Diseño y planeación mecatrónica

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

Diseño y Planeación Mecatrónica

1^a Edición

Ramos Arreguín J.M. Salazar Colores Sebastián Cabal Yepez Eduardo y Vargas Soto J. E.

"Diseño y Planeación Mecatrónica"

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

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

Internet: http://www.mecamex.net

1^ª Edición, 22 de Noviembre, 2022.

ISBN: 978-607-9394-25-7

Derechos reservados.

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

Impreso en México – Printed in Mexico



Capítulo 1 El Reto del Diseño de las Transmisiones por Engranes en la Mecatrónica Candia García Filiberto, Crispín Marciano Daniela A., Méndez Flores Javier y Candia García María de Rayo.	1
Capítulo 2 Metodología y Caso de Estudio de Diseño de Elementos de Unión para Herramentales de Brazos Robóticos. Sánchez Morales Eduardo Saúl, Vera Espitia Carlos Alberto y Rojas Ramírez David.	14
Capítulo 3 Ictal-net: Un Diseño de CNN para la Clasificación de Escalogramas de Electroencefalogramas con Crisis Convulsivas Hernández Nava Gerardo, Salazar Colores Sebastián, Ortiz Echeverri César Javier, Leyva-López Sheila y Ramos Arreguín Juan Manuel.	27
Capítulo 4 <i>Navegación Autónoma de un Robot Móvil Mediante</i> <i>Control Predictivo Basado en Modelo</i> García Pintos Carlos Alfonso, Moreno Vázquez Diana Emilia,	39

Ramírez Maldonado Christian y Aldana Murillo Noé Guadalupe.

Capítulo 5

La interfaz TWI de los Microcontroladores AVR: Ventajas, Modos de Operación y Casos de Estudio Santiago Espinosa Felipe y Ramírez Leyva Fermín Hugo. 51



Capítulo 6 <i>Sistema de Control PID Sintonizado por Ziegler-</i> <i>Nichols y Cohen-Coon</i> Ponce Reynoso Rodolfo, Martínez Rebolledo Miguel Ángel, Cano Morales Jesús, Salgado Tejada Oswalt Esteban y Penca Bolteada Humberto.	72
Capítulo 7 <i>Estación Robótica como Equipo Didáctico para la</i> <i>Enseñanza de la Mecatrónica</i> Aguirre Cerrillo Fabio Abel, Torres del Carmen Felipe de Jesús, Luna Castro Arturo y Pablo Aguirre Jonathan Alexis.	91
Capítulo 8 Desarrollo de un Robot Portero Utilizando la Tarjeta NVIDIA Jetson Nano Zárate Romero María del Carmen, Ramírez Leyva Fermín Hugo y Petrilli Barceló Alberto Elías.	107
Capítulo 9 <i>Construcción y Validación Experimental</i> <i>de un Dispositivo Háptico con Mecanismo</i> <i>Paralelogramo: Preliminar</i> Armas Patricio María de Jesús, Chávez Conde Esteban y Arias Aguilar José Aníbal.	127
Capítulo 10	147

Capítulo 10

Estimación de Parámetros para un Modelo Dinámico de un Servomotor RC

Zamora Martínez Manuel, Rodriguez Liñan Angel, Quiroz Compean Griselda y Torres Treviño Luis M.



Capítulo 11 Control Basado en Reglas Difusas Simulando un Dispositivo de Respiración Auxiliar tipo Ambú Chandomi Velasco Edgardo.	161
Capítulo 12 Diseño y Simulación de un Exoesqueleto de Seis Grados de Libertad para Extremidades Inferiores De La Rosa Hernández Gerardo Adrián, Avitia Becerra José Luis, Rodríguez Hernández Ernesto Daniel, Rodríguez Liñan Juan Angel y Quiroz Compean Griselda.	177
Capítulo 13 <i>Diseño y Construcción de un Minisubmarino</i> <i>Explorador Equipado con un Sistema de Lastre</i> Barrales Romero Missael Eduardo, Flores Mena José Eladio y Michua Camarillo Antonio.	194
Capítulo 14 <i>Efectos de Falla en el Control de Seguimiento</i> <i>del Turtlebot 3</i> Castro Daniel Arturo Rafael, Alcorta García Efraín y Martínez Torres César.	206
Capítulo 15 Monitoreo en Tiempo Real con Almacenamiento en la Nube de Cultivos in Vitro Ramiro Ramiro José, Ortega Luna Miguel Ángel y Esteban Ortega Margarita del Rocío	217



Capítulo 16

Sistema de Monitoreo de Parámetros Físicos en Apiarios de la Región Huasteca Hidalguense Meneses Flores Arturo Elfego, Salazar Casanova Hermes, Mendoza San Juan Luis Alberto y García Morales Ricardo.

Capítulo 17

Sistema de Adquisición de Datos con Arduino y ADS8688 para Obtención de Curvas de Fluorescencia de Clorofila en las Hojas de Plantas López Gutú Melissa Guadalupe y Landaverde Ramirez Adolfo

Capítulo 18

La Importancia del Reacondicionamiento (retrofitting) para la Transición Tecnológica de la Manufactura 3.0 a la Industria 4.0 Jiménez López Eusebio, López Martínez Aldo Augusto, Rivera Nieblas Jorge Osvaldo, Urbalejo Contreras Arturo, Montoya Quezada Manuel Norberto y García Velásquez Luis Andrés.

Capítulo 19

Aprendizaje Automático para la Detección del Daño Pulmonar a través de Parámetros Clínicos Leyva López Sheila, Salazar Colores Sebastián, Hernández Nava Gerardo y Pedraza Ortega Jesús-Carlos.

Capítulo 20

Desarrollo de Control Tolerante a Falla Total de Rotor para Cuadricópteros Martínez Hernández Isaí Mahonri, Estrada Antonio y Fletes Barajas José Ramón. 238

230

251

262

272



Capítulo 21

Validación del Diseño un Transformador de Corriente por medio de Simulación Numérica en la Industria 4.0 Ibáñez Olvera Mario, Jaramillo Sierra Bethsabet, Blanco Flores Alien, Balderas Gutiérrez Juan Nabor y Bobadilla López Ángel.

Capítulo 22

Diseño de Banco de Pruebas de Sistema Pelota y Plataforma por medio de Visión Artificial Ortega Cisneros Benjamín Eliel, Ramírez Villa Goretti,

Traslosheros Michel Alberto y Torres Rivera Moisés.

Capítulo 23

Análisis de Modelos de Segmentación de Atrofia Peripapilar Alfa y Beta en Imágenes de Fondo de Ojo Anguiano Almejo Javier¹, Hernández Nava Gerardo¹ y Alfonso-Francia Gendry¹.

Capítulo 24

Implementación de un Controlador PID para un Sistema "ball and beam" Linealizado Utilizando Matlab y Computer Vision Toolbox de Simulink León Bonilla Ambrosio Edén, Cerezo Sánchez Jorge, Sánchez Ramírez Edwards Ernesto, Morales Pérez Carlos y Salazar Berra Erika.

Capítulo 25

Sistema para la Captura y Cálculo de Cargas Eléctricas Mensuales, Nivel Residencial José Miguel Rodríguez González¹, Juan Morán Hernández², Liliana Vargas Oseguera¹, Arath Terán Soria¹ y Fernando Mercado Álvarez¹. 286

296

313

325

332



El Reto del Diseño de las Transmisiones por Engranes en la Mecatrónica

Candia García Filiberto^{1⊠}, Crispín Marciano Daniela A.¹, Méndez Flores Javier¹, y Candia García María de Rayo²

¹Benemérita Universidad Autónoma de Puebla ²Universidad Alvart [∞]<u>filiberto.candia@correo.buap.mx</u>

Resumen

Los proyectos de dispositivos, productos o sistemas mecatrónicos implican el uso de transmisiones de movimiento tanto para reducir como para incrementar la velocidad de operación de estos. Por ello el objetivo en este trabajo es verificar el uso de una metodología académica para el diseño de transmisiones por engranes rectos. Que bajo los principios de la eficiencia mecánica se valida el diseño de un tren de engranes a través de la verificación por la simulación dinámica del torque y la velocidad de entrada y salida empleando la tecnología CAD/CAM/CAE. Para ello se dibuja la transmisión por tecnología (CAD) y se realiza una simulación dinámica de movimiento (Motion Simulation). En los resultados se identifica la relación que existe entre la eficiencia de entrada y la de salida. Por lo tanto, se concluye que la metodología académica es válida para el diseño eficiente de transmisiones por engranes rectos.

Palabras clave: Engranes rectos, CAD/CAM/CAE, Simulación Dinámica, Momento de Inercia.

1. Introducción

La continuidad de este trabajo tiene su precedente en el proyecto Análisis de trenes de engranajes rectos aplicando tecnología CAD/CAM/CAE [1], donde este trabajo proporciona la metodología académica de diseño de trenes de engranajes CAD/CAM/CAE, que será verificada, para validar su eficacia y repetitividad, ante un diferente contexto de valores de las variables involucradas, velocidad y torque.

La justificación se centra en proporcionar los medios tecnológicos suficientes para transferir tecnología hacia los pequeños productores agrícolas y ganaderos, que les permita operar y dar solución a la problemática permanente de la dependencia de los combustibles fósiles. Dando apertura a una nueva dimensión tecnológica que retoma las técnicas tradicionales de trabajo, que aprovechan la energía eólica a través de transmisiones mecánicas de engranes retos de alta eficiencia, para maquinaria agrícola, como: desgranadoras, picadoras, revolvedoras, cribadoras, entre otras.

Considerando que el objetivo en este trabajo es verificar el uso de una metodología académica para el diseño de transmisiones por engranes rectos (figura 1). Se requiere establecer como marco teórico los principios de la eficiencia mecánica [2], [3] y [4] que validará el diseño de un tren de engranes a través de la comprobación por la simulación dinámica del torque y la velocidad de entrada y salida empleando la tecnología CAD/CAM/CAE.

La prioridad, seguimiento y continuidad de este trabajo implica incrementar la factibilidad para utilizar la energía eólica como medio motriz de los desarrollos mecánicos o mecatrónicos dentro de las actividades productivas del sector primario. Los resultados expresan la relación lineal en función del tiempo entre el torque y la velocidad angular, variables que permiten determinar la potencia en cada Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 1, pp. 1 - 13. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022



una de las etapas de la transmisión. Asimismo, porque las correcciones en las transmisiones por engranajes (engranajes estandarizados y no estandarizados) han ido adquiriendo cada vez más importancia [5].

Los resultados establecen de manera precisa la capacidad de la simulación dinámica mediante software comercial como una herramienta eficaz y versátil para la comprensión de elementos de transmisión utilizando la didáctica experimental por simulación virtual [6]. La conclusión se explica que aun con el rápido y amplio avance de la tecnología CAD/CAM/CAE, que es una valiosa herramienta para el diseño, no es posible omitir el análisis matemático y por consiguiente es requerido que se estimen los porcentajes de variación de la eficiencia en las transmisiones de movimiento por engranes rectos.

2. Método

La documentación y recogida de datos se sustenta en el método del estudio de caso [7], buscando la generalización del procedimiento de diseño de transmisiones mecánicas por engranes rectos a través del método inductivo. Para ello se recurre al procedimiento de [1], donde se expone la sistematización de experiencias de diseño dirigidas a la simulación dinámica (motion simulation) con apoyo de software comercial [8]. Proceso que simplifica y verifica las dimensiones y la eficiencia de entrada y salida de las transmisiones a través de la implicación de características como el torque-momento de inercia y velocidad angular- velocidad lineal del viento. El extenso del procedimiento se puede apreciar en la figura 2a y el diagrama de bloques de la figura 2b muestra el proceso simplificado.

Anterior al procedimiento y como insumo de este, se requiere la referencia de los productos comerciales en el mercado [9], [10] con respecto a la selección de los engranes rectos [9], para transmisiones mecánicas de movimiento. Las tablas 1, 2 y 3 muestran las características de los engranes a utilizar en la verificación de la eficiencia de la transmisión mecánica, cuyos datos son los valores de referencia del CAD parametrizado, que se dibuja mediante la tecnología CAD.

of eeth	Pitch		H	ub	Style	or Sets	keyway screw	With Key and Setsc	way rew†		160	- the
16	Dic.	Bore	Dia.	Proj.	Page 323	Catalog Number	Item Code	Catalog Number	Item Code			N VE
DIAMI	ETRAL PI	псн				Face = Outsic Overa	= .750" le Dia. = Il Length	Pitch Dia. + . = .750" + Hu	125" b Proj.	- ICOPP	2.2	10 au
				1	STEEL						2 79-2	
12 14	.750	.375	.56	.50		YB12 YB14	09916 09918	YB12-3/8† YB14-3/8†	46141 46142			6
15	.938	.375	.75	.50		YB15	09920	YB15-3/8 [†] YB15-1/2	45991 46143		OF	-
16 18	1.000 1.125	.500	.81 .94	.50		YB16 YB18	09922 09924	YB16-1/2 YB18-1/2	46144 46145			
20	1.250	,625	1.05	.50		YB20	09926	YB20-5/8	46146			
24	1.500	.625 .750	1.20	.50		YB24	09928	YB24-5/8 YB24-3/4	46147 46148		12	0.02
28	1.750	.625	1.45	.50		YB28	09930	YB28-5/8 YB28-3/4	46149 46150	FACE	* + P	ROJ.
30	1.875	.625 .750 .875	1.58	.50	A	YB30	09932	YB30-5/8 YB30-3/4 YB30-7/8	46151 46152 46153	Ť	1	ı — +
32	2.000	.625 .750 .875 1.000	1.70	.50		YB32 - -	09934 - - -	YB32-5/8 YB32-3/4 YB32-7/8 YB32-1	46154 46155 46156 46157			RE DIA
36	2.250	1	1.95	.50		YB36	09936	(R)	1574			
40	2.500	626	2.20			YB40	09938		-			VERALL
56	3.500	.020	2.50	.62		YB56A	10574	1. .)			2.5	
60	3.750		2.75			YB60A	10576		-			
64 72	4.000	.750	2.88	.75		YB64A YB72A	10578	12	Ξ.	STAL	VDARD TOL	ERANCES
00	5.000	E -	0.00	CA	STIR	N	10002			DIME	NSION	TOLERAN
96	6.000	10	1 75			VRos	10584			BORE	All	+.0005

16 and 12 Diametral Pitch (Steel & Cast Iron)

20° Pressure Angle (will not operate with 14-1/2° spurs)

Figura 1. Datos de los engranes rectos utilizados, por recomendación del fabricante. Tomada de [10].

Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 1, pp. 1 - 13. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022





Figura 2a. Metodología de diseño de trenes de engranajes CAD/CAM propuesta. Adaptada de [1].





Figura 2b. Diagrama de bloques de la metodología de diseño de trenes de engranajes CAD/CAM. Desarrollo propio.

Tabla 1. Datos del fabricante del engrane de entrada.

ENGRANE ENTRADA				
No. Dientes	60	pza		
Paso diametral	1.59	mm		
Diametro de paso	95.25	mm		
Ángulo de presión	20.00	grados		
Borde de centro	15.88	mm		
Diametro del centro	50.80	mm		
Proyección del centro	15.75	mm		
Cara	19.05	mm		
Diametro exterior	98.43	mm		
Longitud total	34.798	mm		

Tabla 2. Datos del fabricante del engrane intermedio.

ENGRANE INTERMEDIO			
No. Dientes	32	pza	
Paso diametral	1.59	mm	
Diametro de paso	50.80	mm	
Ángulo de presión	20.00	grados	
Borde de centro	15.88	mm	
Diametro del centro	43.18	mm	
Proyección del centro	12.70	mm	
Cara	19.05	mm	
Diametro exterior	53.98	mm	
Longitud total	31.75	mm	

Tabla 3. Datos del fabricante del engrane de salida.

ENGRANE SALIDA				
No. Dientes	14	pza		
Paso diametral	1.59	mm		
Diametro de paso	22.23	mm		
Ángulo de presión	20.00	grados		
Borde de centro	9.53	mm		
Diametro del centro	17.53	mm		
Proyección del centro	12.70	mm		
Cara	19.05	mm		
Diametro exterior	25.40	mm		
Longitud total	31.75	mm		

2.1 Marco de referencia

Los valores de referencia corresponden a un motor de 2 caballos de potencia (HP) con 3600 revoluciones por minuto (rpm) a la salida y un torque de salida de Newtons por metro (N*m). Estos valores por sí mismos representan como problemática la falta de homologación de los productos existentes en el mercado, ya que, si bien la potencia de 2 HP es un valor de muy recurrente mención, en la práctica hallar un producto comercial con especificaciones precisas es complejo. Como se aprecia en la tabla 4. Esta tabla esquematiza con precisión el comportamiento de las variables velocidad y torque, para determinar la potencia en kW [12] mediante la ecuación 1.

Siendo:

$$P = T * \omega \tag{1}$$

- P la potencia en kilowatts (kW)
- T el torque en Newton sobre metro (N/m)
- *ω* la velocidad angular en radianes sobre segundo (rad/s)

La verificación de los valores de potencia de entrada y potencia de salida [12] se llevó a cabo de manera analítica al utilizar las ecuaciones de la energía cinética total (ec. 2) almacenada por un volante por el efecto del momento de inercia (ec. 3) tabla 2 y tabla 3.

$$E_k = \frac{1}{2}I\omega^2 \tag{2}$$

$$I = \frac{1}{2}mr^2 \tag{3}$$

Donde:

- E_k es la energía cinética total (J)
- *I* es el momento de inercia (kg*m²)
- ω es la velocidad angular (rad/s)
- r es el radio al cuadrado (m)

En cuanto al radio se prestó atención especial a los valores de los diámetros de los engranes de acuerdo con la recomendación del fabricante [10]. Por ello la variación principal se realizó en la variable masa, buscando la máxima eficiencia entre la entrada y la salida.



3. Desarrollo

El motor seleccionado para la verificación del procedimiento es de la marca WIN..., debido a que la velocidad de salida es un valor deseado para operar maquinaria agrícola, como: molinos, picadoras, desgranadoras, entre otras. Puesto que velocidades superiores (7000 rpm) como en la marca de motores HON.., son utilizados para trabajos con maquinaria de jardinería.

Marca			WIN	
TIPO DE MOTOR	Cilindro individual – 4 tiempos Motor gasolina OHC	Cilindro individual – 4 tiempos Motor gasolina OHV, eje horizontal	Cilindro individual – 4 tiempos Motor gasolina OHV, eje vertical	Cilindro individual – 4 tiempos Motor gasolina
CILINDRADA	47.9 cm ³	49 cm ³	57 cm ³	97.7 cm ³
RELACIÓN DE Compresión	8.0:1	8.0:1	8.0:1	5.6 : 1
POTENCIA NETA	1.47 kW (2.0 HP) / 7000 rpm	1.6 kW (2.1 HP) / 7000 rpm	1.5 kW (2.0 HP) / 4800 rpm	1.43 kW (1.92 HP) / 3600 rpm
PAR MÁXIMO NETO	2.2 N/m (0.22 kgf/m) / 5000 rpm	2.7 N/m (0.28 kgf/m) / 4500 rpm	3.2 N/m (0.33 kgf/m) / 4000 rpm	3.8 N/m (0.3875 kgf/m) / 3000 rpm

Tabla 4. Características de motores comercializados con valores de potencia de 2 H.P.

En cuanto a los productos que ofrecen los fabricantes se identificó que los valores teóricos seleccionados (1.5 kW / 2 HP / 3000 rpm) se alejan de los valores comerciales. Por ello también la eficiencia de los dispositivos mecatrónicos es variable y pudieran resultar en diseños de baja eficiencia, siendo deseable conocer con exactitud la eficiencia de las transmisiones por engranes y mejorar la relación entre el diseño y la fabricación. Para este caso de estudio los valores con los cuales se realiza la secuencia del procedimiento son: 1.2 kW / 1.6 HP / 3000 rpm.

Al contar con las características geométricas de los engranes que configuran la transmisión mecánica requisitada se dibuja el CAD parametrizado (figura 3). Asimismo, la verificación mediante el método analítico (tablas 5, 6 y 7) aporta las dimensiones requeridas de la masa (figuras 3, 4 y 5), que tiene una variación del 1% con respecto a las dimensiones virtuales del engrane. Para este trabajo los valores de potencia de salida se representarán con una precisión de $\pm 1.2\%$. La variación se debe a que el diseño CAD se dibujó con valores comerciales de fracciones de pulgada, para favorecer la sistematización de operaciones de fabricación de la producción en serie.



Figura 3. Diseño CAD engrane de entrada con su valor de masa. Desarrollo propio.



Las tablas 5, 6 y 7, contienen el desarrollo analítico para determinar el torque y la potencia mecánica de salida a partir de la velocidad en revoluciones por minuto (rpm), la masa y el radio del volante de inercia en diseño.

MÉTODO	MÉTODO ANALÍTICO			
ENERGÍA CINÉTICA ALMACENADA EN UN VOLANTE DE INERCIA				
ENGRANE DE ENTRADA				
DATOS				
MOMENTO DE INERCIA	207.360	kg*mm^2		
MOMENTO DE INERCIA	0.000207	kg*m^2		
MASA	0.180	kg		
RADIO	0.05	m		
ACELERACION TANGENCIAL	3.56	rad/s^2		
ACELERACIÓN ANGULAR	4251.35	°/s^2		
ACELERACIÓN ANGULAR	74.20	rad/s^2		
VELOCIDAD ANGULAR	4452.00	°/s		
REVOLUCIONES POR MINUTO	742.00	rpm		
ENERGÍA CINÉTICA TOTAL	0.63	J		
MOMENTO DE INERCIA	0.000207	kg*m^2		
VELOCIDAD ANGULAR	77.70	rad/s		
	0.0154	N*m		
TORQUE	15.39	N*mm		
	0.00	Kg*m		
Detensis masénisa	1.19553	Watts		
Potencia mecanica	1.60	HP		
Tiempe	1	min		
Tiempo	60	S		

Tabla 5. Potencia de entrada.

Tabla 6. Potencia en transición.

MÉTODO ANALÍTICO				
ENERGÍA CINÉTICA ALMACENADA EN UN VOLANTE DE INERCIA				
ENGRANE INTERMEDIO				
DATOS				
MOMENTO DE INERCIA	60.872	kg*mm^2		
MOMENTO DE INERCIA	0.0000609	kg*m^2		
MASA	0.1670	kg		
RADIO	0.027	m		
ACELERACION TANGENCIAL	3.70	rad/s^2		
ACELERACIÓN ANGULAR	7842.65	°/s^2		
ACELERACIÓN ANGULAR	136.88	rad/s^2		
VELOCIDAD ANGULAR	8212.80	°/s		
REVOLUCIONES POR MINUTO	1368.80	rpm		
ENERGÍA CINÉTICA TOTAL	0.63	J		
MOMENTO DE INERCIA	0.0000609	kg*m^2		
VELOCIDAD ANGULAR	143.34	rad/s		
	0.0083321	N*m		
TORQUE	8.3321	N*mm		
	0.0008493	Kg*m		
Dotoncia mocánica	1.19433	Watts		
Potentia Metanita	1.60	HP		
Tiompo	1	min		
петро	60	S		

Tabla 7. Potencia de salida.

MÉTODO ANALÍTICO			
ENERGÍA CINÉTICA ALMACENADA EN UN VOLANTE DE INERCIA			
ENGRANE DE SALIDA			
DATOS			
MOMENTO DE INERCIA	12.675	kg*mm^2	
MOMENTO DE INERCIA	0.0000127	kg*m^2	
MASA	0.1500	kg	
RADIO	0.0130	m	
ACELERACION TANGENCIAL	3.90	rad/s^2	
ACELERACIÓN ANGULAR	17188.73	°/s^2	
ACELERACIÓN ANGULAR	300.00	rad/s^2	
VELOCIDAD ANGULAR	18000.00	°/s	
REVOLUCIONES POR MINUTO	3000.00	rpm	
ENERGÍA CINÉTICA TOTAL	0.63	J	
MOMENTO DE INERCIA	0.0000127	kg*m^2	
VELOCIDAD ANGULAR	314.16	rad/s	
	0.0038025	N*m	
TORQUE	3.8025	N*mm	
	0.0003876	Kg*m	
Dotoncia macánica	1.19459	Watts	
	1.60	HP	
Tiompo	1	min	
петро	60	s	



Asimismo, los valores de masa de la simulación tanto del engrane intermedio (figura 4) y engrane de salida (figura 5) se representan con: $\pm 0.8\%$ y $\pm 0.7\%$ respectivamente.







Figura 5. Diseño CAD engrane de salida con su valor de masa. Desarrollo propio.

La figura 6, muestra la configuración del tren de engranajes lineal que tiene las siguientes características de relación de velocidad, que se determinaron por la ecuación 4.

$$i = \frac{z_2}{z_1} \frac{z_4}{z_3} \frac{z_6}{z_5} \frac{z_8}{z_7} \frac{z_n}{z_{n-1}}$$
(4)

En las tablas 8, 9 y 10, se encuentra la descripción de comportamiento de la relación de transmisión calculada a través de la ecuación 4. Estos valores de referencia serán verificados en la simulación dinámica de la transmisión de engranes rectos (figura 6).



Tabla 8. Número de dientes de los engranes. Desarrollo propio.

Número de Dientes		
Z1=	60	
Z2=	32	
Z3=	14	

Tabla 9. Valores de la relación de transmisión. Desarrollo propio.

Relación de transmisión		
n1=	0.53	
n2=	0.44	

Tabla 10. Variación de la velocidad por relación de transmisión. Desarrollo propio.

Variación de velocidad en RPM		
n1=	742 rpm	
n2=	1391.25	rpm
n3=	3180	rpm



Figura 6. Ensamble CAD de la transmisión mecánica. Desarrollo propio.

4. Resultados

El comportamiento de las variables velocidad y torque obtenidos mediante la simulación dinámica se muestran en forma gráficas que representan la evaluación de los valores en función del tiempo y por medio de la relación analítica (ec. 1) se determina la potencia.

4.1 Graficas Velocidad

En las figuras 6, 7 y 8 se aprecia que el comportamiento de la variable velocidad que es lineal, con respecto al tiempo.





Figura 6. Velocidad angular del engrane de entrada en °/s. Desarrollo propio.



Figura 7. Velocidad angular del engrane intermedio en °/s. Desarrollo propio.



Figura 8. Velocidad angular del engrane de salida en °/s. Desarrollo propio.

4.2 Gráficas Torque

En las figuras 9, 10 y 11 se aprecia que el comportamiento de la variable torque que no es lineal, con respecto a tiempo.





Figura 9. Torque del engrane de entrada en °/s. Desarrollo propio.



Figura 10. Torque del engrane intermedio en °/s. Desarrollo propio.



Figura 11. Torque del engrane de salida en °/s. Desarrollo propio.



Las tablas 11, 12 y 13, contienen el concentrado de los resutlados con las respectivas conversiones de unidades para determinar la variación de la potencia, tanto en la salida como en la entrada, de manera que la eficiencia pueda ser calculada y expresar la variación en porcentaje.

Tabla de conversión de unidades de velocidad				
708.5	rpm	Entrada	4251.35	°/S
1307.2	rpm	Salida	7843.42	°/S
2887.5	rpm	Salida	17325.96	°/S
Entrada 74.20		74.20	rad/s	
Salida 136.89 rad/s		rad/s		
Salida 302.39 rad/s				

Tabla 11. Valores de la velocidad angular. Desarrollo propio.

 Tabla 12. Valores de torque. Desarrollo propio.

Tabla de conversión de unidades de torque				
0.0157	Nm Entrada 15.74 Nmm			
0.0032	Nm	Salida	3.17	Nmm
0.0034 Nm Salida 3.4 Nmm				

Tabla 13. Valores de potencia. Desarrollo propio.

Tabla de conversión de unidades de potencia				
1.2	Kw	Entrada	1.6	H.P.
0.4	Kw	Salida	0.6	H.P.
1.0 Kw Salida 1.4 H.P.				

La tabla 14, presenta la variación de la eficiencia que fue determinada de manera analítica y por simulación, con respecto a los valores nominales. Es de resaltar que en el método analítico existe un 3% de disminución de la eficiencia con respecto al valor nominal de entrada. Asimismo, que, debido a la variación de la masa en el análisis por simulación dinámica, los valores de entrada y salida son significativos. Este fenómeno justifica la realización de este trabajo y permite mejorar los proyectos que involucran el diseño de dispositivos, productos o sistemas mecatrónicos

 Tabla 14. Comparativa de la eficiencia analitica contra la eficiencia por simulación. Desarrollo propio.

	Valores	Valores	Variación de	Valores	Variación de
	nominales	analíticos	la Eficiencia	simulación	la Eficiencia
	(nr)	(nr)	(70)	(nr)	(70)
Potencia	1.6	1 6026	0%	1 566	-7%
Entrada	1.0	1.0020	0/0	1.500	-270
Potencia Salida	1.6	1.655	3%	1.378	-14%



Si bien la diferencia en la potencia de entrada entre la simulación y el desarrollo analítico desde la perspectiva de la energía cinética total pudiera ser considerado de baja significancia debido a la baja variación del porcentaje comparativo. En las tablas de las tablas 15 y 16, se coincide con [13] que expone que los métodos tradicionales de cálculo basados en criterios simplificados no dan resultados adecuados en el análisis de situaciones complicadas, de manera que deben de ser aceptadas suposiciones y simplificaciones para que las soluciones pueden ser obtenidas mediante el cálculo manual. Por ello las tablas 15 y 16 muestran la comparativa del análisis de las variables torque y velocidad desde la perspectiva de la relación de transmisión entre engranes.

Tabla 15. Valores de la velocidad, del torque y de la potencia obtenidas por la relación de transmisión y los valores de la simulación dinámica. Desarrollo propio.

Relación Analítica Velocidad (rpm)			
n1=	n1= 742 rpm		
n2=	1391.25	rpm	
n3= 3180 rpm			

Relación Analítica Torque (Nmm)			
T1=	19.2	Nmm	
T2=	10.2	Nmm	
T3= 4.5 Nmm			

Relación Analítica Potencia (HP)			
n1=	2	HP	
n2=	2	HP	
n3=	2	HP	

Relación Velocidad Simulación (rpm)			
n1=	742.0	rpm	
n2=	1368.8	rpm	
n3=	3023.9	rpm	

Relación Torque Simulación (Nmm)			
T1=	15.7	Nmm	
T2=	3.2	Nmm	
T3=	3.4	Nmm	

Relación Potencia Simuación (HP)			
ω1=	1.6	HP	
ω2=	0.6	HP	
ω3=	1.4	HP	

Tabla 16. Porcentajes de variación de la velocidad, del torque y de la potencia obtenidas por larelación de transmisión y los valores de la simulación dinámica. Desarrollo propio.

% de Aproximación Velocidad Analítica	% de Aproximación Torque Analítica vs	% de Aproximación Potencia Analítica vs
vs Velocidad de Simulación	Torque de Simulación	Potencia de Simulación
0%	-18%	-22%
2%	-69%	-71%
5%	-24%	-31%

5. Conclusiones

El desarrollo de este trabajo ha cumplido con objetivo propuesto de este proyecto, al verificar la repetitividad y sistematización del uso de una metodología académica para el diseño de transmisiones por engranes rectos. Que bajo los principios de la eficiencia mecánica se valida el diseño de un tren de engranes de 2 HP de potencia, a través de la comprobación por la simulación dinámica del torque y la velocidad de entrada y salida empleando la tecnología CAD/CAM/CAE.

Si bien la tecnología CAD/CAM/CAE, es una valiosa herramienta para el diseño, no es posible omitir el análisis matemático y la perspectiva desde la teoría de la energía cinética, para verificar que la potencia de salida de una transmisión mecánica sea eficiente y complete el diseño óptimo de un dispositivo mecatrónico. Asimismo, la simulación dinámica mediante software comercial como una herramienta eficaz y versátil para la comprensión del comportamiento de los trenes de engranes utilizando la didáctica experimental por simulación virtual. Sin omitir la estimación de los porcentajes de variación de la eficiencia en las transmisiones de movimiento por engranes rectos.



En cuanto a la a la formación profesional de los estudiantes que estudian áreas de interés en el diseño mecánico, este desarrollo proporciona una referencia de consulta, que les permite participar en los procesos de transferencia tecnológica en todas las áreas donde la mecatrónica se encuentra involucrada, sobre todo cuando se requiere transmitir potencia en diferentes velocidades y condiciones de carga. Diseñando dispositivos complejos con mayor simplicidad, respetando las dimensiones de diseño estructural a favor de la rentabilidad de la inversión económica, que busca productos más eficientes y eficaces.

6. Trabajos futuros

La validación del procedimiento para diseñar transmisiones mecánicas permite una continuidad de la experimentación por simulación virtual, que se complementa mediante el prototipado rápido funcional por impresión 3D y el análisis por el método de elementos finitos (FEM), para liberar a escala prototipos experimentales antes de la etapa de su fabricación.

Referencias

- [1] G. F. Candia, d. I. C. I. Vivaldo, L. R. C. Ambrosio, M. J. Flores y M. D. A. Crispín, «Análisis de Trenes de Engranajes Rectos Aplicando Tecnología CAD/CAM/CAE,» de *Proyectando Innovaciones en Ingeniería*, MECAMEX, 2021, pp. 1-17.
- [2] F. P. Beer, E. R. Johnston, J. T. Dewolf y D. F. Mazurek, Mecánica de materiales, Quinta ed., Mexico D.F.: Mc Graw Hill, 2010.
- [3] J. Gere y B. Goodno, Mecánica de Materiales, México D.F.: CENGAGE, 2009.
- [4] R. C. Hibbeler, Mecánica de Materiales, México: PEARSON, 2011.
- [5] F. A. M. Becerra, R. J. L. Moya, O. R. Martínez y J. S. Gómez, «Perfeccionamiento del diseño de transmisiones por engranajes cilíndricos de dientes rectos interiores,» *Revista Científica*, vol. 15, nº 1, pp. 105-113, 2012.
- [6] G. C. I. E. Rodríguez, M. F. A. Villa y G. G. Brianza, «Diseño y desarrollo de banco de transmisión con engranes rectos modulares M3 para prácticas de laboratorio,» Universo de la Tecnología, vol. 1, nº 3, pp. 12-15, 2019.
- [7] B. A. C. Álvarez y T. V. Álvarez, «Cómo organizar un estudio de caso,» *Revista Electrónica educ@upn,* vol. 1, nº 23, pp. --, 2018.
- [8] P. Binde y R. Anderl, Simulations with NX, HANSER, 2014.
- [9] Martin, Gear Manual, Arlington Tx.: MartinSprocket & Gear, Inc., 2013.
- [10] Boston Gear, Rotary Drive Products, Charlotte, NC.: Boston Gear, 2020.
- [11] P. Childs, Mechanical Design, Great Britain: Elsevier, 2004.
- [12] R. Budynas y N. J. Keith, Diseño en ingeniería mecánica, Mc Graw Hill, 2012.
- [13] B. Y. M. Ramos, T. M. L. Fernández, C. J. A. Bosch, R. S. A. Santana y H. R. M. Arias, «Estudio comparativo mediante diferentes métodos para el cálculo de tensiones de contacto en engranajes rectos,» *Tecnología en Marcha*, vol. 35, nº 3, pp. 3-15, 2022.
- [14] H. R. Sancibrián y d. L. A. de Juan, «Cinemática y Dinámica de Máquinas,» 2010. [En línea]. Available: https://ocw.unican.es/course/view.php?id=202§ion=1. [Último acceso: 14 09 2021].



Metodología y Caso de Estudio de Diseño de Elementos de Unión para Herramentales de Brazos Robóticos

Sánchez Morales Eduardo Saúl¹, Vera Espitia Carlos Alberto² y Rojas Ramírez David³

⁽¹⁾ Posgrado CIATEQ, A.C, [⊠] smes_88@hotmail.com
 ⁽²⁾ Posgrado CIATEQ, A.C, [⊠] carlos.vera@safran.com
 ⁽³⁾ BrightMachines S. de R. L. de C.V., [⊠] david.rojas@brightmachines.com

Resumen

El siguiente artículo muestra un caso de estudio, al cual se le aplica una metodología de diseño para generar un acoplamiento entre un brazo robot y su dispositivo EOAT, con el cual se protegerán los componentes de posibles colisiones, y se buscará maximizar los grados de libertad de giro del robot, en conjunto con el acoplamiento y el EOAT. Durante el desarrollo del artículo, se mostrará la metodología utilizada para el diseño de un elemento de unión deformable (cople), y se aplicará plenamente, hasta el punto de simulación del modelo 3D por medio de un estudio de elementos finitos (FEM), a través de un programa de diseño, su validación funcional y su aplicación final sobre un robot FANUC (Lr-Mate 200iD 7L), el cual cuenta con una aplicación de recolección y colocación de partes.

Palabras clave: Brazo robot, EOAT, Metodología, Acoplamiento, Cople deformable, Validación FEM, robot SCARA.

1. Definiciones.

En este apartado revisaremos conceptos generales que se estarán utilizando a lo largo de este artículo, y los cuales, nos ayudarán a comprender de una manera más optima el contenido del mismo.

EOAT. End of Arm Tooling (EOAT, por sus siglas en inglés) es un elemento que se coloca al extremo del último eslabón del robot, el cual suministra a este, la capacidad de agarre del objeto que se quiere manipular, o en su defecto, se colocará la herramienta específica para la cual el robot realizará una tarea determinada (pintura, soldadura, por ejemplo) [1].

CAD. Por sus siglas en ingles Computer Aided Design, se refiere al uso de tecnologías computacionales para el soporte del diseño en etapas de creación, modificación, análisis e incluso la optimización de este mismo [2]. Existen diversos programas para realizar estas tareas. Para la aplicación y generación de los archivos que se presenten en este documento, se estará utilizando SolidWorks[®] en su versión 2019.

2. Introducción

Con el incremento de los procesos automatizados en la industria, los robots manipuladores han tomado una importante relevancia dentro de la industria en general. Un ejemplo de este avance se ve claramente en la industria automotriz, la cual tiene unas altas tasas en la densidad de uso de robots (por cada 10,000 habitantes) de 5,106 desarrollos y 8,509 en desarrollo, en un periodo comprendido entre 2005 y 2014 [3], lo cual es un claro índice de aumento de la demanda de robots y de aplicaciones autónomas dentro de esta industria.



Estos robots se utilizan para aplicaciones muy específicas como pueden ser pintura, soldadura, recolección y colocación, atornillado, entre otros.

Para realizar estas acciones, son necesarios controladores y herramentales costosos que requieren que se asegure la integridad y funcionalidad de estos durante su proceso operativo. Es así como surge la necesidad de agregar un elemento mecánico que funcione como elemento de unión entre las piezas que componen el EOAT, y el sistema de movimiento (como el último eje con movimiento del robot).

Existen elementos de unión rígidos que conectan el EOAT con el robot, sin embargo, estos elementos pueden llegar a ser demasiado fuertes, lo cual, al momento de una colisión del robot en el EOAT, provoca daños mecánicos al EOAT, e incluso al mismo robot.

En el desarrollo de este artículo, se analizará una posible solución al tema del elemento de unión rígido no deformable, localizado entre el robot y el EOAT, esto mediante un caso de estudio, el cual dependerá directamente de su aplicación final. De la misma manera se analizarán los resultados que se obtienen mediante la simulación estática de un modelo de cople definido, logrando de esta manera, evitar daños con costos monetarios elevados derivados de colisiones del herramental con algún componente fijo del equipo.

3. Desarrollo de la Metodología.

Existen diversas aplicaciones para un robot, por lo que definir un elemento de unión genérico que funcione para todas las aplicaciones existentes se torna complejo, por lo que es necesario evaluar cada aplicación de manera particular, analizando los movimientos del robot, así como la viabilidad del uso de elementos de unión deformables, los cuales se utilizarán para la protección de otros componentes con los que cuente la misma celda o el equipo.

Para ejemplificar el uso de los coples mecánicos entre el EOAT y el robot, tomamos el caso de un robot de seis ejes (ver figura 1). En esta figura, podemos ver la ubicación y dirección de movimiento de los ejes de este robot.



*All axes are $0^\circ\,$ at this posture

Figura 1.Localización de ejes de robot Fanuc [4].

Una integración directa del EOAT con el robot, se muestra en la figura 2, en esta podemos ver un robot con el eje 5 en su máximo ángulo de apertura, y se observa que el eje 6 se encuentra limitado en su rotación sobre si mismo, por lo que, mientras este último eje se mueva más hacia la posición máxima del eje 5, el cuerpo del EOAT limitará el movimiento de rotación del eje 6.

Es importante remarcar que al adicionar el cople entre el robot y con el herramental, nos brinda una flexibilidad de movimiento, permitiendo aprovechar todo el radio de giro de los ejes del robot, y de esta manera prevenir la colisión, y disminuyendo posiciones críticas en el mismo.





Figura 2. Colisión debido a restricción de grados de libertad provocada por el propio cuerpo del EOAT.

En lo subsecuente, se describirán los elementos para realizar el correcto acoplamiento EOATrobot, a partir de la metodología desarrollada e implementada en el caso de estudio.

3.1 Cuerpo de la metodología.

Para comenzar, es necesario realizar una inspección de la aplicación, por lo que se proponen los siguientes pasos a seguir, para lo cual será necesario que se tenga referencia de la aplicación final del robot, y un diseño mecánico parcial del herramental:

- Realizar un análisis de riesgo de colisiones. Este se podrá realizar con ayuda de un programa de simulación de movimientos dedicado del robot, o de forma cualitativa con ayuda de una tabla de decisión o valoración, la cual se contempla como una herramienta adicional al programa de simulación del robot.
- 2) Realizar el diseño del cople que se requiere utilizar. Partiendo de los datos del análisis previo.
- 3) Análisis de cople. Una vez que se tiene el diseño del cople, se realiza un análisis estático del componente, con referencia a las cargas y fuerzas de impacto tentativas teóricas a las que estará sujeto el componente.
- 4) Implementación.

Los puntos mencionados se pueden apreciar en el diagrama de flujo en la figura 3.

3.1.1 Valoración de riesgo de colisiones.

Una de las formas de determinar un riesgo de colisión, es a través del uso de programas especializados para cada una de las marcas de los robots que hay en el mercado, y que se vayan a implementar como solución a una aplicación automatizada definida. Para realizar esto, es necesario que todos los componentes mecánicos, que vayan a interactuar con el herramental del robot se encuentren completamente definidos en forma, tamaño y posición dentro del espacio que vayan a utilizar.

Otra manera en la que se puede realizar este tipo de análisis es de forma empírica, mediante el diseño de herramentales que eviten giros excesivos de los ejes del robot.

Para utilizar la primera opción, es necesario que se cuente con el programa específico para cada marca de robot que se encuentre en el mercado, por ejemplo, el software Roboguide[®] del fabricante de robots FANUC[®].





Figura 3. Diagrama de flujo metodología a seguir.

El segundo caso se puede tomar una evaluación cualitativa a partir de la información que se tenga en diseño, como son el número de piezas a manipular, la cantidad de elementos de sujeción, así como los giros que tendrá que hacer el herramental sobre su eje para alcanzar las posiciones deseadas (ver tabla 1).

Descripción	Cantidad	Ponderación
Elementos por Manipular	0	
Elementos de sujeción	0	
Giros del herramental (por elemento de sujeción)		
0°	0	
1° - 90°	0	
91° - 180°	0	
180° - 91°	0	
90° - 0°	0	
Numero de Giros	0	
Ponderación Total		0

Tabla 1. Tabla para análisis cualitativo de herramentales.

De esta manera tenemos que, entre más elementos de sujeción y de manipulación, así como giros del robot, las probabilidades de una colisión en el equipo son mayores, esto debido al aumento de los movimientos, así como los propios giros que realiza el robot para tomar piezas. Esto sin tomar en cuenta los componentes que se encuentren dentro de la celda, y que se dediquen al optimo funcionamiento del equipo. Los criterios de ponderación de la tabla 1, se indican en la tabla 2.



Elemento	s por Manipular	Element	os de Sujeción	Giros d	el herramental
Cantidad	Ponderación	Cantidad	Ponderación	Cantidad	Ponderación
1 - 2	1	1	1	1 - 2	1
3 - 4	3	2	3	3 - 4	3
4 o mas	5	3 o mas	5	4 o mas	5

Usando la herramienta de la tabla 1, sin necesidad de un software de simulación para el robot, podremos saber que factor de riesgo existe al momento de que el robot este laborando. Se recomienda el uso de los siguientes criterios de valoración para determinar el riesgo de colisiones:

- Puntuación < 10: No se recomienda uso de cople deformable (opcional). Riesgo bajo medio.
- Puntuación > 10: Se recomienda el uso de un cople deformable. Riesgo medio alto.
- Puntuación > 27: Altamente recomendable el uso de cople deformable, revisar capacidades de robot. Riesgo alto elevado.

Recordemos que esta herramienta no es exacta, y definitivamente, no sustituye a los resultados que nos arroje una simulación dentro de un software dedicado.

3.1.2 Diseño de conector deformable y sólido.

Una vez que se ha realizado el análisis, y se determina que la aplicación del robot requiere de un elemento de unión deformable o sólido, se procede a realizar el diseño del mismo. En la siguiente sección se detallan los puntos relevantes a considerar para el diseño de estas partes.

3.1.2.1 Conector Solido.

El diseño de un conector sólido dependerá directamente de los criterios y necesidades a cubrir que el diseñador, de forma individual, tome en cuenta al momento de realizar esta pieza. En la figura 4, se muestra un ejemplo de un diseño de un cople rígido para un EOAT.



Figura 4. Ejemplo de diseño de cople conector rígido para EOAT.

Existen diferentes soluciones en diseño para esta misma aplicación. En el caso de la figura 4, solo es un ejemplo de una solución que se puede utilizar en diferentes casos. Esta pieza puede ser diseñada en diversos programas de diseño CAD. Entre los criterios que un diseñador puede tomar en cuenta para el diseño de esta pieza es el peso que soportará, los diámetros internos para el acoplamiento de esta parte con el robot, así como los puntos de referencia con los que cuenta este último.

El análisis mecánico de esta parte, por medio de un método de elementos finitos será opcional, dado que claramente la rigidez estructural de la parte soporta los posibles cambios o esfuerzos que se le apliquen a esta misma.



3.1.2.2 Conector Deformable.

Para una correcta ejecución del diseño de este cople deformable, es necesario conocer la dirección de los movimientos que realizará el robot, así como buscar y definir el movimiento que realice con mayor esfuerzo. De esta manera nos ayudará a definir en diseño, la forma que tendrá este elemento de unión, y las dimensiones con las que contará este componente. Esta pieza puede ser diseñada en diversos programas de diseño CAD. Entre los criterios que se pueden tomar en cuenta para el diseño de esta pieza es el peso que soportará, los diámetros internos para el acoplamiento de esta parte con el robot, así como los puntos de referencia con los que cuenta este último; los esfuerzos a los que la parte estará sometida y los espesores mínimos de pared serán de gran utilidad para realizar mejoras al diseño, aunque pueden ser modificados después de un análisis estático de la parte.

Un análisis de predicción de falla puede ser considerado, para esto se puede utilizar la teoría de las distancias críticas, el cual es un conjunto de metodologías que tienen diversos aspectos en común, como lo son el uso de la tenacidad del material, y un parámetro de longitud el cual dependerá directamente del material [5]. Uno de estos análisis será dado por medio del parámetro de Neuber, donde nos indica que el parámetro efectivo que será capaz de controlar la resistencia de una parte no es la tensión teórica máxima de entalla [6], si no la tensión promedio que se encuentre a lo largo de una distancia de dirección normal a esta [7].

3.1.3 Análisis del cople.

Este análisis se realizará una vez que se tiene definido el diseño del cople. El objetivo será identificar las áreas de mejora en diseño, utilizando un programa de simulación de esfuerzos, al cual se le indicarán las cargas teóricas a las cuales será sometida la parte.

Se recomienda un análisis estático de elemento finito para la pieza, donde criterios como esfuerzos máximos y mínimos, factor de seguridad y deformación serán evaluados; y a su vez, representados en forma gráfica. Es necesario revisar las teorías de falla que se pueden realizar en conjunto, esto para obtener un refinamiento de los resultados, y las cuales, aplicarán a cada parte en específico, así como esfuerzos a los que la parte está siendo sometida.

Adicionalmente un análisis dinámico de la parte se puede ejecutar, el cual considera que el cople se encontrará en movimiento, ya que este se encuentra unido a una parte móvil (eje 6 de robot), y con aceleraciones en el robot, de la misma manera se considera que el brazo se mueve a velocidad constante dentro de los desplazamientos que estará realizando. Por último, tenemos los cálculos de forma manual, los cuales nos ayudarán en caso de no contar con programas de simulación, sin embargo, este tipo de análisis requerirá una inversión de tiempo considerable, dependiendo de los parámetros que se pretenda utilizar.

3.1.4 Implementación.

Existen diversas formas de realizar una implementación de este componente. Para esto se pueden realizar prototipos para la simulación de las condiciones de trabajo de esta parte, así como su correcto funcionamiento.

El uso de partes realizadas en impresión 3D puede ayudarnos a dar una idea de las condiciones de fatiga, sin embargo, este tipo de partes sufren de una falla al momento de ser estresadas, sin que pasen por una zona de plastificación.

Otra manera de ejecutar una validación de este componente es por medio de pruebas destructivas hacia la parte, por lo que, en este caso, se deberá enviar una parte a manufactura la cual nos servirá como parte de prueba, y en la que se realizará una corrida operativa del robot, de tal manera que esta parte sufra una colisión controlada, y de esta manera, nos permita validar su óptimo funcionamiento. Una vez que los resultados se arrojan, la parte se revisa, y si cumple con los criterios necesarios, una segunda parte se envía a manufactura la cual ya será una parte definitiva.



4. Desarrollo de la Metodología.

Una vez que se ha planteado el método a seguir, el cual se indica en la sección anterior, se aplicará esta metodología al caso de estudio en el cual se busca implementarla, como un método de trabajo.

En esta sección se describirán los pasos a seguir, ahora directamente con los componentes que se utilizarán físicamente para la implementación de un cople de unión entre el EOAT y el robot.

4.1 Descripción de la Metodología.

El componente de unión se desarrolla a partir de una primera interacción, donde se requería una pieza hueca que dejará pasar cables de control y comunicación a través del eje hueco de un robot SCARA (NACHI EZ03) ubicado de tal forma que atraviesa el cuarto eje (ver figura 5) del robot, donde se realiza el acoplamiento (pieza de color verde) de un herramental para la ejecución de la tarea que el robot realizará [8]. Una vez que se ha desarrollado, se detectó que una función adicional de este componente es precisamente el absorber la energía generada por un impacto, al momento de una colisión del EOAT del robot. Esta energía disipada llevará a la zona plástica el cople, sin generar una ruptura física del componente, es de esta manera que se dispersa la energía, y se evita que se dañe al robot o a la herramienta.



Figura 5. Conexión de cople y robot SCARA NACHI EZ03.

Utilizaremos como ejemplo un diseño de EOAT (figura 6) que está acoplando a un robot Fanuc[®] Lr/Mate 200iD, y el cual hace una función de recolección y colocación. Este robot y su EOAT, mueven una barra de acero de medio kilogramo de peso, de un sistema de nidos a una posición de preensamble, y de ahí lo mueve a su posición final.

Es importante considerar que la ubicación de la base del robot está en la parte superior de una celda de manufactura, por lo tanto, la orientación de este sistema es de forma horizontal, con los elementos de sujeción orientados hacia la parte inferior.

4.1 Valoración de riesgo de colisiones.

El EOAT que se va a considerar para la aplicación del caso de estudio, solo realiza un giro de 180° en el eje 6 para colocar la pieza en su posición final. No requiere de cambiar la orientación, así como no realiza una fuerza en vertical para inserción de partes o componentes.





Figura 6. Diseño de EOAT para aplicación de recolección y colocación de barras de acero, en verde, se aprecia el cople propuesto.

Con la descripción general del proceso, se toma la tabla 1, y se realiza la valoración de riesgo de colisiones tomando las cantidades de piezas que interactúan en el proceso, y las sujeciones que el EOAT realizará, y, por último, se realiza la ponderación con ayuda de la tabla 2. Los resultados se muestran en la tabla 3.

Descripción	Valor	Ponderación
Elementos por Manipular	3	3
Elementos de sujeción	2	3
Giros del herramental (por elemento de sujeción)		
0°	1	-
1° - 90°	0	
91° - 180°	0	
180° - 91°	2	
90° - 0°	0	
Numero de Giros	3	3
Ponderación Total		27

Tabla 3. Tabla de análisis de riesgo de colisiones en caso de estudio.

Con el análisis realizado, y tomando en cuenta los criterios de evaluación especificados en la sección 3.2.1, se determina que es necesario el uso de un cople deformable.

4.2 Valoración de riesgo de colisiones.

Con la información obtenida, se procede a realizar un cople mecánico que cubra la longitud mínima para que el eje cinco del robot pueda girar, esto, tomando en cuenta la longitud de la placa de soporte para los componentes, la cual es de 250mm de longitud y tiene un ancho de 76mm, y en adición, considerando los giros como la mayor generación de colisiones se obtiene el diseño que se muestra en la figura 7.

En este componente, se considera que la principal posibilidad de una colisión es de dirección radial al centro del cople, esto en cualquiera de sus ejes. Es por esto por lo que se considera la remoción de material al centro del cople, de tal manera que, este pueda deformarse en esta sección al momento de sufrir esfuerzos de torsión. Los esfuerzos en compresión no se toman en consideración, dado que el robot no ejerce una fuerza vertical de empuje hacia abajo para ejecutar alguna de sus tareas.





Figura 7. Cople mecánico considerado.

4.3 Análisis de diseño de conector deformable.

Ahora que se tiene el diseño del cople mecánico, el diseño final del herramental, y el modelo del robot a utilizar, es posible realizar un análisis de la pieza con ayuda de una aplicación de simulación dentro del mismo programa de diseño CAD. Se utiliza la herramienta de simulación estática dentro del programa de diseño CAD SolidWorks[®].

Para poder ejecutar un estudio correcto de la pieza en cuestión, es necesario revisar que la pieza no cuente con chaflanes o redondeos menores a un tamaño de 1mm, si el diseño cuenta con esta característica, será necesario remover todos los chaflanes y redondeos estéticos con los que cuente el diseño 3D, dado que estas operaciones harán que la simulación sea más lenta, e incluso que no se pueda efectuar, además que no agregan información relevante a los estudios que se realizarán, por lo tanto, solo incluiremos aquellos chaflanes y redondeos que sean funcionales dentro de la parte.

Es necesario configurar las cargas y las fijaciones (ver tabla 4) que se utilizarán en el modelo, para establecer los parámetros de simulación dentro del programa:

Descripción	Valor
Parte fija	Cara Superior
Elementos de sujeción	N/A
Material	AI 6061 (T6)
Factor de seguridad	< 1.5
Fuerzas por configurar	
Gravedad	9.81 Nm / s ²
Peso del EOAT	45 N
Fuerza 1 (horizontal)	50 N
Fuerza 2 (torque)	20 Nm

Tabla 4. Configuración para la simulación del cople 3D.

Será necesario considerar que el sistema se encuentra en equilibrio de forma estática, hasta que una fuerza externa al sistema lo desestabilice, es decir una colisión. Desplazamientos debido a vibración no serán tratados en este artículo.

Para la valoración de la pieza de forma correcta contemplaremos los siguientes 3 puntos:

- a) Estrés mecánico de la pieza.
- b) Desplazamiento o deformación (mm).
- c) Factor de seguridad.



a) Estrés mecánico de la pieza.

El estrés mecánico de la pieza estará representado por la teoría de falla de von Mises, y nos reflejará los puntos máximos del esfuerzo al que ha sido sometida la parte (ver figura 8), y en los cuales la parte, no deberá de pasar el límite elástico permitido del material que se ha seleccionado para la pieza. Una pieza que sobrepase los límites elásticos del material se interpretará como una falla de esta, dado que físicamente, el componente estará deformado, o en su peor caso, ya habrá sufrido una ruptura.



Figura 8. Gráfico de esfuerzo de von Mises en el cople.

En la figura 8, se puede apreciar que los valores por encina de 275 Mpa (en color rojo, degradado de claro a fuerte) se encuentran por arriba del límite elástico del material. Por lo tanto, se deberá de tomar en cuenta esta zona, como la más frágil de la parte, y es en estas zonas donde se puede aplicar una mejora de diseño y funcionamiento de la parte.

b) Desplazamiento o deformación.

Otro dato que se considera para la valoración de esta pieza, es el desplazamiento o deformación que tiene al momento de ser sometida a la fuerza que se le ha indicado (figura 9), de tal manera, que es posible evaluar la deformación que sufre la pieza.

En la figura 9, se aprecia la dimensión en la que se deformó la parte. Es necesario considerar que la inclinación que ha sufrido este cople será trasmitida al cuerpo del herramental. Por lo que los cambios físicos o deformaciones que sufra este, afectarán proporcionalmente a los puntos de recolección y dejada de partes por parte del robot.

c) Factor de seguridad.

Una de las características clave en la que se basan muchos modelos para su inspección es el factor de seguridad. Este factor, normalmente tiene que ser mayor que uno, dado que caso contrario toda la pieza estaría comprometida. Entre un mayor factor de seguridad, la pieza en su operación será más confiable, independientemente de su geometría.





Figura 9. Gráfico de deformación en el cople.

En la figura 10, podemos apreciar una sección del cople, donde se representa la dispersión del factor de seguridad. Para nuestro diseño el factor de seguridad mínimo requerido es de 3. En esta misma figura, todo lo que se encuentre con un factor de seguridad menor a 3 estará de color rojo. Todos los datos del factor de seguridad por encima de 10 estarán indicados en color azul. Las áreas de mejora de la parte estarán ubicadas, gráficamente, en las secciones que se muestran en color rojo. Dado que se considera la parte como una revolución y es simétrica, la sección que se muestra en la figura 10, nos refleja la totalidad del volumen de la parte.



Figura 10. Gráfico de factor de seguridad en el cople.

4.4 Implementación.

Para la validación de esta parte, se optó por el uso de una pieza de prueba durante la programación de los puntos operativos del robot. Durante este proceso no se han tenido colisiones que deterioren la forma de esta parte.



Por otro lado, se ha determinado que, a pesar del bajo factor de seguridad en algunos de los puntos que se muestran en la figura 10, durante una operación normal del equipo, este no se verá afectado por las anomalías que llegaran a presentarse, incluso como una comprobación adicional, se ha simulado un esfuerzo de compresión (ver figura 12) en el cople, y en que se aprecia que no presentara deformaciones excesivas. Por lo tanto, es viable el uso de este cople en la aplicación requerida.



Figura 11. Simulación de resultados de deformación de la parte con una carga por compresión de 3000 N.

Una prueba de la fiabilidad y funcionalidad del cople que se ha utilizado en este equipo se muestra en la figura 12, el cual ha sufrido una colisión debido a una deficiente interacción de ejes eléctricos con el robot y su herramental. Para este caso y por la deformación que tuvo la parte, se determinó que hubo un atoramiento durante un desplazamiento lineal, más un esfuerzo de rotación en el mismo herramental. Afortunadamente una vez que se deformó, el robot solo detectó una sobre-corriente sin que se llegara a una colisión. Para poner en marcha nuevamente la celda, no fue necesario reprogramar los puntos de interacción del robot en la celda, solo con cambiar el cople por uno nuevo la celda volvió a operar.



Figura 12. Cople deformado físicamente.



5 Conclusiones

En el amplio campo en el que los robots han sido desplegados, es importante conocer los riesgos mecánicos a los que se exponen, incluso durante las puestas en operación de los equipos, ya que es en esta etapa, cuando los equipos son más susceptibles a colisiones, esto debido al factor humano o a una curva de aprendizaje que se lleva a cabo por cada desarrollador.

No todos los equipos deberán de integrar este tipo de componentes, sin embargo, aquellos que lo requieran, ayudarán de forma contundente a mitigar grandes paros en la cadena de producción donde los robots este desplegados.

Un aspecto importante para considerar es que el usuario final deberá de tener, dentro de su almacén, un cople como refaccionamiento para cubrir un rápido cambio durante una colisión del robot.

Referencias

- [1] C. I. E. R. Gonzales, «Diseño y Simulacion de Gripper Intercambiable entre Robot FANUC LR Mate 200iD y MOTOMAN MH5f,» pp. 13 14, 2017.
- [2] E. W. Z. J. MIkell P. Groover, CAD/CAM: computer-aided design and manufacturing, New Jersey: Prentice Hall, 1984.
- [3] United Nations, Catching technological waves: innovation with equity, U. Nations, Ed., New York, Geneva: United Nations, 2021, pp. 45-48.
- [4] F. Corporation, «FANUC Robot LR Mate 200iD, Operator's Manual,» 2015.
- [5] J. D. F. Benito, Analisis del Proceso de Fractura en Materiales Estructurales mediante el uso del criterio de la densidad de energia de deformacion y el concepto de material equivalente, Santander: Escuela de Doctorado de la Universidad de Cantabria, 2019.
- [6] J. Teran Guillen, S. Cicero Gonzalez, M. Arroyo Olvera, A. del Valle Moreno, A. Torres Acosta y M. Martinez Madrid, EVALUACIÓN DE DEFECTOS TIPO ENTALLA EN ACEROS DE BAJA ALEACIÓN PARA USO ESTRUCTURAL, Sanfandilla, Queretaro: Instituto Mexicano del Transporte, 2016.
- [7] P. G. Gutierrez, Plateamiento y Validacion de una metodologia de analisis de la fisura inducidad por mabiente basada en la teoria de las distancias criticas., Santander: Escuela de Doctorado de la Universidad de Cantabria, 2019.
- [8] N.-F. CORP., «EZ03V4-02 Standard specifications,» TOYAMA CITY.



Ictal-net: un Diseño de CNN para la Clasificación de Escalogramas de Electroencefalogramas con Crisis Convulsivas

Hernández Nava Gerardo, Salazar Colores Sebastián, Ortiz Echeverri César Javier, Leyva López Sheila y Ramos-Arreguín Juan Manuel⊠

> Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería [⊠]juan.ramos@uaq.mx

Resumen

La epilepsia es una enfermedad neurológica caracterizada por convulsiones de manera recurrente y aleatoria, que afecta a alrededor de 70 millones de personas en todo el mundo. Actualmente, en la epileptología, área que trata con la clasificación, detección y predicción de eventos epilépticos, se ha trabajado con la aplicación de técnicas de inteligencia artificial, como el aprendizaje profundo. Sin embargo, en tareas como la clasificación aún existe un margen de mejora en términos de exactitud, precisión, sensitividad y puntaje F1. Por ello en este trabajo se presenta lctal-net, una red neuronal convolucional propuesta para la clasificación periodos ictales (estados convulsivos) e interictales (estados libres de convulsiones) en señales de electroencefalografía. El objetivo de la red propuesta es detectar ataques epilépticos, para lo cual fueron caracterizadas señales de EEG mediante escalogramas obtenidos de la transformada wavelet continua. En este trabajo se utilizaron registros provenientes de la Universidad de Bonn, Alemania. Ictal-net obtuvo un 93.9% de exactitud, 95.47% en precisión, sensitividad del 92.19% y un puntaje F1 de 93.8%, cifras que se encuentran entre las mejores reportadas en la literatura.

Palabras clave: Epilepsia, Clasificación, Escalogramas, Electroencefalograma, Transformada Wavelet Continua, Red Neuronal Convolucional.

1. Introducción

En la última definición clínica operativa publicada por la Liga Internacional Contra la Epilepsia (ILAE, por sus siglas en inglés) en 2014 se menciona que la epilepsia es una enfermedad cerebral que se define por cualquiera de las siguientes circunstancias: por la presencia de al menos dos crisis no provocadas con una separación entre ellas mayor a 24 horas, una crisis no provocada con una probabilidad mínima del 60% de presentar nuevas crisis durante los siguientes 10 años, o bien, tener un diagnóstico de un síndrome de epilepsia [1]. Se considera que este trastorno neurológico crónico no transmisible afecta alrededor de 70 millones de personas en el mundo, siendo una de las enfermedades neurológicas más comunes a nivel mundial, sin distinción de edad o sexo [2]. Esta enfermedad es caracterizada por convulsiones no provocadas que se presentan de forma recurrente y aleatoria.

Las personas que padecen esta enfermedad muchas veces se ven limitadas en sus actividades en la vida diaria, llegando a padecer de discriminación social y laboral [1] [13] [3], lo cual ha inspirado a la realización de este proyecto. Anteriormente, se han realizado trabajos relacionados con la clasificación, detección y predicción de eventos epilépticos, buscando ayudar a las personas que padecen esta enfermedad, mediante algoritmos de Inteligencia Artificial, específicamente, aprendizaje profundo.

Una de las partes clave en el desarrollo de dichos algoritmos, son los datos de entrada. Una de las señales fisiológicas fundamental en el diagnóstico, tratamiento y seguimiento de la epilepsia es el



electroencefalograma (EEG). El EEG es un trazo de la actividad eléctrica de las neuronas, resultado de un estudio llamado electroencefalografía. Dicho registro eléctrico cerebral tiene una magnitud en el orden de microvolts y en él se pueden observar los distintos estados de un evento epiléptico: interictal, periodo intermedio entre eventos epilépticos; preictal, momento previo a una convulsión; postictal, etapa posterior a la crisis; y el periodo ictal que es cuando se presenta el evento epiléptico [4].

Las señales EEG cuentan con una propiedad importante: pueden ser tratadas en distintos dominios para extraer aquellas características específicas de la señal. Básicamente, existen tres distintos dominios en los cuales se puede trabajar con la señal, y realizar un análisis adecuado de la señal de EEG, extrayendo la mayor cantidad de información posible. Los dominios son del tiempo, frecuencia y tiempo-frecuencia. En el dominio del tiempo se puede trabajar con la señal cruda o preprocesada y en él se pueden extraer parámetros de la señal como el valor medio absoluto, cruce en ceros, longitud de onda, energía, cambio de signo de pendiente, potencia media, integral de amplitud, energía no lineal, entropía de Shannon, entre otros.

Por otro lado, en el dominio de la frecuencia, es requerido preprocesar la señal, para lo cual se transforma mediante algún método de transformación como lo puede ser la transformada discreta de Fourier, para posteriormente extraer características como frecuencia pico, ancho de banda de la frecuencia dominante, frecuencia de borde espectral, por mencionar algunas. Por último, para ubicarse en el dominio tiempo-frecuencia es necesario aplicar una transformación, por ejemplo, en el caso de la transformada wavelet puede realizarse una operación discreta o continua, donde se pueden obtener métricas como la media, varianza, media absoluta, curtosis, desviación estándar, asimetría, valores máximos y mínimos, longitud de onda, RMS, parámetros de autor regresión, promedio móvil autorregresivo y escalogramas.

En el caso del presente trabajo las señales EEG se caracterizan en el dominio tiempo-frecuencia mediante la transformada wavelet continua (CWT). Al aplicar la CWT se obtiene un escalograma, el cual es una representación gráfica de la presencia frecuencial respecto al tiempo. La frecuencia, la cual toma el eje de las ordenadas, se organiza de manera logarítmica; mientras que el tiempo se encuentra en el eje de las abscisas. En cuánto mayor intensidad se presente en la imagen quiere decir que hay mayor presencia de esa frecuencia en la señal en el tiempo indicado en las abscisas [5].

Para lograr la clasificación de los eventos epilépticos se han trabajado con distintos tipos de algoritmos, tanto de aprendizaje máquina como de aprendizaje profundo. Prueba de ello son los siguientes trabajos que han sido presentados en los últimos años.

Por ejemplo, en [6] lograron clasificar los conjuntos D y E de la base de datos de la universidad de Bonn, con una precisión entre 88.60% y 91.16% dependiendo del algoritmo de clasificación. Estas cifras fueron obtenidas mediante validaciones cruzadas de 2 y 4 folds. Para procesar las señales EEG utilizaron una función de base radial y obtuvieron parámetros como el promedio la varianza, la desviación estándar y la raíz cuadrática media para caracterizarla, así como la media de la densidad espectral de potencia. Los clasificadores propuestos constaban de una máquina de soporte vectorial (SVM), K-vecinos más cercanos (KNN) y una red bayesiana (NB). Asimismo, en [7] propusieron la clasificación de la base de datos de la Universidad de Bonn utilizando una SVM, KNN y un árbol de decisión (DT), como clasificadores y para caracterizar las señales propusieron la aplicación de la transformada wavelet discreta (DWT) y la descomposición en modo empírico, obteniendo exactitudes entre el 60% y 100% En el 2020 Nagabushanam et al. [8] presentaron un trabajo en el cual se buscaba comparar distintos tipos de algoritmos, como una máquina de soporte vectorial (SVM), una red neuronal, una red de memoria a corto plazo de larga duración (LSTM, por sus siglas en inglés), entre otras, para clasificar las señales de la base de datos de la Universidad de Bonn. Durante el mismo año Shankar et al. [9] realizaron la clasificación de la misma base datos utilizando una red neuronal convolucional (CNN), teniendo como entrada imágenes generadas mediante la transformada de campo angular de Gramian utilizando la sumatoria angular (GASF) y la diferencia angular (GADF) aplicada sobre la señal EEG y sobre la potencia instantánea de la señal. Durante el siguiente año, Aayesha et al. [10], clasificaron la misma base de datos utilizando algoritmos de aprendizaje maguina adicionando clasificadores difusos, logrando exactitudes superiores al 90% para todos sus algoritmos.


Por otro lado, una red LSTM fue propuesta en [11] para clasificar la base de datos de distintas formas. La red consta de cuatro capas y fue entrenada y validada mediante K-fold 10, con 30 épocas y un batchsize de 32. El objetivo principal de este proyecto es la clasificación de señales EEG pertenecientes a sujetos con epilepsia, con lo que se pretende identificar estados ictales e interictales de ventanas de tiempo de 1.6 segundos. Esto se logra utilizando una arquitectura a la cual se le denominó Ictal-net. El cumplir con dicho objetivo podría ayudar a trabajar de manera más eficiente en el tratamiento de los pacientes que padecen de epilepsia, mejorando la calidad de vida de ellos y de sus familiares.

2. Materiales y métodos

En esta sección, se describe el proceso de investigación llevado a cabo para el desarrollo de lctal.net. En la Figura 1 se presenta un diagrama a bloques con el cual puede seguirse de forma visual la metodología, indicando algunos de los aspectos más importantes en cada uno de los pasos.



Figura 1. Diagrama a bloques de le metodología seguida para la elaboración y entrenamiento de lctal-net.

Como se puede observar en la Figura 1, el proceso de implementación del proyecto comenzó con un análisis de la base de datos en la cual se seleccionaron las señales de interés. Posteriormente, se acondicionaron las señales para preprocesarlas y así ser utilizadas como entrada de la CNN: Ictal-net. Donde el preprocesamiento se centra en el cálculo de sus escalogramas mediante la transformada wavelet continua, los cuales fueron normalizados.

Una vez teniendo la entrada para la CNN se comenzó con el diseño de la arquitectura, así como la selección de sus hiperparámetros, continuando con el entrenamiento de esta y finalizando con su evaluación. Todos estos pasos se describen con mayor detalle a continuación.



2.1 Base de datos

La base de datos utilizada pertenece a la universidad de Bonn [13]. La cual consiste en cinco conjuntos de datos denotados por las letras A, B, C, D y E, cada uno de ellos contiene 100 registros EEG de un solo canal. Cada una de las señales tiene una duración de 23.6 segundos. Como características adicionales, estas señales fueron muestreadas a una frecuencia de 173.61 Hz y filtradas con un filtro pasabanda de 0.53 a 40 Hz.

Los conjuntos de datos se dividen de la siguiente forma:

- Conjunto A: Cinco sujetos sanos en estado de relajación con los ojos cerrados.
- Conjunto B: Cinco sujetos sanos en estado de relajación con los ojos cerrados.
- Conjunto C: Cinco sujetos con patología cuyo registro se realizó en la formación del hipocampo del hemisferio opuesto del cerebro, libres de convulsión.
- Conjunto D: Cinco sujetos con patología cuyas señales fueron registradas en la zona epileptógena y están libres de convulsión.
- Conjunto E: Cinco sujetos con patología, en estas señales se presenta actividad convulsiva.

Dado que, el propósito de lctal-net es clasificar señales EEG pertenecientes a periodos ictales e interictales, solo se utilizaron los conjuntos de datos D y E. Además de que comparten una misma característica, los registros que se contienen en estos dos grupos de datos fueron recabados del mismo lado de la zona epileptógena.

2.2 Acondicionamiento de datos de entrada

Una vez cargadas las señales de interés, como primer paso de acondicionamiento se realizó un muestreo con el fin de obtener un mayor número de datos de entrada para poder entrenar y probar la CNN. Esto se realizó dividiendo cada una de las señales en 16 ventanas con 256 muestras cada una. Haciendo un intercalado entre señales ictales e interictales. Esto se puede ver a mayor detalle en la Figura 2.



Figura 2. Muestreo y ordenamiento de las ventanas ictales e interictales.

El ordenamiento fue realizado con el propósito de evitar sesgos temporales, es decir, como las señales EEG son señales en función del tiempo se cuida que las ventanas creadas no se encuentren en más de un conjunto, ya sea de entrenamiento, validación o prueba.



2.3 Creación de escalogramas

Para cada una de las ventanas creadas fue calculado su escalograma mediante la transformada wavelet continua, análisis que se realizó con 250 escalas y función wavelet madre morlet compleja con parámetros 1.5-2.0. Una vez que se obtuvieron los coeficientes calculados por la CWT se les calculo el valor absoluto y posteriormente realizar una normalización.

2.4 Normalización

La normalización seguida para obtener un entrenamiento adecuado de la red se basó en una normalización Min-Max. La cual consiste en estandarizar los valores de los datos de entrada, en este caso los escalogramas, en un rango elegido, por ejemplo, de -1 a 1 o como se realizó para este trabajo, de 0 a 1. Para ello se utiliza la Ecuación 1.

$$x_{normalizada} = \frac{x - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \tag{1}$$

Donde $x_{normalizada}$ es cada uno de los valores del escalograma normalizado. Como se muestra en la Ecuación 1, para obtener dicho valor se debe restar al valor original (*x*) el valor mínimo presente en el escalograma (X_{min}), para posteriormente ser dividido entre el rango numérico del escalograma analizado. Este rango es igual a la diferencia entre el valor máximo (X_{max}) y el valor mínimo, ambos de todo el escalograma.

2.5 Diseño y compilación de lctal-net

Para realizar la tarea de clasificación se propuso una arquitectura, a la cual se le denominó Ictalnet. El diseño de este modelo se inspira en una CNN. Para encontrar la arquitectura que brinda una mejor clasificación de las señales EEG se probaron diferentes parámetros como: número de filtros con sus respectivos tamaños de kernel; número de capas intermedias; funciones de activación; técnicas de regularización como dropout, normalización por lotes (BatchNormalization); y reducción de coste computacional mediante capas que realizan una agrupación máxima en dos dimensiones (Maxpooling2D). En la Tabla 1 se pueden apreciar la variedad de valores probados para cada uno de los hiperparámetros.

Hiperparámetros	Valores
Números de capas convolucionales	1, 2, 3, 4, 5
Número de filtros por capa	[30 – 250]
Tamaño de kernel	3 × 3, 5 × 5
Funciones de activación	Sigmoide, ReLU
Dropout	Activado, desactivado
BatchNormalization	Activado, desactivado
Maxpooling2D	Activado (2 × 2), desactivado

Como se puede ver en la Tabla 1, la búsqueda de la arquitectura consistió en probar múltiples CNN, las cuales podían tener desde una capa convolucional hasta cinco, donde cada una de estas capas podía contener n número de filtros, siendo n un valor dentro del rango de 30 a 250. Mientras que la operación convolucional se realizaba mediante kernels cuadrados, ya sea de dimensiones de 3 × 3, o bien, de 5 × 5. Las funciones de activación para cada una de las capas, tanto convolucionales como las capas densas podían ser la sigmoide o la ReLU.



Ahora bien, entre cada una de las capas convolucionales y densas podían activarse o desactivarse operaciones que ayudaran a tener un mejor rendimiento de la clasificación de las señales, estas funciones eran Dropout, normalización por lotes y agrupación máxima en dos dimensiones.

2.6 Entrenamiento de lctal-net

Cada una de las arquitecturas encontradas en el paso anterior se entrenaron y evaluaron mediante la técnica de división de datos 60-20-20, en la cual del total de muestras que se tienen el 60% de ellas es dedicó al entrenamiento de la red, el siguiente 20% se utilizó como conjunto de validación y con el último 20% se realizaron las pruebas finales, con las cuales se calcularon las cifras de mérito que se reportan en la siguiente sección. Cabe destacar que solo la arquitectura que sobresalió en las etapas de entrenamiento y validación, y a la cual se denominó: Icta-net, es la única que adicionalmente se probó con el conjunto de prueba.

2.7 Evaluación del modelo

Las cifras de mérito que fueron utilizadas para calificar el rendimiento de lctal-net fueron la exactitud, precisión, sensitividad y puntaje F1. Se seleccionaron estas cifras de mérito, dado que son las más utilizadas en la literatura, y se busca hacer una comparación con otros algoritmos que se hayan propuesto en los últimos cinco años y realicen la misma tarea que lctal-net.

Se calculó la exactitud mediante la ecuación dos, mientras que, la precisión, sensitividad o también conocida como recall, y puntaje F1 fueron calculadas utilizando las ecuaciones tres, cuatro y cinco, respectivamente.

$$Exactitud = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$
(2)

$$Precisión = \frac{TP}{TP + FP}$$
(3)

$$Sensitividad = \frac{TP}{TP + FN}$$
(4)

$$Puntaje F1 = 2 \times \frac{Precisión \times Sensitividad}{Precisión + Sensitividad}$$
(5)

Donde TP son los verdaderos positivos, en este caso son las clasificaciones acertadas de los periodos ictales; TN son los falsos positivos, es decir, los escalogramas correctamente asociados a periodos interictales; FP, falsos positivos, son las ventanas ictales que no se lograron clasificar de forma correcta; y finalmente los FN, falsos negativos, las ventanas interictales que fueron reconocidas por lctal-net como periodos ictales.

3. Resultados

Al realizar el muestreo de las señales originales se obtuvieron 3200 ventanas, como resultado de haber dividido las señales de EEG de los conjuntos D y E en 16 ventanas de la misma dimensión. Posteriormente, al aplicar a cada una la transformada wavelet continua, se obtuvieron escalogramas de 250 (escalas) × 256 (muestras) pixeles, siendo estas las entradas para la CNN. En la Figura 3 se puede observar el proceso de obtención del escalograma de una señal en el periodo ictal, mientras que en la Figura 4 se muestra el proceso seguido para obtener el escalograma de una señal en el periodo interictal.

En la Figura 3, se puede se puede observar una señal EEG perteneciente a un periodo ictal, ahora bien, la sección encerrada en el recuadro rojo corresponde a la primera ventana de esa señal, la



cual está conformada por 256 muestras (alrededor de 1.47 segundos). La Figura 3.b) corresponde a la ventana antes mencionada, la cual es procesada mediante la CWT para obtener el escalograma que se muestra en la Figura 3.c), el cual es la entrada al modelo lctal-net.



Figura 3. Preprocesamiento para la obtención de escalogramas de la señal durante un evento epiléptico. (a) Señal EEG de periodo ictal. (b) Ventana de 1.47 segundos de señal EEG de periodo ictal. (c) Escalograma obtenido mediante la CWT de la ventana de tiempo de 1.47 segundos con 250 escalas.

Para el cálculo del escalograma de la señal en el periodo interictal se siguieron los mismos pasos que para el periodo ictal, esto es, en la Figura 4.a) se muestra una señal EEG en un periodo interictal. En la Figura 4.b) la primera ventana de dicha señal y por último en la Figura 4.c) el escalograma obtenido con la wavelet madre morlet compleja con parámetros 1.5-2.0.







3.1 Clasificación de escalogramas

La arquitectura que obtuvo las métricas más altas, y a la cual se le denominó lctal-net consta de cinco capas convolucionales (Conv2D), cada una de ellas con 54, 44, 64, 54 y 44 filtros correspondientemente. Todas las capas trabajaron con kernels de dimensiones de 3 × 3.

Adicionalmente, la componen capas de BatchNormalization, las cuales se encuentran después de las capas convoluciones uno, dos, tres y cinco. La operación de Maxpooling2D se realizó antes de entrar a la cuarta capa convolucional y después de la función de activación de esta misma capa.

Los Dropout con un valor de 0.5 se situaron enseguida de la segunda agrupación máxima en dos dimensiones y al realizar la función de activación de la última capa convolucional, para agregar una



capa de aplanamiento (flatten) y de esta forma preparar los patrones encontrados para la capa densa que le continua, la cual está compuesta por 28 neuronas y a su salida se realiza una normalización por lotes para poder seguir con su función de activación.

Para finalizar, la salida de lctal-net está constituida por una capa densa de dos neuronas con función de activación softmax.

Las capas de activación corresponden a funciones sigmoide a excepción de la segunda capa de activación y la ya mencionada función de salida. La arquitectura de lctal-net se puede visualizar en la Figura 5.



Figura 5. Arquitectura de modelo Ictal-net.

En la Figura 5 se puede observar el orden de las capas que conforman la lctal-net. La entrada para este modelo es de dimensiones de $250 \times 256 \times 1$, ya que al ser un escalograma en escala de grises solo se cuenta con un canal. A la salida del modelo lctal-net se obtienen dos valores, cuando estos valores son (1, 0) el escalograma corresponde a un estado interictal, mientras que cuando los valores son (0, 1) la salida indica que la ventana analizada es de un estado ictal.

La salida de las ventanas analizadas correspondientes al conjunto de prueba se puede ver en la Tabla 2 que corresponde a la matriz de confusión, una herramienta muy utilizada para el apoyo en la evaluación de los algoritmos en el campo de la inteligencia artificial. En esta matriz se puede ver el número de ventanas correspondientes al estado ictal e interictal correctamente clasificadas, así como las que fueron erróneamente clasificadas.



Matriz de confusión							
	Periodo interictal	Periodo Ictal					
	(1,0)	(0,1)					
Periodo interictal (1, 0)	306	14					
Periodo Ictal (0, 1)	25	295					

Tabla 2. Matriz de confusión del método propuesto.

Como se puede observar en la Tabla 2 se obtuvieron 306 clasificaciones correctas para los periodos interictales, mientras que para los periodos ictales se obtuvieron 295 clasificaciones acertadas. A partir de las cifras reportadas en la matriz de confusión se pueden calcular más métricas con las cuales se puede evaluar la arquitectura propuesta, como la exactitud en la cual se obtuvo 93.90%, precisión 95.47%, sensitividad 92.19% y puntaje F1 con 0.9380. Estas cifras son comparadas, en la Tabla 3, contra cifras reportadas por otros autores con sus propios modelos al clasificar la base de datos de la Universidad de Bonn.

Clasificador	Exactitud	Precisión	Sensitividad
lctal-net	93.90 %	95.47 %	92.19 %
RF [10]	97.04 %	97.00 %	97.73 %
SVM [10]	93.52 %	93.50 %	92.04 %
KNN [10]	97.96 %	98.00 %	97.35 %
DT [10]	96.67 %	96.70 %	97.73 %
MLP [10]	98.15 %	98.20 %	96.59 %
FURIA [10]	96.30 %	96.30 %	97.73 %
FLR [10]	93.15 %	93.3 %	96.21 %
FRNN [10]	98.70 %	98.7 %	98.86 %
VQNN [10]	97.59 %	97.6 %	97.73 %
FNN [10]	96.85 %	96.9 %	98.84 %
LSTM [11]	95.00 %	-	91.00 %
SVM 2-fold [6]	88.60 %	-	94.47 %
SVM 4-fold [6]	88.80 %	-	94.60 %
KNN 2-fold [6]	89.23 %	-	89.37 %
KNN 4-fold [6]	88.86 %	-	89.96 %
NB 2-fold [6]	91.16 %	-	91.37 %
NB 4-fold [6]	90.39 %	-	90.69 %
SVM EMD [7]	96.25 %	-	-
SVM DWT [7]	93.75 %	-	-
KNN EMD [7]	93.75 %	-	-
KNN DWT [7]	95.00 %	-	-
DT EMD [7]	97.50 %	-	-
DT DWT [7]	98.75 %	-	-
CNN GASF EEG [14]	94.50 %	-	-
CNN GADF EEG [14]	94.00 %	-	-
CNN GASF EEG potencia [14]	96.50 %	-	-
CNN GADF EEG potencia [14]	97.00 %	-	-

Tabla 3. Métricas de la evaluación propuesta.



Como se puede observar en la Tabla 3 el rendimiento obtenido con la arquitectura Ictal-net se encuentra muy cerca de las mejores cifras reportadas en la literatura para la clasificación de la base de datos de la Universidad de Bonn.

4. Conclusiones

En este trabajo se propuso el uso de la transformada wavelet continua como proceso para la obtención de características de las señales EEG, perteneciente a periodos ictales e interictales, obteniendo como resultado escalogramas que nos indican la presencia de las frecuencias analizadas en la ventana. Siendo estas imágenes la entrada para lctal-net, arquitectura que se encarga de encontrar los patrones necesarios para el reconocimiento de los eventos ictales, de forma automática.

Los resultados obtenidos mediante Ictal-net son alentadores para el campo de la epileptología, ya que se obtuvo un 93.90% de exactitud clasificando periodos ictales e interictales, una precisión de 95.47%, la sensitividad con un valor de 92.19% y finalmente un puntaje F1 de 0.9380.

Con estos resultados se dejan bases sólidas para trabajos futuros en los cuales se pueden clasificar señales en vivo o en el mejor de los casos la predicción de eventos epilépticos, sin embargo, aún queda trabajo por delante. Por otro lado, queda claro que el uso en conjunto de las CNN y la CWT son una herramienta útil para realizar esta tarea.

Referencias

- [1] Fisher, R. S., Acevedo, C., Arzimanoglou, A., Bogacz, A., Helen Cross, J., Elger, C. E., Engel Jr, J., Forsgren, L., French, J. A., Glynn, M., Hesdorffer, D. C., Lee, B., Mathern, G. W., Mosh, S. L., Perucca, E., Scheffer, I. E., Tomson, orn, Watanabe, M., & Wiebe, S. (2014). A practical clinical definition of epilepsy. Epilepsia, 55(4), 475–482. <u>https://doi.org/10.1111/epi.12550</u>
- [2] Instituto Mexicano del Seguro Social. (2020). Hasta siete de cada 10 derechohabientes con epilepsia logran el control de su enfermedad: IMSS | Sitio Web "Acercando el IMSS al Ciudadano." <u>http://www.imss.gob.mx/prensa/archivo/202002/072</u>
- [3] Téllez-Zenteno, J. F., Nguyen, R., & Hernández-Ronquillo, L. (2010). Lesiones, accidentes y mortalidad en epilepsia: Una revisión de sus prevalencias, factores de riesgo y prevención. Revista de Investigación Clínica, 466–479. <u>https://www.medigraphic.com/pdfs/revinvcli/nn-2010/nn105l.pdf</u>
- [4] Almira, J. M., & Aguilar-Domingo, M. (2016). Neuromatemáticas: el lenguaje eléctrico del cerebro. Editorial CSIC Consejo Superior de Investigaciones Científicas. http://ebookcentral.proquest.com/lib/uamsp/detail.action?docID=4794808
- [5] MathWorks. (2022). Visualize scalogram of signals MATLAB MathWorks América Latina. https://la.mathworks.com/help/wavelet/ref/wavelettimefrequencyanalyzer-app.html
- [6] Kumari, R. S. S., & Abirami, R. (2019). Automatic detection and classification of epileptic seizure using radial basis function and power spectral density. 2019 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking, WiSPNET 2019, 6–9. https://doi.org/10.1109/WiSPNET45539.2019.9032800
- [7] Bekbalanova, M., Zhunis, A., & Duisebekov, Z. (2019). Epileptic Seizure Prediction in EEG Signals using EMD and DWT. 2019 15th International Conference on Electronics, Computer and Computation, ICECCO 2019, Icecco, 1–4. https://doi.org/10.1109/ICECCO48375.2019.9043270
- [8] Nagabushanam, P., Thomas George, S., & Radha, S. (2020). EEG signal classification using LSTM and improved neural network algorithms. Soft Computing, 24(13), 9981–10003. <u>https://doi.org/10.1007/S00500-019-04515-0/TABLES/9</u>
- [9] Shankar, A., Dandapat, S., & Barma, S. (2021). Classification of Epileptic Seizure from EEG Signal Based on Hilbert Vibration Decomposition and Deep Learning. Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS, 2802– 2805. <u>https://doi.org/10.1109/EMBC46164.2021.9631081</u>



- [10] Aayesha, Qureshi, M. B., Afzaal, M., Qureshi, M. S., & Fayaz, M. (2021). Machine learning-based EEG signals classification model for epileptic seizure detection. Multimedia Tools and Applications, 80(12), 17849–17877. <u>https://doi.org/10.1007/S11042-021-10597-6</u>
- [11] Xuh, Ś., Xvlqj, O., Frp, V. J., Qxy, V., Lq, D. F., Ri, H. S. W., Qjlqhhulqj, O., Prgho, H., & Jrrg, J. (2021). (slohswlf 6hl]xuh &odvvlilfdwlrq xvlqj /670. 591–594.
- [12] Andrzejak, R. G., Lehnertz, K., Mormann, F., Rieke, C., David, P., & Elger, C. E. (2001). Indications of nonlinear deterministic and finite-dimensional structures in time series of brain electrical activity: Dependence on recording region and brain state. Physical Review E, 64(6), 061907. <u>https://doi.org/10.1103/PhysRevE.64.061907</u>
- [13] Rai, D., Kerr, M. P., McManus, S., Jordanova, V., Lewis, G., & Brugha, T. S. (2012). Epilepsy and psychiatric comorbidity: A nationally representative population-based study. Epilepsia, 53(6), 1095– 1103. <u>https://doi.org/10.1111/j.1528-1167.2012.03500.x</u>
- [14] Shankar, A., Khaing, H. K., Dandapat, S., & Barma, S. (2020). Epileptic Seizure Classification Based on Gramian Angular Field Transformation and Deep Learning. Proceedings of 2020 IEEE Applied Signal Processing Conference, ASPCON 2020, 147–151. https://doi.org/10.1109/ASPCON49795.2020.9276717



Navegación Autónoma de un Robot Móvil Mediante Control Predictivo Basado en Modelo

García Pintos Carlos Alfonso, Moreno Vázquez Diana Emilia, Ramírez Maldonado Christian y Aldana Murillo Noé Guadalupe[⊠]

Universidad Iberoamericana León. Blvd. Jorge Vértiz Campero 1640, Col. Cañada de Alfaro, León, Guanajuato, México, C.P. 37238 ⊠noe.aldana@iberoleon.mx

Resumen

En años recientes, la aplicación de la robótica se ha entrelazado de manera irreversible con los procesos industriales, descomponiendo procesos complejos y de larga duración para dar resultados más precisos, óptimos y eficientes. En este trabajo se presenta una estrategia de control óptimo a la navegación autónoma de un robot de manejo diferencial. Debido a la naturaleza no lineal del modelo matemático del robot de manejo diferencial, se utiliza el control predictivo no lineal basado en modelo. Las contribuciones de este trabajo son dos: 1) Navegación autónoma de un robot de manejo diferencial para el seguimiento de trayectorias de cualquier tipo mediante el uso de control predictivo basado en modelo en simulación. 2) Las simulaciones fueron implementadas en el lenguaje de programación Python. El enfoque propuesto se muestra en una implementación en Python con el objetivo de que el robot llegue a una configuración final deseada a partir de una configuración inicial, siguiendo una trayectorias en línea recta y una trayectoria, cumpliendo con el objetivo de llegar a la configuración deseada.

Palabras clave: Robot de manejo diferencial, control predictivo basado en modelo, navegación autónoma.

1. Introducción

En años recientes, la aplicación de la robótica se ha entrelazado de manera irreversible con los procesos industriales, descomponiendo procesos complejos y de larga duración para dar resultados más precisos, óptimos y eficientes. Sin embargo, el margen de mejora es amplio, considerando que incluso campos ampliamente estudiados como la navegación autónoma de robots, se encuentran sujetos a variables dependientes del entorno de trabajo, la dificultad de la tarea, los sensores con que cuente el mismo y el método de control utilizado.

El presente trabajo, involucra a un robot de manejo diferencial (DDR por sus siglas en inglés) y el uso de estrategias de control para su funcionamiento. Estas, se utilizan debido a que el robot sigue un modelo no lineal. Existe documentación previa que explora la navegación autónoma, así como una gran variedad de métodos de navegación. Desde el uso de una analogía física para interpretar información de sensores y transformarla en instrucciones de movimiento, como en el caso del método de campos potenciales [1], [2], [3], [4], el uso de comandos de movimiento para seleccionar comandos y estrategias de navegación, el cálculo de ángulos de dirección [5], [6]; hasta el uso de comandos de velocidad [7], [8] y aquellos que calculan información de alto nivel a partir de la información sensorial para obtener los comandos de movimiento.

En materia de control óptimo existen varios que tratan el control predictivo basado en modelo (MPC). En [9] se muestra el control de un DDR usando por medio de su modelo dinámico. El modelo del DDR es linealizado a través de una técnica de entrada-salida para así obtener los controles



necesarios mediante MPC y poder simular los resultados. Por otra parte, en [10] realizan seguimiento de trayectorias específicas con MPC, resolviendo la problemática de evasión de obstáculos añadiendo una restricción a su optimización. Los autores de [11] propusieron un control óptimo para DDR que linealizaron mediante series de Taylor para poder hacer uso del control predictivo basado en modelo lineal. De esta forma, logran una implementación en tiempo real. En [12] presentan un trabajo donde emplean un control predictivo no lineal basado en modelo (NMPC) para el seguimiento de trayectorias en línea recta. En [13] se emplean NMPC y comparan dos formas de restricciones del problema de optimización: restricciones de igualdad restricciones de desigualdad para el seguimiento de trayectoria de un robot móvil de manejo diferencial. En [14] muestran un NMPC para el seguimiento de trayectoria de un robot móvil con ruedas. Usa un método de Euler para transformar el problema de optimización no lineal en un problema de optimización cuadrático. Presenta los resultados en simulaciones de computadora e implementaciones en un robot real. El trabajo presentado en [15], muestra un algoritmo basado en NMPC para navegación autónoma de un robot de manejo diferencial donde aparecen obstáculos estáticos y dinámicos a lo largo de su trayectoria.

Las contribuciones de este trabajo son dos: 1) Navegación autónoma de un robot de manejo diferencial para el seguimiento de trayectorias de cualquier tipo mediante el uso de control predictivo basado en modelo en simulación. 2) Las simulaciones fueron implementadas en el lenguaje de programación Python.

2. Aspectos básicos del control predictivo basado en modelo

El control predictivo basado en modelo (MPC) es adecuado para resolver el problema de seguimiento de trayectoria de un robot de manejo diferencial. El MPC necesita un modelo matemático del sistema a controlar; el modelo matemático del robot de manejo diferencial es no lineal por lo que se requiere utilizar un control predictivo no lineal basado en modelo (NMPC).

2.1 Control no lineal basado en modelo

El NMPC puede controlar un sistema que regularmente es un modelo discreto en el tiempo no lineal. Al mismo tiempo que controla al sistema, satisface un cúmulo de restricciones. El NMPC obtiene una secuencia de controles óptimos al resolver un problema de optimización que consiste en minimizar una función objetivo. El primer valor de los controles obtenidos al resolver el problema de optimización numérica se aplica al sistema. Además, se puede predecir una trayectoria óptima del sistema controlado. Tanto la trayectoria como los controles óptimos se calculan numéricamente tomando en cuenta las restricciones dadas en una ventana de tiempo. El proceso se repite desde el estado actual del sistema para obtener una nueva secuencia de controles y una nueva trayectoria óptima. La dinámica del sistema se discretiza con un periodo de muestreo de tamaño T usando el método de Euler.

2.2 Problema de Optimización

El problema de optimización usado en el NMPC se resuelve mediante un método de programación cuadrática secuencial (SQP) que se usa para resolver problemas no lineales de optimización con restricciones. El SQP resuelve problemas de optimización que tienen la estructura mostrada en la Ecuación 1:

$$\min_{\mathbf{z}} J(\mathbf{z}),$$
sujeto a $c_1(\mathbf{z}) \le 0,$
 $c_2(\mathbf{z}) = 0.$
(1)

El NMPC usa un modelo matemático del sistema a controlar para predecir controles en una ventana de predicción llamada horizonte. Específicamente, el NMPC consiste en minimizar, en un tiempo de muestreo *k*. una función de costo adecuada con respecto de un vector $\mathbf{z}_k = (z_k, z_{k+1}, \dots, z_{k+n_u-1})^T$, donde $n_u \ge 1$ es el horizonte de control. El problema de optimización está sujeta a restricciones de desigualdad dadas por $\mathbf{c}_1(\mathbf{z})$ y restricciones de igualdad $\mathbf{c}_2(\mathbf{z})$.



3. Metodología

El modelo cinemático del DDR se basan en las siguientes suposiciones:

- El robot se considera como un cuerpo rígido.
- Las ruedas son independientes y sólo pueden ir hacia adelante o hacia atrás.
- El robot se mueve sobre un plano.
- No hay deslizamiento entre la rueda y la superficie de contacto.

El modelo cinemático del robot, mostrado en la Figura 1, está dado por la Ecuación 2:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}$$
(2)

o, en forma vectorial descrita por la Ecuación 3 y la Ecuación 4, la ecuación anterior se escribe como:

$$\dot{\boldsymbol{x}} = f(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}) \tag{3}$$

$$y = Cx \tag{4}$$

donde el $x_{=}^{def} (x \ y \ \theta)^T$ es el vector de estado que describe la posición y orientación del centro del eje de las ruedas con respecto del marco de referencia $\{0\}$. $u_{=}^{def} (v \ \omega)^T$ es la entrada de control, donde v es la velocidad lineal y ω es la velocidad angular. El modelo del DDR es una ecuación diferencial no lineal con salidas dadas por y = Cx, donde C es una matriz identidad de orden 3.



Figura 1. Marcos de referencia del robot de manejo diferencial.

El problema que se estudia en el presente trabajo se define como:

Problema. Considere el sistema descrito por la Figura 2 con el modelo matemático dado por la Ecuación 2. La posición (x, y), la orientación (θ) , la velocidad lineal (v) y la velocidad angular (ω) se suponen conocidos. El problema consiste en encontrar una ley de control que estabilice el estado y a una trayectoria deseada y_d .

3.1 Control

Se requiere estabilizar el sistema (Ecuación 2) encontrando un control u tal que $y \rightarrow y_d$. Un esquema del enfoque de control propuesto se muestra en la Figura 3.

Para resolver el problema de seguimiento de trayectoria, proponemos un enfoque de NMPC que debe encontrar el control u para que $y \rightarrow y_d$. En este trabajo, la entrada de control se divide en dos: v_k =



 $(v_k, v_{k+1}, \dots, v_{k+n_u-1})^T$ y $\boldsymbol{\omega}_k = (\omega_k, \omega_{k+1}, \dots, \omega_{k+n_u-1})^T$ para que $\boldsymbol{u}_k = (\boldsymbol{v}_k^T \quad \boldsymbol{\omega}_k^T)^T$. La función de costo a minimizar con respecto de $\boldsymbol{u}_k = (\boldsymbol{v}_k^T \quad \boldsymbol{\omega}_k^T)^T$ está dada por la Ecuación 5.



Figura 2. Problema de navegación autónoma de un DDR.



Figura 3. Diagrama que muestra el sistema de control en lazo cerrado que consta del DDR y del NMPC.

$$J(\boldsymbol{x}_{k}, \boldsymbol{\nu}_{k}, \boldsymbol{\omega}_{k}) = \sum_{\substack{i=0\\n_{y}}}^{n_{u}} \| \boldsymbol{\nu}_{(k+1)+i} \|_{\boldsymbol{q}_{v}}^{2} + \sum_{i=0}^{n_{u}} \| \boldsymbol{\omega}_{(k+1)+i} \|_{\boldsymbol{q}_{\omega}}^{2} + \sum_{i=1}^{n_{y}} \| \boldsymbol{x}_{k+i} - \boldsymbol{x}_{k+i}^{d} \|_{\boldsymbol{R}_{\chi}}^{2} + \sum_{i=1}^{n_{y}} \| \boldsymbol{y}_{k+i} - \boldsymbol{y}_{k+i}^{d} \|_{\boldsymbol{R}_{y}}^{2} + \sum_{i=1}^{n_{y}} \| \boldsymbol{\theta}_{k+i} - \boldsymbol{\theta}_{k+i}^{d} \|_{\boldsymbol{R}_{\theta}}^{2},$$
(5)

donde $n_y \ge 1$ es el horizonte de predicción; $x_{k+i}, y_{k+i} y \theta_{k+i}$ son las salidas; $v_{(k+1)+i} y \omega_{(k+1)+i}$ son las entradas predichas; $x_{k+i}^d, y_{k+i}^d y \theta_{k+i}^d$ denotan las $i - \acute{esimas}$ salidas de referencia. El término $||r_i||_W^2$ denota la norma cuadrada de un vector ponderada por una matriz **W**. En la ecuación (5), $Q_v, Q_\omega \in \mathbb{R}^{n_u \times n_u} y R_x, R_y, R_\theta \in \mathbb{R}^{n_y \times n_y}$ son matrices diagonales.

La función de costo (5) está sujeta a restricciones duras dadas por la dinámica del sistema Ecuación 2 discreto:

$$\boldsymbol{x}_{k+1} = f(\boldsymbol{x}_k, \boldsymbol{v}_k, \boldsymbol{\omega}_k), \tag{6}$$

de las restricciones cinemáticas del modelo del robot:

$$-x_k \sin \theta_k + y_k \cos \theta_k = 0, \tag{7}$$

Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 4, pp. 39 - 50. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022



Y, finalmente, las restricciones de los controles que son las velocidades mínima y máxima.

$$\bar{v}_{min} < v_k < \bar{v}_{max} \tag{8}$$

$$\overline{\omega}_{min} < \omega_k < \overline{\omega}_{max} \tag{9}$$

El NMPC encuentra una secuencia de controles óptimos u_k resolviendo el problema de optimización:

$$\min_{\boldsymbol{\nu}_k,\boldsymbol{\omega}_k} J(\boldsymbol{x}_k,\boldsymbol{\nu}_k,\boldsymbol{\omega}_k), \tag{10}$$

lo que da una secuencia de entradas de control v_k , ω_k . Como es costumbre en el NMPC, sólo el primer elemento de $v_k y \omega_k$ se aplica al sistema. En la siguiente iteración, se vuelve a resolver el problema de optimización y se calcula una nueva secuencia de entradas de control. El ciclo se repite hasta que se alcanza la tarea deseada.

4. Resultados

En esta sección, presentamos los experimentos que muestran el desempeño del control en lazo cerrado. La simulación fue realizada en Python 3.9.10 con la distribución de Anaconda [16] usando las librerías **do_mpc** [17], casadi (versión 3.5.5) [18] y matplotlib (versión 3.5.1) [19]. Los experimentos se realizaron en Ubuntu 20.04 con un procesador Intel i3 onceava generación de 3 Ghz. En todos los experimentos, las unidades de la posición están en metros mientras que la orientación está dada en radianes. El horizonte de predicción del NMPC $n_y = 15$, el horizonte de control $n_u = 2$ y el periodo de muestreo T = 0.1 s Se considera un robot con velocidades mínima y máxima con los valores mostrados en la Tabla 1. La posición y orientación del robot en el plano de movimiento en todos los experimentos está dada por la configuración inicial $q_0 = (0m, 0m, 0^\circ)$.

Velocidad	Valor
$ar{v}_{min}$	$-0.26\frac{m}{s}$
$ar{v}_{max}$	$0.26\frac{m}{s}$
$\overline{\omega}_{min}$	$-104.2 \frac{deg}{s}$
$\overline{\omega}_{max}$	104.2 $\frac{deg}{s}$

Tabla 1. Valores de velocidades permitidos.

Para el experimento 1, las matrices de peso fueron fijadas con los valores de la Tabla 2. Los valores de las matrices \mathbf{R}_i son más grandes que los valores de las matrices \mathbf{Q}_i , puesto que es deseable que el error de las salidas sea más importante que los términos de energía (controles de velocidad) en el costo total de la función objetivo.

Este primer experimento corresponde a una navegación para alcanzar la posición y orientación deseadas $\mathbf{q}_d = (x^d, y^d, \theta^d) = (3m, 3m, 45^\circ)$, siguiendo una trayectoria en línea recta. En la Figura 4, la evolución de la posición del robot se muestra en el plano *x*, *y* en color rojo. La configuración deseada \mathbf{q}_d se muestra en color azul. La posición y orientación deseadas se alcanza con buena precisión. La trayectoria alcanzada no alcanzó completamente una línea recta, debido a que la orientación inicial del robot es de 0° y tarda en girar hacia la orientación deseada.



Matriz de peso	Valor
Q_{v}	<i>diag</i> (0.00001,0.00001)
$oldsymbol{Q}_{\omega}$	diag(0.00005,0.00005)
R_{χ}	diag(10.5,…,10.5)
R _y	diag(15.0,…,15.0)
$R_{ heta}$	diag(9.75,,9.75)

Tabla 2. Matrices de peso para el experimento 1.



Figura 4. Simulación para llevar el robot de $q_0 = (0m, 0m, 0^\circ)$ a $q_d = (3m, 3m, 45^\circ)$.



Figura 5. Evolución de la coordenada x del experimento 1.

La Figura 5 muestra la evolución la coordenada x del robot (en color rojo). Se alcanza el valor deseado (línea azul) a los cuatro segundos. La Figura 6 presenta la evolución de la coordenada y del robot, donde el valor deseado se alcanza a los 4 segundos. La orientación se muestra en la Figura 7, donde se aprecia que alcanza su valor deseado. La velocidad lineal del robot se presenta en la Figura 8. La velocidad alcanza su valor máximo positivo durante el trayecto hacia la pose deseada. El valor máximo negativo observado en la figura se debe a que el robot se pasa de la referencia y tiene que aplicar una velocidad negativa (hacia atrás) para lograr el objetivo. En la Figura 9, se presenta la velocidad angular del robot para el primer experimento. La evolución de la velocidad angular muestra que al inicio se tiene que girar con mayor magnitud para alcanzar la orientación deseada.

Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 4, pp. 39 - 50. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022









Figura 7. Evolución de la orientación del robot en el experimento 1.



Figura 8. Evolución de la velocidad lineal del robot en el experimento 1.

Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 4, pp. 39 - 50. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022





Figura 9. Evolución de la velocidad angular del robot en el experimento 1.

Se llevó a cabo un segundo experimento para probar trayectorias de referencia más complejas. Los valores de las matrices de peso para este experimento se muestran en la Tabla 3. La trayectoria por seguir por el robot es una parábola dada ($y = x^2$) que cuya parametrización viene dada en el tiempo t por las Ecuaciones 11 y 12.

$$x = \frac{t}{2} \tag{11}$$

$$y = \frac{t^2}{4} \tag{12}$$

Con esta parametrización, se espera que se alcance la configuración deseada $\mathbf{q}_d = (x^d, y^d, \theta^d) = (2m, 4m, 76^\circ)$. Para la referencia de la orientación, se usó la pendiente a la curva en cada punto para respetar el modelo cinemático del DDR.

Matriz de peso	Valor
$oldsymbol{Q}_{v}$	diag(0.001,0.001)
$oldsymbol{Q}_{\omega}$	diag(0.005,0.005)
R_{x}	$diag(13.15, \cdots, 13.15)$
Ry	<i>diag</i> (14.95, …, 14.95)
$m{R}_{ heta}$	diag(9.95,…,9.95)

Tabla 3. Matrices de peso para el experimento 2.

La Figura 10 presenta la trayectoria seguida por el robot para alcanzar la configuración deseada en el experimento 2. Se observa que la pose deseada se alcanza con buena precisión tanto en posición como en orientación. Hay error durante la trayectoria debido al tiempo que tarda el robot en corregir la orientación. La Figura 11 muestra la evolución de la componente *x* de la pose del robot. El valor deseado se alcanza con buena precisión. En la Figura 12, se presenta la evolución de la coordenada *y* donde se aprecia que el valor deseado se alcanza con buena precisión. La Figura 13 muestra la evolución de la orientación lograda por el robot. Las oscilaciones que aparecen son debidas a que el robot debe realizar movimientos hacia adelante y hacia atrás, ya que no se puede mover de manera lateral debido a la restricción dada por la Ecuación 7. Una vez que la pose deseada se ha alcanzado, las oscilaciones desaparecen y el valor de la orientación permanece constante.



La velocidades lineal y angular se muestran en las Figuras 14 y 15; los valores están dentro de los rangos permitidos (ver Tabla 1). Las oscilaciones que aparecen en las figuras son debidas al movimiento que realiza el robot en la parte final del trayecto para corregir el error lateral. Una vez que el error lateral se ha corregido, las velocidades tienen valores cercanos a cero y el robot detiene su movimiento. La duración del experimento fue de 4 segundos.

En el último experimento, se muestra un experimento comparando el modelo propuesto con el modelo presentado en [10]. La Figura 16 muestra la trayectoria seguida por el robot para alcanzar la configuración deseada. La pose final tiene buena precisión en orientación y posición. A diferencia del enfoque propuesto en este trabajo, la orientación (ver Figura 17) tiene más oscilaciones para alcanzar la referencia en orientación. Nuestro enfoque corrige la orientación de manera suave a comparación que con el método presentado en [10].



Figura 10. Simulación para llevar el robot de $q_0 = (0m, 0m, 0^\circ)$ a $q_d = (2m, 4m, 76^\circ)$.



Figura 11. Evolución de la coordenada x del experimento 2.



Figura 12. Evolución de la coordenada y del experimento 2.

Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 4, pp. 39 - 50. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022





Figura 13. Evolución de la orientación del robot en el experimento 2.



Figura 14. Evolución de la velocidad lineal del robot en el experimento 2.



Figura 15. Evolución de la velocidad angular del robot en el experimento 2.

Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 4, pp. 39 - 50. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022





Figura 16. Simulación para llevar el robot de $q_0 = (0m, 0m, 0^\circ)$ a $q_d = (2m, 4m, 76^\circ)$ mediante [10].



Figura 17. Evolución de la orientación del robot en el experimento realizado mediante [10].

5. Conclusiones

En este trabajo, se presentó una implementación en simulación de navegación autónoma para un robot de manejo diferencial usando un control predictivo no lineal basado en modelo. Los experimentos realizados fueron aumentando la complejidad la trayectoria a seguir, mostrando un nivel de precisión realista al comparar la ruta real con la ruta deseada. El trabajo con la librería do_mpc en Python facilita la modificación de condiciones iniciales y permite observar claramente la velocidad del robot durante su camino hacia el objetivo.

Como trabajo futuro, se pretende seguir con la implementación para seguir trayectorias más complejas. Además, se implementarán los algoritmos de navegación en un simulador dinámico como Gazebo para, posteriormente, implementarlos en un robot real. Además, se modificará la función objetivo para que el robot de manejo diferencial pueda evadir obstáculos en su trayectoria.

Referencias

[1] Khatib, O. "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots" In Autonomous robot vehicles (pp. 396-404). Springer. 1986.



- [2] Borenstein, J., & Koren, Y. "*Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots*". IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics, 19(5), 1179-1187. 1989.
- [3] Krogh, B., & Thorpe, C. "Integrated path planning and dynamic steering control for autonomous vehicles." In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1986.
- [4] Tilove, R. B. "Local obstacle avoidance for mobile robots based on the method of artificial potentials". In Proceedings of the IEEE international conference on robotics and automatio). 1990.
- [5] Feiten, W., Bauer, R., & Lawitzky, G. "*Robust obstacle avoidance in unknown and cramped environments*". In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1994.
- [6] Ulrich, I., & Borenstein, J. VFH+: "*Reliable obstacle avoidance for fast mobile robots.*" In Proceedings of the IEEE international conference on robotics and automation. 1998.
- [7] Brock O., & Khatib, O. "Real-time re-planning in high-dimensional configuration spaces using sets of homotopic paths". In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Vol. 1, pp. 550-555. 2000.
- [8] Arras, K. O., Persson, J., Tomatis, N., & Siegwart, R. "Real-time obstacle avoidance for polygonal robots with a reduced dynamic window." In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2002.
- [9] Bouzoualegh S., Guechi, E. H., & Kelaiaia, R. "*Model predictive control of a differential-drive mobile robot.*" Acta Universitatis Sapientiae, Electrical and Mechanical Engineering, 10(1), 20-41. 2018.
- [10] Benchouche W., Mellah, R., & Bennouna, M. S. "Navigation of a Differential Drive Mobile Robot Using Nonlinear Model Predictive Control." In Conference Proceedings ICCSA'2021. 2021.
- [11] Lages, W. F., & Alves, J. A. V. "*Real-time control of a mobile robot using linearized model predictive control*". IFAC Proceedings Volumes, 39(16), 968-973. 2006.
- [12] Aldana N.G, Gutiérrez A., Martínez E.D., Zamarripa J.C.I. "Control Predictivo no Lineal Basado en Modelo para Navegación de un Robot de Manejo Diferencial". Congreso Internacional de Investigación e Innovación Mutidisciplinario 2022. 3965-3979. 2022.
- [13] Mehrez, M. W., Mann, G. K., & Gosine, R. G. "Comparison of stabilizing NMPC designs for wheeled mobile robots: An experimental study," *Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon)*, pp. 130-135, 2015.
- [14] R. Hedjar, "Approximate Quadratic Programming Algorithm for Nonlinear Model Predictive Tracking Control of a Wheeled Mobile Robot," in IEEE Access, vol. 10, pp. 65067-65079, 2022
- [15] M. Sani, B. Robu and A. Hably, "Dynamic Obstacles Avoidance Using Nonlinear Model Predictive Control," 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 1-6, 2021.
- [16] Anaconda Software Distribution. Anaconda Documentation. Anaconda Inc. Retrieved from <u>https://docs.anaconda.com/</u>. 2020.
- [17] S. Lucia, A. Tatulea-Codrean, C. Schoppmeyer, and S. Engell. "*Rapid development of modular and sustainable nonlinear model predictive control solutions*". Control Engineering Practice, 60:51-62, 2017.
- [18] Andersson, J. A., Gillis, J., Horn, G., Rawlings, J. B., & Diehl, M. "CasADi: a software framework for nonlinear optimization and optimal control". Mathematical Programming Computation, 11(1), 1-36. 2019.
- [19] J. D. Hunter, "*Matplotlib: A 2D Graphics Environment*", Computing in Science & Engineering, vol. 9, no. 3, pp. 90-95, 2007.



La interfaz TWI de los Microcontroladores AVR: Ventajas, Modos de Operación y Casos de Estudio

Santiago Espinosa Felipe y Ramírez Leyva Fermín Hugo

Universidad Tecnológica de la Mixteca Instituto de Electrónica y Mecatrónica Km. 2.5, Carretera a Acatlima Huajuapan de León, Oaxaca, C.P. 69000 <u>fsantiag@mixteco.utm.mx</u>, <u>hugo@mixteco.utm.mx</u>

Resumen

La interfaz TWI de los microcontroladores AVR es totalmente compatible con el estándar I²C desarrollado por Phillips Semiconductors (actualmente NXP Semiconductors). La interfaz maneja un esquema maestro(s)-esclavo(s), en donde la comunicación se realiza únicamente a través de dos alambres, uno para datos y otro para reloj. En una red basada en la interfaz TWI se puede conectar uno o más maestros y hasta 127 esclavos. La simplicidad del hardware externo ha motivado el desarrollo de diferentes módulos que generalmente funcionan como esclavos, pudiendo ser memorias, sensores, DAC's, ADC's, etc. Para comprender los modos de operación y resaltar las ventajas de la interfaz TWI, se realizaron dos sistemas que se describen en el presente capítulo. En el primer sistema, un ATMega328P funciona como maestro y se encarga de coordinar a cuatro esclavos: un reloj de tiempo real, un sensor de temperatura, un LCD manejado a través de un expansor de puertos remoto y un sensor de color. El sistema se complementa con una aplicación en Python para la lectura de los diferentes esclavos y la configuración del reloj de tiempo real. El segundo sistema es una red TWI compuesta de 4 tarjetas Arduino UNO, cada una con un shield multifunción para contar con entradas y salidas. Una de las tarjetas funciona como maestro y las otras 3 son esclavos, los esclavos son contadores de eventos que se pueden manipular en forma independiente, con las operaciones de incremento, decremento, set y reset. Desde el maestro se pueden enviar comandos por la interfaz TWI para solicitar las operaciones en forma remota, con la posibilidad de dirigir el comando a un esclavo en particular o hacer una llamada general para todos los esclavos. El maestro también puede hacer la lectura de uno de los esclavos, esta acción no es posible mediante una llamada general porque provocaría una colisión en el bus.

Palabras clave: Arduino, ATMega328P, dispositivos I²C, interfaz TWI, microcontroladores AVR, sistemas maestro-esclavos.

1. Introducción

La sigla TWI significa *Two Wire Interface*, que en español se traduce como interfaz de dos alambres o dos hilos, se trata de una interfaz incluida en los microcontroladores AVR de Microchip, que es compatible con la interfaz l²C (*Inter-Integrated Circuit*, circuito inter-integrado), un estándar desarrollado por Phillips Semiconductors en la década de los 80 para conectar varios circuitos integrados dentro de un televisor. Phillips ahora se denomina NXP Semiconductors y es parte la empresa estadounidense Qualcomm [1], conocida por el diseño y creación de los microprocesadores Snapdragon. TWI e l²C técnicamente son idénticos, cualquier dispositivo o módulo manejable con el estándar l²C se puede manipular desde la interfaz TWI de los microcontroladores AVR.

En una red TWI se puede conectar uno o más maestros y hasta 127 esclavos. En la figura 1 se aprecia que únicamente se requiere de dos alambres, uno para el manejo de datos (SDA, serial data) y



otro para la señal de reloj (SCL, *serial clock*), como hardware externo se deben emplear dos resistores de *pull-up*, para garantizar la presencia de un 1 lógico en los alambres cuando ninguno de los dispositivos ha colocado algún dato en el bus.



Figura 1. Conexión de dispositivos en la interfaz TWI.

La interfaz I²C no es nueva, pero su uso en los últimos años se ha incrementado con la popularidad de Arduino, ya que muchos *shields* la utilizan porque ofrece ventajas importantes cuando no se necesita una velocidad muy alta para la adquisición y manejo de información. Por ejemplo, para manipular una memoria SRAM de 256 bytes externa a un microcontrolador, será necesario disponer de un bus de direcciones de 8 bits, un bus de datos también de 8 bits y por lo menos 2 terminales para las señales de control, esto significa que se requiere un mínimo de 18 terminales en el microcontrolador, que contrasta ampliamente con las 2 líneas de la interfaz I²C.

Con respecto a los sensores de parámetros analógicos como temperatura, humedad, presión barométrica, etc., aunque la mayoría de microcontroladores incluyen por lo menos un ADC, es necesario acondicionar la salida del sensor para generar un voltaje con el nivel adecuado a la entrada del ADC. La etapa de acondicionamiento generalmente utiliza amplificadores operacionales y, por lo tanto, llega a ser necesaria una fuente con un voltaje mayor al del microcontrolador o una fuente bipolar para la alimentación del circuito. Esta situación se evita con un sensor acondicionado para la interfaz I²C, ya que el *shield* está preparado para el manejo de un protocolo digital e incluye los resistores de *pull-up*, por lo que no es necesario emplear hardware adicional.

Muchos desarrolladores de *shields,* como la empresa Adafruit [2], ofrecen bibliotecas de funciones que facilitan el manejo de sus productos. Esto ha ocasionado que algunos desarrolladores de sistemas embebidos utilicen módulos l²C sin conocer el protocolo, esta es otra motivación para la escritura del presente capítulo, ya que se podrá observar como las secuencias para el manejo de diferentes módulos son muy similares, sin importar su funcionalidad.

Para resaltar las ventajas de la interfaz TWI, se implementaron dos sistemas, en el primero, un ATMega328P es el maestro y se encarga de coordinar a cuatro esclavos con diferentes funciones: el primer esclavo es el módulo TinyRTC, un reloj de tiempo real basado en el chip DS1307 de Dallas Semiconductor, el segundo es un sensor de temperatura soportado por el chip TMS102 de Texas Instruments, el tercer esclavo es el chip PCF8574, también de Texas Instruments, un expansor de puertos remoto de 8 bits en el que se conecta un LCD de 20x4 caracteres y el último esclavo es el sensor de color RGB TCS34725 de Adafruit.

El sistema periódicamente obtiene la información del módulo RTC y del sensor de temperatura para exhibirla en la pantalla LCD. La lectura del sensor de color no es periódica, se realiza cuando se presiona un botón porque previamente se debe colocar un objeto frente al sensor para detectar su color, en el LCD se muestran los valores RGB leídos. Además, el sistema se complementa con una aplicación en Python mediante la cual se puede realizar la lectura y configuración del módulo RTC, así como la lectura del sensor de temperatura y del sensor de color. La aplicación se puede ejecutar en una computadora personal y la comunicación con el ATMega328P se realiza de manera serial, utilizando la



USARTO del microcontrolador y un adaptador de USB-TTL para establecer la conexión física entre ambos dispositivos.

El segundo sistema es una red TWI compuesta de 4 tarjetas Arduino UNO, a cada tarjeta se le conecta un *shield* multifunción porque incluye 4 botones y 4 displays de 7 segmentos, entre otros periféricos, de manera que los nodos de esta pequeña red cuentan con entradas y salidas digitales. Una de las tarjetas funciona como maestro y las otras 3 son esclavos. Los esclavos se han programado para que sean contadores de eventos, en un intervalo entre 0 y 99, con los botones se pueden realizar las operaciones de incremento, decremento, ajuste y reinicio.

Además, en los esclavos también se ha configurado su interfaz TWI para que puedan dar respuesta a comandos recibidos por medio de su dirección individual o por medio de llamadas generales. Los comandos se envían desde el maestro, con los botones se selecciona el número del comando y la dirección del destinatario. Se utiliza la dirección 0 para hacer llamadas generales y solicitar a todos los esclavos que ejecuten el mismo comando. Con los comandos se solicitan las operaciones de incremento, decremento, ajuste, reinicio y la lectura del contador, aunque el último comando no se puede hacer mediante una llamada general porque provocaría una colisión en el bus TWI.

Los dispositivos en la interfaz TWI pueden estar en uno de 4 modos de operación: Maestro Transmisor (MT), Maestro Receptor (MR), Esclavo Transmisor (ST) y Esclavo Receptor (SR). En el primer sistema, el ATMega328P trabaja en los modos MT o MR, mientras que los esclavos están en los modos ST o SR, pero solo el maestro fue programado, los esclavos ya tienen una función establecida. En el segundo sistema, el maestro también puede estar en los modos MT o MR, y los esclavos podrán estar en los modos ST y SR, por lo que en el segundo sistema se experimenta con los cuatro modos de operación.

2. Transferencias en la interfaz TWI

En la figura 1 se puede ver que en la interfaz TWI utiliza solo dos alambres para conectar un conjunto grande de dispositivos, los cuales deben estar físicamente preparados para cumplir con las características físicas inherentes del protocolo. En esta sección se describe la forma en que se realizan las transferencias de datos en el bus, considerando que la comunicación se realiza bajo un esquema maestro-esclavos. Mientras no haya transferencias, en el bus se van a tener niveles lógicos altos, tanto en SDA como en SCL, debido a la presencia de los resistores de *pull-up*.

En la figura 2 se ilustra una transferencia de un maestro transmisor (MT) a un esclavo receptor (SR), separando la actividad de cada dispositivo. El maestro inicia la comunicación estableciendo una condición de inicio, que consiste en una transición de alto a bajo en la línea de datos (SDA) con la línea de reloj (SCL) en alto, después de la transición en SDA, SCL también es llevada a un nivel bajo. Luego, el maestro debe direccionar al esclavo, las direcciones son de 7 bits y no puede ser 0 porque el valor está reservado para llamadas generales (se denomina GCA, por *General Call Address*), es por ello que, en una red TWI se pueden conectar hasta 127 esclavos con direcciones diferentes.



Figura 2. Transferencia de un dato de un maestro a un esclavo.

Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 5, pp. 51 - 71. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022



El maestro coloca los pulsos en SCL para sincronizar la información en SDA, al final de la dirección el maestro debe indicar el modo de acceso, en la figura 2 se aprecia un 0 que corresponde con una escritura (con 1 se indica una lectura). En el noveno pulso del reloj, el maestro libera la línea SDA para que el esclavo coloque un 0 indicando un reconocimiento (Ack), los resistores de *pull-up* hacen que el maestro lea un 1 si el esclavo no está presente. Hecho el reconocimiento, el maestro inicia con la transferencia del dato, sincronizando cada bit con su pulso de reloj, nuevamente en el noveno pulso de reloj el esclavo hace el reconocimiento. La transferencia termina con una condición de paro, que también se puede ver en la figura 2, la cual inicia con una transición a un nivel alto en la señal de reloj (SCL) y se complementa con la transición de bajo a alto en la línea de datos (SDA).

El bit de control (R/W) que sigue a la dirección del esclavo determina el modo de acceso. Un 0 en este bit indica que el maestro hará una escritura y la petición se abrevia como una SLA + W. Un 1 en R/W es una indicación de lectura y en este caso se utiliza la abreviatura SLA + R. El maestro pasa al modo transmisor (MT) después de emitir una SLA + W y obtener reconocimiento, posteriormente puede enviar múltiples datos y terminar las transferencias con una condición de paro. Si se emitió una SLA + R con reconocimiento, el maestro entra al modo receptor (MR) y puede iniciar con las lecturas a las que debe dar reconocimiento, una lectura sin reconocimiento es la forma en que el maestro le indica al esclavo que es el último dato que se va a leer y está seguida de una condición de paro.

Una vez que el maestro ha tomado el control de bus, puede cambiar del modo MT al modo MR (o vice-versa), para ello debe generar un inicio repetido, que es similar a una condición de inicio, pero sin que haya existido una condición de paro. Generalmente el modo MR sigue al modo MT, porque cuando un maestro va a obtener datos de un esclavo, primero le debe indicar su ubicación. Un inicio repetido también permite a un Maestro conmutar entre esclavos, sin perder el control del bus.

Una característica importante de la interfaz TWI es que puede haber más de un maestro en un bus, pero solo uno activo en un instante de tiempo. Si dos maestros intentan tomar el control del bus en forma simultánea, por hardware se realiza un proceso que se conoce como arbitración. La arbitración consiste en que, después de que un maestro coloca un dato en SDA, debe revisar el bus para asegurarse de que el dato está presente, si hay diferencia entre el dato colocado y el dato leído, significa que el maestro ha perdido la arbitración. En la figura 3 se ilustra el proceso de arbitración, en donde el maestro A pierde porque colocó un 1 en el bus mientras que el maestro B colocó un 0. El proceso de arbitración inicia en el paquete de dirección y puede continuar en los paquetes de datos, la naturaleza de la interfaz hace que tenga prioridad un 0 sobre un 1 lógico.



Figura 3. Proceso de arbitración.

3. Organización de la interfaz TWI en los microcontroladores AVR

En la figura 4 se muestra la organización de la interfaz TWI en donde se distinguen 4 bloques principales [3]. En un ATMega328P, las señales SDA y SCL se ubican en sus terminales PC5 y PC4,



respectivamente, la ubicación puede variar para otros miembros de la familia AVR. Las terminales están acondicionadas con un control de *slew-rate* y un filtro para supresión de ruido.



Figura 4. Organización de la Interfaz TWI.

La Unidad de Interfaz con el Bus se encarga de generar las condiciones de inicio y paro, además de monitorear la actividad en el bus para el proceso de arbitración. El registro de datos (TWDR) es el registro principal, en este se escriben los datos a ser transmitidos o se leen los datos recibidos. En el bit Ack se almacena el reconocimiento, este bit se modifica en forma automática, dependiendo del estado y operación de la interfaz.

El Generador de Velocidad de Transmisión determina la frecuencia de la señal de reloj (SCL), la cual depende del registro de Bit Rate (TWBR) y un preescalador, para el cálculo de la frecuencia se aplica la ecuación:

$$Frecuencia_{SCL} = \frac{Frecuencia_{CPU}}{16 + 2(TWBR)(factor de preescala)}$$
(1)

El factor de preescala se define con los bits TWPS[1:0] ubicados la posición menos significativa del registro de estado (TWSR), sus posibles valores son: 1, 4, 16 y 64.

La Unidad de Comparación de Dirección es relevante si el microcontrolador va a ser esclavo, en los 7 bits más significativos del registro de dirección (TWAR) se debe escribir la dirección a la que el MCU responderá como esclavo y en su bit menos significativo se habilita la atención a las llamadas generales. En el registro con la Máscara de dirección (TWAMR) se pueden colocar algunos bits en alto para que sean ignorados durante la comparación de la dirección, de esta manera, un MCU puede dar respuesta a más de una dirección. La comparación es automática y, ante una coincidencia, se pone en alto al bit TWINT del registro de control (TWCR), además, en el registro de estado (TWSR) se indica esta situación.

La Unidad de Control determina el comportamiento de la interfaz por medio de 2 registros, el registro de control (TWCR) incluye bits para habilitar la interfaz (TWEN), activar sus interrupciones



(TWINT), indicar si habrá reconocimiento (TWEA), establecer una condición de inicio (TWSTA) y establecer una condición de paro (TWSTO). El registro TWCR también incluye 2 banderas, una que indica un error de colisión de escritura (TWWC) y la más importante, la bandera de interrupción (TWINT), para indicar que hubo actividad en la interfaz TWINT.

Son diversas las situaciones por las que la bandera TWINT se pone en alto y, para saber cuál fue, se debe evaluar el registro de estado (TWSR), sus 5 bits más significativos reflejan el estado de la interfaz. Los códigos de estado dependen del modo de operación, en la tabla 1 se muestran algunos de los códigos de estado con su respectivo evento, no se consideran los casos con múltiples maestros.

Modo Maestro					
Código	Evento	Modo			
0x08	Estableció una condición de inicio	MT o MR			
0x10	Estableció un inicio repetido	MT o MR			
0x18	Transmitió una SLA + W y obtuvo reconocimiento	MT			
0x20	Transmitió una SLA + W pero sin reconocimiento	MT			
0x28	Transmitió un dato y obtuvo reconocimiento	MT			
0x30	Transmitió un dato pero sin reconocimiento	MT			
0x40	Transmitió una SLA + R y obtuvo reconocimiento	MR			
0x48	Transmitió una SLA + R pero sin reconocimiento	MR			
0x50	Recibió un dato y respondió con reconocimiento	MR			
0x58	Recibió un dato pero no dio reconocimiento	MR			
Modo Esclavo					
0x60	Fue direccionado por una SLA + W y respondió con reconocimiento	SR			
0x70	Fue direccionado por una llamada general y respondió con reconocimiento	SR			
0x80	Recibió un dato y respondió con reconocimiento, previamente direccionado por una SLA + W	SR			
0x90	Recibió un dato y respondió con reconocimiento, previamente direccionado por una llamada general	SR			
0x88	Recibió un dato pero no dio reconocimiento, previamente direccionado por una SLA + W	SR			
0x98	Recibió un dato pero no dio reconocimiento, previamente direccionado por una llamada general	SR			
0xA0	Detecta un inicio repetido o una condición de paro, siendo esclavo	SR o ST			
0xA8	Fue direccionado por una SLA + R y respondió con reconocimiento	ST			
0xB8	Transmitió un dato y recibió reconocimiento	ST			
0xC0	Transmitió un dato pero no obtuvo reconocimiento	ST			
0xC8	Transmitió el último dato y recibió reconocimiento	ST			

Tabla 1. Estados de la Interfaz TWI.

Para manipular la interfaz TWI de los microcontroladores AVR, incluyendo las tarjetas Arduino porque utilizan este tipo de dispositivos, primero se debe distinguir si el MCU va a funcionar como maestro o esclavo. En caso de ser maestro, al habilitar la interfaz también se debe configurar la frecuencia de la señal SCL. Luego, si el maestro va a escribir *n* datos en un esclavo, primero le debe indicar la dirección del registro o memoria en donde se van a colocar los datos y posteriormente proceder con el envío de los datos, este es un proceso secuencial que se ilustra en la figura 5 (a). Por otro lado,



si el maestro va a leer n datos de un esclavo, también le debe indicar la dirección en donde se hará la lectura, para luego leer n - 1 datos con reconocimiento y el último dato sin reconocimiento, por ello, el maestro inicia en modo MT y luego pasa al modo MR, en la figura 5(b) se muestra la secuencia mediante la cual un maestro lee n datos de un esclavo. En ambos modos, el maestro termina la comunicación estableciendo una condición de paro.



Figura 5. Secuencia para (a) la escritura de *n* datos y (b) lectura de *n* datos.

En la figura 5 se observa que cuando un MCU es maestro realiza procesos secuenciales que no requieren el uso de interrupciones, básicamente se deben coordinar las escrituras de los registros TWCR y TWDR, y esperar a que la bandera TWINT se ponga en alto, indicando alguna actividad relevante en el bus, hecho esto, se revisan los bits de estado, si son acordes con lo esperado se continúa con la secuencia, en caso contrario se cancela con el establecimiento de una condición de paro. En [4] se describe la biblioteca TWI.h, la cual contiene funciones que facilitan el desarrollo de las secuencias de escritura y lectura. Esta biblioteca fue empleada en la implementación de los programas de los maestros para los casos de estudio que se describen en secciones posteriores.

Si un MCU va a ser esclavo, primero se debe configurar su dirección y, si se considera necesario, habilitar la atención a las llamadas generales. Luego, por medio del registro TWCR se debe habilitar la interfaz y su reconocimiento, en el modo esclavo si es conveniente activar las interrupciones por que se ignora el momento en que ocurrirá un evento en la interfaz. Hecho esto, el esclavo se desentiende de la interfaz TWI y se dedica a las tareas que se le han programado. Cuando ocurra un evento en el bus se generará una interrupción, en la rutina de servicio a la interrupción (ISR) se deben revisar los bits de estado para identificar la causa y proceder con su atención, realizando las acciones requeridas. Para un esclavo no es necesario configurar la frecuencia de la señal SCL porque el reloj lo genera el maestro.

4. Sistema multifunción con 4 esclavos

El primer caso de estudio es un sistema multifunción basado en un ATMega328P trabajando como maestro, con este MCU se manejan cuatro esclavos con diferentes funciones: el primero es el módulo TinyRTC, un reloj de tiempo real que utiliza el chip DS1307 de Dallas Semiconductor, el segundo



es un sensor de temperatura soportado por el chip TMS102 de Texas Instruments, el tercer esclavo es el chip PCF8574, también de Texas Instruments, un expansor de puertos remoto de 8 bits en el que se conecta un LCD de 20x4 caracteres y el último esclavo es el sensor de color RGB TCS34725 de Adafruit, en la figura 6 se presenta un diagrama con la organización del sistema.

La información del módulo RTC y del sensor de temperatura se obtiene cada 500 ms y se exhibe en la pantalla LCD, el periodo de 500 ms se maneja con el temporizador 1 del ATMega328P. La lectura del sensor de color se realiza cuando se presiona el botón etiquetado como Captura, el cual es atendido con la interrupción externa 0, antes de presionar al botón, es necesario colocar un objeto frente al sensor para detectar su color y mostrar en el LCD los valores RGB leídos.



Figura 6. Primer caso de estudio: Sistema con 4 módulos l²C.

El adaptador USB-TTL hace posible la comunicación del sistema con una computadora, fue necesario desarrollar una aplicación en Python para realizar la lectura y configuración del módulo RTC, así como la lectura del sensor de temperatura y del sensor de color. La aplicación envía comandos al ATMega328P, quien los recibe por medio de la USARTO, los comandos son identificados y el MCU envía una cadena de respuesta o, cuando se trata de configurar al RTC, se prepara para recibir más información.

4.1 El módulo Tiny RTC

El módulo Tiny RTC se ha hecho popular como parte de los *shields* de Arduino, está basado en el CI DS1307, un Reloj/Calendario de Tiempo Real (RTC) con interfaz I²C. El módulo contiene los elementos necesarios para la operación del chip, incluyendo un cristal de 32.768 kHz, un socket para una batería de respaldo y los resistores de *pull-up* propios del protocolo I²C. En la figura 7 se muestra al módulo Tiny RTC y la forma en que se conecta el DS1307 para su manejo. Se puede ver que el módulo también tiene una memoria EEPROM I²C, con una capacidad de 32 kbits (24C32), la cual no es empleada en el presente sistema.

El circuito DS1307 responde a la dirección de esclavo 0x68 (1101000) y puede trabajar en los modos esclavo receptor (para configurar la fecha y la hora) y esclavo transmisor (para leer la fecha y la hora), su frecuencia máxima de operación es de 100 kHz. En la tabla 2 se muestra el mapa de registros del DS1307, se puede ver que la hora y fecha están en formato BCD, y que, además, incluye una memoria RAM de 56 localidades y un registro de control, en el que se configura al hardware para generar una señal cuadrada a diferentes frecuencias [5].





Figura 7. Módulo Tiny RTC (vistas superior e inferior) y conexión del DS1307.

Dir.	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Función	Rango	
0x00	СН	De	cenas de s	egundos	Unic	Unidades de segundos			Segundos	0 – 59	
0x01	0	De	ecenas de	minutos	Uni	Unidades de minutos			Unidades de minutos Minutos		0 – 59
0,02	0	12	PM/AM	Dec. hora		··· · · ·			Horoo	1 – 12	
0x02	0	24	Dec	. hora	Unidades de hora			noras	0 – 23		
0x03	0	0	0 0		0	Día d	Día de la semana		Día	1 – 7	
0x04	0	0	Dec. d	Unid	ades d	el día (mes)	Día (mes)	1 – 31		
0x05	0	0	0 Dec. mes		U	Unidades del mes		es	Mes	1 – 12	
0x06		Dece	enas del añ	U	nidade	s del aŕ	ĬO	Año	0 – 99		
0x07	OUT	0	0	SQWE	0	0	RS1	RS0	Control	-	
0x08-0x3F			56 lc	calidades de	e 8 bits				RAM	0x00-0xFF	

Tabla 2. Mapa de registros del DS1307.

El bit CH de la dirección 0x00 sirve para detener al reloj (*clock halt*), el reloj está activo con el bit CH en bajo. La hora se puede configurar en un modo de 12 o de 24 horas, un 0 en el bit 6 del registro 0x02 define un modo de 24 horas y un 1 es para el modo de 12 horas, con el cual, se destina al bit 5 del mismo registro como indicador de AM o PM, por lo que es más simple el modo de 24 horas. Se observan 2 registros para el día, el primero hace referencia al día de la semana, donde 1 equivale a domingo, 2 a lunes y así sucesivamente; el otro corresponde al día del mes, cuyo valor máximo depende del mes actual, para febrero se consideran los años bisiestos, pero como el año está en un rango entre 0 y 99, básicamente se revisa si el año es divisible entre 4.

Para el manejo del módulo Tiny RTC se crearon las funciones: *Escribe_RTC()* y *Lee_RTC()*, las cuales siguen secuencias similares a las mostradas en las figuras 5(a) y 5(b), pero con un límite de datos constante, predefinido en 3. La dirección de acceso puede ser 0 para hacer referencia a la hora o 4 para la fecha, el día de la semana y los demás registros no son utilizados.

La información que se lee del módulo RTC se exhibe de manera continua en la pantalla LCD, la cual requiere cadenas en código ASCII, con este mismo formato se envía la información a una PC cuando es solicitada, por ello, con la función *Lee_RTC()* después de que se realiza el acceso al módulo, se hace la conversión de BCD a ASCII. Para la escritura es lo contrario, la información llega al microcontrolador como una secuencia de caracteres ASCII y es convertida a BCD antes de realizar la escritura en el módulo RTC, trabajo que hace la función *Escribe_RTC()*.



4.2 Sensor de Temperatura

El circuito TMP102 es un sensor de temperatura digital de baja potencia para sistemas que no requieren una alta aproximación en la medición, porque su precisión es de +/- 0.5 °C, pero con la ventaja de que el sensor no necesita calibración o hardware externo. El sensor puede detectar la temperatura desde -40°C hasta 125°C, internamente utiliza un diodo como sensor de temperatura, acoplado a un ADC sigma-delta de 12 bits. La resolución del sensor es de 0.0625°C, con un comportamiento lineal, por lo que basta una operación de multiplicación para obtener el valor de la temperatura [6]. En la figura 8 se muestra al módulo TMP102 y su diagrama electrónico, se puede ver que el módulo básicamente es el chip TMP102 acondicionado para facilitar su manejo, con sus resistores de *pull-up* que son parte de la interfaz l²C.

El módulo responde como esclavo a la dirección 0x48 porque la terminal ADD0 del chip está conectada a GND, sin embargo, esta unión puede eliminarse y conectar ADD0 con Vcc, SDA o SCL, de esa forma, el módulo puede responder a las direcciones 0x49, 0x4A o 0x4B, respectivamente, esto permite a un sistema manejar hasta 4 sensores en el mismo bus I²C.



Figura 8. Módulo con el sensor de temperatura TMP102.

En la tabla 3 se muestra el mapa de registros del sensor TMP102 con su modo de acceso, los 4 registros son de 16 bits, por lo que una vez que se ha establecido la dirección de acceso vía TWI, se deben realizar dos lecturas o escrituras consecutivas, sin que se afecte al registro ubicado en la dirección siguiente.

Tabla 3. Mapa de registros del TMP102.

Dirección	Registro	Modo de acceso
0x00	Registro de temperatura	Solo lectura
0x01	Registro de configuración	Lectura/Escritura
0x02	Registro T _{LOW}	Lectura/Escritura
0x03	Registro T _{HIGH}	Lectura/Escritura

El registro de configuración sirve para seleccionar el modo de operación del circuito, se puede configurar el modo *shut-down* para apagar al sensor y reducir el consumo de potencia. También se tiene el modo termostato, en el que el sensor emite alertas si la temperatura está por debajo de la indicada en T_{LOW} o por encima de T_{HIGH}, para este modo se debe establecer el valor de los registros ubicados en las direcciones 0x02 y 0x03. Otro modo es el extendido, en el que se cambia la resolución del ADC a 13 bits. Si el registro de configuración no se modifica, por default se tendrá un sensor de 12 bits que no



emite alertas y solo posibilita la lectura del registro de temperatura ubicado en la dirección 0x00, esta configuración es la que se utilizó en el presente sistema.

En la tabla 4 se puede ver que los 12 bits con la información de la temperatura están alineados a la izquierda en el registro de 16 bits. Al hacer las lecturas en la dirección 0, primero se obtiene al byte 1 y después al byte 2. Puesto que el sensor puede entregar temperaturas negativas, la información está en complemento a 2. En el presente sistema se mide la temperatura ambiente por lo que no van ocurrir temperaturas negativas, después del acceso al sensor vía l²C, el valor de la temperatura se obtiene con la expresión:

$$Temperatura = (((Byte \ 1 \ll 8) + Byte \ 2) \gg 4) * 0.0625$$
(2)

Para enviar la temperatura a la pantalla LCD o a la computadora, cuando sea solicitada, después de cada lectura se debe realizar la conversión de punto flotante a código ASCII.

Tabla 4. Registro de temperatura.

Byte 1 del registro de temperatura						Byt	e 2 del	registr	o de te	mpera	tura				
D7	D6	D6	D4	D3	D2	D1	D0	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
T11	T10	Т9	T8	T7	T6	T5	T4	Т3	T2	T1	Т0	0	0	0	0

4.3 Expansor de Puertos

El circuito PCF8574 proporciona un puerto bidireccional de 8 bits a partir de la interfaz I²C, el chip cuenta con 3 terminales de dirección (A2, A1 y A0), dependiendo de su conexión, puede responder como esclavo desde la dirección 0x20 hasta la 0x27, por lo que en un bus I²C se pueden conectar hasta 8 puertos externos de 8 bits [7].

El PCF8574 contiene dos elementos de estado en cada terminal, uno para salida y otro para entrada, así como transistores y diodos de protección. Esto hace que no se requiera de una configuración para que las terminales sean entradas o salidas y, por lo tanto, el PCF8574 no incluye registros internos como otros dispositivos I²C. Su operación es simple, si desde un maestro se envía una SLA + W seguida de un dato, el dato se almacena en los elementos de estado de salida y su valor se ve directamente reflejado en las terminales, por el contrario, si se envía una SLA + R seguida de una lectura, el maestro obtendrá el valor contenido en los elementos de estado de entrada. El PCF8570 también contiene una salida que indica un cambio en las terminales, que se puede emplear para provocar una interrupción en un microcontrolador.

Con el PCF8574 se ha comercializado un módulo para el manejo de un LCD alfanumérico, este se muestra en la figura 9, así como un diagrama de conexiones con un ATMega328P y un LCD. Se observa en el diagrama que el PCF8574 responde a la dirección 0x27 y que el puerto solo trabaja como salida, por lo que la terminal de interrupción del PCF8574 es ignorada.



Figura 9. Expansor de puertos y módulo comercial para el manejo de un LCD.



Un LCD se puede manipular con una interfaz de 4 u 8 bits, en [4] se describe la operación del LCD y la forma de conectarlo e inicializarlo con ambas configuraciones. Cuando se utiliza al expansor de puertos solo se dispone de 8 bits, por lo que se debe emplear la interfaz de 4 bits para incluir las señales de control, además de los datos. En la tabla 5 se muestra la conexión de las terminales del expansor de puertos con las terminales del LCD.

Terminal PCF8574	Terminal LCD	Función
P0	RS	Selecciona un comando (RS = 0) o un dato (RS = 1)
P1	RW	Selecciona una escritura (RW = 0) o una lectura (RW = 1)
P2	E	Habilitación del LCD
P3	А	Ánodo del LED que ilumina el LCD
P4	D4	Terminal 4 del bus de datos
P5	D5	Terminal 5 del bus de datos
P6	D6	Terminal 6 del bus de datos
P7	D7	Terminal 7 del bus de datos

Tabla 5. Conexión del LCD con el expansor de puertos.

En [4] también se describe la biblioteca LCD.h, para este proyecto, sus funciones se adecuaron por emplear la interfaz TWI, se realizó la función *TWI_Sec_Esc_Dato(uint8_t dato, uint8_t esclavo)*, la cual ejecuta una secuencia para escribir el dato en el esclavo indicado, esta función es llamada cada que se requiere escribir un dato en el puerto del LCD, salvo este cambio, la estructura de las funciones en la biblioteca LCD.h se mantiene.

4.4 Sensor de color

El módulo TCS34725 es un sensor digital de color con interfaz I²C, que proporciona los valores RGB de un objeto posicionado frente al sensor, así como la intensidad de la claridad presente, que puede emplearse para normalizar los valores del color en un entero de 8 bits [8]. En la figura 10 se muestra al módulo TCS34725 con la organización a bloques del sensor, se puede ver que la detección se realiza con 4 fotodiodos que responden a diferentes longitudes de onda, en la misma figura están los espectros de la respuesta de cada uno de los fotodiodos.



Figura 10. Sensor de color TCS34725, organización y respuesta relativa.

El módulo TCS34725 responde como esclavo a la dirección 0x29 y puede operar a una frecuencia máxima de 400 kHz. En el diagrama a bloques se observa que el sensor puede provocar una interrupción cuando el valor del color claro está fuera de los límites superior e inferior establecidos.



También se puede configurar un registro de persistencia para que la interrupción se produzca después de varias fallas. Estas características se configuran en los registros internos, pero no son utilizadas en el presente sistema.

Dirección	Registro	Descripción
0x00	ENABLE	Habilita al ADC de cada fotodiodo y la potencia del módulo, por ello se inicializa con 0x03
0x01	ATIME	Controla el tiempo de integración interna, se deja con 0x00 para un tiempo de 700 ms
0x0F	CONTROL	Define una ganancia para los valores digitales, se deja en 0x00 para que no tenga ganancia
0x14	CDATAL	Byte bajo del color claro
0x15	CDATAH	Byte alto del color claro
0x16	RDATAL	Byte bajo del color rojo
0x17	RDATAH	Byte alto del color rojo
0x18	GDATAL	Byte bajo del color verde
0x19	GDATAH	Byte alto del color verde
0x1A	BDATAL	Byte bajo del color azul
0x1B	BDATAH	Byte alto del color azul

Tabla 6. Re	gistros del senso	de color empleados	s en el presente sistema.
-------------	-------------------	--------------------	---------------------------

En la tabla 6 se muestran solo los registros empleados en el sistema, durante la fase de configuración de recursos, el MCU establece los valores para los 3 primeros registros y cuando se solicita, se realiza la lectura de los últimos 8 registros. Cabe señalar que para el acceso a un registro se coloca un 1 en el bit más significativo de la dirección, por ser un bit de control que autoriza su acceso.

Para cada color se obtienen 2 bytes, incluyendo al color claro, si se observa el comportamiento del sensor en la figura 10, se notará que el fotodiodo para el color claro responde a un espectro más amplio que los fotodiodos para los colores, en términos prácticos, este valor sirve para normalizar los valores de los colores con la siguiente expresión:

$$Color_{8b} = (Color_{16b}/Clear_{16b}) * 255$$
(3)

De esta forma se obtienen los valores RGB en 8 bits, normalizados al color claro presente en el entorno. Mediante transferencias por TWI se obtiene toda la información del sensor, se normaliza y en la pantalla LCD solo se muestran los valores RGB, los cuales también pueden ser enviados a una PC para replicar el color presente.

4.5 Organización del código en el ATMega328P

El código del ATMega328P contiene al programa principal (*main*), tres rutinas para la atención a las interrupciones (del temporizador 1, de la USART0 y la interrupción externa 0) y funciones de soporte que son invocadas desde los otros elementos, incluyendo las funciones de las bibliotecas TWI.h y LCD_TWI.h, la última fue una adecuación de la biblioteca LCD.h porque el LCD es manejado por medio de la interfaz TWI. El programa principal realiza las siguientes tareas:

- 1. Configura entradas y salidas del ATMega328P.
- 2. Configura la USART para una comunicación a 9600 bps, con interrupción por recepción.
- 3. Habilita y configura la interfaz TWI a 50 kHz.
- 4. Llama la función que inicializa al LCD, vía TWI.
- 5. Configura al temporizador 1 para que interrumpa cada medio segundo.



- 6. Configura la interrupción externa para detectar flancos de bajada en INTO.
- 7. Inicializa al sensor de color, vía TWI.
- 8. Lee la hora y la fecha del módulo RTC, dejando la información en cadenas globales.
- 9. Lee la temperatura del módulo TMP102, dejando su valor en una cadena global.
- 10. Escribe las cadenas con hora y fecha en el LCD.
- 11. Escribe la cadena con la temperatura en el LCD.
- 12. Lee el sensor de color, deja la información RGB en una cadena global y la escribe la escribe en el LCD.
- 13. Activa al habilitador global de interrupciones.
- 14. Entra a un ciclo infinito sin actividad, porque las tareas se atenderán por interrupciones.

El temporizador 1 genera una interrupción cada 500 ms, cuando esta ocurre, la ISR o rutina de servicio lee la hora, la fecha y la temperatura, para actualizar la información en el LCD, estas acciones repiten los pasos 8, 9, 10 y 11 del algoritmo principal. Experimentalmente se midió el tiempo desde que inicia la ISR hasta que concluye y se observó que el proceso tarda 30 ms, con el MCU operando a 1 MHz y la frecuencia de la señal SCL configurada a 50 kHz. Esto significa que la CPU invierte el 6 % de su tiempo en tareas periódicas, quedando un 94 % libre para atender las otras interrupciones.

La interrupción externa 0 genera un evento cada que se presiona un botón, en su rutina de servicio hace la lectura del color, deja los valores RGB en una cadena global y escribe la información en el LCD. Acciones que repiten el paso 12 del algoritmo principal.

La USARTO permite la comunicación con una computadora, produce una interrupción cada que recibe un comando, en su ISR identifica al comando y le da respuesta. Los comandos básicamente son caracteres ASCII que se listan y describen en la tabla 7. La información que el MCU envía es la que actualiza periódicamente el temporizador o que se genera con la interrupción externa 0, son las mismas cadenas ASCII que se muestran en la pantalla LCD. No existe la posibilidad de que se reciba un comando diferente porque se envían de una aplicación en Python que evita esa situación.

Comando	Descripción			
'A'	Envía la hora actual, una cadena de texto con el formato "hh:mm:ss".			
'B'	Envía la fecha actual, una cadena de texto con el formato "dd/mm/aa".			
'C'	Recibe la nueva hora, una cadena de texto con el formato "hh:mm:ss".			
'D'	Recibe la nueva fecha, una cadena de texto con el formato "dd/mm/aa".			
'E'	Envía la información del sensor TMP102, una cadena de la forma "Temperatura = tt.ťC"			
'F'	Envía la información del sensor de color, una cadena de la forma "R=n1 G=n2 B= n3"			

Tabla 7.	Acciones o	ue realiza el	ATMega328P	ante los	comandos	recibidos.
	100101100 0	ao iounza o	Almoguozoi		oomanaoo	100101000.

Los comandos 'C' y 'D' son para modificar la hora y la fecha, respectivamente, difieren de los otros porque además de recibir al comando, el MCU debe recibir la nueva información para actualizar la cadena que le corresponda, refrescar la pantalla LCD y respaldar la información en el módulo RTC, haciendo las transferencias por TWI. La información que el MCU recibe está en código ASCII, aunque está lista para presentarla en la pantalla LCD, debe procesarse para la escritura en el módulo RTC.

4.6 Sistema en operación

En la figura 11 se muestra al sistema funcionando, se aprecia la conexión de los 4 módulos TWI con el ATMega328P, únicamente por dos líneas, la pantalla LCD exhibe la información que se obtiene de los sensores y del módulo RTC. También están dos botones, el de la derecha es el botón de *reset*,


conectado en la terminal 1 que corresponde con PC6, y el de la izquierda es el botón de la interrupción externa, para realizar la captura del color, está conectado en la terminal 4 que corresponde con PD2. Las terminales 2 y 3 corresponden con RXD y TXD, respectivamente, estas se conectan al adaptador USB-TTL para la comunicación con la computadora. En la tabla 8 se resumen las ventajas de emplear la interfaz TWI en el primer caso de estudio.



Figura 11. Implementación física del primer caso de estudio.

Tabla 8. Ventajas de emplear la interfaz	TWI en el primer caso de estudio.
--	-----------------------------------

Ventaja	Descripción
Simplicidad en la conexión	La conexión de 4 módulos l ² C con funciones diversas utiliza solo 2 terminales del microcontrolador.
No se requieren etapas de acondicionamiento de señal	Los módulos con los sensores de temperatura y de color están acondicionados para entregar la información en formato digital.
Reutilización de código	Los 4 módulos l ² C se manipulan por medio de la biblioteca TWI.h, sin importar que su funcionalidad sea completamente diferente.
Solo se requiere de una fuente de voltaje	A pesar de que dos de los módulos empleados manejan información analógica, la alimentación del circuito solo requiere de 5 V y es tomada del puerto USB de una computadora, porque su consumo en corriente está en el orden de miliamperios.
Flexibilidad de la interfaz l ² C	Para el microcontrolador solo es información en un protocolo establecido, la diversidad de módulos l ² C comerciales que están surgiendo en el mercado hace que esta interfaz resulte altamente flexible.

4.7 Aplicación en Python

La aplicación en Python es una interfaz de usuario que muestra la información del sistema en una computadora y configura al módulo RTC. La aplicación fue realizada en la versión 3.10 de Python y se basa principalmente en dos bibliotecas: *Tkinter* para la construcción de la interfaz gráfica y *Serial* para establecer la comunicación con el ATMega328P. En la figura 12 se puede ver a la aplicación en ejecución, después del diseño de la GUI se procedió al desarrollo de las funciones que atienden los



eventos de los botones, cuando un botón se presiona se envía el comando que le corresponde y se recibe o transmite la información relacionada con el comando.



Figura 12. Interfaz en Python para la comunicación con el ATMega328P.

La aplicación utiliza 3 tipos de objetos: *Button* para crear los botones, *Label* para mostrar la información recibida y *Spinbox* para definir la hora y fecha que se va a transmitir al sistema. Se utilizan elementos *Spinbox* para asegurar que la información está en un rango válido, al ejecutar la aplicación se inicializan con la hora actual del sistema, obtenida con el apoyo de la función *datetime.now()*.

5. Red TWI con tarjetas Arduino UNO

El segundo caso de estudio consiste en una red TWI compuesta de 4 tarjetas Arduino UNO, cada una con un *shield* multifunción, como el que se muestra en la figura 13, donde se puede ver que incluye botones y displays de 7 segmentos, entre otros periféricos [9]. Los displays se manejan por medio de dos registros de desplazamiento con número de serie MC74HC595, para reducir a 3 el número de terminales empleadas por el microcontrolador de la Arduino. En la misma figura se resaltan las conexiones de la interfaz TWI y las terminales para compartir la alimentación.

Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 5, pp. 51 - 71. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022





Figura 13. Shield utilizado en cada uno de los nodos de la red TWI.

La figura 14 muestra un esquemático que ilustra la conexión de los botones y displays del *shield* con el microcontrolador, se puede ver que los botones tienen resistores de *pull-up* externos, por lo que cuando se presionan generan una transición de alto a bajo, la cual se detecta por medio de interrupciones por cambios en el puerto C, los 3 botones generan la misma interrupción y por software se detecta el botón presionado, al detectar un nivel bajo en la terminal que le corresponde.



Figura 14. Conexión de botones y displays del shield con el ATMega328P.

Tres de las tarjetas en esta pequeña red funcionan como esclavos, las direcciones a las que dan respuesta se definen como constantes, se optó por emplear las direcciones 0x01, 0x02 y 0x03, ya que la dirección 0x00 se empleará en las llamadas generales. Los esclavos se han programado para que sean contadores de eventos (con una variable global llamada *Conta*) con un valor máximo de 99, su salida se va a mostrar en los displays de 7 segmentos. El botón A1 es para incrementar la salida, el botón A2 hace un decremento y con el botón 3 el contador se fija en 50. El *shield* deja disponible al botón de *reset* con el que la salida toma nuevamente el valor de 0. Además, en los esclavos también se ha configurado su interfaz TWI para que puedan dar respuesta a comandos recibidos por medio de su dirección individual o por medio de llamadas generales.

El maestro utiliza el mismo *shield*, el botón A1 es para seleccionar al esclavo y su valor se muestra en el display de la izquierda, pudiendo ser un número entre 0 y 3. Con el botón A2 se elige el comando que se enviará al esclavo, se configuraron 5 comandos, los cuales se describen en la tabla 9, el número del comando se muestra en el segundo display de izquierda a derecha. Una vez que se ha elegido al esclavo y el comando, se puede presionar al botón A3, con el que realizan las transferencias por TWI.



Los dos displays de la derecha se utilizan para el comando 4, con el que el esclavo seleccionado envía su valor para exhibirlo en esos displays.

Comando	Nombre	Función
0	Reinicio	Conta = 0
1	Incremento	Conta = Conta + 1
2	Decremento	Conta = Conta - 1
3	Ajuste	Conta = 50
4	Lectura	Envía el valor de Conta

Tabla 9. Comandos que se manejan en la red TWI

En los primeros 4 comandos el maestro es transmisor (MT) por lo que el esclavo seleccionado es receptor (SR), estos comandos aceptan llamadas generales, con ello, sin importar el valor actual en los contadores locales, todos realizarán el cambio en forma simultánea. En el último comando, el maestro inicia como transmisor (MT) para direccionar al esclavo, luego, después de un inicio repetido, el maestro se vuelve receptor (MR) y queda en espera del dato, la lectura se hace sin reconocimiento porque no hay más datos por leer, las transferencias terminan con una condición de paro. Para el programa del maestro se utilizó la biblioteca TWI.h [4], el programa se asegura que el comando 4 no se realice con la dirección de esclavo en 0, porque una llamada general con operaciones de lectura provocaría una colisión en el bus, dado que los esclavos pueden enviar datos diferentes al mismo tiempo.

En los esclavos no se puede emplear la biblioteca TWI.h, los esclavos son pasivos en el bus, es decir, sus acciones dependen del maestro por lo que es conveniente emplear interrupciones por TWI, una interrupción se presenta cuando la bandera TWINT se pone en alto y por software se deben evaluar los bits de estado para saber cómo proceder. En la tabla 1 se describieron todos los estados posibles para los modos SR y ST, pero no todos ocurren en la presente aplicación, después de una interrupción, los estados se identifican mediante una estructura *switch-case* para su posterior atención.

5.1 Organización del Código

En el maestro se tienen dos contadores independientes, uno para elegir al esclavo y otro para el comando, estos son manejados con los botones A1 y A2, mientras que el botón A3 se utiliza para enviar el comando elegido vía TWI al esclavo que corresponde. En la función *setup()* del *sketch* básicamente se configuran las entradas y salidas, así como los recursos empleados. En la función *loop()* se hace un refresco continuo de la información en los displays para aparentar que todos están encendidos al mismo tiempo. El maestro solo maneja la interrupción por cambios en el puerto C, en la rutina de servicio se identifica al botón presionado, si se trata de A1 y A2 se hacen los ajustes en los contadores. Con el botón A3 se realiza la secuencia que envía el comando elegido, utilizando las funciones de la biblioteca TWI.h, la cual no utiliza interrupciones. Si se trata del comando 4, la respuesta del esclavo es colocada en dos displays del maestro.

Los esclavos son contadores de eventos, manejados de manera local con los botones A1, A2 y A3, con las tareas de incremento, decremento y ajuste. El contador es manejado a distancia por medio de la interfaz TWI, de la cual puede recibir alguno de los comandos listados en la tabla 9. En su función *setup()* se configuran las entradas y salidas, los recursos empleados y se establece la dirección de esclavo a la que dará respuesta. En la función *loop()* también se hace un refresco continuo de la información en los displays, similar al maestro. Los esclavos utilizan la interrupción por cambios en el puerto C para los ajustes locales del contador y la interrupción por TWI para modificar el contador a distancia o para enviar su valor actual por medio de la misma interfaz.

Cabe señalar que las interrupciones por cambios en las terminales para una tarjeta Arduino y el modo esclavo transmisor no se pueden simular con la herramienta Proteus, versión 8.9, por lo que se tuvo que probar directamente en el hardware.



5.2 Sistema en Ejecución

En la figura 15 se puede ver al sistema en ejecución, el maestro se ubica en la zona superior de las fotografías y los esclavos están en la parte inferior. En (a) se presenta al sistema después de inicializarse, por eso los contadores están con 0. Si en ese momento se presiona el botón A3 del maestro, no se observarán cambios en los esclavos porque se tiene una llamada general enviando el comando de reinicio. En (b) ya se han modificado los esclavos y muestran valores diversos. Si se presiona el botón A3 del maestro, se hará una llamada general con el comando de incremento, como resultado, se tendrán los valores 03, 13 y 56, en los diferentes esclavos.



Figura 15. Red TWI en ejecución, la tarjeta en la zona superior es el maestro y las otra son los esclavos.

Para comprender el comportamiento del sistema, en las tablas 10, 11 y 12 se exponen diferentes ejemplos de ejecución, mostrando las funciones de la biblioteca TWI.h que utiliza el maestro y el estado que perciben los esclavos cuando se genera una interrupción, con las acciones posteriores acordes con el estado. Es importante resaltar que para el ejemplo 2 (tabla 11), el maestro emite el comando y todos los esclavos lo identifican y ejecutan en forma concurrente. El tiempo de respuesta de un esclavo es mínimo, por el hecho de emplear interrupciones, solo se requieren algunos ciclos de reloj (con un periodo de 65 ns) para identificar y ejecutar el comando. Las ventajas de emplear la interfaz TWI en el segundo caso de estudio se listan en la tabla 13.

Maestro	Esclavo 3				
(biblioteca TWI.h)	Estado	Situación	Acciones		
TWI_Inicio();					
TWI_EscByte(3 << 1);	0x60	Direccionado con una SLA + W	Limpia la bandera TWINT		
TWI_EscByte(1);	0x80	Recibe el comando en TWDR	Identifica que el comando es 1 e incrementa su contador		
TWI_Paro();	0xA0	Detecta una condición de paro	Limpia la bandera TWINT		

Tabla 11. Ejemplo 2: El maestro solicita un incremento a todos los esclavos



Maestro	Todos los esclavos				
(biblioteca TWI.h) Esta		Situación	Acciones		
TWI_Inicio();					
TWI_EscByte(0);	0x70	Direccionado con una GCA	Limpia la bandera TWINT		
TWI_EscByte(1);	0x90	Recibe el comando en TWDR	Identifica que el comando es 1 e incrementa su contador		
TWI_Paro();	0xA0	Detecta una condición de paro	Limpia la bandera TWINT		

Tabla 12. Ejemplo 3: El maestro lee el contador del esclavo 1

Maestro	Esclavo 1				
(biblioteca TWI.h)	Estado	Situación	Acciones		
TWI_Inicio();					
TWI_EscByte(1 << 1);	0x60	Direccionado con una SLA + W	Limpia la bandera TWINT		
TWI_EscByte(4);	0x80	Recibe el comando en TWDR	Identifica que el comando es 4, pone en alto una bandera de lectura		
TWI_Inicio();					
TWI_EscByte ((1 << 1) + 1);	0xA8	Direccionado con una SLA + R	Escribe el valor del contador en TWDR		
TWI_LeeByte(&dato, 0)	0xC0	El dato fue transmitido sin reconocimiento	Limpia la bandera de lectura y la bandera TWINT		
TWI_Paro();	0xA0	Detecta una condición de paro	Limpia la bandera TWINT		

Tabla 13. Ventajas de emplear la interfaz TWI en el segundo caso de estudio.

Ventaja	Descripción
Simplicidad en el hardware	Solo se requiere de dos alambres y dos resistores de <i>pull-up</i> .
Comunicación multipunto	Un maestro se puede comunicar con 3 esclavos diferentes.
Ejecución concurrente	Con las llamadas generales, después de enviar un comando, todos los esclavos lo identifican y ejecutan al mismo tiempo.
Flexibilidad de la red	La red puede crecer en el número de esclavos e incluso en el número de maestros.

6. Conclusiones

Los ingenieros en electrónica, mecatrónica o áreas afines deben contar con conocimientos sólidos de la interfaz TWI, porque actualmente se están produciendo muchos módulos con funciones muy diversas y su manipulación con los registros del MCU produce código más compacto y eficiente.

La limitante real para conectar un número grande de dispositivos en un bus l²C es el tiempo de respuesta, porque la comunicación es serial y la evaluación es secuencial.

El comportamiento de un microcontrolador como esclavo transmisor se considera la principal aportación del segundo caso de estudio, porque resulta un poco confuso determinar las acciones a realizar en los diferentes estados, la actividad del maestro se debe sincronizar con el esclavo, cuando el maestro envía la SLA+R y el esclavo detecta el código de estado 0xA8, en ese momento debe colocar el dato a enviar en el registro TWDR para que se transmita cuando el maestro haga la lectura. El esclavo sabe qué dato enviar porque el modo ST sigue a un modo SR y en ese modo ya se hizo la indicación.



El segundo caso de estudio puede ser la base para sistemas con trabajo distribuido, donde el maestro requiera enviar comandos a un esclavo en particular o llamadas generales a todos los esclavos, de igual forma, el maestro podría solicitar el estado de cada uno de los esclavos. Por ejemplo, si se construye un robot con varios grados de libertad y se necesitan movimientos concurrentes, el maestro puede enviar parámetros que los esclavos van a recibir e interpretar para su posterior ejecución.

Por último, se resalta el hecho de que, aunque en el segundo caso de estudio se utilizaron tarjetas Arduino y se programaron desde el mismo entorno, los recursos del MCU se manejaron por medio de sus registros internos, consultando los bits de estado en el registro TWSR para una adecuada operación del ATMega328P en modo esclavo transmisor.

Referencias

- [1] Wireless Technology & Innovation | Mobile Technology | Qualcomm, <u>https://www.qualcomm.com/</u>, última visita en agosto de 2022.
- [2] Adafruit industries, Unique & fun DIY electronics and kits, <u>https://www.adafruit.com/</u>, última visita en agosto de 2022.
- [3] ATmega328P, 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash, <u>https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-</u> ATmega328P Datasheet.pdf, última visita en septiembre de 2022.
- [4] Santiago-Espinosa F., "El Microcontrolador ATMega328P de Microchip: Programación en Ensamblado, Lenguaje C y un enlace con Arduino", Universidad Tecnológica de la Mixteca, México, 1a. Edición, 2021. Disponible en: <u>http://repositorio.utm.mx:8080/jspui/handle/123456789/388</u>
- [5] DS1307, Serial I2C Real-Time Clock, <u>https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS1307.pdf</u>, última visita en septiembre de 2022.
- [6] TMP102, Low-Power Digital Temperature Sensor With SMBus and Two-Wire Serial Interface, https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tmp102.pdf, última visita en septiembre de 2022.
- [7] PCF8574 Remote 8-Bit I/O Expander for I2C Bus, <u>https://www.ti.com/lit/ds/symlink/pcf8574.pdf</u>, última visita en septiembre de 2022.
- [8] RGB Color Sensor with IR filter and White LED TCS34725, <u>http://www.adafruit.com/product/1334</u>, última visita en septiembre de 2022.
- [9] Getting Started With the Arduino Multifunction Shield, <u>https://www.electroschematics.com/getting-</u> <u>started-with-the-arduino-multifunction-shield/</u>, última visita en septiembre de 2022.



Sistema de Control PID Sintonizado por Ziegler-Nichols y Cohen-Coon

Ponce Reynoso Rodolfo¹, Martínez Rebolledo Miguel Ángel¹, Cano Morales Jesús², Salgado Tejada Oswalt Esteban¹ y Penca Bolteada Humberto¹*

 ¹Universidad Tecnológica de la Región Norte de Guerrero (UTRNG). Av. Catalina Pastrana S/N, Col. Ciudad Industrial, Iguala de la Independencia, C.P. 40030, Guerrero.
 ²Instituto Tecnológico Superior de Huichapan (ITESHU). Dom. Conocido s/n El Saucillo, C.P. 42411, Huichapan, Hidalgo. Correspondencia: pbh.humberto@gmail.com

Resumen

El presente artículo trata sobre el diseño de un controlador de posición PID de estructura paralelo implementado sobre un servomotor de corriente directa y sintonizado por los métodos de Ziegler-Nichols y Cohen-Coon. El algoritmo de control se implementa en un sistema electromecánico para la apertura, estrangulación y cierre de una válvula de tipo compuerta. Por tal motivo, se muestra el modelo matemático del motor de corriente directa obtenida mediante ecuaciones diferenciales y transformada de Laplace. Las ganancias de Kp, Ki y Kd obtenidas por dos métodos diferentes, se validan mediante la simulación del diagrama de bloques del sistema en Simulink y su implementación física con la ayuda de una tarjeta de desarrollo Arduino UNO. Mediante las funciones de excitación de tipo escalón y sigmoide, se generan las curvas de reacción del controlador mismas que permiten establecer los criterios de selección del método a implementar, de acuerdo con los requerimientos del sistema físico. Se observa que el tiempo de asentamiento del controlador PID sintonizado por Cohen-Coon se efectúa en 0.2 segundos más rápido que la respuesta del controlador sintonizado por Ziegler-Nichols en pruebas de posicionamiento con una entrada escalón, por lo que se consideran dichas ganancias para efectos de pruebas físicas en el Actuador de Válvulas desarrollado.

Palabras clave: Controlador PID, Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, Sistema de control, Motor de CD, Parámetros de sintonización.

1. Introducción

Una de las variables más importantes en los sistemas de control es la posición de un motor, el cual puede ser controlado de tres métodos diferentes, por control de flujo, reóstato de la armadura y control de voltaje terminal [1]. En gran parte de las aplicaciones, los motores de corriente directa se modelan como sistemas lineales y por tal razón se requieren técnicas de control lineal como algoritmos del tipo proporcional, integral y derivativo, PID o enfoque de colocación de polos, LQR, control de movimiento incremental, entre otros [2].

El control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) es el tipo de controlador más utilizado en sistemas de control [3], [4], se estima que el 90% de los sistemas con bucle de control y de ganancia derivativa establecida a cero son del tipo PID [5]. El controlador PID es óptimo cuando la dinámica del proceso a controlar es simple. Sin embargo, puede ser sustituido en procesos de control más complejos como cuando el sistema es de orden superior a dos, en sistemas que presentan retraso de tiempo dominante y sistemas con modos oscilatorios [6].

Este tipo de controlador se compone de ganancias Kp, Ki y Kd, los cuales pertenecen a los elementos proporcional, integral y derivativo respectivamente. Se encuentran conectados en paralelo y



la señal de error es tomada como entrada por cada uno de estos elementos [7]. Generalmente este sistema de control se vuelve inestable e ineficiente si se utilizan valores incorrectos de las constantes de ajuste del controlador, por esta razón, antes de instalar algún sistema de control o para aplicaciones ya existentes [8], es común proponer un método de sintonización para elegir los parámetros óptimos del controlador en base a pruebas de circuito abierto y cerrado en planta [9].

El proceso para establecer las ganancias (Kc, Ti, Td) óptimas de un controlador tipo P, I y D que permiten una respuesta aceptable de acuerdo a algún criterio de desempeño establecido se denomina sintonización [10],[11]. Existen dos tipos de métodos de sintonización, los de lazo cerrado y lazo abierto. Algunos de los métodos más utilizados para este propósito son los propuestos por: Ziegler-Nichols, Chien Hrone-Reswick, Cohen-Coon y Wang-Juang-Chan. El proceso de sintonización se divide en dos etapas: identificación y sintonización [12].

Para obtener la información dinámica de la planta es necesario una prueba experimental, se conecta la planta en lazo abierto y se excita con una entrada de tipo escalón, se registran los valores tanto de entrada como las de salida, y finalmente, se implementa alguna técnica de identificación experimental. La planta de Ziegler-Nichols es uno de los casos más estudiados porque muchos de los procesos industriales son aproximados por este tipo de sistema [13]. Este fue el primer método para obtener los parámetros del controlador PID y se basa en la respuesta escalonada medida del sistema en lazo abierto [14].

Los métodos de sintonización de Ziegler-Nichols y Cohen-Coon se aplica a las plantas que muestran una curva característica en forma de S como respuesta a una entrada escalonada en un sistema de lazo abierto [15]. La curva en forma de S se identifica por dos constantes: el tiempo de retardo L y la constante de tiempo T. Ambos métodos son relativamente fáciles de implementar, sin embargo, es importante considerar que las constantes obtenidas de Kp, Ki y Kd son aproximaciones de los valores ideales y que es necesario un ajuste de valores de manera Manual o automática si se utiliza el sintonizador de Simulink.

2. Justificación

Los métodos de Ziegler-Nichols y Cohen-Coon propuestos en el presente trabajo como técnicas de sintonización, son empleados para sistemas dinámicos que tienen una respuesta o curva de reacción sigmoidal cuando son excitados en lazo abierto a través de una señal de tipo escalón. Ambos métodos de sintonización son fáciles de implementar debido a las operaciones matemáticas simples que se requieren para encontrar los valores aproximados de las ganancias del controlador PID. Además, el método de la curva de reacción, es el único método en lazo abierto de operación manual que implementa un procedimiento de análisis gráfico.

3. Materiales y métodos

El sistema de control de posición está compuesto por un sistema embebido Arduino UNO en donde se desarrolla el algoritmo de control PID, se emplea un puente H L298N para la etapa de potencia, se utiliza un motor de corriente directa de imanes permanentes con escobillas, se emplea una caja de engranes y un Encoder de efecto Hall para la medición de la posición en tiempo real. Los elementos de control se encuentran conectados en un sistema de lazo cerrado.

Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 6, pp. 72 - 90. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022





Figura 1. Diagrama de bloques del controlador Proporcional Integral Derivativo. [imagen modificada de Maung et al., 2018]

3.1 Tarjeta de desarrollo Arduino UNO.

Arduino UNO es una placa de hardware de código abierto de bajo costo y de múltiples posibilidades de aplicación, construida a base de un microcontrolador denominado AVR de la serie ATmega328 del fabricante ATMEL, Figura 2. Este microcontrolador es una versión muy reducida de un microprocesador programable y tiene todos los elementos esenciales de un ordenador, excluyendo los dispositivos periféricos, como disco duro, tarjeta de video, teclado, etc. [16]. El Microcontrolador ATmega328, tiene 14 entradas digitales, 6 entradas analógicas, oscilador de cristal de 16MHz, una conexión USB, una alimentación tipo jack, un ICSPheader y un botón de Reset [17].



Figura 2. Tarjeta de desarrollo Arduino UNO.

3.2 Módulo puente H L298N.

El módulo puente H bidireccional L298N mostrado en la Figura 3, puede operar dos motores de corriente directa de manera independiente en un intervalo de manejo de 5V a 35V y hasta 2A por cada motor empleado [18]. Este módulo puede manejar señales de tipo PWM en sus terminales EN A y EN B, los cuales permiten aplicaciones relacionadas con el control de velocidad.



Figura 3. Módulo puente H L298N.



3.3 Encoder de efecto Hall.

Los encoders de efecto Hall permiten determinar sin contacto la velocidad de rotación y la posición a través de la medición del flujo magnético [19] generado por un imán multipolar y un sensor magnético de efecto Hall o de magneto resistencia [20]. En la Figura 4 se muestran las partes principales de un encoder de efecto Hall y su alojamiento en el motor de corriente directa.



Figura 4. Encoder magnético de efecto Hall. [imagen modificada de Sclater, 2001]

El encoder utilizado por el motor Gearmotor 37Dx57L es de tipo cuadratura con una resolución de 64 CPR si se emplean los canales A y B. Sin embargo, si se emplea un solo canal de señal, la resolución es de 16 CPR. En la Figura 5 se muestra el diagrama de conexión utilizado para la lectura de las CPR y de la velocidad del motor.



Figura 5. Diagrama de conexión electrónica para la lectura de las CPR del encoder.

Las mediciones en el microcontrolador de las cuentas por revolución CPR, permiten asegurar que una revolución sea igual a 16 CPR y que concuerda con lo que se especifica en las hojas de datos del motor eléctrico.Una vez comprobada la resolución del encoder se procede a desarrollar el programa para la adquisición de los datos relacionados con la velocidad como respuesta a una entrada de tipo escalón.

Las conexiones eléctricas mostradas en la Figura 5 se realizan de acuerdo a la Tabla 1 y corresponden al encoder y al motor eléctrico.

Los datos obtenidos de la velocidad del motor se obtienen utilizando uno de los canales del encoder del motor y se comprueban mediante el empleo de un tacómetro digital. El voltaje de



alimentación del encoder se toma de una de las fuentes del Sistema Embebido de Arduino UNO de 3.3V.

Blanco	Señal del encoder canal B
Amarillo	Señal del encoder canal A
Azul	Alimentación del encoder de 3.5 a 20V
Verde	Terminal de tierra del encoder (GND)
Negro	Alimentación del motor
Rojo	Alimentación del motor

Tabla 1. Código de colores de los cables del motor Gearmotor 37Dx57L.

Además, la señal de la velocidad del motor se requiere para obtener los parámetros del motor si se emplea el método experimental. De la misma manera, la curva de velocidad se emplea para el análisis gráfico de los métodos de sintonización de Ziegler-Nichols y Cohen-Coon cuando se tiene una entrada de voltaje de tipo escalón.

3.4 Motor de cd con escobillas e imanes permanentes.

Los Motores de corriente directa como se muestra en la Figura 6, son ampliamente utilizadas en la industria por sus excelentes características de control de velocidad, por su simplicidad de puesta en marcha, fiabilidad y costo efectivo. Sus aplicaciones pueden ser sistemas de control, automóviles, aviones, en la robótica, camiones y adaptables a variadores de velocidad e inversión rápida de giro [2], [7], [21].

Para su análisis se deben establecer modelos y procedimientos teóricos con el objetivo de determinar sus principales parámetros [22]. Estas máquinas eléctricas son una buena base para algoritmos de control avanzado debido a su compatibilidad con la mayoría de las cargas mecánicas relacionadas con las características de torque-velocidad [23].



Figura 6. Motorreductor 37DX57L POLOLU.

Esta máquina eléctrica es un motor de imanes permanentes con escobillas de 12V y una caja de engranes en configuración reductor de 131.25:1. Además, cuenta con un encoder de cuadratura de 64 CPR.

Para obtener la relación de transmisión (n) de la caja de engranes se debe contar el número de dientes de cada engrane y registrarse como se muestra en la Tabla 2 con las especificaciones de conductor y conducido para posteriormente sustituirse en la ecuación 1.



Engrane	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8	Z_9	Z ₁₀
Conductor	10		10		10		12		12	
Conducido		25		30		30		28		30

Tabla 2. Número de dientes de cada engrane.



4. Equipo de medición

Para implementar los métodos de sintonización de Ziegler-Nichols y Cohen-Coon se requiere generar una curva de reacción que puede obtenerse mediante una señal escalón, el cual se obtiene de una fuente de voltaje de CD. Así mismo, la medición de la velocidad del motor se realiza con la ayuda de un encoder, una tarjeta de Arduino UNO y un ordenador el procesamiento de las señales de la velocidad.

Para el proceso de sintonización del controlador, se utilizó un ordenador con el programa de Matlab y SIMULINK para la simulación de la planta con el objetivo de obtener las curvas de reacción de una entrada escalón y una de tipo sigmoidal.

5. Modelado del servomotor

Como caso de interés se estudiará el Metal Gearmotor 37Dx57L mm, es un motor de BDC que viene integrado con una caja de engranes, su función principal es de reducir la velocidad de rotación y aumentar el par de torsión del eje motriz.

Para desarrollar el modelo matemático se consideran las ecuaciones que aproximan la relación de las variables de entrada con las de la salida del sistema en el dominio del tiempo. Del diagrama electromecánico de la Figura 6, se deduce la ecuación diferencial eléctrica y mecánica de la planta.



Figura 7. Circuito equivalente del motor de cd y caja de engranes.

Siempre que el rotor gira, se induce en la armadura una tención llamada voltaje contraelectromotriz Vb y se obtiene a partir de la siguiente ecuación.

$$V_b = K_e \frac{d}{dt} \theta_m \tag{2}$$

Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 6, pp. 72 - 90. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022



(0)

*(***-**)

La siguiente ecuación diferencial se obtiene del diagrama eléctrico de la Figura 6, y se deduce al aplicarse la segunda ley de Kirchoff igualando la suma de las caídas de tensión en el circuito.

$$E_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{d}{dt} i_a(t) + V_b(t)$$
(3)

El par-motor puede obtenerse mediante la multiplicación de la constante de proporcionalidad Ki y corriente de armadura i_a .

$$T_m(t) = K_i i_a(t) \tag{4}$$

De manera general, la ecuación diferencial de la parte mecánica de un motor de corriente directa se obtiene al aplicarse la segunda ley de Newton, el cual relaciona la aceleración con el par producido por el motor.

$$T_m(t) = J_m \frac{d^2}{dt^2} \theta_m + B_m \frac{d}{dt} \theta_m + T_L$$
(5)

Se aplica la transformada de Laplace a las ecuaciones 2, 3, 4 y 5.

$$T_m(S) = K_i I_a(S) \tag{6}$$

$$V_b(S) = K_e S \Theta_m(S) \tag{7}$$

$$E_a(S) = L_a S I_a(S) + R_a I_a(S) + V_b(S)$$
⁽⁸⁾

$$T_m(S) = J_m S^2 \Theta_m(S) + B_m S \Theta_m(S) + T_L(S)$$
⁽⁹⁾

Se despeja la(S) de la ecuación 8.

$$I_{a}(S) = \frac{E_{a}(S) - V_{b}(S)}{L_{a}S + R_{a}}$$
(10)

Se sustituye la ecuación 10 en 6.

$$T_m(S) = K_i \frac{E_a(S) - V_b(S)}{L_a S + R_a}$$
(11)

Se despeja $\Theta_m(S)$ de la ecuación 9.

$$\Theta_m(S) = \frac{T_m(S) - T_L(S)}{J_m S^2 + B_m S}$$
(12)

Se sustituye la ecuación 11 en la ecuación 12 considerando a $T_L(S) = 0$ con el objetivo de simplificar el modelo matemático. Bajo esta consideración, durante el procedimiento de identificación del motor, los coeficientes se obtienen sin separar el motor de cd con la caja de engranes.

$$\Theta_m(S) = \frac{K_i [E_a(S) - V_b(S)]}{(J_m S^2 + B_m S)(L_a S + R_a)}$$
(13)

Se despeja a $V_b(S)$ de la ecuación 8.

$$V_b(S) = L_a S I_a(S) + R_a I_a(S) - E_a(S)$$
(14)



Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 6, pp. 72 - 90. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022

Se sustituye la ecuación 14 en 13 y se simplifica.

$$\Theta_m(S) = \frac{K_i I_a(S)}{J_m S^2 + B_m S}$$
(15)

Se sustituye la ecuación 7 en 8.

$$E_a(S) = (L_a S + R_a) I_a(S) + K_e S \Theta_m(S)$$
⁽¹⁶⁾

Se sustituye la ecuación 15 en 16.

$$E_a(S) = \frac{I_a(S)[(L_aS + R_a)(J_mS^2 + B_mS) + K_eK_iS]}{J_mS^2 + B_mS}$$
(17)

Para obtener la función de transferencia de la posición angular del motor, se emplean las ecuaciones 15 y 17.

$$\frac{\Theta_m(S)}{E_a(S)} = \frac{K_i}{S[LaJmS^2 + (LaBm + RaJm)S + (RaBm + KeKi)]}$$
(18)

Si se deriva la posición del motor y luego se obtiene su transformada de Laplace da como resultado la velocidad angular.

$$\frac{d}{dt}\theta_{\rm m} = \omega_{\rm m} \tag{19}$$

$$S\Theta_m(S) = W_m(S) \tag{20}$$

Por lo tanto, puede deducirse la función de transferencia de la velocidad angular del motor de cd relacionando la ecuación 18 con 20.

$$\frac{W_{\rm m}(S)}{E_a(S)} = \frac{K_{\rm i}}{{\rm LaJmS^2 + (LaBm + RaJm)S + (RaBm + KeKi)}}$$
(21)

A pesar de que se implementa un sistema compuesto por un motor de corriente directa y una caja de engranes, los parámetros mostrados en el modelo matemático se obtienen de manera experimental tomando las lecturas de las variables sin separar el motor eléctrico y la caja de engranes. De esta manera se puede simplificar el proceso de identificación del sistema electromecánico.

5.1 Parámetros del motor de corriente directa.

Los parámetros requeridos por el modelo matemático no se proporcionan en las hojas de datos del fabricante y por esta razón se realiza un proceso de identificación del motor de manera física dando como resultado los valores mostrados en la Tabla 3.

No.	Símbolo	Descripción	Valor con unidad
1.	R _a	Resistencia de armadura	5.55 Ω
2.	La	Inductancia de armadura	2.09 mH
3.	K_e, K_i	Constante de fuerza contraelectromotriz	1.2896 $\frac{Nm}{Amp}$
4.	J_m	Momento de inercia del motor	$3.46629945 \times 10^{-07} \frac{Kg \cdot m^2}{s^2}$
5.	B_m	Coeficiente de fricción	0.069325989 Nms

Tabla 3. Parámetros del motor de corriente directa.



Las constantes obtenidas por el método experimental mostradas en la Tabla 3, se validan comparando los resultados de la simulación en Matlab utilizando el modelo matemático y las lecturas de velocidad de manera física con la ayuda de un tacómetro, Tabla 4.

No.	Voltaje de armadura	Velocidad medida	Velocidad simulada
1.	4V	2.702 rad/s	2.52 rad/s
2.	5V	3.037 rad/s	3.15 rad/s
3.	6V	3.759 rad/s	3.78 rad/s
4.	7V	4.503 rad/s	4.41 rad/s
5.	8V	5.257 rad/s	5.04 rad/s

Tabla 4. Velocidades simuladas y medidas de manera física.

Como puede observarse, la diferencia entre las dos lecturas de velocidades tiene un error absoluto de -0.07 y la curva de reacción mostrada en la Figura 8, es la que se obtiene al implementar una señal de excitación de tipo escalón en la planta. Esta curva en forma de S, es la señal de respuesta necesaria para considerar implementar los criterios de sintonización de Ziegler-Nichols y Cohen-Coon.

6. Resultados

6.1 Sintonización del algoritmo de control PID.

Un controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) es un mecanismo genérico de control en lazo cerrado comúnmente utilizado en los sistemas de control industriales [18]. Es el tipo de controlador más utilizado en sistemas de control [4], [7], se estima que el 90% de los sistemas de control y de ganancia derivativa establecidas a cero son del tipo PID [5].

Un controlador PID calcula el valor del error como la diferencia entre la variable de proceso medido y la señal de comando [18].

Obtención de las ganancias del controlador PID por el método de Ziegler-Nichols.



Figura 8. Análisis gráfico de la respuesta de la planta a una entrada escalón.





Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 6, pp. 72 - 90. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022

$$K_p = \frac{1.2 \ (0.1575)}{0.0175} = 10.8 \tag{23}$$

$$T_i = 2L \tag{24}$$

$$T_i = 2(0.0175) = 0.035 \tag{25}$$

$$T_d = \frac{L}{2} \tag{26}$$

$$T_d = \frac{0.0175}{2} = 0.00875 \tag{27}$$

Para pasar del PID estándar al PID paralelo se aplican las siguientes ecuaciones 28, 30 y 32.

$$K_p = K_p \tag{28}$$

$$K_P = 10.8$$
 (29)

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \tag{30}$$

$$K_i = \frac{10.8}{0.035} = 308.57\tag{31}$$

$$K_d = K_p \cdot T_d \tag{32}$$

$$K_d = (10.8)(0.00875) = 0.0945 \tag{33}$$

Obtención de las ganancias del controlador PID por el método de Cohen-Coon.

$$K_p = \frac{T}{L} \left(\frac{4}{3} + \frac{L}{4T} \right) \tag{34}$$

$$K_p = \left[\frac{0.1575}{0.0175}\right] \left[\frac{4}{3} + \frac{0.0175}{4(0.1575)}\right] = 12.24$$
(35)

$$T_i = \frac{L(32T + 6L)}{13T + 8L} \tag{36}$$

$$T_i = \frac{0.0175[32(0.1575) + 6(0.0175)]}{13(0.1575) + 8(0.0175)} = 0.04116$$
(37)

$$T_d = \frac{4LT}{11T + 2L} \tag{38}$$

$$T_d = \frac{4(0.0175)(0.1575)}{11(0.1575) + 2(0.0175)} = 6.23x10^{-03}$$
(39)

Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 6, pp. 72 - 90. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022



Se sustituyen los valores de Ti y Td en las ecuaciones 28, 30 y 32.

$$K_{\rm P} = 12.24$$
 (40)

$$K_i = \frac{12.24}{0.04} = 297.44 \tag{41}$$

$$K_d = (6.23x10^{-03})(12.24) = 0.076 \tag{42}$$

Los valores de las ganancias del algoritmo de control PID obtenidos por los criterios de Ziegler-Nichols y Cohen-Coon, no representan valores estrictamente ideales para la obtención de una respuesta optima del sistema de control. Más bien, son valores aproximados a aquellas constantes que se requieren para el adecuado rendimiento del sistema de control. No obstante, obtener las aproximaciones de los coeficientes ideales permiten comenzar el proceso de sintonización del algoritmo de control PID.

De acuerdo con los valores de los coeficientes de Kp, Ki y Kd mostrados en la Tabla 5, pueden obtenerse las curvas de reacción del controlador PID. Para esto deben colocarse los valores de las ganancias del controlador en el bloque de Gc(S) del diagrama mostrado en la Figura 9 o de manera simplificada en el diagrama mostrado de la Figura 10. Además, la función de transferencia de la planta Gp(S) que corresponde a la posición, se simplifica al utilizar la función de transferencia de la velocidad como puede observarse.

Tabla 5. Valores de las ganancias de Kp, Ki y Kd.

No.	Método	Кр	Ki	Kd
1.	Ziegler-Nichols	10.8	308.57	0.0945
2.	Cohen-Coon	12.24	297.44	0.076

La señal de referencia representada como V(S) en el diagrama de bloques de la Figura 9 será considerada como una señal de tipo escalón de acuerdo a lo que indica en la Figura 10.





El diagrama de bloques mostrado en la Figura 10, se construye en SIMULINK y pertenece al sistema de control de posición PID en lazo cerrado. En este diagrama de bloques, emplea la función de transferencia de la velocidad y luego multiplica por una integral para obtener la posición angular. Por otra parte, se consideran graficar la señal de referencia y la posición angular del motor con el objetivo de observar el transitorio generado por el algoritmo de control PID y el tiempo que tarda en llegar a la señal de referencia como se observa en la Figura 10.





Figura 10. Diagrama de bloques del control de posición PID en lazo cerrado.

Las configuraciones necesarias para la señal de entrada escalón dependen del tipo de motor con el que se experimente, para el caso particular de este trabajo los voltajes están acotados a un máximo de 12V considerando la hoja de datos del fabricante del motor bajo objeto de estudio.

Las curvas de reacción de la posición del motor por los métodos de Ziegler-Nichols y Cohen-Coon que se observan en la Figura 11, son de un sistema de control práctico que tienen una respuesta transitoria con oscilaciones amortiguadas antes de llegar al estado estacionario. Estas respuestas pueden ser adecuadas en los sistemas en donde no es relevante el transitorio, sin embargo, para los sistemas de control de posición es de suma importancia evitar los transitorios y por esta razón se requiere reducir el sobrepaso.



Figura 11. Respuestas transitorias del controlador PID.

El análisis del transitorio permite determinar el sobrepaso de la respuesta del sistema físico con respecto a la señal de referencia, de igual manera permite tomar las consideraciones necesarias para evitar daños al sistema dinámico a controlar y reducir el consumo de energía del motor eléctrico.

En la Tabla 6 se muestran los parámetros a considerar en las respuestas del sistema de control mismas que se localizan de forma gráfica en la Figura 12.

Uno de los parámetros más importantes a considerar en el transitorio de un sistema de control de posición es el sobrepaso máximo, la razón estriba en que los motores eléctricos están acoplados a sistemas mecánicos que permiten transformar el movimiento rotatorio a un desplazamiento de cuerpos mecánicos. Estas trayectorias pueden realizarse sobre un plano o espacio tridimensional y el sobrepaso puede dañar seriamente la planta o a los objetos que están en su contorno al no tener un mecanismo en la coordenada o posición adecuada.



No.	Parámetros	Concepto
1.	y_{max}	Sobrepaso máximo
2.	y_{ss}	Valor en estado estable
3.	t_r	Tiempo de levantamiento
4.	t_p	Tiempo pico
5.	t_s	Tiempo de asentamiento

Tabla 6. Parámetros de una respuesta transitoria.

El transitorio mostrado en la Figura 12, es la repuesta del control de posición PID con los valores de las ganancias de Kp, Ki y Kd obtenidas por el método de sintonización de Ziegler-Nichols mostrados en la Tabla 5, los cuales deben someterse a un ajuste automático con el objetivo de obtener nuevos coeficientes de las ganancias que permitan reducir el sobrepaso y el tiempo de asentamiento.



Figura 12. Transitorio del control de posición PID por Ziegler-Nichols.

En la Tabla 7 se muestra los coeficientes de Kp, Ki y Kd ajustados de forma automática con el simulador de SIMULINK. Es muy importante considerar que el ajuste automático se realiza utilizando como datos iniciales los que se obtienen a partir del análisis gráfico, mismos que se registran en la Tabla 5.

Como puede observarse en la Tabla 7, los valores de las ganancias del controlador PID son parecidos para ambos criterios de sintonización y en consecuencia la respuesta de la planta es similar de acuerdo al grafico mostrado en la Figura 14.





Figura 13. Diagrama de bloques en Simulink.

Tabla 7. Valores	de las ganan	cias de Kp, Ki y I	Kd ajustadas	por Simulink.
------------------	--------------	--------------------	--------------	---------------

No.	Método	Кр	Ki	Kd
1.	Ziegler-Nichols	19.3919	43.5178	0.148
2.	Cohen-Coon	19.5451	44.03	0.11997



Figura 14. Control de posición PID ajustado por SIMULINK.

De manera muy estricta si se desea evitar cualquier sobrepaso puede conseguirse si se reajustan los valores de las ganancias obtenidas por SIMULINK de forma manual. Este proceso consiste en cambiar los coeficientes de forma manual basándose en la respuesta que se observe en el simulador. En la Figura 15 se muestra las curvas de posición sin el transitorio y con un tiempo de asentamiento de 0.7 segundos, esta respuesta de posicionamiento se obtiene al emplear los valores de las ganancias del controlador PID mostrados en la Tabla 6.

En la Tabla 8, se muestran los valores de Kp, Ki y Kd reajustados de forma manual y empleados en el diagrama de bloques de la Figura 13.

Tabla 8. Va	alores de la	s ganancias d	le Kp, Ki y	v Kd ajustadas	de forma manual.
-------------	--------------	---------------	-------------	----------------	------------------

No.	Método	Кр	Ki	Kd
3.	Ziegler-Nichols	20	0.5	0.8
4.	Cohen-Coon	21	0.3	0.09





Figura 15. Control de posición PID reajustado de forma manual.

El diagrama de bloques de la Figura 16, permite comparar la respuesta de la planta cuando se trata de una señal de entrada de tipo sigmoidal como posición de referencia. La razón por la que se emplea una señal sigmoidal estriba en que la curva de reacción es suave y que para aplicaciones de posicionamiento real se emplean trayectorias ya definidas.



Figura 16. Diagrama de bloques del control de posición PID con una entrada tipo sigmoide.

Como puede observarse en la Figura 17, la respuesta de la planta a una señal de tipo sigmoidal no presenta un sobrepaso en la posición de acuerdo con los criterios de sintonización de Ziegler-Nichols y Cohen-Coon.



Figura 17. Control de posición PID por Ziegler-Nichols.



Finalmente, las ganancias del controlador tipo PID se probaron en la planta mostrada en la Figura 18 con el fin de validar la respuesta de posicionamiento del sistema de control de apertura, estrangulamiento y cierre de la válvula de compuerta. Este sistema electromecánico corresponde a un Actuador desarrollado para instalaciones de tomas domiciliarias con el fin de regular la presión de agua potable que superan los 5 Kg/cm².



Figura 18. Actuador de Válvulas para tomas domiciliarias.

La ventaja principal de los métodos de sintonización propuestos en este artículo, es el establecimiento aproximado de las ganancias ideales del controlador PID mediante el análisis grafico de la curva de reacción de la planta sometida a una señal de excitación de tipo escalón. Mismo, que se traduce en un menor tiempo destinado para determinar los valores que estabilizan al sistema de control. De igual manera, antes de implementarse las ganancias Kp, Ki y Kd al sistema físico, puede observarse en SIMULINK la respuesta dinámica de la planta. De esta manera, existe un ahorro de energía y no se somete a riesgos físicos el sistema a controlar.



Figura 19. Partes principales del Actuador.



En la Figura 19 se muestran las partes principales del actuador que permiten comprender el funcionamiento del sistema mecánico. Así también, en la Figura 20 se muestran las curvas características de la presión en la tubería durante la apertura y cierre de la válvula de compuerta.



Figura 20. Curvas de presión aguas arriba.

Los cambios de presión mostrados en la Figura 20, son ejemplos claros de lo que sucede constantemente en una toma domiciliaría y que en casos de sobre cargas de presión en las redes de distribución, este tipo de fluctuaciones, pueden dañar las instalaciones hidráulicas.

La atenuación o reducción del transitorio de presión mostrado en la Figura 21 durante el cierre de la válvula de compuerta, es el resultado del control de posición PID sintonizado por Cohen-Coon. De esta manera, se observa la eficiencia del controlador que puede ser de gran ayuda en la protección contra las oscilaciones de presiones durante la apertura, estrangulamiento y cierre de las válvulas de compuerta.



Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 6, pp. 72 - 90. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022



Cierre automático de la válvula

Apertura automática de la válvula



Figura 21. Respuesta de la presión operada por el Actuador automático.

7. Conclusiones

Los métodos de sintonización propuestos en el presente trabajo constituyen las bases del control PID de sistemas automáticos para simplificar el proceso de aproximación y obtención de los valores de las constantes Kp, Ki y Kd. Además, los criterios de Ziegler-Nichols y Cohen-Coon son métodos gráficos basados en el análisis de la curva de reacción de una entrada de tipo escalón, lo cual permite evitar procedimientos empíricos para la obtención de las ganancias del controlador.

Se observó el resultado en el motor eléctrico sujeto a un sistema de control de posición Gearmotor 37DX57L, lo cual puede decirse que los valores obtenidos de las ganancias del controlador por los métodos antes expuesto, son satisfactorios para las aplicaciones de apertura, estrangulamiento y cierre de una válvula de compuerta.

Durante las pruebas de control de posición se pudo observar sobrepasos y se corrigieron mediante el reajuste de las ganancias Kp, Ki y Kd con el sintonizador automático de SIMULINK. Posteriormente se consideró una respuesta más estricta con relación a la señal de referencia por lo que se reajusto los valores obtenidos por SIMULINK de forma manual. Los resultados obtenidos finalmente cumplieron ampliamente los objetivos planteados para un sistema de control de posición con una señal agresiva como lo es una entrada escalón.

Por otra parte, se realizaron simulaciones con SIMULINK con una señal de referencia de tipo sigmoide misma que corresponde a una señal de entrada menos agresiva. Por lo tanto, se recomienda para futuros trabajos sobre este tema considerar implementar una señal sigmoidal de forma real a la planta y observar su respuesta física si concuerda con su simulación.

Referencias

- [1] Chotai, J., & Narwekar, K. (2017, December). Modelling and position control of brushed DC motor. In 2017 International Conference on Advances in Computing, Communication and Control (ICAC3) (pp. 1-5). IEEE, 2017.
- [2] Dohmke, T., & Gollee, H. (2007). Test-driven development of a PID controller. *leee Software*, *24*(3), 44-50.
- [3] Moradi, S. Y., & Saeedi, E. (2016). Controlling DC Motor Position, Using PID Controller Made by PIC Microcontroller. *Moradi, Seyed Yahya & Saeedi, Enayatallah.*(2016).
- [4] Fuentes, M. A. C., Rivera, C. M. C., Gomez, L. D., & Paredes, J. M. H. Control de Posición de un Motor DC por Asignación de Polos.



- [5] Knospe, C. (2006). PID control. *IEEE Control Systems Magazine*, *26*(1), 30-31.
- [6] Åström, K. J., Hägglund, T., & Astrom, K. J. (2006). *Advanced PID control* (Vol. 461). Research Triangle Park: ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society.
- [7] Moradi, S. Y., & Saeedi, E. (2016). Controlling DC Motor Position, Using PID Controller Made by PIC Microcontroller. *Moradi, Seyed Yahya & Saeedi, Enayatallah.* (2016). Controlling DC Motor Position, Using PID Controller Made by PIC Microcontroller.
- [8] Ziegler, J. G., & Nichols, N. B. (1942). Optimum settings for automatic controllers. *trans. ASME*, *64*(11).
- [9] Bennett, S. (1993). Development of the PID controller. *IEEE Control Systems Magazine*, *13*(6), 58-62.
- [10] Joseph, E. A., & Olaiya, O. O. (2017). Cohen-coon PID Tuning Method; A Better Option to Ziegler Nichols-PID Tuning Method. *ENginerring Research*, *2*(11), 141-145.
- [11] Ruge Ruge, I. A. (2011). Optimización de señal de control en reguladores PID con arquitectura antireset Wind-Up. *Tecnura*, *15*(30), 24-31.
- [12] Alfaro, V. M. (2001). Identificación de procesos sobreamortiguados utilizando técnicas de lazo cerrado. *Ingeniería*, *11*(1-2), 27-41.
- [13] Díaz-Rodríguez, I. D., Han, S., & Bhattacharyya, S. P. (2019). *Analytical design of PID controllers*. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer International Publishing.
- [14] Ali, A. M., Mohammed, A. H., & Alwan, H. M. (2019). Tuning PID Controllers for DC Motor by Using Microcomputer. *Int. J. Appl. Eng. Res*, *14*(1), 202-206.
- [15] Patel, V. V. (2020). Ziegler-Nichols tuning method. *Resonance*, *25*(10), 1385-1397.
- [16] Céspedes Machicao, M. (2017). Características de las placas arduino. *Universidad Autónoma Juan Misael Saracho*, 2-7.
- [17] Georgitzikis, V., Akribopoulos, O., & Chatzigiannakis, I. (2012). Controlling physical objects via the internet using the arduino platform over 802.15. 4 networks. *IEEE Latin America Transactions*, *10*(3), 1686-1689.
- [18] Maung, M. M., Latt, M. M., & Nwe, C. M. (2018). DC motor angular position control using PID controller with friction compensation. *International journal of scientific and research publications*, *8*(11), 149.
- [19] Sclater, N. (2011). *Mechanisms and mechanical devices sourcebook*. McGraw-Hill Education.
- [20] Moreno, M. A. O., & Zúñiga, E. (2018). ENCODER MAGNÉTICO PARA MEDICIONES ANGULARES DE ALTA PRECISIÓN. Pistas Educativas, 38(120).
- [21] Sahoo, S., Subudhi, B., & Panda, G. (2015, June). Optimal speed control of DC motor using linear quadratic regulator and model predictive control. In 2015 international conference on energy, power and environment: towards sustainable growth (ICEPE) (pp. 1-5). IEEE.
- [22] Mercado, J. L. L. (2005). Control en Posición de Servomecanismos de Corriente Directa. *México DF, Noviembre de*.
- [23] Deb, P. B., Saha, O., Saha, S., & Paul, S. (2017). Dynamic model analysis of a dc motor in MATLAB. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 8(3), 57.



Estación Robótica como Equipo Didáctico para la Enseñanza de la Mecatrónica

Aguirre Cerrillo Fabio Abel¹, Torres del Carmen Felipe de Jesús², Luna Castro Arturo¹ y Pablo Aguirre Jonathan Alexis¹

¹Departamento de Metal-mecánica TecNM/Instituto Tecnológico de Lázaro Cárdenas ²Departamento de Ingeniería Mecánica / Universidad de Guanajuato <u>fabio.aguirre@lcardenas.tecnm.mx</u>

Resumen

En este documento se presenta la integración y colaboración de un robot dentro de una estación robótica para ser usada como equipo didáctico en la enseñanza-aprendizaje de la mecatrónica. La estación es una herramienta pedagógica del laboratorio para que los estudiantes cuenten con entrenamiento de un sistema mecatrónico que simula un proceso industrial. Se trata de un equipo que tiene la finalidad de trabajar en la manipulación de piezas para realizar un proceso relativamente sencillo al obtener un producto como resultado de un ensamble entre dos piezas. Se explican los diferentes módulos y la relación que tienen dentro de la estación robótica. Se puede ver el diseño mecánico y los elementos que la componen para realizar los movimientos al utilizar actuadores neumáticos y eléctricos. Además se describe la forma del control de los actuadores y las señales que se requieren para el trabajo y la operación entre los diferentes módulos.

Palabras clave: estación robótica, mecatrónica, módulos, ensamble, producto

1. Introducción

La industria actual de la fabricación avanzada depende en gran medida de la mecatrónica, robótica y de las técnicas de automatización, los cual las convierte en unos campos profesionales de rápido crecimiento. El número de instalaciones robotizadas aumenta a un ritmo acelerado en todo el mundo impulsado por la necesidad creciente de productividad y eficiencia en la industria. La mayor parte de los fabricantes ya ha integrado, en mayor o menor medida, la tecnología robótica en su empresa [1]. La robótica es un elemento indispensable para la industria 4.0 [2].

Desde el 2005 la *International Federation Of Robotics* ha publicado una lista de los 10 beneficios clave de la robótica [3]:

- 1. Reducir los costos operativos.
- 2. Mejorar la calidad y consistencia del producto.
- 3. Mejorar la calidad de trabajo para los empleados.
- 4. Aumentar la producción.
- 5. Aumentar la flexibilidad de fabricación de productos.
- 6. Reducir el desperdicio de material y que aumente el rendimiento.
- 7. Cumplir con las normas de seguridad y mejorar la salud y la seguridad en el lugar de trabajo.
- 8. Reducir la rotación laboral y a la dificultad de contratar trabajadores.
- 9. Reducir los costos de capital.
- 10. Ahorrar espacio en área de fabricación de alto valor.



Los 10 beneficios clave en conjunto con la automatización, hace que se este cambiando la forma en que trabajamos y cada vez más, la forma en que vivimos. Los robots son una de las claves en este desafiante ritmo acelerado de cambio de vida [4]. Lo anterior también salpica a los sistemas educativos en el mundo. La industria necesita de ingenieros mecatrónicos, técnicos y operarios con los pertinentes conocimientos y habilidades de la robótica. Pero esto presenta nuevos desafíos en términos de cualificación ya que los estudiantes requieren contar con vivencias en laboratorios para su formación profesional.

En el Instituto Tecnológico de Lázaro Cárdenas perteneciente al Tecnológico Nacional de México (TecNM) se ofrece la carrera de Ingeniería Electromecánica a nivel licenciatura. Tiene un módulo de especialidad que lleva por nombre Mecatrónica y sus materias son: Mantenimiento Industrial, Electrónica de Potencia, Controladores Lógicos Programables, Tópicos Avanzados de Automatización y Robótica Industrial. De acuerdo al plan de estudios de la materia de Robótica Industrial la competencia especifica es: *Realiza los estudios de movimientos cinemáticos de un robot para su aplicación, control y programación en una estación robótica que realiza tareas con enfoque a las aplicaciones industriales.* Por tanto, el objetivo de este trabajo es contar con una estación robótica para la enseñanza de la robótica y mecatrónica que contribuya como equipo de laboratorio para que los estudiantes tengan la oportunidad de realizar prácticas que apuntalen su formación académica.

2. Método y tarea a realizar

En este punto se ha hecho un análisis de las características que debería de tener la estación robótica. La metodología llevada considera los siguientes aspectos:

- Debe ser posible la manipulación mecánica para llevar a cabo el ensamble de al menos dos piezas.
- Se tiene que contar con un trabajo colaborativo entre los componentes de la estación robótica.
- El ensamble debe de representar un proceso que simule la entrega de un producto como un ejemplo utilizado en aplicaciones industriales.
- Como ya se tiene un robot disponible en el laboratorio, el robot tiene que ser capaz de efectuar las operaciones de manipulación mecánica entre las dos piezas a ensamblar, esto es, en el diseño de las piezas a ensamblar se deben de tomar en cuenta las características del robot ya existente.
- El diseño de las piezas a ensamblar debe considerar operaciones de rotación y traslación del robot.
- La estación robótica debe ser del tipo modular con la finalidad de incorporar elementos nuevos y/o expandir la operación en trabajos futuros.
- En necesario la comunicación entre los dispositivos que controlen los diferentes módulos.
- Que como resultado del diseño y la construcción se pudieran tener productos didácticos que contribuyan para diferentes materias de la carrera de Ingeniería Electromecánica como: diseño mecánico, diseño asistido por computadora, Electrónica Analógica y digital, Circuitos Neumáticos, Mecánica de Fluidos, Robótica Industrial y Controladores Lógicos Programables.

En la figura 1 se muestran las dos piezas que se han diseñado para el ensamble utilizando un software de diseño CAD [5]. Se trata de un recipiente y una tapa para generar un producto. En la parte superior del recipiente se tiene un espacio libre y que debe de coincidir con la saliente de la tapa en el momento del ensamble. Una vez que se coloca la tapa se tiene que hacer un movimiento de giro en un ángulo de 90 grados (ver figura 2).

3. Descripción de la estación

El proceso de ensamble descrito anteriormente debe ser realizado por la estación robótica como lo muestra la figura 3. Se compone de seis módulos: 1) Módulo Alimentador, 2) Módulo Pick and Place, 3) Módulo Almacén, 4) Módulo Robot, 5) Módulo Sujeción y 6) Módulo Banda.

Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 7, pp. 91 - 106. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022





Figura 1. Piezas del ensamble.



Figura 2. Proceso de ensamble para generar el producto.



Figura 3. Módulos de la estación robótica.

1. Módulo Alimentador. Se trata de un alimentador por gravedad y que se muestra en la figura 4a. El recipiente es colocado en el alimentador. El cilindro neumático de doble efecto es el encargado de empujar el recipiente. Observar que tiene un sensor de rodillo con contacto mecánico con la finalidad de detectar la presencia del recipiente (figura 4b).

Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 7, pp. 91 - 106. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022





2. Módulo Pick and Place. Sus elementos principales se presentan en la figura 5a. La tarea es tomar el recipiente utilizando sujeción por vacío para dejarlo en el receptáculo. Para subir y bajar la ventosa se utiliza un cilindro neumático de doble efecto de 10 mm de diámetro interior y 75 mm de carrera. Sobre una estructura se tiene montado un carro eje lineal y es el encargado de realizar el recorrido de forma horizontal de izquierda a derecha y viceversa. El eje lineal realiza su movimiento por el accionamiento de un motor a pasos NEMA 23. La transmisión entre el motor a pasos y el eje lineal es por banda dentada. La carrera del movimiento horizontal es de 400 mm. Se cuenta con un sensor de rodillo y un proceso *Home* para llevar al carro del eje lineal a una posición de inicio (ver figura 5b). Al ejecutar el proceso Home (botón S1) el carro se mueve de derecha a izquierda hasta accionar el sensor de rodillo (1B2). Una vez accionado el sensor de rodillo, el motor a pasos cambia de dirección y el carro de mueve de izquierda a derecha una distancia conocida estando en su posición de inicio.



3. Módulo Almacén. Como su nombre lo indica, este módulo tiene la función de almacenar las tapas del producto tal y como se observa en la figura 6. Las tapas permanecen en este lugar hasta que el robot las toma para ser llevadas al Modulo Sujeción y de hacer el ensamble del producto.



Figura 6. Modulo Almacén.



4. Módulo Robot. Se trata del robot SCORBOT-ER 4u. Es un robot manipulador didáctico con una morfología de una cadena cinemática abierta (ver figura 7). La figura 7a muestra los eslabones del robot mientras que en la figura 7b se aprecien los 5 grados de libertad con los que cuenta. En la tabla 1 se presentan los rangos de movimiento y las velocidades en cada una de las articulaciones.



a) Eslabones del robot.

b) Giros de las articulaciones.

Figura	7.	Módulo	Robot	[6].
riguiu		modulo	110001	

Tabla 1. Capacidades de giros y velocidades del robot.				
Articulación	Rango	Velocidad efectiva		
Base	310°	20°/seg		
Hombro	158°	26.3°/seg		
Codo	260°	26.3°/seg		
Elevación muñeca	260°	83°/seg		
Giro muñeca	Mecánicamente sin límite	106°/seg		

La capacidad de carga útil máxima es de 1 kg. El movimiento de cada una de las articulaciones se realiza con servomotores de 12 VCD. Tiene una pinza mecánica de dedos paralelos como efector final con una apertura de 0 a 65 mm al ser accionada por un servomotor de corriente directa y codificador óptico [6]. El robot cuenta con un controlador llamado Controller-USB que se alimenta con 110/220 VCA. El controlador tiene entradas y salidas digitales que pueden ser usadas con la finalidad de comunicarse son el proceso. Además cuenta con un puerto Axis 7 (conector DB9), que lleva la energía y las señales para el control del módulo Banda (ver figura 8).



Figura 8. Módulo Robot.



5. Módulo Sujeción. Un mejor detalle se muestra en la figura 9. Se utiliza un cilindro neumático de doble efecto para realizar una sujeción mecánica y mantener sin movimiento al recipiente. Lo anterior ayuda para la operación del ensamble de la tapa con el recipiente al realizar el movimiento de giro. El cilindro tiene un diámetro de 10 mm y una carrera de 10 mm.

6. Módulo Banda. Una vez que el robot finaliza con el ensamble, el producto es llevado a este módulo (ver figura 10). La banda es movida por un motor reductor eléctrico que trabaja con 12 VCD. El objetivo de este módulo es llevar el producto de un lugar a otro simulando que el proceso de fabricación continua y/o que el producto es llevado a otro sitio para su empaque.



Para el control de los actuadores neumáticos se utilizan electroválvulas y en la figura 11 se muestra el circuito neumático de la estación robótica realizado con FluidSim 5 de Festo [7] [8]. Para los actuadores de doble efecto se tienen válvulas reguladoras de caudal con la finalidad de controlar la velocidad de avance y retroceso.



Figura 11. Circuito neumático de la estación robótica.

En la figura 12 se puede ver el diagrama eléctrico relacionado al circuito neumático. En la tabla 2 se describen los elementos y modelos del fabricante SMC [9]. Notar que la alimentación de las bobinas de las electroválvulas es de 2 niveles de voltaje, esto es, 12 VCD y 24 VCD.

Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 7, pp. 91 - 106. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022





Tabla 2. Elementos neumáticos de la estación robótica.					
Elemento	Marca	Modelo	Comentarios		
Filtro regulador	0Z	AW20-N02BG-ZA	Presión máxima 1 MPa		
Cilindro de expulsión		CDJ2B10-100A-B	φ = 10 mm <i>s</i> = 100 mm		
Cilindro vertical		CDJ2B10-75A-B	φ = 10 mm <i>s</i> = 75 mm		
Cilindro de sujeción		CDJ2B10-10A-B	φ = 10 mm <i>s</i> = 10 mm		
Válvulas 5/2 vías	1V1, 2V1	SYJ31-20-5MZ-M5	Bobina 24 VCD		
Válvulas 3/2 vías	4V1	SYJ51-25M-M5	Bobina 24 VCD		
Válvulas 5/2 vías	3V1	SYJ31-20-6MZ-M5	Bobina 12 VCD		
Válvula reguladora de caudal	1V2, 1V3, 2V2, 2V3	AS1201F-M5E-04A	Conector M5 manguera 4 mm		
Válvula reguladora de caudal	3V2, 3V3	AS2002F-04A	Manguera 4 mm		
Generador de vacío	4V2	ZU05S	Conexión en línea		
Ventosa		ZPR16UN-06	Conexión en T rosca M5		

Ya se ha comentado que el eje lineal es accionado por un motor a pasos. Para lograr lo anterior se utiliza el controlador de motor a pasos TB6560 y el diagrama de conexiones eléctricas se muestra en la figura 13 [10]. Las características generales son:

- Voltaje de operación 10-35 VCD.
- Control de ajuste de corriente.
- Corriente máxima de 3 A.
- Control de ajuste de paso 1, 1/2, 1/4, 1/8 y 1/16.
- Control de dirección.

El controlador TB6560 es compatible con sistemas TTL 5V y se requiere de dos pines para el control. Si el pin de *Dirección* se encuentra en *estado lógico 0* el motor a pasos puede girar en sentido de las manecillas del reloj. Si su estado es *lógico 1* entonces puede girar en dirección contraria. El otro pin de control es el *pulso de trabajo*. Si se aplican 400 pulsos y el controlador TB6560 se encuentra configurada con un ajuste de paso de ½ para un motor de 200 pulsos/rev, el motor a pasos gira una revolución y el eje lineal se desplaza 40 mm. Por tanto se tiene que 40 mm/400 pulsos da como resultado una resolución de 0.1 mm/pulso.



Figura 13. Control del motor a pasos.



Se disponen de dos controladores el control de los diferentes módulos mostrados en la tabla 3: controlador del robot Controller-USB [12] y Controlador Manipulador. Los elementos principales del Controlador Manipulador son:

Tabla 3. Relación módulos controlador.					
Nombre	Nombre	Comentarios			
Modulo Alimentador Modulo Pick and Place	Controlador Manipulador	Incluye tarjeta optoacoplada, Arduino Uno, shield clemas y un relay shield. Se programa con el IDE de Arduino			
Modulo Robot Modulo Sujeción Modulo Banda Transportadora	Controller-USB	Controlador propio del robot SCORBOT-ER 4u Se programa con software del robot			

- Tarjeta optoacoplada DST-1R8P-N. Contiene elementos electrónicos que recibe señales digitales de con niveles de voltaje de 24 VCD y proporciona señales de salida con niveles lógicos TTL de 5 VCD.
- Arduino Uno. Es una placa basada en el microcontrolador <u>ATmega328P</u>. Contiene pines que se pueden configurar como entradas y salidas en niveles de voltaje de 5 VCD [11]. En este elemento se realiza la programación para el control de los diferentes elementos de los módulos y la comunicación hilo a hilo con el controlador Controller-USB.
- Shield clemas. Facilita la conexión eléctrica ya que permite atornillar los cables a una clema para garantizar conexiones seguras a los pines de entrada y salida. Se monta directamente sobre el Arduino Uno.
- Relay shield. Contiene 4 relevadores para proporcionar la energía necesaria para activar o desactivar las electroválvulas de los módulos que le correspondan. El control se realiza con la programación en el Arduino Uno. Se monta directamente sobre el shield clemas.

En la figura 14 se muestra una fotografía del Controlador Manipulador y en la figura 15 se puede ver un diagrama de las conexiones eléctricas.

- Se cuenta con 5 señales de entrada a un voltaje de 24 VCD.
- Se muestran los 5 pines de entrada para el Arduino Uno y son los pines 3, 10, 11, 12 y 2.
- El botón pulsador S1 es una señal para ejecutar el proceso Home.
- El botón pulsador S2 es una señal para ejecutar el inicio del proceso.
- La señal R2_ROBOT es una señal de comunicación que viene del Controller-USB.
- Se puede ver que los 6 pines de salida para el Arduino Uno son los pines 4, 5, 6, 7, 8 y 9.



Figura 14. Fotografía del Controlador Manipulador.





Figura 15. Diagrama de conexiones del Controlador Manipulador.

- Los pines 4, 5, 6 y 7 del Arduino Uno son para activar los relevadores K4, K3, K2 y K1 respectivamente del Relay shield.
- Al activar las bobinas K1, K2 Y K3 (pines en el orden 7, 6 y 5) se proporciona energía a las bobinas 1M1, 2M1 y 3M1 respectivamente (ver figura 10).
- Energizando la bobina K4 se tiene una señal de comunicación que va hacia el Controller-USB.
- Los pines 8 y 9 se dirigen a la tarjeta controladora del motor a pasos TB6560 (ver figura 12).

En la figura 16 se puede ver el panel frontal del Controller-USB [12] y la figura 17 muestra las conexiones del Controller-USB utilizadas de manera conceptual. Si se cierra el contactor K4, quiere decir que se ha activado el pin 4 de salida del Arduino Uno con la finalidad de hacer una comunicación hilo a hilo entre el Controlador Manipulador y con Controller-USB. De la misma manera, si se quiere mandar un bit de información del Controller-USB al Controlador Manipulador se activa la salida por relevador 2 al energizar la bobina *R2_ROBOT*. Con la activación o desactivación de la bobina *R1_ROBOT* se permite el flujo de energía para la bobina de la electroválvula 3M1 y así controlar el cilindro de sujeción del Módulo Sujeción (ver figuras 11 y 12). El motor reductor eléctrico del Módulo Banda se gobierna por medio del puerto Axis 7. Su control se realiza con el software del fabricante del robot SCORBOT-ER 4u.





Figura 16. Panel frontal Controller-USB [12].



Figura 17. Diagrama de conexiones Controller-USB.

4. Secuencia de trabajo

En la figura 18 se muestra el flujo de las señales para la operación de la estación robótica. Al oprimir el *Botón Home* se genera una señal *S1* que llega al Controlador Manipulador y se ejecuta el proceso Home que se ha descrito anteriormente. En el Controlador Manipulador se tiene la programación del Arduino Uno para proporcionar las señales de dirección (CW+) y pulso de trabajo (CLK+) que llegan al controlador de motor a pasos y mover el Carro eje lineal a la posición de inicio. Al oprimir el Botón Inicio se genera la señal S2 y se ejecuta el proceso de ensamble con dos secuencias de trabajo.



Figura 18. Flujo de señales.

La secuencia 1 contempla:


- 1. Se activa la bobina 1M1 de la electroválvula 1V1 y el cilindro de expulsión empuja al recipiente contenido en el Módulo Alimentador.
- 2. El recipiente activa el sensor de rodillo 1B1. Una vez activado el sensor 1B1, el vástago del cilindro vertical del Módulo Pick and Place baja por el recipiente al activarse la bobina 2M1 de la electroválvula 2V1.
- 3. Se activa la bobina 4M1 de la electroválvula 4V1 para generar el vacío y tomar el recipiente con la ventosa.
- 4. Se desactiva la bobina 2M1 de la electroválvula 2V1 y el cilindro vertical sube.
- 5. El Carro eje lineal se mueve 400 mm de izquierda a derecha manipulado las señales de dirección (CW+) y pulso de trabajo (CLK+) del controlador a motor a pasos.
- 6. Se activa la bobina 2M1 de la electroválvula 2V1 y el cilindro vertical baja para colocar al recipiente en el receptáculo.
- 7. Se desactiva la bobina 4M1 de la electroválvula 4V1 y la ventosa suelta al recipiente.
- 8. Se desactiva la bobina 2M1 de la electroválvula 2V1 y el cilindro vertical sube.
- 9. El Carro eje lineal se mueva 400 mm pero ahora lo hace de derecha a izquierda para colocarse en la posición de inicio.

Una vez que son llevados lo nueve pasos descritos anteriormente, el Controlador Manipulador activa la bobina del relevador K4. La programación se realiza con el IDE de Arduino y es descargado en el Arduino Uno. El Controller-USB recibe la señal de K4 y el robot robot SCORBOT-ER 4u se pone a trabajar de acuerdo a la Secuencia 2:

- 1. El robot parte de la posición de inicio y se mueve a la posición en donde se encuentra el recipiente en el receptáculo.
- 2. Utilizando la pinza mecánica, el robot toma el recipiente del receptáculo y lo lleva al Módulo Sujeción.
- 3. Se activa la bobina 3M1 de la electroválvula 3V1 y el cilindro de sujeción hace su trabajo.
- 4. El robot deja al recipiente al abrir la pinta mecánica.
- 5. El robot se coloca en una de las posiciones del Módulo Almacén y toma la tapa.
- 6. La tapa es llevada por el robot al Módulo Sujeción y colocada encima del recipiente (recordar proceso de ensamble de la figura 2).
- 7. El robot mantiene sujeta la tapa y la gira un ángulo de 90 grados.
- 8. La pinza mecánica del robot abre y deja la tapa.
- 9. Con la pinza mecánica, el robot toma el producto y lo coloca en el Módulo Banda.
- 10.Se activa la banda transportadora por un tiempo y el producto es llevado de un lugar a otro.
- 11. El Controller-USB activa la salida por relevador R2_ROBOT. De esta forma le avisa al Controlador Manipulador que ha acabado su trabajo.
- 12. El robot se coloca en la posición de inicio es espera de una nueva señal K4.

Cuando el Controlador Manipulador recibe la señal R2_ROBOT, el proceso de ensamble se hace nuevamente para obtener un segundo producto. Concluido el proceso del segundo producto, la estación robótica se encuentra en espera de una nueva señal al oprimir el Botón Inicio.

La programación para que el Controller-USB haga la secuencia 2 utiliza el software del fabricante del robot. El software es el RoboCell para SCORBOT-ER 4u y es instalado en una computadora [13]. El software permite a los estudiantes enseñar posiciones, escribir los programas y depurarlos. En la figura 19 se muestra una pantalla del software Robocell y la imagen se centra en observar principalmente las pestañas de: Movimiento Robot, Movimiento Manual, Enseñar posiciones y Programa – Artículo.





Figura 19. Pantalla software Robocell.

Por ejemplo, con las pestañas de Movimiento Manual o Movimiento Robot se le enseñan las posiciones 2, 3, 4, 5 y 100. Enseñar posiciones significa llevar al robot real a una posición deseada dentro del espacio de trabajo y guardarla. Ahora se procede a escribir el código y ejecutar el programa. El código del programa mostrado en la figura anterior establece las acciones que se ejecutan de forma secuencial de la línea 1 a la línea 9. En la figura 20 se tienen 5 fotografías que representan las posiciones de las acciones dadas por el programa.



5. Resultados



En la figura 21 se observa la construcción física de la estación robótica. Sobre la fotografía se han escrito el nombre de los módulos para su identificación. Las pruebas de la estación se han realizado verificado todos los módulos. También se han se han hecho pruebas en la programación.



Figura 21. Presentación física de la estación robótica.

En la figura 22 se muestran fotografías de un video grabado realizando la Secuencia 1 ya explicada en la sección anterior. La secuencia comienza oprimiendo el Botón Inicio (figura 22a).



g) h) Figura 22. Fotografías de la estación robótica realizando la secuencia 1.



En la figura 23 se muestran fotografías de un video grabado realizando la Secuencia 2. Para tal secuencia se programa en el software RoboCell y no olvidando que el Controller-USB es el elemento que proporciona las señales. Físicamente el robot SCORBOT-ER 4u es el encargado de realizar las operaciones de tomar y dejar los objetos para ejecutar las tareas en el proceso del ensamble para generar el producto.



رہ Figura 23. Fotografías de la estación robótica realizando la secuencia 2.

Es importante comentar que algunas piezas de la estación son de plástico producidas con el apoyo de una impresora 3D. El material utilizado ha sido el PLA. La impresión 3D ha traído grandes beneficios en diversos campos y se ha vuelto muy importante en la actualidad en aplicaciones de robótica, diseñadores gráficos, aeronáutica, medicina y prótesis, diseños mecánicos y otras más. Ha permitido que los diseñadores puedan materializar una gran cantidad de diseños virtuales creados en un software de CAD [14].

6. Finalidad didáctica



A lo largo del presente trabajo solo se han abordado los elementos, las características y la integración de los diferentes módulos de la estación robótica. Lo anterior implica que se tienen las condiciones y un equipo didáctico de laboratorio para diseñar e implementar actividades de aprendizaje con la finalidad de que los estudiantes las ejecuten y las desarrollen:

- 1. Se le muestra al estudiante el funcionamiento físicamente y se le pide que como producto de aprendizaje realice un resumen del proceso de ensamble de la estación robótica y de los elementos que la componen. El objetivo de esta actividad es que el alumno observe el funcionamiento y comprenda el trabajo colaborativo de un robot dentro de una estación para un proceso de ensamble en la industria.
- 2. Los archivos CAD de la estación se tienen a disposición en cualquier momento para trabajar en ensambles utilizando software de diseño. Por ejemplo, los archivos CAD del Módulo Sujeción se le comparten a los estudiantes y se les pide que hagan el ensamble correspondiente. Con lo anterior el estudiante relaciona los conocimientos de una materia con otras dentro de la retícula de la carrera logrando obtener un mensaje muy importante, esto es: los conocimientos adquiridos en una materia sirven para otras materias y tienen utilidad práctica en las aplicaciones reales industriales.
- 3. Relacionado con el punto anterior, la actividad se puede realizar en colaboración con el profesor de la materia de Diseño Asistido por computadora. Esto es una manera de fomentar el trabajo en conjunto entre profesores y que en muchos casos es llevado acabo en forma de islas.
- 4. La estación robótica tiene elementos neumáticos y que son ampliamente utilizados en la industria. Se proporciona el esquema de conexión neumático y el estudiante identifica la simbología correspondiente reconociendo los elementos físicamente. La actividad puede ser realizada desde que el estudiante toma la materia de Circuitos Hidráulicos y Neumáticos.
- 5. La estación robótica haca uso de un motor a pasos y que el movimiento giratorio se transforma en un movimiento lineal. El estudiante tiene la posibilidad de programar al microcontrolador Arduino para manipular el movimiento del carro eje lineal del Módulo Pick and Place. Lo anterior implica identificar el motor a pasos y el controlador de motor a pasos con la finalidad de generar los pulsos necesarios para el movimiento deseado.
- 6. El estudiante tiene la oportunidad de trabajar en actividades de un robot que realiza movimientos de traslación y rotación lo que le permite relacionar los conocimientos de la cinemática directa e inversa de un robot vistos en su clase de robótica. Desde luego aterriza los conceptos de los componentes y/o elementos de un robot manipulador industrial.
- 7. El estudiante tiene la oportunidad de programar y utilizar el software para que el robot haga tareas elementales de tomar y dejar un objeto. Además tiene el equipo en el laboratorio para comunicar al robot con otros dispositivos en un proceso de ensamble como un ejemplo real.
- 8. La estación robótica se puede utilizar para visitas guiadas. Se invita a los estudiantes del primer semestre de la carrera de Ingeniería Electromecánica con la finalidad de involucrarlos y motivarlos. Desde luego el mismo concepto se puede llevar a cabo para hacer la promoción de la carrera para los alumnos de nuevo ingreso y que están próximos a egresar del nivel bachillerato.

7. Conclusiones

La robótica y la mecatrónica se utilizan ampliamente en la industria y por cada segundo que pasa van teniendo una mayor penetración en diferentes aplicaciones industriales. Su integración con la sociedad requiere que se cuente con personal capacitado especializado para encarar los retos y las necesidades en la automatización de hoy en día.



Las instituciones educativas deben de participar en la solución al proporcionar los medios para que los estudiantes acumulen horas de prácticas en los laboratorios y cuenten con mayores herramientas para afrontar de la mejor manera a la vida industrial y profesional.

Con el trabajo realizado se tiene una estación robótica que integra diferentes tecnologías con los diferentes módulos para realizar un proceso de ensamble como un ejemplo de una aplicación industrial que sirve como equipo didáctico de laboratorio para el enseñanza-aprendizaje de la mecatrónica. Es necesario dar un seguimiento a la estación y generar un manual de prácticas de laboratorio e implementarlo institucionalmente para servicio de los estudiantes.

Como trabajos futuros se recomienda montar sensores de finales de carrera en los elementos neumáticos para introducir las señales al sistema de control. También es importante en sustituir al Arduino Uno por un PLC industrial, así como adquirir un HMI (human machine interface) para el monitoreo del proceso. Con la anterior, la estación robótica tendría otras características adicionales tal y como lo tienen las estaciones robóticas en las aplicaciones industriales.

Referencias

- [1] Festo Didactic SE. *"Automatización industrial* Sistemas de aprendizaje para la formación técnica", Catalogo, Esslingen Alemania, 2021.
- [2] Joyanes L. *"Industria 4.0 La Cuarta Revolución Industrial"*, Editorial Alfaomega, México, Primera Edición, 2017.
- [3] Wilson, M. *"Implementation of Robot Systems"*, Elsevier, USA, First published, 2015.
- [4] International Federation of Robotics. *"Robots and the Workplace of the future"*, Positioning paper, Frankfurt, Germany, 2018.
- [5] Gómez S. *"El Gran Libro de SolidWorks"*, Editorial Alfaomega Marcombo, España, Tercera Edición, 2020.
- [6] Inteliteck, "SCORBOT-ER 4u User Manual", Intelitek Inc., Catalog #100343 Rev. B, September 2001.
- [7] Festo Didactic SE. "FluidSim 5", Versión 5.6c, Festo Pneumatics, Germany, www.fluidsim.com.
- [8] Festo Didactic SE. "FluidSim 5 Manual", Festo Pneumatics, Germany, <u>https://www.festo-didactic.com/int-en/</u>.
- [9] SMC España, *"SMC España Catalogo de productos"*, Recuperado de <u>https://www.smc.eu/es-es/productos</u> (Marzo 2022).
- [10] Toshiba, "Modulo TB6560 Stepper Motor Driver", Manual del controlador de motor a pasos Recuperado de <u>https://www.makerguides.com/wp-content/uploads/2019/08/TB6560-Manual.pdf</u> (Junio 2021).
- [11] Reyes F. y Cid J. *"Arduino Aplicaciones En Robótica Mecatrónica e Ingenierias*", Alfaomega Grupo Editor, México, 2015, Primera Edición.
- [12] Inteliteck, "Controller-USB User Manual", Intelitek Inc., Catalog #100341 Rev. G, February 2007.
- [13] Inteliteck, "RoboCell para SCORBOT-ER 4u User Manual", Intelitek Inc., Catalog #100346 Rev. F, May 2006.
- [14] Horvath J. y Cameron R., "Mastering 3d Printing in the Classroom, Library and Lab", Apress, California, USA, 2018.



Desarrollo de un Robot Portero Utilizando la Tarjeta NVIDIA Jetson Nano

Zárate Romero María del Carmen¹, Ramírez Leyva Fermín Hugo¹ y Petrilli Barceló Alberto Elías²

 (1) Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapan de León, Oaxaca, México.
 (2) Tokyo University of Science, Tokyo, Japan. zrmariadc@gmail.com

Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo de un robot portero de bajo costo, el cual detecta una pelota lanzada con la mano e intercepta su movimiento. El algoritmo de detección y localización de la pelota se desarrolló con base en la tarjeta NVIDIA Jetson Nano para el robot de un grado de libertad, que consta de un eslabón y un motor brushless de corriente directa (BLDC) X8318S. La etapa de potencia y control del robot es realizada mediante la tarjeta ODrive que internamente tiene configurado un PID que controla la posición o velocidad del motor. Se utilizó visión estereoscópica para localizar la posición de la pelota mediante el centroide que se obtiene de las imágenes de cada cámara y con la disparidad entre ellos. En la tarjeta Jetson Nano se utiliza la biblioteca OpenCV con soporte para CUDA, lo que permite tener una velocidad máxima de procesamiento de 28 FPS. En este trabajo se muestra que con este sistema embebido es posible conseguir altas tasas de procesamiento a un costo reducido.

Palabras clave: Jetson nano, motor brushless, robot portero, visión estereoscópica.

1. Introducción

En los últimos años, la robótica ha crecido considerablemente a nivel científico, tecnológico y económico. Los robots se han vuelto importantes en la sociedad debido a que son utilizados en diferentes sectores como en la salud, industrial, educación, seguridad, transporte, entretenimiento, entre otros [1]. Haciendo énfasis en la educación, la robótica es utilizada en la resolución de problemas, matemáticas, programación, diseño, física e incluso música y arte a estudiantes de todos los niveles educativos. El surgimiento de kits de bajo costo ha sido uno de los mayores impulsores en el uso de la robótica en la educación [2]. La figura 1 muestra algunos ejemplos de robots utilizados para la educación [3][4][5].



Figura 1. Ejemplos de robots utilizados en el ámbito educativo.

El robot HERO-I, creado en 1983 por la empresa Heath, fue uno de los primeros kits utilizados para la enseñanza [3]. El robot contaba con un extenso manual para ensamblar, pero no explicaban los fundamentos teóricos de robótica o los principios del ensamblaje, por lo que no se obtenía una



experiencia satisfactoria para aprendizaje [2]. El robot Hemisson [4], de la empresa K-Team, cuenta con un microcontrolador de 8 bits y es utilizado para la enseñanza en niveles de educación media. Por otra parte, Boe bot conforma un kit que puede utilizarse para la construcción de robots móviles con ruedas, con bandas o con patas, utilizan procesadores Parallax, pero también puede utilizarse con el controlador Arduino [5].

Actualmente las competencias deportivas en la robótica se han vuelto muy populares en el mundo debido a que atraen la atención de las personas, especialmente de los estudiantes y les genera interés en la ciencia y la tecnología. Esto los motiva a estudiar en áreas relacionadas con la robótica. Dentro de estas competencias uno de los robots más populares y atractivos es el robot portero. Un robot portero tiene la tarea de detener una pelota en movimiento para evitar que entre en un área delimitada por una portería. Para ello, se requiere de una alta velocidad en los algoritmos de detección y una alta velocidad de respuesta en los actuadores. Las partes fundamentales del robot portero son la visión artificial y la teoría del control. La visión artificial o visión por computadora trata de describir el mundo que se observa a partir de una o más imágenes y reconstruir sus propiedades, tales como: forma, iluminación y distribución de color [6]. Por otro lado, la teoría del control aplicada a la robótica realiza el movimiento de las articulaciones del robot a través del uso de actuadores como un sistema de una entrada y una salida [7].

Algunos ejemplos de robots porteros y robots de juegos con pelotas son el robot portero comercial RoboKeeper, el cual ha sido utilizado en eventos de exhibición con futbolistas profesionales. Este robot emplea un sistema que consiste de una estructura metálica que sirve de soporte para las cámaras, una portería, una computadora externa y un motor trifásico de 400 V [8]. Rollin' Justin es un robot humanoide enfocado a la investigación que atrapa pelotas mediante la detección del contorno circular y de cámaras que se mueven con el robot [9]. Otro ejemplo es el robot industrial Stäubli RX90B de 6 GDL que realiza la captura de una pelota mediante estrategias de captura no prensiles de objetos esféricos [10]. En [11], se desarrolló un brazo robótico receptor de 2 GDL compuesto por un procesador digital de señales un sistema de visión de dos cámaras y dos motores. iRoboGoalie es un robot portero comercial equipado con inteligencia artificial utilizado para fútbol profesional, diversión y entretenimiento. [12]. En la figura 2 se muestran algunos robots porteros y que realizan juegos con pelotas.



a) RoboKeeper





c) Stäubli RX90B d) Brazo robótico de dos articulaciones Figura 2. Ejemplos de robots dedicados a juegos con pelotas.



En los trabajos descritos con anterioridad se tiene que en el caso de RoboKeeper y iRoboGoalie el sistema es de alto costo, incluso iRoboGoalie tiene un costo aproximado de \$16,500 dólares. En los demás casos se observó que algunos robots presentan algunas complicaciones debido a que el costo computacional de los algoritmos de visión artificial afecta considerablemente al tiempo de detección de la pelota. Además, el tiempo de respuesta de los actuadores utilizados no es el suficiente debido a que se emplean motores de baja eficiencia.

Por lo tanto, en este trabajo se propone la implementación de un robot portero de bajo costo que opere en tiempo real y funcionando con el uso de un motor de alta eficiencia que reaccione en el menor tiempo para la intercepción de la pelota. Para mejorar la respuesta del sistema debido a la alta carga computacional, se utiliza la tarjeta Jetson Nano para implementar el algoritmo de detección. A diferencia de otras tarjetas de una sola placa (Single Board Computer) se eligió la Jetson Nano por ser un sistema embebido que cuenta con una unidad de procesamiento gráfico (GPU) que permite desarrollar aplicaciones de inteligencia artificial, aprendizaje automático y procesamiento de imágenes aprovechando la potencia de los 128 núcleos Maxwell que tiene incorporada. Además, la tarjeta NVIDIA Jetson Nano cuenta con soporte para CUDA que es compatible con la biblioteca de visión artificial OpenCV.

Se elige utilizar una cámara binocular y aplicar visión estereoscópica porque este método ha demostrado ser más preciso para la estimación de profundidad respecto al uso de una cámara [13]. además no se requiere de sensores externos para estimar la profundidad [14], lo cual reduce el costo del robot portero. Para la parte de control de movimiento del robot portero se elige un motor sin escobillas de corriente directa (BLDC) debido a su alta eficiencia y su alta controlabilidad. Se espera favorecer el desarrollo del interés por la ciencia con el uso de esta plataforma en la que se ven integradas varias áreas de la ingeniería.

2. Marco teórico

Se describe a continuación la teoría utilizada para el desarrollo del robot portero.

2.1 Robot portero

Se define al robot portero como un sistema que tiene la tarea de detener una pelota en movimiento para evitar que ingrese a un área delimitada por una portería. Los elementos que componen el sistema del robot portero son un sistema de visión, actuadores que proporcionan movimiento al robot, eslabones que intercepten la pelota y una computadora que ejecute los procesos del sistema. La figura 3 muestra los elementos que conforman un robot portero, se tienen dos componentes principales: el sistema de visión y el sistema de control. Ambos sistemas son gestionados por una computadora, la cual realiza la ejecución simultánea de los procesos que se requieren en los dos sistemas.



Figura 3. Componentes del robot portero.



El sistema de visión del robot portero se encarga de localizar la posición espacial de la pelota respecto a un marco de referencia inercial, el cual se encuentra normalmente asociado a la base del robot portero. Para realizar la localización de la pelota se requiere de múltiples etapas de procesamiento de imágenes, tales como: adquisición de las imágenes, preprocesamiento de imágenes, segmentación, representación de las características de la imagen y por último reconocimiento e interpretación. Para localizar la pelota se utiliza la técnica de visión estereoscópica que utiliza dos cámaras para obtener la profundidad de un objeto, esto se logra a través del concepto de disparidad entre dos imágenes [6].

El sistema de control se encargará de realizar el movimiento del robot una posición de referencia que permita detener la pelota en movimiento. El algoritmo de control aplicado depende del actuador seleccionado, para este caso se elige al motor BLDC, el cual utiliza un control de tipo trapezoidal conformado por diferentes controladores de tipo P, PI y PID en cascada. Los diferentes controladores se activan o desactivan en función de la variable del motor que se desee controlar: corriente, velocidad o posición. El control de par se logra a través del control de corriente debido a que estas variables están relacionadas por un factor de escala.

El sistema mecánico del robot portero se encarga de interactuar con los elementos del entorno, principalmente la pelota a la cual debe interceptar. Para lograr esto, se tienen diferentes configuraciones de mecanismos, las cuales constan de articulaciones y eslabones. El robot portero más simple consta de un grado de libertad con un eslabón sujeto a un motor. Existen otros sistemas con más grados de libertad, sin embargo, son más complejos de controlar.

2.2 Tarjeta NVIDIA Jetson Nano

La tarjeta NVIDIA Jetson Nano es una computadora que permite desarrollar aplicaciones de inteligencia artificial, procesamiento de imágenes, redes neuronales y aprendizaje automático por lo que ofrece un buen rendimiento para la ejecución de altas cargas de trabajo y es compatible con CUDA [15]. En la figura 4 se muestra la tarjeta NVIDIA Jetson Nano.



Figura 4. Tarjeta NVIDIA Jetson Nano.

Algunas ventajas de esta tarjeta es que permite desarrollar proyectos de sistemas embebidos debido a su tamaño compacto, además de ser una plataforma de bajo costo. Esta tarjeta utiliza un procesador de cuatro núcleos Quad-core ARM A57 con 4GB LPDDR4 de memoria y una GPU con arquitectura NVIDIA Maxwell TM de 128 núcleos NVIDIA CUDA. La tasa de transferencia de datos es de 1.6 GHz. Algunas de las características de la Jetson Nano se muestran en la tabla 1 [15].

La tarjeta NVIDIA Jetson Nano cuenta con una arquitectura ARM que permite utilizar el sistema operativo Ubuntu hasta la versión 18.04. Los algoritmos de visión se implementan a través de la biblioteca de cómputo paralelo CUDA. Debido a que la biblioteca OpenCV es un estándar para los algoritmos de visión, se habilita a la misma con soporte para CUDA. Las unidades de procesamiento gráfico o GPU. Algunas ventajas sobre el uso de los GPUs son su alto rendimiento computacional que permite desarrollar aplicaciones paralelas.



Especificación	Descripción
GPU	NVIDIA Maxwell™ de 128 núcleos
CPU	Quad-core ARM A57 @ 1.43 GHz
Memoria	4GB 64-bit LPDDR4 25.6GB/s
Almacenamiento	microSD (Tarjeta no incluida)
Codificador de Video	4Kp30 4x 1080p30 9x 720p30 (H.264/H.265)
Decodificador de Video	4Kp60 2x 4Kp30 8x 1080p30 18x 720p30 (H.264/H.265)
Conectividad	Gigabit Ethernet, M.2 Key E
Camera	0. 2x MIPI CSI-2 conectores
Pantalla	HDMI y DP
USB	4x USB 3.0, 1x USB 2.0 Micro-B
Otros	Encabezado de 40 pines (GPIO, I2C, I2S, SPI, UART) Encabezado de 12 pines (Energía y señales relacionadas, UART) Cabezal de ventilador de 4 pines
Mecánico	100 mm x 80 mm x 29 mm

Tabla 1. Especificaciones Técnicas del Kit de Desarrollador Jetson Nano.

2.3 OpenCV

OpenCV es una biblioteca de visión por computadora escrita en C/C++ que contiene más de mil funciones dedicadas a la visión por computadora. Su principal ventaja es que es de código abierto y cuenta con múltiples interfaces para lenguajes de programación C, C++, Java y Python. Además, puede ser instalada en todos los sistemas operativos: Windows, macOS, Linux y Android [16].

2.4 CUDA

CUDA (Compute Unified Device Architecture) es una plataforma de cómputo paralelo simple desarrollada por NVIDIA que permite acelerar las aplicaciones informáticas mediante el uso de las GPU's. La programación en CUDA se realiza a través de programas desarrollados en lenguajes como C, C++, Fortran, Python y MATLAB, donde se agregan palabras clave para el paralelismo de las GPU. A nivel de hardware la GPU se divide en unidades de cómputo paralelo llamados cores. Cada core se divide en múltiples SM's (Streaming Multiprocessor). En nivel software, una función que se ejecuta dentro de la GPU recibe el nombre de kernel. Al ejecutar el kernel se realizan múltiples copias de la función, las cuales se ejecutan dentro de bloques. Se define a un bloque como una agrupación de hilos. Al realizar el programa en CUDA se tienen dos partes principales del programa. La primera parte corresponde al CPU y es conocida como host, por otro lado, el GPU corresponde al device. El proceso de programación en CUDA se puede resumir en cinco pasos que se describen a continuación [16]:

- 1. Reservar memoria para el host y el device.
- 2. Copiar datos del host a la memoria device.
- 3. Ejecutar el kernel especificando el grado de paralelismo, es decir el número de bloques y de hilos por bloque.
- 4. Después de que se finalicen de ejecutar los hilos, se copian los datos de la memoria device al host.
- 5. Se libera toda la memoria utilizada en el device y host.



2.5 Modelo pinhole

A continuación, se explica el modelo más simple que existe para una cámara, el modelo pinhole, para ello, se considera la proyección de un punto $P = \begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix}^T \epsilon \mathbb{R}^3$ en el plano de la cámara. En la figura 5 se muestra una representación del modelo pinhole.



Figura 5. Geometría del modelo pinhole.

Mediante triangulos semejantes se observa que el punto $P = [X \ Y \ Z]^T \epsilon \mathbb{R}^3$ es mapeado al punto $P = [fX/Z \ fY/Z \ f]^T \epsilon \mathbb{R}^3$, donde *f* es la distancia focal de la cámara. Este mapeo se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} fX\\fY\\Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0\\ 0 & f & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X\\Y\\Z\\1 \end{bmatrix}$$
(1)

La matriz de la expresión anterior se puede escribir como $diag(f, f, 1)[I \quad 0]$, donde diag(f, f, 1) representa la matriz diagonal de 3x3, *I* representa la matriz identidad de 3x3 y **0** es un vector 3x1 de ceros. En la ecuación (1) se asume que el origen de coordenadas del plano de la imagen es el punto principal. En general, se requiere una transformación para las coordenadas de la imagen respecto al punto principal mediante la siguiente ecuación.

$$\begin{bmatrix} fX\\ fY\\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & p_x & 0\\ 0 & f & p_y & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X\\ Y\\ Z\\ 1 \end{bmatrix}$$
(2)

La ecuación (2) se puede reescribir como:

$$\begin{bmatrix} fX\\fY\\Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & p_x\\0 & f & p_y\\0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X\\Y\\Z\\1 \end{bmatrix}$$
(3)

_ _ _ _

Si el sistema coordenado global utilizado es diferente del sistema coordenado de la cámara se puede realizar una transformación de rotación y traslación al modelo anterior para obtener:

$$\begin{bmatrix} fX\\ fY\\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & p_x\\ 0 & f & p_y\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X\\ Y\\ Z\\ 1 \end{bmatrix}$$
(4)

Las dos matrices en el lado derecho de la ecuación (4) se conocen como matriz intrínseca y matriz extrínseca. Los valores de estas matrices se encuentran mediante el proceso de calibración de las cámaras que será descrito en el siguiente apartado.



2.6 Calibración de cámaras

El sistema de visión del robot portero utiliza 2 cámaras que requieren estar calibradas previamente. La calibración es el proceso que consiste en encontrar los parámetros que definen el modelo de la cámara y son conocidos como parámetros intrínsecos y extrínsecos. Los parámetros intrínsecos son aquellos que tienen una relación entre cámara y óptica (centro óptico, distancia focal, coeficientes de distorsión y tamaño de cada píxel). Estos parámetros pueden agruparse en una matriz intrínseca como se muestra en la ecuación 5 [6].

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(5)

Se tiene que f_x y f_y son las longitudes focales de la lente de la cámara en el eje x y eje y respectivamente. c_x y c_y son las coordenadas de centro óptico de la cámara. Las unidades de los parámetros intrínsecos se consideran en píxeles [6].

Los parámetros extrínsecos dependen de la colocación física de la cámara y no de sus parámetros internos, es decir, relacionan el sistema coordenado de la cámara con el sistema coordenado global a través de una matriz de rotación $R \in \mathbb{R}^{3x3}$ y un vector de traslación $T \in \mathbb{R}^3$ [17]. Para el par de cámaras estereoscópico se requiere conocer la rotación y traslación de una cámara respecto a otra, si las dos cámaras tienen la misma orientación y están separadas por una distancia lateral se obtendrán dos imágenes paralelas. A partir de la geometría de cámaras paralelas se puede determinar la localización de un objeto en el espacio.

2.7 Geometría de dos cámaras paralelas

Para encontrar las coordenadas del punto $P = \begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^3$ a partir de las coordenadas de los planos de la imagen es necesario conocer la distancia focal *f* de las cámaras y la separación entre los centros ópticos o línea de base *B*. Aunque se presenta el análisis para la posición en el eje *X*, el procedimiento para el eje *Y* es el mismo. La figura 6 muestra dos cámaras en paralelo que observan un punto *P* en el espacio, las líneas azules representan los planos de las imágenes. Los puntos *X_L* y *X_R* (en unidades de píxeles) representan el punto *P* proyectado a los planos izquierdo y derecho respectivamente. Para este análisis el punto *P* se mide respecto a la cámara izquierda.



Figura 6. Geometría de dos cámaras paralelas.



A partir de la figura 6 se utiliza la semejanza de triángulos para encontrar la relación entre las distancias (X, X_R) y (X, X_L) . Se obtienen las ecuaciones 6 y 7.

$$\frac{X}{Z} = \frac{X_L}{f} \tag{6}$$

$$\frac{B-X}{Z} = \frac{-X_R}{f} \tag{7}$$

Despejando X_L y X_R de 6 y 7 se obtienen las ecuaciones 8 y 9.

$$X_L = f\left(\frac{X}{Z}\right) \tag{8}$$

$$X_R = f\left(\frac{X-B}{Z}\right) \tag{9}$$

Debido a que las coordenadas del punto P son desconocidas, se tiene un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas. Primero se despeja X de las ecuaciones 8 y 9, se obtiene la ecuación 10.

$$X = \frac{X_L Z}{f} = B + \frac{X_R Z}{f} \tag{10}$$

Despejando Z de la ecuación 10 se obtiene la profundidad en 11.

$$Z = f\left(\frac{B}{X_L - X_R}\right) \tag{11}$$

El denominador de la ecuación 11 recibe el nombre de disparidad y se denota como 12.

$$d = X_L - X_R \tag{12}$$

La coordenada X se obtiene de la ecuación 6 como:

$$X = Z\left(\frac{X_L}{f}\right) \tag{13}$$

Análogamente, para la coordenada Y se obtiene la ecuación 14.

$$Y = Z\left(\frac{Y_L}{f}\right) \tag{14}$$

Las ecuaciones 11,13 y 14 permiten determinar la localización de un punto en el espacio utilizando la disparidad entre las imágenes y la distancia focal.

2.8 Geometría epipolar

En un escenario real las cámaras no se encontrarán perfectamente alineadas como muestra la figura 7. Entonces, se requiere encontrar una relación entre ambas cámaras a partir de la geometría que se genera, conocida como geometría epipolar. La geometría epipolar es independiente de la estructura de la escena y depende sólo de los parámetros internos y pose relativa [18]. La geometría epipolar describe la relación entre los puntos P_L y P_R , que corresponden a la proyección del punto P sobre los planos de la imagen.





Figura 7. Geometría epipolar.

Se muestra en la figura 7 que los centros ópticos de la cámara O_L , O_R y el punto *P* generan al plano epipolar, estos vectores se escriben respecto al sistema coordenado de la cámara izquierda P_L y $P_R \in \mathbb{R}^3$ representan los vectores de los puntos P_L y P_R expresados en los sistemas coordenados izquierdo y derecho respectivamente. $R \in \mathbb{R}^{3x3}$ y $t \in \mathbb{R}^3$ representan la pose de la cámara derecha respecto la cámara izquierda. Dado que O_L , O_R , P_L , P_R y *P* son coplanares se cumple la ecuación 15.

$$P_L \cdot (t \times (RP_R + t)) = 0 \tag{15}$$

Considerando que el producto punto se puede reescribir como la transposición de un vector y expandiendo el producto cruz:

$$P_L^T(t \times (RP_R) + t \times t) = 0 \tag{16}$$

Utilizando la propiedad de vectores $t \times t = 0$ se obtiene:

$$P_L^T(t \times (RP_R)) = 0 \tag{17}$$

Desarrollando la ecuación 17 se obtiene la relación del punto P proyectado en las dos imágenes.

$$P_L^T E P_R = 0 \tag{18}$$

La matriz $E = [t]_x R$ se conoce como matriz esencial y $[t]_x$ es la matriz antisimétrica asociada al vector t. La matriz esencial relaciona los puntos P_L , P_R de ambas cámaras, es importante mencionar que estos puntos se encuentran en unidades de longitud, para relacionar las coordenadas en píxeles (\hat{P}_L , \hat{P}_R) se utiliza la matriz intrínseca de cada cámara *K* como muestran las ecuaciones 19 y 20.

$$\hat{P}_L = K_L P_L \tag{19}$$

$$\hat{P}_R = K_R P_R \tag{20}$$

Sustituyendo 19 y 20 en 18 se obtiene la relación de las coordenadas en píxeles en la ecuación 21.

$$\hat{P}_L^T F \, \hat{P}_R = 0 \tag{21}$$

La variable $F = (K_L^{-1})^T E K_R^{-1}$ es conocida como matriz fundamental y es utilizada en el proceso de rectificación del par de cámaras estéreo.

2.9 Rectificación

La rectificación de un par de cámaras estéreo consiste en transformar el par de imágenes captadas por la cámara para que las líneas epipolares de cada imagen queden alineadas horizontalmente a un mismo plano [19]. Para ello es necesario utilizar los parámetros intrínsecos y extrínsecos obtenidos del proceso de calibración. Después de rectificar el par de imágenes estéreo se



tendrá el caso para la geometría de cámaras paralelas y se podrá obtener la profundidad mediante las ecuaciones obtenidas anteriormente. En este caso se eliminó la distorsión presente en las imágenes y estas se alinearon aun mismo plano mediante el uso de CUDA para agilizar el proceso debido a que al procesar dos imágenes de manera simultánea se tiende a ralentizar el proceso de visión en un robot portero.

2.10 El motor BLDC

El motor BLDC (Brushless Direct Current) es un motor síncrono con imanes permanentes en el rotor (parte móvil) y devanados en el estator (parte fija), como se ilustra en la figura 8. Los imanes permanentes crean el flujo del rotor y el estator energizado crea polos electromagnéticos. El principio de movimiento utilizado en los motores BLDC es el mismo que el de los motores síncronos de imanes permanentes, donde el rotor (equivalente a una barra magnética) es atraído hacia los polos electromagnéticos generados por el estator. El control del movimiento del rotor requiere de energizar las fases del estator en una secuencia específica, para ello se requiere el conocimiento de la posición del rotor [20].



Figura 8. Motor BLDC de tres fases con un par de imanes permanentes.

Para suministrar energía a los devanados del estator se utiliza un conmutador electrónico o inversor que aplica impulsos eléctricos sin tener que utilizar las escobillas. Se puede suministrar corriente continua y corriente alterna a los devanados del estator, aunque se alcanza el mayor rendimiento en un BLDC al utilizar corriente continua [20]. La característica que distingue a un motor BLDC de un PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) es que la fuerza contraelectromotriz de un motor BLDC es de tipo trapezoidal en lugar de sinusoidal como en el caso de un PMSM. En la figura 9 se muestra la conmutación de un motor BLDC.



Figura 9. Fuerza contraelectromotriz de un motor BLDC.

La región de conmutación de la fuerza contraelectromotriz en un BLDC debe ser tan pequeña como es posible, pero no tan pequeña para que conmutar una fase se vuelva complicado cuando se utiliza un inversor. La parte plana de la fuerza contraelectromotriz debe ser de 120° para producir un torque suave [21]. El motor brushless de corriente directa se ha vuelto muy popular en los últimos años



destacando por sus ventajas de alta potencia, buen par y fácil mantenimiento a diferencia de los motores con escobillas.

2.11 Control de un motor BLDC

El control de un motor BLDC consiste en generar corrientes CD en las fases del motor. Este control es subdividido en dos operaciones independientes: sincronización del flujo entre rotor y estator, y control del valor de corriente [20]. Ambas operaciones se realizan en el inversor de tres fases que se ilustra en la figura 10.



Figura 10. Inversor de 3 fases en un motor BLDC.

La sincronización del flujo se obtiene a partir de la posición angular del motor, obtenida de los sensores o a través de técnicas sin sensores. A partir de una posición se determina el par de transistores apropiados (M1 a M6 en la figura 10) que deben ser encendidos. El valor de corriente se puede controlar de dos maneras diferentes: utilizando modulación por ancho de pulso (PWM) o en modo de histéresis. Para el control por PWM el voltaje de alimentación se recorta a una frecuencia fija y un ciclo de trabajo que depende del error de corriente. Existen dos tipos de manejar la conmutación en cada compuerta: corte duro y suave. En el corte duro ambos transistores son encendidos y apagados al mismo tiempo, en el corte suave sólo la compuerta superior conmuta mientras que la inferior permanece encendida. En el control por histéresis las compuertas se encienden y apagan si la corriente es mayor o menor que la corriente de referencia, es decir el error se utiliza para controlar el estado de los transistores lo cual aumenta la precisión, pero lo hace más susceptible al ruido acústico y electromagnético [20].

A partir de lo mencionado anteriormente se puede diseñar un esquema de control PID para el control de corriente de motor, como se muestra en la figura 11. El controlador PID recibe como entrada el error de corriente en el motor y como salida se tiene al ciclo de trabajo necesario en las compuertas del inversor para realizar las etapas anteriormente descritas. Es importante mencionar que en un motor BLDC el par del motor es proporcional a la corriente, por lo que se puede utilizar el esquema de la figura 11 para realizar el control de par.



Figura 11. Esquema de control PID para corriente en un motor BLDC.



Si se requiere implementar un control de velocidad se puede optar por añadir otro controlador en cascada al esquema previo, como se muestra en la figura 12. Las sintonizaciones de las ganancias en los controladores se obtienen a partir del modelo dinámico del motor o a través de métodos empíricos.



Figura 12. Control de velocidad aplicado al motor BLDC.

3. Descripción del sistema

3.1 Software

La programación del sistema se realizó mediante la tarjeta NVIDIA Jetson Nano en Linux utilizando el lenguaje C++. El sistema operativo del robot es Ubuntu 18.04. El sistema de visión se programó en C++ y se utilizó la biblioteca OpenCV habilitada para el soporte de CUDA [22]. Para habilitar el soporte de CUDA se requiere instalar la biblioteca OpenCV desde el código fuente, realizando el proceso de compilación para CUDA y CuDNN (NVIDIA CUDA Deep Neural Network). Debido a que el proceso de compilación requiere al menos 6GB de memoria RAM, se utiliza la herramienta dphys-swapfile para extender su capacidad a través de memoria de intercambio tomada de la memoria microSD. La programación del sistema de control se realizó escribiendo una biblioteca de comunicación serial para comunicar el motor brushless del sistema con la tarjeta de control ODrive Robotics, esto debido a que el framework base de la tarjeta ODrive, llamado odrivetool, está escrito en código de lenguaje Python versión 3.7, pero el sistema ubuntu 18.04 tiene instalado Python versión 3.6.8 por defecto. Utilizando una biblioteca de comunicación serial se evitan problemas de dependencias futuros para posibles actualizaciones de la herramienta odrivetool.



Figura 13. Diagrama de flujo para el algoritmo del robot portero.



El diagrama de flujo para el algoritmo de visión que se utiliza en el robot portero se muestra en la figura 13. Se observa que el proceso de detección es lineal y comienza con la adquisición de las imágenes de la cámara. Posteriormente las imágenes pasan por el proceso de rectificación que permite proyectar las imágenes obtenidas sobre el mismo plano. El siguiente paso convierte las dos imágenes del espacio de color RGB a HSV, se utiliza el espacio HSV porque es el modelo que se asemeja más a la percepción humana y por lo tanto es más fácil configurar los umbrales para realizar la detección de color. La obtención de la máscara binaria filtra el color de la pelota aplicando umbrales previamente definidos. Dado que en el proceso de segmentación algunos píxeles no pertenecen a la pelota debido al ruido en el ambiente, se requiere aplicar operaciones morfológicas para mejorar los resultados de la máscara binaria resultante.

Sí se obtiene una máscara binaria con un área mayor a un umbral previamente definido se considera que la pelota ha sido detectada. Cuando la pelota es detectada, se procede a obtener las coordenadas del centro de la pelota en píxeles, para ambas cámaras. Esto se realiza mediante el cálculo de los primeros momentos de la imagen. Se procede al determinar la disparidad entre los centroides de la imagen. Utilizando la disparidad, se obtiene la profundidad y localización espacial de la pelota. Con la posición de la pelota respecto al sistema coordenado de la cámara, se requiere del uso de transformaciones homogéneas para determinar la posición de la pelota respecto al sistema coordenado de la robot. Finalmente, dada la posición de la pelota con respecto al robot se aplican identidades trigonométricas para obtener la posición angular de referencia para el sistema de control. El ángulo de referencia se envía a la tarjeta controladora utilizando el protocolo de comunicación serial.

3.2 Hardware

En la figura 14 se observa el diagrama a bloques del sistema eléctrico que conforma el robot. El sistema consta de la tarjeta NVIDIA Jetson Nano que procesa los sistemas de visión y control. Para el sistema de visión se utiliza una cámara estéreo IMX219-83 que se encarga de la adquisición de las imágenes. Para el sistema de control de movimiento del robot se utiliza un motor brushless X8318S KV100 y un encoder de posición absoluto AS5047P. También se emplea una tarjeta de control ODrive Robotics para controlar el motor brushless. El sistema utiliza dos fuentes de alimentación: la primera es de 5V para la tarjeta Jetson Nano y la segunda es de 24 V que se emplea en la tarjeta ODrive Robotics y que alimenta el motor.



Figura 14. Diagrama a bloques de las conexiones del robot portero.

Los dispositivos electrónicos utilizados en el robot portero son los siguientes:

 Tarjeta NVIDIA Jetson Nano: La tarjeta NVIDIA Jetson Nano es una computadora de una sola placa (SBC) con Linux que utiliza un procesador de cuatro núcleos Quad-core ARM A57 con 4GB LPDDR4 de memoria y una GPU con arquitectura NVIDIA Maxwell [™] de 128 núcleos NVIDIA CUDA [15].



- Motor brushless X8318S KV100: El motor X8318S es un motor sin escobillas con potencia máxima de 2900 W y corriente continua máxima de 58 A. Además, puede ser alimentado por una batería de litio de 8-14S LiPo [23].
- Encoder AS5047P: El encoder AS5047P es un sensor magnético de posición que mide ángulos a velocidades de hasta 28,000 RPM. Tiene las interfaces SPI, PWM, UVW y ABI [24].
- Tarjeta ODrive Robotics: La tarjeta ODrive sirve para el control de motores BLDC y tiene la capacidad de controlar dos motores de manera independiente. Los modos de control que tiene son de posición, velocidad, torque y control de posición con planeación de trayectoria. Existen dos versiones de este controlador: 24 V y 56 V. En este caso se empleará el controlador ODrive V3.6 de 56 V para realizar el control del motor X8318S. La tarjeta está equipada con un microcontrolador STM32F405RGT y tiene los protocolos de comunicación I2C, USB, UART [25].
- Cámara estéreo IMX219-83: La cámara IMX219-83 es una cámara binocular que es compatible con el kit de NVIDIA Jetson Nano versión B01. Esta cámara tiene una resolución de 3280 x 3464 píxeles y un sensor Sony IMX219. Cuenta con 2 carriles MIPI CSI-2 DPHY [26].
- Fuentes de alimentación: En el sistema del robot portero se utilizaron dos fuentes de alimentación: una de 5 V para la tarjeta Jetson Nano y otra de 24 V para la tarjeta ODrive Robotics.

En la figura 15 se muestran los dispositivos empleados en la construcción del robot portero.



c) Encoder AS5047P d) Cámara estéreo IMX219-83 Figura 15. Dispositivos eléctricos utilizados en el robot portero.

4. Desarrollo

En esta sección se describe los procesos realizados para la implementación del robot. Primero se muestra el diseño asistido por computadora (CAD) y la manufactura del robot para obtener el prototipo construido. Posteriormente se muestra el desarrollo de los procesos de visión estereoscópica y control del motor BLDC para el movimiento del robot portero.

4.1 Diseño asistido por computadora

Para el desarrollo del trabajo, primero se modeló en 3D la estructura del robot portero. Para ello se empleó el software de diseño SolidWorks y se definió que el eslabón del robot portero cuente con una longitud de 30 cm. El diseño CAD del robot se muestra en la figura 16, en donde se tiene el eslabón, la portería, el motor y la cámara del sistema. En la parte superior de la portería se tienen soportes que



sujetan la cámara. Las dimensiones de la portería son de 64 x 37 x 19 cm. El espacio de trabajo del robot abarca un área de 1177.912 cm2 para los límites articulares del eslabón.



Figura 16. Diseño CAD del robot portero.

4.2 Manufactura del robot

La construcción del prototipo se realizó utilizando diferentes técnicas de maquinado:

- El eslabón del robot se manufacturó mediante fresado con un router CNC utilizando un cortador plano de 3/32". El software empleado para la generación del código G fue Mastercam.
- La carcasa del motor y los soportes de la cámara se maquinaron empleado manufactura aditiva, en este caso se utilizó impresión 3D con PLA (Ácido Poliláctico) como filamento.
- La portería se maquinó mediante la soldadura de elementos como PTE (Perfil Tubular Estructural) ligero para la parte frontal y PTE pesado para la parte trasera. También, se colocaron dos soportes de varilla redonda en la parte de atrás.

La figura 17 muestra el robot construido.



Figura 17. Construcción del robot portero.

4.3 Sistema de visión

Inicialmente se realizó el proceso de calibración de la cámara, para ello se tomó un conjunto de 20 pares de imágenes a color de 640 x 480 píxeles. Teniendo este conjunto de imágenes se procedió a obtener las matrices de los parámetros intrínsecos y extrínsecos de las cámaras. La matriz de parámetros intrínsecos de la cámara izquierda K_L y la cámara derecha K_R obtenidas del proceso de calibración se muestran en las expresiones 22 y 23.

$$K_L = \begin{pmatrix} 591.0630 & 0 & 334.0683 \\ 0 & 786.3731 & 233.1959 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$
(22)



$$K_R = \begin{pmatrix} 586.7411 & 0 & 343.0905 \\ 0 & 784.5311 & 230.7649 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$
(23)

Una vez obtenidos los parámetros intrínsecos y extrínsecos de las cámaras se proceden a rectificar las dos imágenes del par estéreo. Esto se realizó mediante el uso del GPU de la tarjeta NVIDIA Jetson Nano. En la Figura 18, se observa el par estéreo original y el rectificado.



Figura 18. Par estéreo original y rectificado.

Al par estéreo rectificado se le aplicó un filtro gaussiano para reducir el ruido presente. Posteriormente se cambió el espacio de color de la imagen al espacio HSV. Se definió un rango para el color verde de la pelota y se analizó si cada píxel de la imagen original se encuentra dentro del rango de color definido. Si el píxel se encuentra dentro del rango, entonces se considera como un elemento válido. El conjunto de los elementos válidos se almacenó dentro de una máscara binaria. Posteriormente a esta máscara binaria se le aplicaron operaciones morfológicas de apertura y cierre a cada imagen para reducir las imperfecciones y el ruido. En la figura 19 se muestran las máscaras binarias donde se tiene que únicamente se detectó la pelota en color verde.



Con las máscaras binarias se obtuvieron las coordenadas (x, y) en píxeles del centroide de la pelota en cada imagen. Posteriormente, se obtiene la disparidad y profundidad. Con la información de profundidad se obtiene el resto de coordenadas en el espacio que servirán para que el robot pueda interceptar la pelota.



4.4 Control de movimiento del motor

Teniendo las coordenadas de la pelota en el espacio se aplican unas matrices de rotación y traslación para cambiar el sistema coordenado de la cámara al sistema coordenado del motor. Una vez hecho esto, se calcula el ángulo del posible punto de impacto de la pelota al que deberá moverse el motor para posicionar el eslabón.

Para controlar el motor X8318S se instalaron los paquetes y dependencias requeridas de la ODrive en la Jetson Nano y posteriormente se configuraron los parámetros del motor brushless y el encoder AS5047P. La tarjeta de control ODrive emplea un esquema en cascada que permite la configuración en 3 diferentes modalidades: control de posición, control de velocidad y control de par. El esquema de control en cascada se muestra en la figura 20. Los diferentes controladores se activan o desactivan en función del modo de control seleccionado. El modo de par se realiza mediante el control de la corriente aplicada en los MOSFET's de la tarjeta, esto debido a que el par es proporcional a la corriente del motor, para utilizar el par como referencia del controlador se aplica un factor de escala al par de referencia para obtener la corriente de referencia.



Figura 20. Algoritmo de control en cascada utilizado por la tarjeta ODrive.

El controlador de corriente usa un control de tipo PI (Proporcional Integral). Si se utiliza el modo de control de velocidad, se activan los controladores de velocidad y corriente de manera simultánea, el controlador de velocidad en el lazo también es de tipo PI. Para el modo de posición se activa todo el lazo de control, el controlador de posición es de tipo P (proporcional). Además, puede observarse que además de los comandos de posición, velocidad y corriente, se tienen feedfordward de velocidad y corriente como entrada del lazo, estas entradas son utilizadas cuando se necesita una mejora en la respuesta del sistema.

5. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del robot portero. Primero se describe el tiempo de detección del algoritmo de visión artificial. Posteriormente, se describe la respuesta del sistema de control. Por último, se muestra la plataforma completa en funcionamiento. Para los resultados del sistema de visión se determina el tiempo total de procesamiento al detectar la pelota utilizando el GPU de la tarjeta Jetson Nano por cada ejecución. En la figura 21 se muestra el tiempo de ejecución para la etapa de detección del algoritmo de la figura 13 y se puede observar que el tiempo fue méximo de detección es de 0.0565 s, mientras que el tiempo mínimo es de 0.035 s. Este tiempo fue medido con las funciones getTickCount y getTickFrequency de OpenCV. Se obtiene la diferencia entre los ciclos al comenzar y terminar el algoritmo, posteriormente se divide el valor de la diferencia entre la frecuencia de cada ciclo de reloj para obtener el tiempo total del proceso en segundos.





Figura 21. Tiempo de procesamiento por cada detección de la pelota.

Los resultados de tiempo promedio para el total de experimentos se muestran en la tabla 2, el sistema de visión presenta un tiempo promedio de 0.0451 s para cada detección del programa de visión.

Proceso	Tiempo [s]
Adquisición de las imágenes	0.001
Carga de imágenes al GPU	0.0020
Rectificación	0.0062
Segmentación	0.0320
Descarga de imágenes del GPU	0.0017
Cálculo del centroide	0.0022
Cálculo de disparidad y profundidad	5.2425e-7
Tiempo total de procesamiento	0.0451

Tabla 2. Tiempo de los procesos del sistema de visión.

En la figura 22 se muestran algunos resultados del lazo de control en modo posición. Se observa que movimiento del motor es muy rápido por lo que actúa instantáneamente al alcanzar la posición. El error más grande en el control se presenta al elegir una posición de 90°, el cual es de 5° como se observa en la figura 22 b). Cuando se requiere un ángulo de 45° el motor tiene error de tres grados en la estimación.



a) Posición deseada de 45° b) Posición deseada de 90° Figura 22. Resultados de control de posición aplicado al robot portero.



Las pruebas de lanzamiento de la pelota a una distancia de 2 metros de la portería tienen un tiempo promedio de 1.2 s. Al considerar que el tiempo promedio de detección del algoritmo es de 0.045 s, hay un promedio de 26 FPS. Con 26 FPS procesados, se tiene que en un lanzamiento de la pelota el sistema de control es capaz de reaccionar adecuadamente para evitar una anotación en la portería. Es posible interceptar la pelota a pesar del error de posición en el movimiento del motor, esto se debe al grosor del eslabón que tiene el robot. Se tuvieron algunos problemas en el comportamiento del robot dado que el comando de posición se envía inmediatamente después de realizar el cálculo de la orientación del robot. Debido a lo anterior en ocasiones el robot portero presentaba oscilaciones mientras realizaba el seguimiento de la pelota. Como una mejora a futuro, se puede añadir una funcionalidad extra para predecir la trayectoria futura en función de las mediciones previas de la posición de la pelota. En la figura 23 se puede notar al robot interceptando la pelota en movimiento.



Figura 23. Prueba de funcionamiento del robot portero.

6. Conclusiones

La tarjeta NVIDIA Jetson Nano es una buena alternativa para implementar algoritmos de visión estereoscópica porque cuenta con 2 puertos de alta velocidad para las cámaras y una GPU. Además, es un sistema portátil que permite el desarrollo de sistemas embebidos. Utilizando la biblioteca de OpenCV con soporte para CUDA se logra reducir el tiempo de procesamiento en un 20.4% respecto al uso del CPU. A través de los resultados obtenidos se considera como trabajo futuro implementar un algoritmo de detección de pelotas menos sensible a la iluminación. La respuesta de movimiento en el robot portero presenta oscilaciones, por ello, se considera implementar un algoritmo de estimación de trayectorias futuras para reducir en número las veces que se envía el comando de posición al robot.

Referencias

- [1] Siciliano, B., y Khatib, O. "Springer Handbook of Robotics". Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2° edición, 2016.
- [2] Miller D. P., Nourbakhsh I. R., Siegwart R. "Robots for Education". Handbook of Robotics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [3] Patrick H. Stakem. "Personal Robots 1980-2014". PRRB Publishing. 1° edición, 2014.
- [4] K-Team. "Hemisson Robot". Disponible en: https://www.k-team.com/mobile-robotics-products/oldproducts/hemisson/comment-page-1, accedido: 04-07-2022.
- [5] Parallax Inc. "Boe bot Robot". Disponible en: https://www.parallax.com/boe-bot-robot/, accedido: 04-07-2022.
- [6] Szeliski R. "Computer Vision Algorithms and Applications". Springer, Heidelberg, 1° edición, 2010.
- [7] Spong, M. W., y Fujita M. "Control in Robotics". The Impact of Control Technology. IEEE Control Systems Society, 1° Edición, 2011.
- [8] Fraunhofer IML, 4attention GmbH & Co. KG. "RoboKeeper". Disponible en www.robokeeper.com, accedido: 06-07-2022.



- [9] Birbach, O., Frese, U., y Bäuml, B. "Realtime Perception for Catching a Flying Ball with a Mobile Humanoid". Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 5955– 5962, Shanghai-China, 2011.
- [10] Bätz, G., Yaqub, A., Wu, H., Kühnlenz, K., Wollherr, D., y Buss, M. "Dynamic manipulation: Nonprehensile ball catching". 18th Mediterranean Conference on Control and Automation, pp. 365–370, 2010.
- [11] Lin, C. Y., Chiu, Y. P., Lin, C. Y., y Tsai, C. R. (2014). "Development of a binocular vision based catcher robot system using DSP platform". Journal of the Chinese Institute of Engineers, 37(2), pp. 210–223, 2014.
- [12] Leverage Science and Technologies Ltd. "iRoboGoalie". Disponible en https://irobogoalie.com/, accedido: 12-07-2022.
- [13] Khusheef, A. S. (2017). "Vision-based object distance measurement using mono and stereo vision". The Iraqi Journal of mechanical and material engineering, Vol. 17, No. 4, pp. 734-744.
- [14] Mustafah, Y. M., Azman, A. W., y Akbar, F. (2012). "Indoor UAV positioning using stereo vision sensor". Procedia Engineering, Vol. 41, pp. 575-579.
- [15] NVIDIA Corporation. "Kit para Desarrollador Jetson Nano". Disponible en: https://www.nvidia.com/es-la/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-nano/productdevelopment/, accedido: 10-07-2022.
- [16] Vaidya, B. "Hands-On GPU-Accelerated Computer Vision with OpenCV and CUDA: Effective Techniques for Processing Complex Image Data in Real Time Using GPUs". Packt Publishing Ltd, Birmingham UK, 2018.
- [17] Zhengyou, Z. "Camera Extrinsic Parameters". Computer Vision a Reference Guide, Springer, 2021.
- [18] Richard H. "Multiple View Geometry in Computer Vision". Cambridge University Press, 2° edición, 2004.
- [19] Fernández, R., y Roman, A. J. "Adquisición y visualización de vídeo 3D". Universidad Politécnica de Cataluña, 2010.
- [20] Akin, B., Bhardwaj, M., y Warriner, J. "Trapezoidal Control of BLDC Motors Using Hall Effect Sensors". C2000 Systems and Applications Team, 2011.
- [21] Rambabu, S. "Modeling and control of a brushless dc motor". Department of Electrical Engineering National Institute of Technology Rourkela, 2007.
- [22] OpenCV. "CUDA Module Introduction". Disponible en: https://docs.opencv.org/4.x/d2/dbc/cuda_intro.html, accedido: 11-07-2022.
- [23] Zhuhai Xiaoying Model Co., L. "Motor sin escobillas X8318S". Disponible en: http://www.zhxyrc.com/goods/307946, accedido: 12-07-2022.
- [24] Ams OSRAM Group. "AS5047P 14-Bit On-Axis Magnetic Rotary Position Sensor with 12-Bit Decimal and Binary Incremental Pulse Count for 28krpm High Speed Capability". Disponible en: https://ams.com/documents/20143/36005/AS5047P_DS000324_3-00.pdf, accedido: 12-07-2022.
- [25] ODrive Robotics. "ODrive Robotics". Disponible en https://odriverobotics.com/, accedido: 12-07-2022.
- [26] Waveshare. "IMX219-83 Stereo Camera, 8MP Binocular Camera Module, Depth Vision". Disponible en: https://www.waveshare.com/imx219-83-stereo-camera.htm, accedido: 12-07-2022.



Construcción y Validación Experimental de un Dispositivo Háptico con Mecanismo Paralelogramo: Preliminar

Armas Patricio María de Jesús¹, Chávez Conde Esteban² y Arias Aguilar José Aníbal¹

¹Universidad Tecnológica de la Mixteca, División de Estudios de Posgrado, Huajuapan de León, Oaxaca. México. ²Universidad del Papaloapan, Departamento de Mecatrónica, Loma Bonita, Oaxaca. México. armas.patricio.ma.de.jesus@gmail.com

Resumen

En este artículo se aborda la construcción y validación de un dispositivo háptico de dos grados de libertad (2 GDL), basado en un mecanismo paralelogramo con dinámica desacoplada. Las validaciones que se realizan al dispositivo háptico son cinemática directa e inversa y cinemática diferencial; de igual forma se implementa un control cinemático y un controlador por par calculado en el espacio articular para el seguimiento de trayectorias. También se ha desarrollado un ambiente virtual, el cual tiene como objeto una esfera que representa al HIP (Haptic Interface Point), la cual se mueve en el plano XY para una interacción unidireccional entre el dispositivo háptico y el ambiente virtual. La mayoría de los dispositivos hápticos comerciales son de arquitectura cerrada, lo cual dificulta que se puedan realizar modificaciones a la estructura de control y al protocolo de comunicación; así como también se dificulta la integración de hardware. Nuestro dispositivo háptico es de arquitectura abierta en donde se podrán implementar diferentes algoritmos de control y se podrán crear diferentes ambientes virtuales; además de poder usarlo para la investigación. Los resultados experimentales preliminares muestran el desempeño de las estrategias de control implementadas y la comunicación unidireccional con el ambiente virtual.

Palabras clave: Dispositivo Háptico, Mecanismo Paralelogramo, Dinámica Desacoplada.

1. Introducción

En los últimos años el mercado de la tecnología háptica está creciendo rápidamente y se ha producido un gran desarrollo tecnológico en los dispositivos hápticos. Estos proporcionan la retroalimentación de fuerza al usuario que interactúa con entornos virtuales o remotos. Además, permiten tocar, sentir o manipular objetos virtuales añadiendo el sentido del tacto a la experiencia visual. En este sentido, algunos investigadores han trabajado con dispositivos hápticos, por ejemplo, en [1] muestran el diseño y la caracterización de un dispositivo háptico maestro con estructura paralelogramo para un sistema quirúrgico laparoscópico teleoperado. En [2] presentan un dispositivo háptico paralelo de cuatro GDL el cual es fabricado usando técnicas de origami capaz de producir retroalimentación háptica. También en [3] muestran resultados experimentales de un dispositivo háptico maestro con mecanismo paralelo capaz de generar fuerza pasiva en la punta del dedo. Finalmente, en [4] presentan un dispositivo háptico de 2 GDL, el cual se puede utilizar como un dispositivo fijo o de mano (móvil), el cual se compone de dos plataformas con mecanismo paralelo; el dispositivo es capaz de aplicar retroalimentación háptica al usuario.

En este trabajo se presenta la construcción y validación de un prototipo experimental de dos grados de libertad (2 GDL) con dinámica desacoplada, basado en un mecanismo paralelogramo. Las validaciones que se realizan al dispositivo háptico son cinemática directa e inversa y cinemática diferencial, de igual forma se implementa un control cinemático y un controlador por par calculado en el espacio articular para el seguimiento de trayectorias.



La organización del trabajo es la siguiente: En la sección 2 se presenta un modelado de sólidos del robot paralelogramo tipo robot manipulador. En la sección 3 se presentan los modelos matemáticos, considerando el desacoplamiento de las ecuaciones dinámicas. El desarrollo de los controladores cinemáticos y dinámicos se muestra en la sección 4. Finalmente, en la sección 5 se encuentran los resultados preliminares de la validación experimental del dispositivo háptico ilustrando su desempeño.

2. Modelado de sólidos

Se utilizó el programa SolidWorksTM para el modelado de sólidos del robot paralelogramo de 2 GDL. Se consideró una restricción a cumplir, mediante el diseño geométrico de dos pesas para cambiar el centro de masa de los eslabones $L_3 y L_4 y$ lograr el desacoplamiento dinámico. Se realizaron los cálculos necesarios, (cotejando las propiedades físicas dadas por el programa de sólidos empleado) y se obtuvieron de manera experimental las masas de los eslabones. En la Figura 1 se observa que las partes principales del robot son: la base que soporta al mecanismo paralelogramo, cinco soportes con sus respectivos rodamientos, tres pernos brida para la unión de los eslabones, dos motores de corriente directa, dos codificadores incrementales, dos pesas y dos ejes transmisores de potencia para mover a los eslabones activos $L_1 y L_2$. El caso de estudio ha sido modelado considerando que la transmisión del movimiento es directa entre la flecha de los actuadores y los eslabones actuados, por medio de los ejes transmisores de potencia y los coples.



Figura 1. Partes principales del dispositivo háptico.

3. Modelos matemáticos

En esta sección se presenta el modelado matemático de la cinemática directa, inversa y diferencial los cuales se resolvieron mediante el método geométrico. También se presenta la dinámica del robot con mecanismo paralelogramo, el cual se ha obtenido por las ecuaciones Euler-Lagrange (ver [5] y [6]) y está descrita por ecuaciones diferenciales ordinarias lineales, que representan solamente las características dinámicas de la parte mecánica del dispositivo háptico.

3.1 Cinemática

El mecanismo paralelogramo de cinco barras mostrado en la Figura 2 tiene dos grados de libertad. L_1 , L_2 , L_3 , $L_2 + L_4$ son las longitudes de los eslabones 1, 2, 3 y 4, respectivamente, $\phi_1 y \phi_2$ son las posiciones angulares de los eslabones actuados. Las longitudes de los eslabones $L_1 y L_3$ es la misma, de igual forma que las longitudes marcadas como L_2 .





Figura 2. Manipulador de 5 barras de dos grados de libertad.

Ahora, considere el triángulo formado por ABC de acuerdo a la Figura 3, en donde se puede ver que el problema de la cinemática inversa está dado por las ecuaciones (1) y (2).



Figura 3. Dibujo esquemático para el análisis de la cinemática.

$$\phi_1 = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{L_4\sin(\beta)}{L_1 + L_4\cos(\beta)}\right) \tag{1}$$

$$\phi_2 = \phi_1 + (\beta + \pi) \tag{2}$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(-\frac{\sqrt{1 - \cos(\beta)^2}}{\cos(\beta)} \right) \tag{3}$$

$$\cos(\beta) = \left(\frac{x^2 + y^2 - L_1^2 - L_4^2}{2L_1L_4}\right)$$
(4)



Ahora bien, de las Figuras 2 y 3 observe que las coordenadas cartesianas x e y del robot y que representan la cinemática directa están dadas por la ecuación (5).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 \cos(\phi_1) & -L_4 \cos(\phi_2) \\ L_1 \sin(\phi_1) & -L_4 \sin(\phi_2) \end{bmatrix}$$

$$(5)$$

en donde x e y representan la posición del efector final. De la misma forma la cinemática diferencial puede ser calculada de acuerdo a la ecuación (6)

$$\dot{x} = J(q)\dot{q}$$

$$x = [x \quad y]^{T}, \qquad \dot{x} = [\dot{x} \quad \dot{y}]^{T}, \qquad q = [\phi_{1} \quad \phi_{2}]^{T} \quad y \neq [\phi_{1} \quad \phi_{2}]^{T}$$
(6)

y la matriz Jacobiana J(q) se define en la ecuación (7),

$$J(q) = \begin{bmatrix} -L_1 \sin(\phi_1) & L_4 \sin(\phi_2) \\ L_1 \cos(\phi_1) & -L_4 \cos(\phi_2) \end{bmatrix}$$
(7)

3.2 Dinámica

El mecanismo paralelogramo de la Figura 4 se encuentra sobre el plano *x-y*. Se mostrará que, si los parámetros del manipulador satisfacen una relación simple, entonces las ecuaciones del manipulador quedan desacopladas, por lo que las posiciones angulares de los eslabones actuados $\phi_1 y \phi_2$ se pueden ajustar de manera independiente.



Figura 4. Dibujo esquemático del mecanismo paralelogramo para la dinámica.

Donde L_{c1} , L_{c2} , L_{c3} y L_{c4} son las localizaciones de los centros de masa de cada eslabón; m_1 , m_2 , m_3 , m_4 , l_1 , l_2 , l_3 , l_4 , representan las masas y los momentos de inercia de los eslabones. Las ecuaciones dinámicas del robot paralelogramo de 2 GDL pueden ser encontradas en [5] y [6], y quedan descritas por (8) y (9),

$$\tau_1 = a_{11}\ddot{\phi}_1 + a_{12}\ddot{\phi}_2 + c_{11}\dot{\phi}_2^2 + b_1(\dot{\phi}_1) \tag{8}$$

$$\tau_2 = a_{21}\ddot{\phi}_1 + a_{22}\ddot{\phi}_2 + c_{22}\dot{\phi}_1^2 + b_2(\dot{\phi}_2) \tag{9}$$



Con:

$$\begin{aligned} a_{11} &= \left(m_1 L_{c1}^2 + I_1 + m_3 L_{c3}^2 + I_3 + m_4 L_1^2\right) \\ a_{12} &= a_{21} = \left(m_3 L_{c3} L_2 - m_4 L_1 L_{c4}\right) \cos(\phi_1 - \phi_2) \\ a_{22} &= \left(m_2 L_{c2}^2 + I_2 + m_3 L_2^2 + m_4 L_{c4}^2 + I_4\right) \\ c_{11} &= \left(m_3 L_{c3} L_2 - m_4 L_1 L_{c4}\right) \sin(\phi_1 - \phi_2) \\ c_{22} &= -\left(m_3 L_{c3} L_2 - m_4 L_1 L_{c4}\right) \sin(\phi_1 - \phi_2) \\ b_1(\phi_1) &= c_{e1} \phi_1 + f_{c1} sign(\phi_1) \\ b_2(\phi_2) &= c_{e2} \phi_2 + f_{c2} sign(\phi_2) \end{aligned}$$

donde "sign" denota la función *signum*; c_{ei} y f_{ci} con i=1,2, son las constantes de fricción viscosa y fricción de Coulomb, respectivamente, que representan la fricción equivalente debido a los rodamientos de las uniones de los eslabones y de los ejes transmisores de potencia; τ_1 y τ_2 son los pares de entrada al sistema.

De las ecuaciones (8) y (9) se observa que para que ocurra el desacoplamiento de las ecuaciones dinámicas del mecanismo paralelogramo, se tendría que cumplir la condición dada por (10),

$$(m_3 L_{c3} L_2 - m_4 L_1 L_{c4}) = 0 (10)$$

Para ello, solo se requiere encontrar a L_{c3} y L_{c4} debido a que el resto de los parámetros son conocidos. Para poder realizar el desacoplamiento del dispositivo háptico y calcular el momento de inercia de cada eslabón se recurrió al teorema de los ejes paralelos, ya que este permite determinar el momento de inercia de un objeto compuesto cuando se conocen los momentos de inercia de sus partes [7]. Si consideramos a los eslabones $L_3 y L_4$ como objetos simples, es decir, sin la pesa, entonces su centro de masa se localiza en $\frac{1}{2}L3$ y $\frac{1}{2}L4$, respectivamente, ya que se asume que el material del que están hechos los eslabones está uniformemente distribuido y que guardan simetría. Se considera a los eslabones como objetos cuando se le agrega la pesa para modificar su centro de masa.

En la Figura 5 se observa al objeto compuesto del eslabón L_4 con masa m_4 =0.18 kg y una pesa con masa m_p =0.059440 kg y radio r=0.01 m, del cual se determinarán su centro de masa L_{c4} y después su momento de inercia de masa respecto al eje L que pasa por su centro de masa.



Figura 5. Eje L perpendicular al eslabón L_4 y a la pesa.

En la Figura 6 se observa al eslabón L_4 con la pesa colocada a una distancia del origen del sistema de referencia de 0.1163 m.





Figura 6. Coordenada L_{c4} del centro de masa del objeto compuesto.

La ecuación (11) será utilizada para encontrar las distancias $L_{c3} y L_{c4}$ al centro de masa de los eslabones $L_3 y L_4$, respectivamente.

$$\bar{x} = \frac{x_{Li} * m_{Li} + x_{pLi} * m_p}{(m_{Li} + m_p)}$$
(11)

En donde x_{Li} es la distancia al centro de masa de los eslabones L_i , m_{Li} es la masa de los eslabones L_i , x_{pLi} es la distancia desde el origen del sistema de referencia del eslabón al centro de masa de la pesa en los eslabones L_i y \bar{x} es la distancia al centro de masa del objeto compuesto.

Para obtener a L_{c4} se coloca la pesa a una distancia del sistema de referencia **x**-**y** de x_{pL4} =0.1063 m + 0.01 m=0.1163 m, como se observa en la Figura 6 y una distancia al centro de masa del eslabón L_4 de x_{L4} =0.0175 m. Sustituyendo en la ecuación (11) se obtiene (12) y es la distancia al centro de masa L_{c4} , como se observa en la Figura 7.

$$\bar{x} = L_{c4} = 0.04201428 \,\mathrm{m}$$
 (12)



Figura 7. Distancia desde *L* al centro de masa del eslabón.

De acuerdo a las Figuras 5 y 7, se procede a determinar los momentos de inercia del eslabón y de la pesa. La distancia desde el centro de masa del eslabón hasta el centro de masa del objeto compuesto es 0.024514 m. Por lo tanto, el momento de inercia del eslabón respecto al eje L está dado por (13):

$$I_{L4} = \frac{1}{12} (0.18 \, kg) (0.1063 \, m)^2 + (0.18 \, kg) (0.024514 \, m)^2 = 2.776638 \times 10^{-4} \, kgm^2 \tag{13}$$

La distancia desde el centro de masa de la pesa hasta el centro de masa del elemento compuesto es de 0.07428572 m como se observa en la Figura 8.





Figura 8. Distancia desde L al centro de masa de la pesa.

Ahora se procede a encontrar el momento de inercia I_{pL4} de la pesa.

$$I_{pL4} = \frac{1}{12} (0.059440 \ kg) (0.01 \ m)^2 + (0.059440 \ kg) (0.07428572 \ m)^2 = 3.285071 x 10^{-4} \ kg. \ m^2 \tag{14}$$

El momento de inercia del objeto compuesto respecto a L está dado por la suma de (13) y (14),

$$I_4 = I_{L4} + I_{pL4} = 6.061709 \times 10^{-4} \ kg. \ m^2 \tag{15}$$

En la Figura 9 se observa al objeto compuesto del eslabón L_3 con masa $m_3 = 0.12$ kg y una pesa, del cual se determinará su centro de masa L_{c3} y después su momento de inercia de masa respecto al eje L que pasa por su centro de masa.



Figura 9. Eje L perpendicular al eslabón L_3 y 1a pesa.

De la ecuación (10) se tiene $m_3L_{c3}L_2 = m_4L_1L_{c4}$, interesa conocer la masa total de los eslabones considerando la masa propia del eslabón más la masa de la pesa añadida; así se tiene que para el eslabón L_4 la masa total es $m_4 = m_4 + m_p$ y para el eslabón L_3 la masa total es $m_3 = m_3 + m_p$. De tal forma que en (16) y (17) se muestran los valores de m_4 y m_3 .

$$m_4 = 0.23944 \text{ kg}$$
 (16)
 $m_3 = 0.17944 \text{ kg}$ (17)

Una vez obtenidos estos valores de masa, se procede a obtener un factor de ganancia k dado por (18),

$$\mathbf{k} = \frac{m_3 L_2}{m_4 L_1} = 0.528999 \tag{18}$$



De tal forma que la distancia al centro de masa del objeto compuesto Lc3 está dado por:

$$\bar{x} = L_{c3} = \frac{L_{c4}}{k} = 0.079422 \text{ m}$$
 (19)

En la ecuación (19) se obtuvo el valor para L_{c3} y de la ecuación (11) se despeja la posición x_{pL3} de la pesa en el eslabón L_3 . De acuerdo a la Figura 10, con una distancia al centro de masa del eslabón x_{L3} =0.085 m, se tiene:

$$x_{pL3} = 0.0681608 \,\mathrm{m} \tag{20}$$



Figura 10. Coordenada L_{c3} del centro de masa del objeto compuesto.

De acuerdo a las Figuras 9 y 10, se procede a determinar los momentos de inercia del eslabón L_3 y de la pesa. La distancia desde el centro de masa del eslabón hasta el centro de masa del objeto compuesto es 0.005578 m como se observa en la Figura 11. Por lo tanto, el momento de inercia del eslabón respecto a L es:

$$I_{L3} = \frac{1}{12} (0.12 \text{ kg}) (0.058160 \text{ m})^2 + (0.12 \text{ kg}) (0.005578 \text{ m})^2 = 3.755954 \text{x} 10^{-5} \text{ kgm}^2$$
(21)



Figura 11. Distancia desde L hasta el centro de masa del eslabón.

La distancia desde el centro de masa de la pesa hasta el centro de masa del elemento compuesto es de 0.0112612 m como se observa en la Figura 12. Así que el momento de inercia de I_{pL3} de la pesa está dado por la ecuación (22).





Figura 12. Distancia desde L hasta el centro de masa de la pesa.

$$I_{pL3} = \frac{1}{12} (0.059440 \text{ kg})(0.01 \text{ m})^2 + (0.059440 \text{ kg})(0.0112612)^2 = 8.0331946 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$$
(22)

El momento de inercia del objeto compuesto respecto a L está dado por (23),

$$I_3 = I_{L3} + I_{pesaL3} = 4.559273 \times 10^{-5} \, kgm^2 \tag{23}$$

Ahora sustituyendo los datos obtenidos en la ecuación (10), se tiene que,

$$(0.17944 \text{ kg})(0.079422 \text{ m})(0.12 \text{ m}) - (0.23944 \text{ kg})(0.17 \text{ m})(0.04201428 \text{ m}) = 4.822944 \text{ x}10^{-9}$$
 (24)

Como se observa el resultado es muy cercano a cero y se puede decir que se ha logrado el desacoplamiento del dispositivo háptico. De tal forma que en (25) y (26) se muestra que la dinámica es dada por un conjunto de ecuaciones desacopladas y sin términos centrífugos.

$$\tau_1 = a_{11}\ddot{\phi}_1 + b_1(\dot{\phi}_1)$$
(25)
$$\tau_2 = a_{22}\ddot{\phi}_2 + b_2(\dot{\phi}_2)$$
(26)

4. Control de movimiento

4.1 Control cinemático

Considere el caso general de la cinemática diferencial de velocidad de un robot manipulador, dada por la ecuación (6). Se desea realizar seguimiento de trayectoria en el espacio cartesiano y se considera como entrada de control de velocidad a (27),

$$\dot{q} = U \tag{27}$$

La ecuación (28) representa al controlador propuesto, es un control proporcional basado en la cinemática diferencial de velocidad del robot dado en [8],

$$U = J^{-1}[\dot{x}_d - k(x - x_d)], \tag{28}$$

donde $U = [u_1 u_2]^T$, J^{-1} es la inversa de la matriz Jacobiana, $x_d y \dot{x}_d$ son los vectores de posición y velocidad deseados $x_d = [x_d \ y_d]^T y k = diag[k_{11} \ k_{22}]$ es la matriz de ganancias del controlador.

La ecuación (28) expresada en forma escalar, tiene dos controladores, $u_1 y u_2$ dados por (29),

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x}_d & -k_{11} \left(x - x_d \right) \\ \dot{y}_d & -k_{22} \left(y - y_d \right) \end{bmatrix}$$
(29)

4.2 Control dinámico



Se propusieron dos controladores del tipo **Par Calculado + integral** (ver [9]) para el seguimiento de una trayectoria circular, uno por cada eslabón activo. Se considera como entrada de control a $\tau = u$, en donde las entradas de control son los pares de los motores. Este tipo de control incluye la dinámica completa del robot manipulador en la estructura matemática del controlador. La forma del controlador está dada por (30),

$$u = D(q)\Theta + F(\dot{q}) \qquad q = [q_1 \ q_2]^T = [\phi_1 \ \phi_2]^T \ F = [b_1 \ b_2]^T$$
(30)

donde D(q) es una matriz diagonal de *nxn* a la que se le conoce como matriz de masas, $F(\dot{q})$ es un vector de n elementos y son los pares debido a las fricciones (b_1 y b_2 se definen en la sección 3.2), q es el vector de los desplazamientos angulares de los eslabones actuados, siendo Θ la entrada de control auxiliar dada por (31),

$$\Theta = \ddot{q}_d - K_D \Delta \dot{q} - K_P \Delta q - K_I \int \Delta q \tag{31}$$

Así mismo, $\Delta q = q - q_d$ y q_d hasta su segunda derivada en el tiempo, son los valores deseados de posición, velocidad y aceleración angular; K_D , K_P y K_I son las ganancias derivativa, proporcional e integral del control. La dinámica en lazo cerrado se muestra en (32) y (33),

$$D(q)\ddot{q} + F(\dot{q}) = D(q)\,\Theta + F(\dot{q}) \tag{32}$$

$$\ddot{q} = \Theta$$
 (33)

Siendo la dinámica del error dada por (34):

$$\Delta q_i^3 + K_D \Delta \ddot{q}_i + K_P \Delta \dot{q}_i + K_I \Delta q_i = 0 \quad \text{con } i = 1,2 \tag{34}$$

En (35) se muestra la ecuación característica de la dinámica del error y es un polinomio de la forma:

$$s^3 + K_D s^2 + K_P s + K_I = 0 ag{35}$$

Con $\Delta q_i = q_i - q_i^*$. Para el diseño de las ganancias del controlador se propone un polinomio característico deseado de tercer orden dado por (36),

$$(s+p)(s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2),$$
 (36)

tal que sea Hurwitz. De tal forma que se tienen dos controladores:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = D(q) \begin{bmatrix} \ddot{q}_1^* - o - p - q \\ \ddot{q}_2^* - r - s - t \end{bmatrix} + F(\dot{q})$$
(37)

En donde,

$$\begin{split} & o = k_{D12}(\dot{q}_1 - \dot{q}_1^*) \\ & p = k_{P11}(q_1 - q_1^*) \\ & q = k_{I10} \int (q_1 - q_1^*) \\ & r = k_{D22}(\dot{q}_2 - \dot{q}_2^*) \\ & s = k_{P21}(q_2 - q_2^*) \\ & t = k_{I20} \int (q_2 - q_2^*) \end{split}$$

Siendo q_1^* , q_2^* hasta sus segundas derivadas en el tiempo, son los valores deseados de posición, velocidad y aceleración angular.

5. validación experimental: resultados preliminares


Los resultados de simulación numérica y experimental fueron obtenidos con el software de Matlab/SimulinkTM, usando el método numérico Runge-Kutta de orden 4, con un paso fijo de integración de 1 ms.

5.1 Plataforma experimental

En la Figura 13 se muestra el diagrama esquemático del sistema en lazo cerrado de la plataforma experimental, compuesta del dispositivo háptico con mecanismo paralelogramo que será el medio de interacción con el usuario, una fuente de alimentación, dos motores Maxon EC-max 40 brushless de 120 watt, codificador de 500 pulsos por revolución, dos servoamplicadores de Maxon motor y una tarjeta de adquisición de datos Sensoray. También se cuenta con la computadora en donde residen el ambiente virtual, las ecuaciones cinemáticas y dinámicas, al igual que los controladores. Cada servoamplificador tiene dos formas de configuraciones de control: velocidad y par.



Figura 13. Plataforma experimental: Dispositivo háptico y computadora.

Ahora bien, para la validación experimental se hizo uso de Simulink Desktop Real-Time[™] el cual utiliza el lenguaje de programación C para realizar el procesamiento y la adquisición de datos.

5.2 Cinemática directa e inversa

La cinemática directa, inversa y diferencial se realizó sin aplicar par en los motores, fue en movimiento libre, usando la lectura de los codificadores y una tabla cuadriculada para observar la posición del efector final, como se muestra en la Figura 15 (las unidades de la tabla cuadriculada están dadas en centímetros).

La cinemática directa requiere como entrada las posiciones articulares de los eslabones actuados. Como se observa en la Figura 14 los desplazamientos angulares $\phi_1 = 144^{\circ} y \phi_2 = 210.2^{\circ}$ producen que el efector final se situé en el punto (0.03007, 0.20) m.

Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 9, pp. 127 - 146. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022





Figura 14. Resultados experimentales: a) y b) desplazamiento angular de los eslabones L₁ y L₂; c) y d) posición del efector final para el punto dado (0.03, 0.20) m.

La cinemática inversa requiere como entrada la posición del efector final y como salida se obtienen las posiciones articulares de los eslabones L_1 y L_2 cómo se puede observar en las Figuras 15 y 16.



Figura 15. Posición del efector final en el punto (0.03, 0.20) m.



Figura 16. Resultados experimentales: a) y b) Desplazamientos angulares de L₁ y L₂ medidos por los codificadores; c) y d) obtenidos con la cinemática inversa.



Los valores utilizados para los eslabones se muestran en la Tabla 1.

Longitudes
$L_1 = 0.17 \text{ m}$
$L_2 = 0.12 \text{ m}$
$L_3 = 0.17 \text{ m}$
$L_4 = 0.195 \text{ m}$

Tabla 1. Longitudes de los eslabones.

5.3 Cinemática diferencial

Para este experimento se colocaron únicamente los eslabones activos a cada motor, es decir, solo se usó parte del mecanismo. Además, se utilizaron los servoamplificadores, la tarjeta de adquisición de datos, la computadora; y los modelos matemáticos correspondientes a la cinemática directa y el Jacobiano; todo lo anterior implementado en software con Matlab/Simulink[™].

En la Figura 17 se muestra la comparación de las posiciones y velocidades obtenidos por el Jacobiano y por la cinemática directa. Como se observa las posiciones y velocidades del efector final encontrados por medio de la cinemática directa y por el jacobiano son muy similares. Para saber que tan pequeños son los errores de posición del efector final observe la Figura 18.



Figura 17. Resultados experimentales: a) y b) posición del efector final; c) y d) velocidades del efector final.

Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 9, pp. 127 - 146. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022





Figura 18. Resultados experimentales: Errores de posición y velocidad del efector final.

5.4 Control cinemático

La prueba experimental del control cinemático de velocidad se realizó de acuerdo a la Figura 19, en donde el hardware está compuesto por los motores con sus respectivos eslabones, los codificadores, servoamplificadores, la tarjeta de adquisición de datos y la computadora; los modelos matemáticos correspondientes a la cinemática directa, diferencial y el controlador cinemático, todo lo anterior implementado en software con Matlab/Simulink[™].



Figura 19. Simulación en tiempo real: Hardware in the loop simulation. Prof. Rolf Isermann. Darmstadt University of Technology.

En la Figura 20 se muestran las trayectorias deseadas y reales del Caracol de Pascal y el círculo, como se esperaba las trayectorias son similares. Sin embargo, es importante ver el error que existe entre la trayectoria deseada y la trayectoria real, para ello, es necesario conocer los errores de posición del efector final como se presentan en la Figura 21.





Figura 20. Resultados experimentales: seguimiento de trayectorias.



Figura 21. Resultados experimentales: errores de posición del efector final.

5.5 Dinámica

Para el experimento del control dinámico también se utilizó el esquema mostrado en la Figura 19, en donde el hardware está compuesto por los motores y un solo eslabón por cada motor, los codificadores, los servoamplificadores, la tarjeta de adquisición de datos y la computadora. Por otro, lado también se programaron los modelos matemáticos correspondientes a la cinemática y al control dinámico; todo esto implementado en software con Matlab/Simulink[™].

Como se observa en la Figura 22, se hace uso de los bloques 'enconder input' y 'analogic output', para monitorear los desplazamientos articulares de los eslabones actuados y para aplicar el valor de consigna al motor en forma de voltaje, respectivamente.





Figura 22. Diagrama de bloques para la validación experimental.

Los parámetros dinámicos como la inercia, la fricción viscosa y la fricción de Coulomb equivalente se estimaron con pruebas experimentales. Primeramente, se colocaron cada uno de los eslabones actuados al motor y de forma manual se hicieron oscilar para después graficar los desplazamientos angulares y en conjunto con el modelo dinámico del péndulo simple se fueron ajustando los parámetros dinámicos, hasta lograr que se parecieran los desplazamientos angulares; tanto el obtenido de forma experimental como el del modelo del péndulo simple. Para obtener una mejor aproximación de estos parámetros se recurrió a un experimento en lazo cerrado, en donde a los eslabones actuados se les llevó a una posición de referencia y se les hizo oscilar, de tal forma que se obtuvieron sus desplazamientos angulares, con ello, se encontraron las características de la respuesta transitoria de una función prototipo de segundo orden y a su vez se encontraron dichos parámetros dinámicos. Con estos experimentos se tuvo una referencia de partida, aunque como se observa en la Figura 23, los resultados no eran aceptables aún; así que en línea se fueron reajustando estos parámetros de acuerdo a la respuesta del control. Finalmente, los parámetros dinámicos que se utilizaron se muestran en la Tabla 2.



Figura 23. Desplazamiento angular de los eslabones actuados vs función prototipo de segundo orden.



Masa de los eslabones [kg]	Longitud de los eslabones [m]		
$m_1 = 0.12$	$L_1 = 0.17$		
$m_2 = 0.10$	$L_2 = 0.12$		
$m_3 = 0.12$	$L_3 = 0.17$		
$m_4 = 0.18$	$L_4 = 0.195$		
Distancias al centro de masa [m]	Momentos de inercia de masa $[kg.m^2]$		
$L_{c1} = 0.085$	$I_1 = 0.0013$		
$L_{c2} = 0.06$	$I_2 = 0.0002$		
$L_{c3} = 0.079422$	$I_3 = 4.559273 \text{x} 10^{-5}$		
$L_{c4} = 0.04201428$	$I_4 = 6.061709 \mathrm{x} 10^{-4}$		
Fricción viscosa $\left[{}^{N.m.s}/_{rad} ight]$	Fricción seca o de Coulomb [<i>N</i>]		
$c_{L1} = 0.03$	$f_{L1} = 0.0071$		
$c_{L2} = 0.0014$	$f_{L2} = 0.0016$		
$c_{L3} = 0.03$	$f_{L3} = 0.0071$		
$c_{L4} = 0.0014$	$f_{L4} = 0.0016$		

Tabla	2	Parámetros	dinámicos	del	disnositi	ivo hái	otico
ιανία	~ .	i arametros	umanneos	uei	uispositi	100 1101	JUCO.

Ahora bien, en la Figura 24 se muestran las señales de control τ_1 y τ_2 , en donde los pares demandados a los motores son de 0.2507 Nm y 0.1172 Nm, entre más pequeños sean los valores de las señales de control es mejor, ya que esto indica que se demanda menor energía al sistema.



Figura 24. Resultados experimentales: señales de control.

El seguimiento de la trayectoria se muestra en la Figura 25, a simple vista se observa que los errores de posición del efector final son un tanto más grande con respecto al control cinemático. Para saber que tan grande es el error vea la Figura 26.









Figura 26. Resultados experimentales: errores de posición del efector final.

5.6 Comunicación del robot con el ambiente virtual

En esta prueba experimental el usuario manipuló el efector final para dibujar una trayectoria como se muestra en la Figura 27, la idea fue establecer una comunicación unilateral entre el dispositivo háptico y el HIP que representa al efector final. El HIP fue representado por una esfera hecha en el toolbox de realidad virtual "3D World Editor" de Matlab/SimulinkTM, la cual se movía libremente, es decir, no hubo interacción con una pared virtual y tampoco se realizó control del prototipo.





Figura 27. Comunicación unilateral: Robot y ambiente virtual.

6. Conclusiones

Se validó la cinemática directa, obteniendo un error máximo para la posición del efector final en **x** e **y** de 7x10-5 m y 2.4x10-3 m respectivamente. Para la cinemática inversa, se obtuvo un error máximo para la posición angular de los eslabones L_1 y L_2 de 0.5° y 2.4°. Se validó la cinemática diferencial, comparando el Jacobiano vs la cinemática directa para las posiciones y velocidades lineales del efector final, obteniendo errores de 1x10-3 m, 2x10-3 m, 0.02 m/s y 0.2 m/s para posición y velocidad en **x** e **y**, respectivamente.

También se implementó un control cinemático proporcional para seguimiento de trayectorias, obteniendo un error de posición del efector final en x e y de 2x10-3 m para ambas trayectorias. En cuanto al control dinámico, los errores de posición del efector final para la trayectoria circular son de 0.015 m y 0.008 m para x e y; respectivamente. Como se puede observar el mejor desempeño se obtuvo con el control cinemático, ya que este a diferencia del control dinámico, no requiere del conocimiento de los parámetros dinámicos del sistema. Todos los errores mencionados se obtuvieron de forma numérica a partir de la posiciones reales y deseadas. Finalmente se logró establecer la comunicación unilateral: prototipo-ambiente virtual.

En general, se logró validar la cinemática directa, inversa y diferencial; la dinámica se validó de forma parcial, ya que es necesario mejorar la estimación de los parámetros dinámicos del sistema y realizar algunos ajustes mecánicos al prototipo.

Como trabajo futuro, se puede considerar la implementación de otras estrategias de control, las ecuaciones dinámicas acopladas, incluir un sensor de fuerza en el efector final para realizar experimentos de control de fuerza, como también, establecer una comunicación bidireccional con una pared virtual.

Referencias

- [1] Liu X., Wu B., Wu Z., Zeng L., Xu K. "Design and Experimental Characterizations of a Haptic Device for Surgical Teleoperation", International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), IEEE Robotics & Automation Society, pp. 375-380, United States of America, 2020.
- [2] Williams S., Suchoski J., Chua Z., Okamura A. "A 4-DoF Parallel Origami Haptic Device for Normal, Shear and Torsion Feedback", IEEE Robotics and Automation Letters. IEEE, Vol. 7, No. 2, pp. 3310-3317, 2022.



- [3] Nakamura S., Motoi N. "*Development of exoskeleton Haptic device using poder brake and constant torque spring*", Electrical Engineering in Japan. Wiley Online Library, Vol. 214, No. 2, p. e23311, 2021.
- [4] Kuang L., Marchal M., Aggravi M., Giordano P., Pacchierotti C. "Design of a 2-DoF Haptic Device for Motion Guidance", Haptics: Science, Technology, Applications. Springer Nature, Vol. 13235, pp. 198-206, 2022.
- [5] Spong M., Hutchinson S., Vidyasagar M. "*Robot Modelling and Control*", Wiley, United States of America, Second Edition, 2020.
- [6] Siciliano, B., and Sciavicco, L. "*Modelling and Control of Robot Manipulators*", Springer, United States of America, Second Edition, 2000.
- [7] Bedford, A. and Fowler, W. "*Engineering Mechanics Dynamics*", Prentice Hall, United States of America, Fifth edition, 2007.
- [8] Craig J. "Introduction to Robotics: Mechanics and Control", Pearson, United States of America, Fourth Edition, 2017.
- [9] Fu, K.S., Gonzalez, R., and Lee, C.G. "*Robotics: Control, Sensing, Vision, and intelligence*", McGraw-Hill Education, E.U.A, International Ed, 1987.



Estimación de Parámetros para un Modelo Dinámico de un Servomotor RC

Zamora Martínez Manuel, Rodriguez Liñan Angel, Quiroz Compean Griselda y Torres Treviño Luis M.

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Ave. Universidad S/N, Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L., CP 66455 México. e-mail: zamm1880643@uanl.edu.mx

Resumen

El presente trabajo propone una estimación de los parámetros de un modelo dinámico de segundo orden de un servomotor RC, el cual incluye el modelo del acondicionamiento de señales de la tarjeta de control. La propuesta consiste en aproximar el valor numérico de los coeficientes del modelo dinámico del servomotor que influyen en la respuesta de estado estacionario, mediante métodos de aproximación de funciones polinomiales de primer grado. Por otro lado, los parámetros del modelo dinámico que sólo influyen en la respuesta de estado transitorio se estiman mediante un algoritmo genético evolutivo. Ambas etapas se implementan a partir de mediciones experimentales de entradas y salidas. Adicionalmente se propone la inclusión de una etapa de acondicionamiento de la señal que describe la interacción entre el servomotor y la tarjeta de control, lo cual ayuda a reducir el error existente entre la salida del modelo y los datos experimentales. El valor númerico de los coeficientes del modelo obtenido se compara contra el servomotor real, obteniendo un modelo cuyo desempeño es aproximado a la implementación física del servomotor.

Palabras clave: Estimación paramétrica, algoritmos genéticos, servomotor RC.

1. Introducción

Uno de los actuadores más utilizados en aplicaciones industriales es el servomotor, ya sea en sistemas electromecánicos, robóticos o automatizados. Existen varios tipos de servomotores según sus características particulares; dependiendo del tipo de motor electromecánico o del servodrive que esté posea. Algunos tipos de servomotores incluyen motores de corriente directa, imanes permanentes, RC (por su principal uso para radio control), de corriente alterna y los de transmisión directa. El presente trabajo se centra en los servomotores RC, debido a su tamaño compacto, gran precisión y bajo costo. La morfología de estos servomotores está compuesta por un motor de corriente directa (CD), un sistema electrónico de control y una caja de engranajes encargada de la reducción de la velocidad del eje del motor a cambio de aumentar el par de torsión. Debido a su propia arquitectura, es posible medir la posición del eje del motor en todo momento, puesto que está conectado a un potenciómetro. En la literatura se pueden encontrar diferentes modelos para un motor de CD, que describen tanto la parte mecánica de la parte eléctrica, utilizando ecuaciones de acoplamiento entre ellos [1], [2]. En algunos estudios utilizan estos modelos del motor de CD para representar el comportamiento de servomotores RC, sin incluir los efectos asociados a engranaje, retroalimentación interna, sistema electrónico y demás, pero logrando regulación de posición gracias al uso de técnicas de control o de estimación con compensación de las dinámicas no modeladas [3]. La validación de un modelo de un motor de CD acoplado a una caja de engranajes y un subsistema electrónico se presenta en [4], obteniendo la función de transferencia que contempla el modelo completo del servomotor, lo cual esta limitado a su implementación a sistemas lineales con condiciones iniciales en reposo.

Además de contar con un modelo, otro problema es el de conocer los valores numéricos de los parámetros de dicho modelo, lo cual es necesario para implementación de algunas técnicas de control



u otras aplicaciones. Una metodología para la estimación paramétrica basada en las mediciones de un servomotor RC es dada en [5]; sin embargo, está limitada por la variabilidad de los datos medidos y de la interacción entre el servomotor y la tarjeta de adquisición de datos utilizada. En este objetivo de estimar los parámetros, la identificación de sistemas es un área que estudia metodologías para la obtención de modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de mediciones de las variables del sistema. Técnicas como la de mínimos cuadrados y Newton-Raphson, se han aplicado a este tipo de problemas con cierto éxito, aunque el problema de convergencia a un mínimo local en lugar del mínimo global persiste. La obtención de valores óptimos por este tipo de técnicas puede depender del valor inicial del parámetro.

Estimar los parámetros de diferentes sistemas no es un problema trivial, por lo que en algunas investigaciones la determinación de los parámetros de varias plataformas se ha propuesto como un problema de optimización [6-8]. Amiri et al. trabajaron en el modelo matemático del motor DC, calculado por la ley de Kirchhoff. Con base en el modelo matemático, se definió un problema de optimización para estimar sus parámetros midiendo la travectoria simulada y real capturada por el codificador. El modelo estimado se valida mediante la comparación de la trayectoria angular real y simulada [9]. En este tipo de técnicas hay la posibilidad de que un valor inicial ligeramente diferente de parámetros haga que el algoritmo converja a una solución completamente diferente. En [10] se propone el uso conjunto de un algoritmo de optimización de ballenas (WOA por sus siglas en inglés) y un controlador adaptable basado en modelo para la estimación de los parámetros de un motor DC. Técnicas tales como aceleración de movimiento inverso (RMA) han sido implementadas para identificar las componentes de fricción y momento de inercia de un pequeño motor DC [11]. Sun et al. usaron un algoritmo genético (AG) de múltiples padres para la identificación de parámetros de una respuesta infinita adaptable para mejorar tasa de convergencia del AG convencional [12]. Mohammadi et al. implementaron un híbrido de AG y optimización por enjambres de partículas (PSO) para la estimación de los parámetros del motor de inducción trifásico [13]. El uso de algoritmos evolutivos ha demostrado su utilidad en la determinación de parámetros para motores de inducción.

Los algoritmos evolutivos son métodos que emplean el paradigma de la evolución propuesto por Darwin, en el que la ley fundamental es el principio de variación y selección. Este principio, junto con el cambio de generación (a través de la reproducción), son los principales componentes de las estrategias evolutivas [14]. Los algoritmos evolutivos se basan en el proceso de aprendizaje colectivo dentro de una población de individuos, cada uno de los cuales representa un punto de búsqueda en el espacio de soluciones potenciales a un problema dado [15].

En los algoritmos evolutivos, varios individuos exploran el espacio de soluciones del entorno en puntos aleatorios. Luego, los individuos mejor evaluados pasan sus genes (información) a la siguiente generación. La evaluación es el procedimiento para valorar en qué medida las soluciones se ajustan a los objetivos establecidos. Los diferentes criterios de selección pueden ser estocásticos o deterministas. Después del proceso de selección, se inicia la fase de reproducción, en ésta la información de los individuos seleccionados se conserva y se mezcla en nuevos individuos con mecanismos de recombinación, también se considera un factor de mutación durante este procedimiento, la mutación es la introducción de información nueva y aleatoria, la mutación introduce la innovación en la población [15].

2. Modelo matemático del servomotor RC y la señal de la tarjeta de control

Como se reporta en [5], el comportamiento de un servomotor RC (como el ilustrado en la figura 1) puede describirse por un modelo dinámico de segundo orden representado como

$$c_1 \ddot{q} + c_2 \dot{q} + q = c_3 w_{tarjeta} - c_4 \tau - c_5 \tag{1}$$

donde $w_{tarjeta}$ es el ancho de pulso PWM aplicado, q es la posición angular, \dot{q} es la velocidad angular, \ddot{q} es la aceleración angular, τ es el par de torsión asociado a la carga; c_1 , c_2 , c_3 , c_4 y c_5 son



coeficientes constantes que dependen de los parámetros eléctricos y mecánicos de cada servomotor RC, como los que se ilustran en la figura 1.



Figura 1: Representación esquemática de un servomotor [16].

En muchos de los casos, los valores numéricos de los coeficientes c_1 a c_5 de (1) son inciertos porque los valores de los parámetros mecánicos y eléctricos son desconocidos o no medibles. En este trabajo se propone realizar una estimación paramétrica mediante dos metodologías complementarias. Por un lado, los coeficientes c_3 , c_4 y c_5 (relacionados con la entrada PWM, la carga mecánica y posición para entrada cero, respectivamente) son obtenidos mediante aproximación de funciones polinomiales de primer grado, utilizando mediciones de entradas y salidas en estado estacionario para posición constante. Por otro lado, los coeficientes c_1 y c_2 (relacionados con la aceleración y la velocidad, respectivamente) son estimados mediante un algoritmo evolutivo que utiliza mediciones del estado transitorio, antes de llegar a posición constante. Antes de abordar el problema de estimación de los coeficientes, a continuación se describen algunas relaciones entre variables del servomotor RC.

El presente trabajo considera la existencia de un potenciómetro que funciona de sensor de posición angular, por lo que es necesario describir la relación existente entre el voltaje de entrada que recibe el servomotor V y el ancho de pulso $w_{tarjeta}$. Otros factores importantes considerados, son el ciclo de trabajo del servomotor y la tarjeta de control.



Figura 2: Representación gráfica de los diferentes ciclos de trabajo bajo los que puede operar un servomotor RC.

Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 10, pp. 147 - 160. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022



En la figura 2 se puede observar un ejemplo del funcionamiento del ciclo de trabajo para un servomotor, además, es posible establecer una relación entre la amplitud V_{dd} de la señal $w_{tarjeta}$ y el periodo de tiempo *T* de la señal PWM, acorde con [5] la relación puede ser expresada como

$$w_{tarjeta} = k_{p1}V \tag{2}$$

donde $k_{p1} = T/V_{dd}$ es un factor de equivalencia, *V* es el voltaje promedio de entrada recibido por el servomotor. El fabricante suele proporcionar los datos correspondientes a *T* y V_{dd} , no obstante, estos suelen variar dependiendo de la implementación experimental, por lo que es recomendado utilizar un osciloscopio para conocer los valores específicos para la configuración a utilizar. Es importante además, considerar las limitaciones físicas que el servomotor empleado presenta, ya que los rangos de operación especificados por el fabricante de esté y los datos proporcionados por el fabricante de la tarjeta de control, podrían conducir a errores, debido a que no siempre son compatibles de manera directa. En [5] se presenta una metodología para la estimación de coeficientes como k_{p1} , k_{p2} , k. Dicha metodología fue replicada para la obtención de los coeficientes que se utilizaron a lo largo del presente trabajo, además de proponer la obtención de dos nuevos coeficientes asociados a la señal de acoplada entre la tarjeta de control utilizada y el servomotor.

2.1 Relación tarjeta de control - servomotor

Comprender la relación existente entre la tarjeta de control y el servomotor es una parte fundamental para reducir los errores de precisión que puedan generarse en la salida del modelo. Se propone representar la relación entre la posición alcanzada de la flecha del servomotor en estado estacionario q_{ee} y el valor de ancho de pulso $w_{tarjeta}$ en la entrada del servomotor por

$$w_{tarjeta} = k_{pwm} q_{ee} + w_{offtarjeta} \tag{3}$$

donde q_{ee} es la posición angular q en estado estacionario, $w_{offtarjeta}$ es el valor de $w_{tarjeta}$ para que $q = 0^{\circ}$ y k_{pwm} está asociado con la proporción de incremento de q_{ee} ante incrementos en el valor de ancho de pulso $w_{tarjeta}$.

Utilizando datos de mediciones de q_{ee} y $w_{tarjeta}$ realizadas en estado estacionario para la metodología propuesta, bajo la suposición de que el valor de $w_{tarjeta}$ es el valor en tiempo de ancho de pulso PWM, es posible ver que el coeficiente k_{pwm} es la pendiente en la relación lineal de la figura 3. $w_{offtarjeta}$ representa el valor de la curva en $w_{tarjeta}$ cuando el $q_{ee} = 0$.



El valor de ancho de pulso de la señal PWM se suele codificar en la tarjeta de control mediante un número entero decimal w_{dec} equivalente a un número binario de *B* bits, tal que $w_{dec} \in \{0, 1, 2, ..., 2^B - 1\} \subset \mathbb{N}$. El valor máximo de $w_{dec} = 2^B - 1$ en la tarjeta de control produce el 100% del ciclo de trabajo de la señal PWM, generando el máximo valor admisible de $w_{tarieta}$. De igual manera, al ingresar el



valor mínimo de $w_{dec} = 0$ la tarjeta de control produce el 0% del ciclo de trabajo de la señal PWM, generando el minímo valor admisible de $w_{tarjeta}$. Por lo tanto, se propone una relación que permita mapear el valor de $w_{tarjeta}$ al valor de w_{dec} , esto debido al protocolo de comunicación utilizado, puesto que el dato de entrada para la tarjeta de control es un valor entero positivo w_{dec} . Siguiendo la metodología antes descrita, se propone el cálculo de k_{dec} como la pendiente de la gráfica de la figura 4.



Figura 4: Obtención del coeficiente k_{dec}.

El coeficiente k_{dec} es el coeficiente que permite mapear el valor en unidades de tiempo $w_{tarjeta}$ a un valor codificado w_{dec} en las instrucciones de la tarjeta,

$$w_{tarjeta} = k_{dec} w_{dec} + w_{tarjetaoff} \tag{4}$$

Obtenidas las ecuaciones (2) y (4) y junto al resto de coeficientes obtenidos mediante las mediciones y la metodología propuesta en [5], es posible realizar la estimación paramétrica para un modelo de un servomotor de segundo orden como el de (1). En las siguientes secciones se muestra el procedimiento llevado a cabo para realizar dicha estimación, comenzando por los coeficientes c_3 y c_5 para estado estacionario, c_4 es obtenido de manera experimental. Finalmente, c_1 y c_2 mediante un algoritmo evolutivo.

3. Estimación de coeficientes para un servomotor

A lo largo de la metodología propuesta, se han asociado los coeficientes de (1) con magnitudes propias de la operación del servomotor, tales como la velocidad, aceleración, ancho de pulso y par de torsión. De manera tal que, se propone realizar la estimación de los coeficientes de la siguiente manera; c_3 y c_5 son calculados cuando el servomotor se encuentra sin carga en estado estacionario, c_4 se calcula luego de añadir una carga desbalanceada a la flecha del servomotor y cuando los valores numéricos de estos 3 coeficientes son conocidos, c_1 y c_2 son estimados mediante un algoritmo genético evolutivo, al minimizar el error entre la salida medida y la salida del modelo con coeficientes estimados.

3.1 Coeficientes c_3 y c_5

Partiendo de (1), su forma en estado estacionario sin carga, que implica $\ddot{q} = 0$, $\dot{q} = 0$ y $\tau = 0$, es dada por

$$q_{ee} = c_3 w_{tarjeta} - c_5 \tag{()}$$

Resolviendo (3) para q_{ee} se obtiene

Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 10, pp. 147 - 160. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022



$$q_{\rm ee} = \frac{1}{k_{pwm}} w_{tarjeta} - \frac{w_{off\ tarjeta}}{k_{pwm}} \tag{6}$$

por lo tanto el valor de los coeficientes es dado por $c_3 = \frac{1}{k_{pwm}}$ y $c_5 = \frac{w_{off \ tarjeta}}{k_{pwm}}$.

3.2 Coeficiente c_4

Como se ha mencionado anteriormente, el coeficiente c_4 esta relacionado con el par de torsión del servomotor, por lo que es necesario llevar a cabo experimentos adicionando una carga a la flecha de este. Para su cálculo, se propone el uso de una carga desbalanceada conocida, tal como el caso de un péndulo, descrito por

$$\tau_l = J_l \ddot{q} + B_l \dot{q} + mglCos(q) \tag{7}$$

donde J_l es el momento de inercia de la carga, el cual puede ser desconocido, B_l es el coeficiente de fricción viscosa de la carga, el cual puede ser desconocido, m es la masa de la carga la cual debe ser conocida, l es la distancia entre la flecha del servomotor y el centro de masa de la carga, la cual debe ser conocida y g es la aceleración gravitacional. De esta manera, la carga propuesta (7) es incluida en (1) obteniendo

$$(c_1 + c_4 J_l)\ddot{q} + (c_2 + c_4 B_l)\dot{q} + q = c_3 w_{tarjeta} - c_4 mglCos(q) - c_5$$
(8)

Si el servomotor con carga está en estado estacionario para una entrada $w_{tarjeta}$ constante, implica que $\ddot{q} = 0$ y $\dot{q} = 0$ para el tiempo final $t_f \rightarrow \infty$ en (8) y teniendo la medición en estado estacionario de la posición $q \rightarrow q_{ee}$, permite resolver para el coeficiente

$$c_4 = \frac{c_3 w_{tarjeta} - c_5 - q_{ee}}{mgl Cos(q_{ee})}$$
(9)

donde m, g y l deben tener valores conocidos durante la adquisición de la posición q.

3.3 Coeficientes c_1 y c_2

En el caso de los coeficientes c_1 y c_2 , se utilizó un algoritmo genético (AG), el cual busca valores de c_1 y c_2 tales que se minimice el error entre las salidas medidas y la salidas del modelo (1). El AG es un sistema de optimización que busca minimizar la diferencia absoluta, a la cual nos referiremos como error ($|\mathcal{E}|$), entre la salida del modelo (posición estimada \tilde{q}) y los datos experimentales (posición medida q). La figura 5 muestra al pseudocódigo del algoritmo genético, que a grandes rasgos consiste en un ciclo de evaluación, selección, y generación de individuos, donde cada individuo representa una posible solución.

La evaluación de un individuo es inversamente proporcional del error evocado utilizando sus genes (c_1 y c_2). Por su lado, la selección se refiere a determinar que individuos dentro de la población (*P*) serán parte del grupo que transmitirá sus genes (*PS*) a la siguiente generación. La figura 6 muestra el pseudocódigo del mecanismo de selección utilizado en este trabajo. El mismo consta de un sistema de torneo, donde dos individuos dentro de *P* compiten entre sí, y el individuo con la mejor evaluación "gana" su pase a *PS*.

Finalmente, para la generación de nuevas soluciones se empleó un mecanismo de cruce aritmético simple y mutación al azar. La figura 7 muestra el pseudocódigo de este paradigma de generación. El cruce aritmético simple crea el gen del nuevo individuo al mezclar (con la media aritmética) la información numérica de los genes de los padres. La mutación comprende una manera de introducir nueva información aleatoriamente para mantener la riqueza en los individuos de nuevas



generaciones. Los métodos descritos anteriormente fueron elegidos debido a su bajo costo computacional además de que resultan ser suficientes para el problema a resolver.

- 1) $P \leftarrow Rand[N, k]$ (Random generation of initial population of size N)
- 2) For 500 iteration
- 3) Evaluation $\leftarrow |\mathcal{E}|$
- 4) $PS \leftarrow Selection(P, Evaluation)$
- 5) $P \leftarrow Generation(PS)$
- 6) **End**

Figura 5: Pseudocódigo que describe al AG.



Figura 6: Pseudocódigo para el mecanismo de selección y representación esquemática del gen empleado.

 $\begin{array}{ll} 1) & {\bf For} \ i \in P. \\ 2) & {\bf If} \ Eval(i_p) > Eval(i_{Rand}) \\ 3) & PS_p \leftarrow i_p \\ 4) & {\bf Else} \\ 5) & PS_p \leftarrow P_{Rand} \\ 6) & {\bf End} \end{array}$

Figura 7: Mecanismo de generación.

Lo anterior puede ser representado de manera gráfica mediante el diagrama de flujo de la figura

8.

Al terminar la búsqueda se obtienen los coeficientes c_1 y c_2 para el modelo de un servomotor, dichos coeficientes están relacionados con la velocidad y la aceleración, respectivamente. Dichos coeficientes se obtienen al comparar la respuesta real de un servomotor, los datos recabados fueron alimentados al algoritmo evolutivo, minimizando el error entre los datos reales que del servomotor contra la posible respuesta obtenida en simulaciones utilizando los valores previamente obtenidos para los coeficientes c_3 , c_4 , c_5 y los valores propuestos para c_1 y c_2 .

3.4 Acondicionamiento de la señal medida

En la sección anterior del presente trabajo, se supone la utilización de un potenciómetro a manera de sensor de posición de la flecha del servomotor. Lo cual puede llevar a problemas debidos a la medición, ya que no cuenta con una resolución lo suficientemente fina, sin mencionar la existencia de ruido eléctrico que este pueda causar, variaciones en función de la temperatura, entre otros factores de incertidumbre. Por lo que es necesario incluir una etapa en la cual se minimicen dichos problemas.

Si se midiera la señal bajo condiciones ideales, definiendo esto como inexistencia de incertidumbre y de ruido en el sensor, la conversión del voltaje a posición angular es dada por

Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 10, pp. 147 - 160. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022



(11)

$$q_{sensor} = \frac{V_p - V_{poff}}{p} \tag{10}$$



Figura 8: Diagrama de flujo general de un algoritmo evolutivo.

Sin embargo en condiciones reales esto difícilmente se cumple. Con la finalidad de que la posición medida corresponda con la posición angular física de la flecha del servomotor se propone la inclusión de un factor de corrección

$$q_{acondicionada} = q_{sensor} + \Delta_{corrección}$$

donde en caso de ser necesario se incluye una etapa de filtrado y $\Delta_{corrección}$ es un factor de corrección.

Para la validación del modelo y de la metodología propuesta para la estimación de sus paramentos, la siguiente sección describe los resultados obtenidos al utilizar un servomotor RC comercial.

4. Resultados

Los resultados que se muestran a lo largo de la presente sección, fueron obtenidos al aplicar la metodologia de estimación paramétrica explicada en las secciones anteriores a un serovmotor RC *Power HD High-Torque Servo 1501MG* como el que se muestra en la figura 9. Los experimentos fueron realizados utilizando como tarjeta de control un Arduino Mega 2560 en conjunto con el software Simulink de Matlab.

El Arduino Mega 2560 tiene un rango de operación para el ancho de pulso PWM $w_{tarjeta} \in [0.54, 2.04] ms$, mientras que el servomotor RC *Power HD High-Torque Servo 1501MG* tiene una



posición máxima de aproximadamente $q_{max} = 165^{\circ}$ con un ciclo de operación $w_{tarjeta} \in [0.8, 2.2] ms$. Utilizando el protocolo de comunicación vía Simulink, es necesario mapear el valor de salida correspondiente a $w_{tarjeta}$ a un valor contenido entre $w_{dec} \in [0, 255]$, mientras que para realizar la lectura del voltaje $V \in [0,5] V$ es necesario una conversión en sentido inverso, siendo el rango de señal adquirida en valor decimal $V_{dec} \in [0, 1024]$.



Figura 9: Servomotor RC Power HD High-Torque Servo 1501MG.

Con la finalidad de recabar los datos necesarios para llevar a cabo la metodología propuesta, se realizaron los experimentos correspondientes a 14 posiciones diferentes de la flecha del servomotor, comenzando en 0°, aumentando de manera gradual en intervalos de 10° hasta llegar a 140°. Durante este experimento, se llevaron a cabo las mediciones de q_d , $w_{tarjeta}$, w_{dec} , V_p , V_{pwm} y q_{ee} , estos datos se encuentran concentrados en la tabla 1.

$q_d[^\circ]$	w _{tarjeta} [mS]	$w_{dec} \in [0,255]$	$V_p[V]$	V_{pwm} [V]	$q_{ee}[^{\circ}]$
0	0.5	62.5	0.77	1.20	0
10	0.65	81.25	0.84	1.57	9
20	0.75	93.75	0.87	1.81	19
30	0.85	106.25	0.93	2.06	28
40	0.95	118.75	0.97	2.30	37
50	1.05	131.25	1	2.55	48
60	1.15	143.75	1.06	2.78	57
70	1.27	158.76	1.11	3.08	68
80	1.37	171.25	1.15	3.33	79
90	1.47	183.75	1.21	3.57	88
100	1.6	200	1.27	3.9	97
110	1.7	212.55	1.3	4.13	106
120	1.8	225	1.35	4.39	117
130	1.9	237.5	1.4	4.62	127
140	2	250	1.45	4.87	138

Tabla1: Mediciones de los 14 experimentos de posicionamiento.

En las figuras 10 y 11 se observa de manera gráfica los datos obtenidos al realizar los diversos experimentos así como una aproximación lineal, con la finalidad de aplicar la metodología descrita en la sección anterior.

Para la implementación y ejecución del algoritmo genético, se seleccionó una cantidad de individuos en la población TP=150 y con generaciones TI=500 de individuos, restringiendo el espacio de búsqueda a valores positivos de los coeficientes c1 y c2. Se ejecutaron 100 iteraciones para comparar los resultados. La evaluación de los individuos se cuantificó mediante una función de aptitud dada por el error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) entre las posiciones angulares de los datos experimentales y del modelo con coeficientes estimados.

Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 10, pp. 147 - 160. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022





Figura 10: Obtención experimental del coeficiente k_{nwm} .



Figura 11: Obtención experimental del coeficiente k_{dec} .

La figura 12 muestra representa de manera gráfica la evolución del error cuádratico medio existente entre la salida del modelo estimado y los datos experimentales del servomotor, particularmente de 3 de las 100 iteraciones realizadas. Se puede apreciar la disminución del error conforme se avanza en las generaciones, esto debido a la obtención de mejores soluciones para la estimación parámetrica. Además, se aprecia que los resultados obtenidos mediante el AG varían entre experimentos, no obstante, convergen a soluciones similares.

En la tabla 2 se muestran los valores de los coeficientes estimados con la metodología presentada, por lo que el modelo de la ecuación (1) queda con coeficientes numéricos en la forma

$$0.0039\ddot{q} + 0.1253\dot{q} + q = 94.3396w - 44.2286\tau - 49.6038$$
(12)

Los resultados obtenidos al emplear el modelo (12) comparado con los datos experimentales obtenidos del servomotor se presentan en la figura 13. Puede apreciarse que el comportamiento del modelo es aproximado a los datos experimentales del servomotor.

No obstante el error que existe entre la posición identificada y la posición en estado estacionario de la flecha del servomotor es notorio, por lo que es necesario efectuar el acondicionamiento de la señal



propuesto. Al agregar $\Delta_{corrección}$ a la señal idenficada, se observa un comportamiento mucho más cercano a la posición mecánica del servomotor. El error entre la posición acondicionada y la posición de estado estacionario de la flecha del servomotor se aproxima a cero, lo cual puede observarse en la figura 14.



Figura 12: Representación gráfica de la función de aptitud (error cuadrático medio) obtenido a lo largo de las 500 generaciones del algoritmo genético en 3 diferentes iteraciones del experimento realizado.

Tabla 2: Parámetros estimados utilizando Arduino Mega 2560 mediante Simulink y servomotor Power HD
High-Torque Servo 1501MG.

Parámetros	Valor estimado
p	0.0049 V/°
V _{poff}	0.7700 V
<i>C</i> ₁	$0.0039 \ s^2$
<i>C</i> ₂	0.1253 <i>s</i>
<i>C</i> ₃	94.3396 °/ms
<i>C</i> ₄	44.2286 °/Nm
<i>C</i> ₅	49.6038 °
k _{pwm}	1/0.0106 <i>ms</i> /°
k _{dec}	0.008
	<i>ms</i> /unidad de 0 a 255

De las figuras 13 y 14 se puede apreciar que el modelo obtenido a partir de la metodología híbrida propuesta, presenta un error en estado estacionario pequeño, el cual fue cuantificado mediante el RMSE, siendo éste menor a 1°. El desempeño obtenido es logrado principalmente debido a que al realizar los experimentos descritos en las secciones anteriores, se pueden obtener datos que permiten el ajuste del AG de manera tal que la búsqueda de los parámetros a estimar sea acotada en un espacio de búsqueda reducido, evitando así la convergencia a mínimos locales.



De manera similar, en las figuras 15 y 16, se muestra el resultado obtenido al utilizar un conjunto de datos distinto, cuya posición deseada en estado estacionario es 40°. Se aprecia que a pesar que la calidad de la señal muestrada el modelo alcanza la posición deseada con un error RMSE menor a 1°.



Figura 13: Gráfica comparativa entre la posición de la flecha del servomotor en estado estacionario (línea negra), la posición acondicionada (línea roja), la respuesta del modelo identificado del servomotor (punteada azul) y la posición medida mediante el potenciometro (puntos verdes).



Figura 14: Representación gráfica del error existente entre la posición de la flecha del servomotor en estado estacionario y la posición identificada más el factor de corrección.





Figura 15: Gráfica comparativa entre la posición de la flecha del servomotor en estado estacionario (línea negra), la posición acondicionada (línea roja), la respuesta del modelo identificado del servomotor (punteada azul) y la posición medida mediante el potenciometro (puntos verdes).



Figura 16: Representación gráfica del error existente entre la posición de la flecha del servomotor en estado estacionario y la posición identificada más el factor de corrección.

5. Conclusiones

La metodología propuesta incluye el uso de algoritmos genéticos evolutivos para el cálculo de coeficientes para un modelo de un servomotor RC, específicamente para los coeficientes relacionados a las variables asociadas a la propia dinámica del servomotor; la posición y la velocidad. Esto con la



finalidad de obtener los valores más apropiados para dichos coeficientes, los cuales resultaron ser más complicados de identificar utilizando otras metodologías basadas en experimentos.

Se observa además que, la adición de los coeficientes que relacionan la conexión entre la tarjeta de control y servomotor, minimizan los errores provocados por la incompatibilidad de los valores de sus ciclos de trabajo. El factor de corrección mejora la respuesta final del modelo propuesto y el filtrado de los datos permite entregar información más precisa al algoritmo evolutivo, obteniendo así los mejores valores.

Si bien el AG permite la estimación parámetrica de algunos de los coeficientes del modelo, es importante resaltar que dichos coeficientes son obtenidos en función de los datos alimentados al AG, por lo que es imperante el uso de datos experimentales consistentes para así lograr la obtención de un modelo más robusto frente a las diferentes condiciones bajo las cuales se obtuvieron dichos datos. En este sentido, se propone como trabajo futuro la creación de una base de datos de curvas caracteristicas del servomotor, para así obtener datos que abarquen un mayor rango de condiciones experimentales y por ende, una estimación parámetrica más robusta.

Referencias

- [1] Gaviño, Ricardo Hernández. "Introducción a los sistemas de control: Conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB". Prentice Hall Mexico, Mexico DF, 2010.
- [2] Ogata, Katsuhiko and others. Modern control engineering, volume 5. Prentice hall Upper Saddle River, NJ, 2010.
- [3] Y. Huang and G. Cheng, "A robust composite nonlinear control scheme for servomotor speed regulation,"International Journal of Control, vol. 88, no. 1, pp. 104–112, 2015.
- [4] C. U. Onate and J. K. Molina, "Characterization, simulation, and implementation of a new dynamic model for a dc servomotor," IEEE Latin America Transactions, vol. 12, no. 6, pp. 997–1004, 2014.
- [5] M. E. P. Morales, M. Zamora, and Á. Rodriguez-Liñán, "Caracterización paramétrica para un modelo de segundo orden del servomotor rc," Ingenierías, vol. 22, no. 82, p. 7, 2019.
- [6] N. Wongvanich, P. Somkane, and V. Kongratana, "System identification of the two tanks system subjected to wireless hart delays," in 2018 18th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), pp. 363–368, IEEE, 2018.
- [7] A. A. Obed, A. L. Saleh, and A. K. Kadhim, "Speed performance evaluation of bldc motor based on dynamic wavelet neural network and pso algorithm," International Journal of Power Electronics and Drive Systems, vol. 10, no. 4, p. 1742, 2019.
- [8] N. F. Zakaria, M. A. Zulkifley, and M. M. Mustafa, "Parameters estimation of double exponential smoothing for hand jitter reduction using genetic algorithm," Jurnal Teknologi, vol. 77, no. 6, 2015.
- [9] M. S. Amiri, M. F. Ibrahim, and R. Ramli, "Optimal parameter estimation for a dc motor using genetic algorithm," International Journal of Power Electronics and Drive Systems, vol. 11, no. 2, p. 1047, 2020.
- [10] B. Nayak, et al., "Parameter estimation of DC motor through whale optimization algorithm," International Journal of Power Electronics and Drive Systems, vol. 10, pp. 83-92, 2019.
- [11] B. Pillai, et al., "Motion control applications: Observer based DC motor parameters estimation for novices," International Journal of Power Electronics and Drive Systems, vol. 10, pp. 195-210, 2019.
- [12] G. Sun, et al., "Performance of multi-parents genetic algorithms (MPGA) for IIR adaptive system identification," Midwest Symposium on Circuits and Systems, pp. 1-4, 2015.
- [13] G. Sun, et al., "Parameter Estimation of Three-Phase Induction Motor Using Hybrid of Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization," Journal of Engineering (United States), 2014.
- [14] H.-G. Beyer, "The theory of evolution strategies". Springer Science & Business Media, 2001.
- [15] T. Bäck and H.-P. Schwefel, "An overview of evolutionary algorithms for parameter optimization, "Evolutionary computation, vol. 1, no. 1, pp. 1–23, 1993.
- [16] C. Urrea, & J. K. Molina. "Characterization, simulation and implementation of a new dynamic model for a dc *servomotor*." IEEE Latin America Transactions, 12(6), 997-1004, 2014.



Control Basado en Reglas Difusas Simulando un Dispositivo de Respiración Auxiliar tipo Ambú

Chandomi Velasco Edgardo[⊠]

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, ^{1⊠}edgardochandomi@gmail.com.

Resumen

Adultos que tienen condiciones médicas subyacentes como enfermedad cardiaca, Covid-19, presión alta, diabetes o enfermedades de los pulmones, tienen mayores probabilidades de enfermarse de gravedad, los respiradores artificiales (RA) que son los utilizados comúnmente siguen utilizando controles convencionales, a un mayor costo y equipo voluminoso, estos métodos son simples de aplicar, pero tiene muchas debilidades, una de ellas es que si el sistema cambia entonces los parámetros PID también deben de ser cambiados, por lo cual el rendimiento estático y dinámica se verá afectado, causando una respuesta lenta y ruido. En esta investigación se ha realizado el diseño y la simulación de un sistema de control utilizando el método Fuzzy Logic para el desempeño eficiente de un dispositivo que contiene una bolsa tipo Ambú como elemento base de ayuda en la respiración asistida, el método de investigación se realizó mediante el software Matlab/Simulink y Arduino, está destinado a aumentar el control al utilizar lógica a un control de estabilidad de 2 segundos requeridos y la activación del Trigger controla el porcentaje adecuado de fuerza para bombear el aire requerido, todo en conjunto de un prototipo donde el sistema de control manipula la bolsa Ambú, y así ayudar a tener una mejor perspectiva del sistema de respiración en personas adultas que se encuentren con algún problema respiratorio.

Palabras clave: Sistema de Control, Actuador, Bolsa Ambú, Ventilador Mecánico, Respiración Artificial, Lógica Difusa, PID.

1. Introducción

Gracias a que el AMBU [1] toma aire del ambiente, no requiere una instalación de aire comprimido para su funcionamiento. A su vez, permite el agregado de oxígeno, utilizando algún tipo de depósito para el gas y luego conectándolo al respirador, estos aspectos permiten que el respirador pueda ser utilizado en tiendas de campaña, sin grandes necesidades de infraestructura.

El problema de base es si la imitación de modelos, sistemas o elementos de la naturaleza aplicados a nuestra tecnología puede dar lugar a controladores avanzados, la formalización teórica puede dar lugar a mejores resultados. Los progresos recientes parecen indicar lo segundo. Es, parafraseando a S. Russell, paralelo al desarrollo de la aviación: los primeros aviones útiles fueron aquellos que, olvidando el imitar a pájaros, emplearon la mecánica y aerodinámica en sus diseños [2].

No obstante, en procesos complejos, de modelos muy poco precisos donde las suposiciones teóricas no son fáciles de verificar, en estos conceptos se emplea la intuición del sentido común del ser humano y el aprendizaje continuo.

Los formalismos en los que se basan los sistemas de control (de decisión) inteligente son, además de la teoría de control no lineal y adaptativo básica:

- Inferencia lógica (en particular, la lógica borrosa).
- Inferencia probabilística (usada en sistemas expertos de supervisión y diagnóstico, en particular las redes bayesianas).



- Teoría de grafos y programación dinámica.
- Ajuste de parámetros (de sistemas con capacidades de generalización adecuadas, como las redes neuronales, los sistemas neuro-borrosos y los support vector machines) en aprendizaje supervisado o clasificación (clustering), mediante técnicas deterministas o aleatorias.
- Programación avanzada (arquitecturas inteligentes, orientación a objetos) donde se integran las herramientas

La incorporación de las técnicas de inteligencia artificial en el ámbito de la biomédica ha producido numerosas mejoras en el campo diagnóstico y preventivo de muchas enfermedades, el desarrollo del proyecto de investigación que se muestra en el presente documento surge con el propósito de mejorar las cualidades de un sistema de respiración auxiliar mexicano.

En 1956 el doctor en ingeniería Holger Hesse y el Dr. Henning Rubén, lanzan el primer resucitador manual del mundo. Este invento es considerado un gran hito para las técnicas de reanimación y emergencias y se da a conocer en todo el mundo [3].

En 2013 este artículo describe la comparación entre el desarrollo de un control neuronal y el de un control difuso diseñados ambos para mejorar el desempeño de la estabilidad de un manipulador planar paralelo 3RRR (Revolute-Revolute-Revolute). El manipulador tiene como característica que utiliza tres servomotores de diferente capacidad; es decir, cada servomotor posee un límite diferente en cuanto a su capacidad para aplicar el par requerido por la articulación a la que se encuentra acoplado. Los sistemas de control que se comparan tienen la finalidad de modificar la respuesta de los servomotores con base en tres parámetros que son: la ganancia proporcional de posición (PG), la ganancia proporcional de velocidad (VG) y la ganancia integral de velocidad (VI). Con el conocimiento del comportamiento del manipulador se pudo establecer como variables de entrada de la RNA la vibración y la corriente del servomotor tomado como referencia, los valores obtenidos para la varianza en las vibraciones del manipulador, la implementación del modelo inverso simplificado del manipulador con base en una red neuronal redujo la vibración en un 37.46% en todos los servomotores como valor promedio. Asimismo, mejoro el comportamiento del servomotor de menor capacidad, logrando una reducción de 39.12%. Para el control difuso se propusieron como variables de entrada la vibración de cada una de las articulaciones activas del manipulador. Como salidas de los parámetros VG y VI de cada servomotor. Tomando referencia los valores obtenidos para la varianza en las vibraciones del manipulador, la incorporación del control difuso redujo la vibración en un 66% en todos los servomotores como valor promedio [4].

En 2020, año donde se escasearon los respiradores, surgió la urgencia de implementar como los que son basados en criterios sobre el manejo de equipos de ventilación mecánica, y considerando los criterios del apartado anterior, se desarrollaron e implementaron algoritmos que corresponden al desarrollo del ventilador "SURKAN", está presión es utilizada en conjunto con la presión configurada para el cálculo del error que ingresa al controlador PID que regula la apertura y cierre de la válvula de inspiración. El algoritmo permite configurar la FR en un rango de 5 hasta 40 rpm, el tiempo inspiratorio en un rango es de 0.1 hasta 3 segundos, mientras que la pausa inspiratoria variaría entre 25% hasta 75%. El control de activación del disparo Trigger, se logró con el algoritmo de la figura 4, actuando cuando se determina en un rango de -0.5 hasta -2.5 cmH2O. Se tomó en cuenta una presión negativa ya que ésta se da al instante que el paciente realiza un esfuerzo para la inspiración. El uso de un controlador PID, para alcanzar la PIP solicitada por el usuario, permite seguir la referencia en un tiempo menor a se ha utilizado un controlador PID permitiendo alcanzar el parámetro de presión a un valor adecuado de acuerdo al tiempo de inspiración seleccionado [5].

En diciembre 2019 Se implementa un controlador basado en FUZZYSMC y PI para controlar la velocidad del motor BLDC. Se aplica un par variable y se compara el rendimiento de ambos controladores. Se observa que el tiempo de subida y el tiempo de asentamiento son menores en FUZZYSMC que en el controlador PI. Muestra la respuesta de la velocidad del controlador de lógica difusa y del controlador PI para diferentes condiciones de carga. El sistema es probado para 10% de carga a 0.05 segundos, 50% de carga a 0.1 segundos y 100% de carga a 0.15 segundos. A una



velocidad de 2000 rpm con condición de carga del 10% con PI el tiempo de respuesta 43 ms y de estabilidad de 73 ms, a un 50% el tiempo de respuesta 43.8 ms y de estabilidad de 70 ms, y 100% el tiempo de respuesta 45.9 ms y de estabilidad de 75.9 ms. En cambio, usando controlador FuzzySMC con condición de carga del 10% el tiempo de respuesta 5 ms y de estabilidad de 8.6 ms, a un 50% el tiempo de respuesta 5.2 ms y de estabilidad de 7.9 ms, y 100% el tiempo de respuesta 5 ms y de estabilidad de 6.5 ms (6).

Si bien, la propuesta del proyecto surge para enfrentar las carencias tecnológicas de equipo médico con tecnología nacional, esto con el propósito de atender a pacientes con problemas de respiración, se prevé que, así como el virus de la influenza es cíclico, este nuevo virus también lo ha sido durante un periodo de tiempo aún no definido.

Tabla 1. Resultados y métodos utilizados en investigaciones anteriores

Autor	Resultados			
Villaseñor A. Marcos, Álvarez T. Erik,	FUZZYSMC la incorporación del control difuso redujo la			
Ramírez A. Agustín, Orozco M.	vibración en un 66% en todos los servomotores como valor			
Horacio, Padilla M. José A.	promedio			
Naranjo César, Flor Omar, Tapia	Sistema heurístico, optimización y uso de elementos			
Jeysson, Flores Evelyn, Coba Alfredo,	mecánicos de fácil acceso permite que los tiempos de			
Chango Eduardo.	armado del diseño sean convenientes frente a la demanda			
	de estos equipos en una emergencia sanitaria como la			
	actual pandemia producida por la COVID-19.			
Miño Carlos, Cuaycal Andrés, Quiroga	Surkan, algoritmo PID simple de control manual.			
Josue, Gómez Karen, Portilla Karla.				
Hari Maghfiroh, Musyaffa' Ahmad,	Control de velocidad PID aumento del 6.27% de			
Agus Ramelan, Feri Adriyanto	funcionamiento			

Tabla 2. Evaluaciones de diferentes métodos

	Modelado	Comportamiento Dinámico	Robustez
PID	Puede llegar a ser complejo e impreciso en las zonas no lineales	Ruido en la acción de control	Comportamiento adecuado ante cambios en el modelo.
RNA	Sencillo, pero impreciso fuera de la zona entrenada	Poco ruido en la acción de control, pero existen retardos	Presenta error de posición al cambiar el modelo sin ser reentrenado.
IARespir a:	Dos polos reales y un polo.	Representa con una precisión aceptable la dinámica del sistema tensión-presión.	Presenta buen comportamiento en la búsqueda de ganancia, pero no se ha adecuado a los métodos clásicos.
Respira dor mecánic o emerge nte	Procedimiento heurístico de sintonización	Control de las variables respiratorias según en modo PRVC.	Se establecieron los valores iniciales, hicieron pruebas e investigaron la deformidad de la bolsa Ambu.

2. Metodología



La metodología es utilizada basándose en parámetros médicos de respiración en personas adultas, modelando y simulando la fisiología humana como datos fundamentales para la aplicación de dichas variables [8], en caso de los resultados de las pruebas no fueran las esperadas, se procederá a realizar los ajustes necesarios desde el inicio del proyecto. A continuación, para la realización del proyecto consta de 5 pasos principales, el algoritmo de control debe ir implementado en un sistema embebido, para este caso en particular, por otro lado, la estructura del prototipo está desarrollado por Quatro Robotics S.A., donde permite la transportación adecuada y el libre movimiento sobre superficies planas, se diseñará basándonos en características de la fisiología del cuerpo humano para determinar variables y técnicas implementadas que permitan suministrar oxígeno a personas adultas con problemas respiratorios.



Figura 1. Esquema del diseño del ventilador mecánico [Fuente propia]

En la figura 1, se enumeran los componentes que se han estado utilizando para el funcionamiento del controlador: (1) fuente de poder 24 v, (2) regulador de voltaje, (3) sensor de pulsioxímetro, (4) sensor de respiración, (5) tarjeta de control Arduino, (6) driver de motor a pasos, (7) motor a pasos, (8) mecanismo de leva, (9) sensor final de carrera, (10) bolsa ambú, (11) extensiones de bolsa ambu, (12) circuito de respiración.

Consiste en tomar el modelo del aparato respiratorio, por considerarse un solo compartimiento, debido a que este adopta propiedades eléctricas equivalentes a cada uno de los elementos que comprenden la vía respiratoria, como lo indica la figura 2, representada como un tubo conductor de un solo flujo conectado a un compartimiento elástico. Este modelo es análogo a un circuito eléctrico que consiste de una resistencia y un condensador, una fuente de poder o de alimentación que constituye la presión generada por un ventilador mecánico, la corriente eléctrica representa el flujo de aire [7].

De acuerdo al modelo se suministra una presión (presión ventilatoria) de gas ventilatorio a través de un tubo, oponiendo este una resistencia a la circulación del aire. La variación de volumen respecto



(V) de la variación de la presión (P) interna del globo es la complianza pulmonar que es la propiedad elástica del pulmón y que (C) equivale eléctricamente a la carga y descarga de un condensador, la Resistencia de vía aérea (R), es la resistencia que presentan los conductos (vías aéreas) por donde circula el aire hasta llegar los alvéolos pulmonares, en el modelo eléctrico, este parámetro es la suma de las diferencias de presión debidas a la complianza del sistema y a la resistencia de vía aérea, por lo cual se hace una descripción análoga con un circuito en serie RC como indica la figura 3 [7].



Figura 2. Modelo del aparato respiratorio [7].



Figura 3. Circuito RC en serie [fuente propia]

Usaremos el circuito RC en serie E = VR + VC donde se adopta un comportamiento similar al intercambio de gases del sistema respiratorio [7].

Donde:

E = VOLTIOSR = OHMIOSC = FARADIOS

Con respecto a la representación eléctrica, cuando un circuito solo contiene una resistencia y un capacitor (circuito RC), como lo indica la figura 4, se aplica la segunda ley de Kirchhoff [11], donde establece que la suma de las caídas de voltaje, a través de la resistencia (R), y del capacitor (C), es igual al voltaje aplicado E(t), y según la ley de Ohm se tiene que la caída de voltaje a través de un capacitor de capacitancia C es q(t) /C, donde q es la carga en el capacitor; por tanto, para que el circuito en serie como lo indica la figura 4, y de acuerdo a la segunda ley de Kirchhoff, se tiene la ecuación [7]:

$$R(t) + \frac{1}{C}q(t) = E(t) \tag{1}$$

Pero la corriente *i* y la carga *q* se relaciona mediante $i = \frac{dq}{dt}$; así, la ecuación se transforma en la ecuación diferencial lineal:

Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 11, pp. 161 - 176. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022



$$R\frac{dq}{dt} + \frac{1}{C}q(t) = E(t)$$
(2)

Reemplazando en (2) los parámetros eléctricos del circuito (RC) por las variables ventilatorias, se tiene, que al aplicar una presión de entrada al sistema (presión de salida del ventilador), el volumen variará de acuerdo a la ecuación diferencial lineal de primer orden ecuacion (3), que establece que la presión total aplicada es la suma de las diferencias de presión debidas a la complianza del sistema y a la resistencia de vía aérea es [7]:

$$R_i \frac{dVi(t)}{dt} + \frac{1}{C}Vi(t) = P(t)$$
(3)

Donde:

P(t) = Es la presión de salida del ventilador Vi(t) = Es el volumen inspiratorio $\frac{1}{c}$ = Es la complianza o distensibilidad pulmonar.

Del circuito RC como lo indica la figura 4, equivalente al modelo del aparato respiratorio. Se realiza el análisis por ley Kirchhoff [11], donde las tensiones de entrada son iguales a las tensiones E salida, para lo cual se halla la caída de tensión en (Ri) y en (C), aplicando la ley de Ohm, se toma ecuacion (3), y se despeja el volumen inspiratorio, se genera la ecuación ecuacion (4) y ecuacion (5), para obtener la función de transferencia y realizar su modelación en Matlab [7].

$$\frac{dVi}{dt} = \frac{P_{vent}(t)}{Ri} - \frac{1}{Ri * C}Vi$$
(4)

$$\frac{dVi}{dt} = \left[P_{vent}(t) - \frac{1}{C}Vi\right]\frac{1}{Ri}$$
(5)



Figura 4. Función de transferencia de la fisiología de respiración



Figura 5. Diseño del controlador de lógica difusa

2.1. Parámetros de control y ventilación

Frecuencia respiratoria



Cantidad de respiraciones por minuto, para un adulto sano promedio mientras está en reposo son de 12 a 18 respiraciones por minuto, con un promedio de 15 respiraciones por minuto [8].

Presión positiva al final de la espiración (PEEP)

Presión residual en el sistema respiratorio luego de la espiración, se programa una CPAP o PEEP entre 5 y 8 cmH2O. En caso de hipoxemia de origen respiratorio, la PEEP se debe ir aumentando de 2 a 3 cmH2O hasta conseguir la máxima mejoría en la presión arterial de oxígeno (PaO2), si el IMC va de 30-40: usar un PaO2 de 8 cmH2O y si IMC> 40 utilizar 10 cmH2O [8].

Presión inspiratoria máxima (PIP)

Nivel más alto de presión aplicado a los pulmones durante la inhalación, en ventilación mecánica, el número refleja una presión positiva en centímetros de presión de agua (cmH2O) PIP en un rango de 5 hasta 35 cmH2O [8]

Tiempo inspiratorio (Ti)

El tiempo a lo largo del cual hay un flujo inspiratorio hacia los pulmones [8].

Relación inspiración/espiración

Es la fracción de tiempo que se dedica a la inspiración y la espiración en cada ciclo respiratorio, la programación difiere según el modelo a considerar en la respiración [8].

Pausa inspiratoria

El Tiempo posterior al tiempo inspiratorio, en el cual ocurre un cierre de las válvulas tanto inspiratorias como espiratorias del ventilador mecánico, produciendo de esta manera que el volumen inspiratorio se mantenga por un lapso de tiempo en los pulmones [8].

Trigger

Este es el dispositivo que permite que el respirador abra su válvula inspiratoria cuando lo demanda el paciente, la sensibilidad puede ser activada de 2 formas: por flujo o por presión [8].

Presión Pico

Es la presión máxima generada en la vía aérea en promedio no debería superar los 35 cmh20 [8].

Presión arterial

Es la fuerza de su sangre al empujar contra las paredes de sus arterias, presión arterial sistólica/Presión arterial diastólica 90/60 mm Hg (milímetro de mercurio) hasta 120/80 mm Hg [90], pulso: 60 a 100 latidos por minuto y temperatura 37 °C [8].

Volumen corriente (VC).

Es la cantidad de gas que el respirador manda al paciente en cada respiración. Se programa en las modalidades de volumen y en modalidades de doble control. Lo habitual es programar un VC de 6– 10 ml/ kg (excepto en recién nacidos y pacientes con enfermedad pulmonar hipoxémica, en que se programan volúmenes menores). Hay que tener en cuenta que algunos respiradores compensan automáticamente el volumen de las tubuladuras (volumen de compresión) y otros no, por lo que, con el mismo volumen programado, el volumen efectivo puede ser diferente [8]:



Diseño y Planeación Mecatrónica, Capítulo 11, pp. 161 - 176. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022

Fórmula para obtener Volumen corriente = VC

$$K(constante) = 6 a \ 10 \ ml/kg \ de \ peso \ ideal \tag{6}$$

$$VC \ mujeres = \ estatura^2 * 21.5 * k \tag{7}$$

$$7C mujeres = estatura^2 * 21.5 * k$$

$$VC \ hombres = estatura^2 * 23 * k \tag{8}$$



Figura 6. Volumen espiratoria e inspiratoria esperado [fuente propia].



Figura 7. Curva de volumen esperado.

La figura 8 muestra la fase inspiratoria y espiratoria, es decir, mientras la presión es positiva se realiza la inspiración durante un segundo, al otro segundo se realiza la fase espiratoria producida por la caída de presión, el ciclo de volumen se repite continuamente dependiendo del tren de pulsos, este comportamiento es análogo a la carga y descarga de un condensador de un circuito RC.





Figura 8. Curva de flujo de fase inspiratoria/espiratoria.

2.2. Algoritmo de Control

Una de las principales cualidades que tenemos los seres humanos es la de poder tomar decisiones ante situaciones con altos niveles de incertidumbre y en ocasiones pobremente definidas. Por ejemplo, cuando nos enseñaron a conducir, nuestro profesor de autoescuela nos decía que, para arrancar. El control borroso trata de implantar en el computador, intrínsecamente numérico, las estrategias de control de los operadores de proceso, expresadas normalmente en términos lingüísticos, y, por tanto, imprecisos. Por ejemplo, un horno de cemento, si la temperatura es caliente y el oxígeno un poco bajo, entonces se abre un poco la ventilación [3].

En esta etapa del proyecto se efectuará un esfuerzo intelectual para valorar las principales variables Este sistema es el encargado de interpretar las órdenes provenientes del operador y generar acciones concretas sobre otros componentes funcionales del Ventilador, adquiriendo y procesando continuamente la información enviada por los sensores, en resumen, es la inteligencia del Ventilador.

Controlador Lógica Difusa

Lógica Difusa es una rama de la Inteligencia Artificial (IA) que ha sido utilizada desde 1965 hasta ahora. La lógica difusa sigue siendo elegida por su fiabilidad para resolver problemas complejos y no lineales, por su flexibilidad ante diversos problemas y porque puede combinarse con otros métodos de control para producir un sistema más óptimo [9]. La lógica difusa usa reglas básicas para producir resultados difusos, a saber, la regla IF-THEN, donde IF es un antecedente y THEN es una consecuencia [10]. En el método difuso hay 4 componentes principales, que son [9]:

- Fuzzificador: El fuzzificador se emplea para mapear el valor / precio de variables en el mundo real en conjuntos difusos.
- Base de conocimientos: La base de conocimiento contiene el conocimiento del sistema de control como guía para evaluar el estado del sistema para obtener la salida de control deseada por el diseñador.



- Motor de inferencia difusa: El motor de inferencia difusa traduce las declaraciones difusas de la base de reglas en cálculos matemáticos (combinatoria difusa).
- Defuzzificación: La defuzzificación puede definirse como el proceso de cambiar las cantidades difusas que se presentan en forma de conjuntos difusos de salida con una función de membresía para recuperar su forma.



Figura 9. Diagrama de bloques de controlador lógica difusa [9].

La modelación matemática teórica, realizadas en estos softwares, permitió recrear el comportamiento de los sistemas fisiológicos permitiéndonos conocer mejor los fenómenos fisiológicos, representados de forma análoga en estos modelos al interpretar su comportamiento del sistema determinado, como las siguientes tablas para la evaluación de reglas:

Spo2/rpm	L1	L2	L3	L4	normal	R	MR
ESTABLE	Ν	Ν	Ν	Ν	P2	P1	P1
H1	Ν	Ν	Ν	Ν	P3	Ν	Ν
H2	Ν	Ν	Ν	P4	Ν	Ν	Ν
H3	Ν	Ν	Ν	P5	Ν	Ν	Ν
H4	Ν	Ν	P6	Ν	Ν	Ν	Ν
H5	Ν	Ν	P7	Ν	Ν	Ν	Ν
H6	Ν	P8	Ν	Ν	Ν	Ν	Ν
H7	Ν	P9	Ν	Ν	Ν	Ν	Ν
H8	P10	Ν	Ν	Ν	Ν	Ν	Ν
FATAL	P11	Ν	Ν	Ν	Ν	Ν	Ν

 Tabla 3. Especificación de sensores de respiración y saturación de oxigeno.

Donde la tabla 2 es de la saturación de oxígeno de estable a fata, donde ocurre la hipoxia, y la evaluación de las respiraciones por minuto donde el actuador recorre a P1 al p11 son las pulsaciones al actuador a controlar y N es la estabilidad.



Figura 10. Funciones de membresía de una entrada de datos RPM.

Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 11, pp. 161 - 176. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022





Figura 11. Función de membresía de entrada SPO2.



Figura 12. Pulsos requeridos en las pruebas.

	Tabla 4. Especificaciones	del sensor de l	respiraciones	por minuto y	/ los pulsos a	controlar.
--	---------------------------	-----------------	---------------	--------------	----------------	------------

SENSOR RPM	DL	ML	L	С	R	MR	DR
PULSOS (RPM)	SR	MR	R	Р	D	MD	CERO

Donde el sensor DL: demasiado lento, ML: muy lento, L: lento, C: centro estable, R: rápido, MR: muy rápido, DR: demasiado rápido y los pulsos: SR: super rápido, MR: muy rápido, R: rápido, P: estable D: despacio MD: muy despacio CERO: freno paro



Figura 13. Función de membresía para el sensor RPM.



La salida, las revoluciones por minuto son las que más se adecuan, el motor recorre un total de 500 pasos por minuto haciendo una salida de esa intensidad mediante las reglas difusas.



Figura 14. Pulsos requeridos para el funcionamiento.

3. Resultados

Se optó en realizar la lógica difusa, ya que tiene propiedades computacionales particulares que las hacen adecuadas para ciertos problemas particulares y no para otros. Los sistemas difusos, los cuales razonan con información imprecisa a través de un mecanismo de inferencia bajo incertidumbre lingüística, son buenos explicando sus decisiones.

Adecuaremos las simulaciones que generan los patrones fisiológicos en la pantalla de una computadora, otros son los software de instrumentación, valiosos en la investigación académica, unos contienen un ambiente gráfico previamente programado de señales fisiológicas, así mismo se ejecutan modelos matemáticos ingresando las variables correspondientes, al igual que el software de MATLAB, y con la herramienta de Simulink, permite realizar modelos matemáticos, que para el caso, es el utilizado en la simulación como recurso académico utilizado desde un comienzo en el presente trabajo.

El uso del software consiste en simular un ventilador mecánico controlado por presión y ciclado por tiempo, para lo cual se toma el modelo del aparato respiratorio (modelo unicompartimental) como lo indica la Figura 2, simulando el suministro de presión ventilatoria (Pvent), que equivale a un voltaje en el circuito eléctrico, de igual manera (C) representa la complianza o distensibilidad pulmonar y (Ri) representa la resistencia de la vía aérea.



Figura 15. Estabilidad de activación del equipo a 2 segundos requeridos.


Sistema de monitoreo

Para este caso, existen varias formas de interactuar con el sistema. Se decidió usar el sistema embebido del Arduino como comunicación entre el sistema a controlar, por ser tan compatible con diversos softwares de programación.

En la figura 16 y 17 apreciamos el muestreo en un adulto sano, las gráficas rojas representan la saturación de oxígeno en la sangre (SPO2) y las gráficas azules muestran la frecuencia cardiaca.



Tiempo en ms Figura 16. Sensor SPO2 en una persona adulta y frecuencia cardiaca.





Figura 17. Saturación de oxígeno de una persona normal y ritmo cardiaco en reposo absoluto. En la figura 16 muestra una relación de espiración e inspiración en tiempo real de una persona adulta en condiciones de perturbación, como se mostró en la figura 8.



Figura 18. Prueba de sensibilidad de la frecuencia respiratoria de un adulto.



Tiempo en ms

Figura 19. Respiraciones por minuto de una persona adulta en reposo.

En la figura 19, se emplean los datos a manera que los pulsos vayan con forma a la presión de cmH2O para mejorar la presión que da el sistema ambu para su eficiencia en la ejecución, apoyándonos de las medidas y los parámetros dados. Luego mediante esta figura 12 se dirige una frecuencia de inspiración y expiración y la sensibilidad del Trigger que va de -1 a 1.

En estas pruebas nos acercamos a una mejor estabilidad y una nueva función de transferencia, lo cual ayudo al mejor funcionamiento, primero, usando fuzzy logic designer, un sensor el cual mide las respiraciones por minuto controla a una salida un motor a pasos.



Figura 20. Presión de flujo de aire a 20 cmH2o suministrada a cada cierto tiempo requerido ejemplo cada segundo.



4. Conclusiones

En este trabajo de investigación se obtuvieron resultados significativos respecto al diseño de un controlador con lógica difusa, haciendo pruebas simuladas por medio de Matlab, Simulink y Arduino, el diseño y construcción del mecanismo se realizó pensando en su facilidad de implementación y sea eficiente para su elaboración, se recomienda que las bases en la información sea la más usada o probada adecuadamente, ya que en diferentes zonas se pueden usar otros parámetros a considerar para la implementación de los cálculos.

El controlador PID funcionó en un principio, pero al estar buscando los parámetros el programa utilizaba más espacio de memoria para sintonizarlos, en cambio, el toolbox de Matlab de lógica difusa aplicaba ser más eficiente para el problema de implementación en el mecanismo, los resultados de este estudio son muy similares a métodos de mayor rendimiento y en casos de mayor calidad, sin embargo, se obtuvieron muy buenos resultados y si es eficiente tener un mecanismo de respiración auxiliar con bolsas ambu por su practicidad, menor costo, facilidad de mantenimiento. Se seguirá experimentando, investigando, valorando y contribuyendo para adquirir más conocimientos.

Después de las simulaciones del sistema se vio que tiene una mejora en la respuesta, también se encontraron varios problemas relacionados con el modo de interacción con el usuario y la interfaz, dando a conocer que las respuestas a la frecuencia de respiración respondieron adecuadamente.

El diseño del este controlador difuso depende de los parámetros de la planta y generalmente suele ser complicado implementar una única técnica que posea la suficiente capacidad para arrojar los resultados esperados.

Referencias

- [1] Ambu.es. 2020. Ambu International Recuperado de: https://www.ambu.es/sobre-nosotros/acercade-ambu/nuestrahistoria#:~:text=La%20bolsa%20Ambu&text=Es%20el%20primer%20resucitador%20autoinflable,
- y%20los%20servicios%20de%20emergencia Fecha de consulta 8 June 2020 [2] Comité español de automática. (2010, 15 octubre). Sistemas de Control Inteligente | CEA.
- http://intranet.ceautomatica.es/en/og/control-inteligente/sistemas-de-control-inteligente
- [3] Diciembre Sanahuja, S. (2017). Sistemas de Control con Lógica Difusa: Métodos de Mamdani y de Takagi-Sugeno-Kang (TSK).
- [4] Villaseñor, A. M., Álvarez, T. E., Ramírez, A. A., Orozco, M. H., & Padilla, M. J. A. (2013). Técnicas de Inteligencia Artificial para el Control de Estabilidad de un Manipulador Paralelo. itson, 11(1). https://www.itson.mx/publicaciones/rieeyc/Documents/vol11/vol11-articulo3.pdf
- [5] MiñoC., CuaycalA., QuirogaJ., GómezK., & PortillaK. (2020). ALGORITMOS PARA EL CONTROL DE PARÁMETROS VENTILATORIOS EN EQUIPOS MECÁNICOS EMERGENTES. Universidad Ciencia Y Tecnología, 1(1), 123-129. Recuperado a partir de https://uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct/article/view/324
- [6] More, P.B. (2019). Fuzzysmc based Speed Control of BLDC Motor. International Journal of Engineering Research and, 8.
- [7] Flórez Luna, Néstor (2006). Simulación por software de las curvas generadas en ventilación mecánica por control de presión. Umbral Científico, (9),85-96. [fecha de Consulta 29 de Junio de 2021]. ISSN: 1692-3375. Disponible en: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30400910
- [8] Carrillo Álvarez, A., & López-Herce Cid, J. (2003). Programación de la ventilación mecánica. Anales de Pediatría, 59(1), 67–74. https://doi.org/10.1016/s1695-4033(03)78151-x
- [9] R. Goswami and J. Dheeraj, "Performance Review of Fuzzy Logic Based Controllers Employed in Brushless DC Motor," International Conference on Computational Intelligence and Data Science (ICCIDS), 2018.
- [10] H.U. Jianyao, W.U. Juan, H. Peng, Q. Peng, and Q. Huang, Application of Fuzzy Logic Algorithm for Optimization of Control Strategy in Electric Vehicles (IEEE), 2017.
- [11] Pardell, X., 2019. Ventilación Mecánica Apuntes De Electromedicina Xavier Pardell. [online] Pardell.es. Recuperado de: https://www.pardell.es/ventilacion-mecanica.html
- [12] Pozuelo-Reina, Ángel A.; Redondo-Calvo, Francisco J. Avances en la historia de la VMNI. Período de Entreguerras (1919-1939) Revista Americana de Medicina Respiratoria, vol. 17, núm. 3, septiembre, 2017, pp. 255- 264.



Diseño y Simulación de un Exoesqueleto de Seis Grados de Libertad para Extremidades Inferiores

De La Rosa Hernández Gerardo Adrián, Avitia Becerra José Luis, Rodríguez Hernández Ernesto Daniel, Rodríguez Liñan Juan Angel y Quiroz Compean Griselda

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. griselda.quirozcm@uanl.edu.mx

Resumen

Los exoesqueletos son dispositivos mecatrónicos que pueden ser usados en programas de rehabilitación física para personas que han sufrido alguna lesión neurológica como, por ejemplo, el accidente cerebral isquémico o hemorrágico. Este tipo de lesiones pueden causar la pérdida parcial o total de la movilidad por lo que se vuelve necesario contar con dispositivos de asistencia que apoyen a las personas a recuperar su movilidad y reintegrarse a su vida diaria. En el presente trabajo se presenta el diseño un exoesqueleto de extremidades inferiores, el cual puede ser una herramienta útil para rehabilitar movilidad en las articulaciones de la cadera, rodilla y tobillo. El diseño mecánico del exoesqueleto está fundamentado en las medidas antropométricas promedio de una persona mexicana. Además, se presenta el modelo dinámico del exoesqueleto a partir de las ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange, con la finalidad de conocer el comportamiento del dispositivo. Considerando trayectorias de posiciones de referencia de las articulaciones de interés, se resuelve el problema de control de seguimiento de trayectoria utilizando un esquema de control PID. Los resultados se verifican por medio de simulaciones numéricas.

Palabras clave: Exoesqueleto, Dispositivo Mecatrónico de Asistencia, Diseño Mecánico, Modelado Euler-Lagrange, Control Saturado.

1. Introducción

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), más del 15% de la población tiene algún tipo de discapacidad [1]. Tan solo en Estados Unidos en el 2010, alrededor de 30.6 millones de personas tenían una discapacidad asociada con sus actividades ambulatorias tales como tener dificultad al caminar, subir o bajar escaleras, o tenían la necesidad de usar una silla de ruedas, andador, bastón o muletas [2]. En el 2011, en la Unión Europea poco más de 11 mil personas con discapacidad para caminar [3]. En el ámbito nacional, la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición 2012 reportó que alrededor del 4.9% de hombres y 5.8% de mujeres (alrededor 2.5 y 3 millones de personas respectivamente) tenían la discapacidad al caminar o moverse [4]. En el caso específico de las discapacidades en los miembros inferiores, éstas pueden tener origen en anomalías congénitas [5], condiciones crónicas [6] o lesiones [7,8]. Las estadísticas globales muestran que las discapacidades relacionadas con patologías neuromusculares de miembros inferiores son prevalentes. Una de estas patologías es el accidente cerebral isquémico o hemorrágico, también conocido como stroke, el cuál ocurre cuando un coaquio sanguíneo bloquea o estrecha una arteria que conduce al cerebro. Algunos factores de riesgo relacionados con el estilo de vida son el tener sobrepeso u obesidad, inactividad física o beber bebidas alcohólicas en exceso, mientras que los factores de riesgo médicos son hipertensión arterial, colesterol alto, diabetes, entre otros, y una de las complicaciones más comunes es la parálisis o perdida del movimiento muscular [9]. Para mejorar la calidad de vida de una persona con dicha complicación, necesario proporcionar opciones de tratamientos y terapias para que los pacientes afectados puedan reintegrarse exitosamente en sus actividades diarias. Una herramienta que puede ser de utilidad en los programas de rehabilitación física son los exoesqueletos [10].



De manera general, los exoesqueletos son dispositivos mecatrónicos que pueden ser usados para amplificar o rehabilitar capacidades motrices de una persona [11]. En el caso amplificación de capacidades, el sector industrial se ha beneficiado del uso de exoesqueletos para asistir a los operadores en la manipulación de elementos pesados para mantener una posición corporal durante periodos prolongados de tiempo [12]. Incluso, se ha reportado que el uso de exoesqueletos en líneas de producción puede reducir la fatiga y las lesiones de los operadores de manera significativa, disminuyendo la probabilidad de accidentes laborales, lo que se traduce en un ahorro de capital económico para las empresas [13]. En el caso de rehabilitación, los exoesqueletos se usan como dispositivos de asistencia para personas que han perdido capacidad de movimiento en las extremidades superiores y/o inferiores [14]. Además, para algunas enfermedades como el accidente cerebral isquémico, se ha mostrado que el uso de exoesqueletos en etapas tempranas de la rehabilitación puede ayudar a recuperar capacidades motrices en periodos de tiempo más cortos en comparación con la rehabilitación sin uso de exoesqueletos [15].

El desarrollo de exoesqueletos mecatrónicos implica al menos las siguientes etapas: diseño mecánico (número de grados de libertad, capacidades cinemáticas y dinámicas, restricciones mecánicas), instrumentación (selección de sensores, actuadores y sistema de procesamiento) y control (módulos o algoritmos de control que definen el comportamiento automático del dispositivo) [16]. Actualmente existe una gran diversidad de pruebas de concepto de exoesqueletos, incluso, existen ya algunos desarrollos comerciales, como los exoesqueletos Indego, ReWalk, HAL, Exo-H3, Ekso GT [10]. Comúnmente los desarrollos incluyen cuatro grados de libertad actuados (cadera y rodilla) [17]. Esto impone el reto de ampliar el diseño mecánico para contar con exoesqueletos que consideren movimiento actuado en las tres principales articulaciones de las extremidades inferiores, esto es: cadera, rodilla y tobillo. Existen antecedentes directos sobre el diseño y control de exoesqueletos como el reportado en [18] y [19]; sin embargo, aún existen muchas preguntas por resolver en términos de modulación de energía de este tipo de dispositivos. Por tal motivo, en este trabajo se presenta el diseño mecánico de un exoesqueleto para extremidades inferiores de seis grados de libertad (cadera, la rodilla y el tobillo de ambas piernas). El diseño está fundamentado en las medidas antropométricas estándar para obtener las longitudes y pesos de cada segmento del exoesqueleto. Posteriormente se desarrolla el modelo dinámico a partir de las ecuaciones de Euler-Lagrange y se propone un controlador PID para resolver el problema de seguimiento de trayectorias. Los resultados del exoesqueleto ejecutando una trayectoria de movimiento se ilustran a través de una simulación del modelo dinámico con control PID en el software Matlab-Simulink.

2. Desarrollo metodológico

En esta sección se expone la metodología utilizada para desarrollar el diseño mecánico del dispositivo de asistencia. Como se muestra en la Figura 1, la metodología inicia por el análisis antropométrico del cuerpo humano, lo cual proporciona las medidas antropométricas promedio con las que se realizará el diseño mecánico. Con esta información y la metodología de Euler-Lagrange, se calcula el modelo dinámico que representa la abstracción del comportamiento físico del exoesqueleto de miembro inferior considerando como grados de libertad la cadera, la rodilla y el tobillo; tanto de pierna derecha como de izquierda. Después se seleccionan las trayectorias de referencia para cada una de las articulaciones del exoesqueleto y se propone un controlador PID para resolver el problema de seguimiento de trayectorias. La solución de dicho problema se ilustra con simulaciones numéricas. En las siguientes secciones se detalla cada uno de los pasos de la metodología propuesta.



Figura 1. Desarrollo metodológico del diseño mecánico y simulación de un exoesqueleto de seis grados de libertad.



2.1 Diseño mecánico

El proceso para desarrollar el diseño mecánico del exoesqueleto se comienza al considerar parámetros antropométricos estándar del cuerpo humano [20]. Considerando una persona con una altura promedio (H) y peso promedio (W), respectivamente, se pueden calcular los parámetros del mecanismo. En la Tabla 1 se resumen los principales parámetros requeridos para realizar el diseño mecánico.

Vínculos	Medida antropométrica	Porcentaje del segmento
	Longitud	23.2% de H
	Peso	10.5% de W
Muslo	Centro de Masa	43.3% de la longitud del muslo
	Radio de Giro	26.7% de la longitud del muslo
	Momento de Inercia	No aplica
	Longitud	24.7% de H
	Peso	4.75% de W
Pantorrilla	Centro de Masa	43.4% de la longitud del muslo
	Radio de Giro	28.1% de la longitud del muslo
	Momento de Inercia	No aplica
	Longitud	4.25% de H
	Peso	1.43% de W
Pie	Centro de Masa	50% de la longitud del muslo
	Radio de Giro	25.7% de la longitud del muslo
	Momento de Inercia	No aplica

Tabla 1. Cálculo de las medidas antropométricas de los principales segmentos del cuerpo humano.

Una vez realizados los cálculos de cada uno de los vínculos, se comenzó a desarrollar el modelo mecánico en el software Autodesk Inventor Professional. considerando como material el ácido poliláctico (PLA). Las principales vistas del modelo CAD se muestran en la Figura 2.



Figura 2. Vistas del modelo mecánico generado en Autodesk Inventor Professional a partir de las medidas antropométricas promedio escaladas reportadas en la Tabla 1.



2.2 Modelo matemático de exoesqueleto

El diseño mecánico del exoesqueleto busca reproducir el movimiento articular de las extremidades inferiores del cuerpo humano en el plano anatómico conocido como sagital. Por tal motivo, el mecanismo resultante es planar y su movimiento puede ser modelado matemáticamente con la metodología de Euler-Lagrange para robots planares. Debido a que el mecanismo reproduce el movimiento de las articulaciones cadera, rodillo y tobillo en ambas piernas, el modelo se propone como un par de cadenas abiertas de tres grados de libertad cada una. En esta sección se describe la metodología para la obtención del modelo dinámico de una de las cadenas abiertas, asumiendo que es la misma metodología para ambias cadenas.

2.2.1 Ecuación de movimiento de Euler-Lagrange

La ecuación de movimiento de Euler-Lagrange describe la dinámica de las posiciones y velocidades articulares de un sistema mecánico y está dada por [21]:

$$\tau = \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right] - \left[\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q} \right] + f_f(f_e, \dot{q}), \tag{1}$$

donde τ es el par articular, q es la posición angular, (q, \dot{q}) es la velocidad angular, $L(q, \dot{q})$ es la función Lagrangiano y $f_f(f_e, \dot{q})$ es una función de fricción.

La función Lagrangiano está dada por lo siguiente:

$$L(q,\dot{q}) = K(q,\dot{q}) - \mathcal{U}(q), \tag{2}$$

donde $K(q, \dot{q})$ es la energía cinética y $\mathcal{U}(q)$ es la energía potencial. La energía cinética de cada vínculo de un mecanismo está definida como:

$$K(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \left[m v^T v + I \dot{q^2} \right],$$
(3)

donde m es la masa del eslabón a analizar, v es la velocidad lineal del eslabón e I es el tensor de momentos de inercia del eslabón. Por su parte, la energía potencial se define como:

$$\mathcal{U}(q) = mgh, \tag{4}$$

donde *g* es la constante de gravedad terrestre y *h* es la altura actual del eslabón con respecto al suelo.

Para obtener la expresión de la función Lagrangiano (2) y, posteriormente la ecuación de movimiento (1) del exoesqueleto, se propone el diagrama de cuerpo rígido mostrado en la Figura 3. Con ello se calculan las expresiones de la energía cinética y potencial para cada uno de los vínculos del exoesqueleto, esto es, muslo, pantorrilla y pie.





Figura 3. Diagrama de cuerpo de una de las dos cadenas abiertas del exoesqueleto de miembros inferiores. Las líneas azules representan (de arriba hacia abajo) el muslo, pierna y pie, mientras que los círculos negros representan las articulaciones de cadera, rodilla y tobillo. Los círculos amarillos representan los centros de masa de los vínculos.

Para este fin, se define la posición angular del exoesqueleto como un vector que incluye las tres posiciones angulares de cada vínculo, esto es, q_1 , q_2 y q_3 , el cual se representa como sigue:

$$q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}.$$
(5)

En el mismo sentido, velocidad articular de los actuadores del robot puede representarse como:

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix}.$$
(6)

A continuación, se describe el procedimiento para calcular las energías cinéticas y potencial de cada uno de los vínculos del exoesqueleto.

2.2.2 Cálculo de energía cinética

La energía cinética del exoesqueleto propuesto se puede calcular partiendo de la velocidad del centro de masa de cada eslabón del mecanismo [22]. La velocidad se obtiene de la derivada temporal del vector de posición definido para cada grado de libertad como sigue. Para el primer vínculo (muslo) el vector de posición es:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{c1}Sin(q_1) \\ -l_{c1}Cos(q_1) \\ 0 \end{bmatrix} .$$
 (7)

Para el segundo vínculo (pantorrilla):

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 Sin(q_1) + l_{c2} Sin(q_1 + q_2) \\ -l_1 Cos(q_1) - l_{c2} Cos(q_1 + q_2) \\ 0 \end{bmatrix}.$$
(8)



Para el tercer vínculo (pie):

$$\begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 Sin(q_1) + l_2 Sin(q_1 + q_2) + l_{c3} Sin(q_1 + q_2 + q_3) \\ -l_1 Cos(q_1) - l_2 Cos(q_1 + q_2) - l_{c3} Cos(q_1 + q_2 + q_3) \\ 0 \end{bmatrix}.$$
(9)

En las ecuaciones (7)-(9) l_1 y l_2 son las longitudes del primer y segundo vínculo; mientras que l_{c1} , l_{c2} y l_{c3} son las longitudes al centro de masa de los tres vínculos del exoesqueleto. Después de esto se calculan las velocidades lineales (v_i) de los centros de masa a partir de la derivada temporal de las ecuaciones (7)-(9):

$$v_i = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \frac{\partial}{\partial q} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \frac{d}{dt} q,$$
(10)

donde *i*=1,2,3 es el número de vínculo del cual se obtiene el modelo cinemático diferencial. Con el objetivo de simplificar la notación, definimos el jacobiano del modelo de cinemática directa como:

$$v_i = \Omega_i \frac{d}{dt} q, \tag{11}$$

donde:

$$\Omega_i = \frac{\partial}{\partial q} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}.$$
(12)

Podemos expresar el modelo cinemático diferencial del primer vínculo como:

$$v_{1} = \begin{bmatrix} l_{c1}Cos(q_{1})\dot{q}_{1} \\ l_{c1}Sin(q_{1})\dot{q}_{1} \\ 0 \end{bmatrix}.$$
 (13)

La cinemática diferencial del segundo vínculo puede expresarse como:

$$v_{2} = \begin{bmatrix} l_{1}Cos(q_{1})\dot{q}_{1} + l_{c2}Cos(q_{1}+q_{2})\dot{q}_{1} + l_{c2}Cos(q_{1}+q_{2})\dot{q}_{2} \\ l_{1}Sin(q_{1})\dot{q}_{1} + l_{c2}Sin(q_{1}+q_{2})\dot{q}_{1} + l_{c2}Sin(q_{1}+q_{2})\dot{q}_{2} \\ 0 \end{bmatrix}.$$
(14)

La cinemática diferencial del tercer vínculo puede expresarse como:

$$v_3 = \begin{bmatrix} v_{3,1} \\ v_{3,2} \\ 0 \end{bmatrix}, \tag{15}$$

donde, $v_{3,1} = l_1 Cos(q_1)\dot{q}_1 + l_2 Cos(q_1 + q_2)\dot{q}_1 + l_2 Cos(q_1 + q_2)\dot{q}_2 + l_{c3} Cos(q_1 + q_2 + q_3)\dot{q}_1 + l_{c3} Cos(q_1 + q_2 + q_3)\dot{q}_1 + l_2 Cos(q_1 + q_2)\dot{q}_1 + l_2 Cos(q_1 + q_2)\dot{q}_1 + l_2 Cos(q_1 + q_2)\dot{q}_1 + l_2 Cos(q_1 + q_2)\dot{q}_2 + l_{c3} Cos(q_1 + q_2 + q_3)\dot{q}_1 + l_{c3} Cos(q_1 + q_2 + q_3)\dot{q}_2 + l_{c3} Cos(q_1 + q_2 + q_3)\dot{q}_1 + l_{c3} Cos(q_1 + q_2 + q_3)\dot{q}_2 + l_{c3} Cos(q_1 + q_2 + q_3)\dot{q}_3.$

La expresión de la energía cinética definida en la ecuación (3) requiere el cálculo del cuadrado de la magnitud del vector de velocidad, lo cual es equivalente al producto escalar $v^T v$. Conservando la notación propuesta en (12), el cuadrado de la cinemática diferencial puede expresarse como:

$$v^{T}v = (\Omega \dot{q})^{T} (\Omega \dot{q}) = \dot{q}^{T} \Omega^{T} \Omega \dot{q},$$
(16)



donde la matriz Ω_1^T puede expresarse como:

$$\Omega_1^T = \begin{bmatrix} l_{c1} Cos(q_1) & l_{c1} Sin(q_1) & 0\\ 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$
(17)

por lo que podemos calcular el cuadrado de la velocidad cartesiana del primer vínculo como:

$$v_1^T v_1 = l_{c_1}^2 \dot{q}_1^2 \tag{18}$$

La matriz Ω_2^T puede expresarse como:

$$\Omega_2^T = \begin{bmatrix} l_1 Cos(q_1) + l_{c2} Cos(q_1 + q_2) & l_1 Sin(q_1) + l_{c2} Sin(q_1 + q_2) & 0\\ l_{c2} Cos(q_1 + q_2) & l_{c2} Sin(q_1 + q_2) & 0\\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$
(19)

por lo que podemos calcular el cuadrado de la velocidad cartesiana del segundo eslabón como:

$$v_2^T v_2 = [l_1^2 + 2l_1 l_{c2} Cos(q_2) + l_{c2}^2] \dot{q_1^2} + 2[l_1 l_{c2} Cos(q_2) + l_{c2}^2] \dot{q_1} \dot{q_2} + l_{c2}^2 \dot{q_2^2}.$$
(20)

La matriz Ω_3^T puede expresarse como:

$$\Omega_{3}^{T} = \begin{bmatrix} \Omega_{3,1}^{T} & \Omega_{3,2}^{T} & 0\\ \Omega_{3,3}^{T} & \Omega_{3,4}^{T} & 0\\ \Omega_{3,5}^{T} & \Omega_{3,6}^{T} & 0 \end{bmatrix},$$
(21)

en donde $\Omega_{3,1}^T = l_1 Cos(q_1) + l_2 Cos(q_1 + q_2) + l_{c_3} Cos(q_1 + q_2 + q_3), \ \Omega_{3,2}^T = l_1 Sin(q_1) + l_2 Sin(q_1 + q_2) + l_{c_3} Sin(q_1 + q_2 + q_3), \ \Omega_{3,4}^T = l_2 Sin(q_1 + q_2) + l_{c_3} Sin(q_1 + q_2 + q_3), \ \Omega_{3,5}^T = l_2 Sin(q_1 + q_2) + l_{c_3} Sin(q_1 + q_2 + q_3), \ \Omega_{3,5}^T = l_2 Sin(q_1 + q_2 + q_3), \ \Omega_{3,5}^T = l_{c_3} Cos(q_1 + q_2 + q_3), \ \Omega_{3,5}^T = l_{c_3} Sin(q_1 + q_2 + q_3).$

Por lo que podemos calcular el cuadrado de la velocidad cartesiana del tercer eslabón como:

$$v_{3}^{T}v_{3} = [l_{1}^{2} + 2l_{1}l_{2}Cos(q_{2}) + 2l_{1}l_{c3}Cos(q_{2} + q_{3}) + l_{2}^{2} + 2l_{2}l_{c3}Cos(q_{3}) + l_{c3}^{2}]\dot{q}_{1}^{2} + 2[l_{2}^{2} + 2l_{2}l_{c3}Cos(q_{3})] + l_{1}l_{2}Cos(q_{2}) + l_{c3}^{2} + l_{1}l_{c3}Cos(q_{2} + q_{3})\dot{q}_{1}\dot{q}_{2} + 2[l_{c3}^{2} + l_{2}l_{c3}Cos(q_{3}) + l_{1}l_{c3}Cos(q_{2} + q_{3})]\dot{q}_{1}\dot{q}_{3} + [l_{2}^{2} + 2l_{2}l_{c3}Cos(q_{3}) + l_{c3}^{2}]\dot{q}_{2}^{2} + 2[l_{c3}^{2} + l_{2}l_{c3}Cos(q_{3})]\dot{q}_{2}\dot{q}_{3} + l_{c3}^{2}\dot{q}_{3}^{2}.$$

$$(22)$$

En la ecuación (16) podemos considerar al producto de matrices $\Omega^T \Omega$ como una matriz simétrica y definida positiva. Con las ecuaciones (18), (20) y (22) se calcula la energía cinética en cada uno de los vínculos del exoesqueleto de la ecuación (3).

2.2.3 Cálculo de la energía potencial

La energía potencial es la energía almacenada en el mecanismo debido al campo conservativo de la gravedad y depende únicamente de su posición [23]. La energía potencial está directamente relacionada a la distancia de los centros de masa de robot con respecto al suelo. A mayor distancia del suelo, mayor la energía potencial del sistema. El modelo general de energía potencial para cada vínculo está dado por la ecuación (4), por lo que es necesario identificar primero el eje de referencia del robot que se encuentre perpendicular al suelo. Este eje nos permite conocer la altura el enésimo centro de masa del robot y por lo tanto modelar la energía potencial del mismo. Mediante análisis, debemos determinar cuál es la altura máxima que puede alcanzar el robot sobre el eje de referencia que seleccionamos en el paso anterior, y sustraemos la altura actual (de modelo cinemático directo) de la



altura máxima (obtenida de forma analítica) y así determinamos la altura h de la energía potencial de cada uno de los vínculos del exoesqueleto.

La altura h_1 del primer vínculo puede definirse como:

$$h_1 = h_{act1} - h_{max1} = -l_{c1}Cos(q_1) - (-l_{c1}) = l_{c1}[1 - Cos(q_1)].$$

La energía potencial del primer vínculo \mathcal{U}_1 puede escribirse como:

$$\mathcal{U}_{1}(q) = m_{1}gl_{c1}[1 - Cos(q_{1})].$$
⁽²³⁾

La altura h_2 del segundo vínculo puede definirse como:

$$h_2 = h_{act2} - h_{max2} = (-l_1 - l_2) - (l_1 Cos(q_1) + l_{c2} Cos(q_1 + q_2)).$$

La energía potencial del primer vínculo \mathcal{U}_2 puede escribirse como:

$$\mathcal{U}_{2}(q) = m_{2}g[(-l_{1} - l_{2}) - (l_{1}Cos(q_{1}) + l_{c2}Cos(q_{1} + q_{2})].$$
⁽²⁴⁾

La altura h_3 del tercer vínculo puede definirse como:

$$h_3 = h_{act3} - h_{max3} = (-l_1 - l_2 - l_{c3}) - (l_1 Cos(q_1) + l_2 Cos(q_1 + q_2) + l_{c3} Cos(q_1 + q_2 + q_3)).$$

La energía potencial del tercer vínculo \mathcal{U}_3 puede escribirse como:

$$\mathcal{U}_{3}(q) = m_{3}g[(-l_{1} - l_{2} - l_{c3}) - (l_{1}Cos(q_{1}) + l_{2}Cos(q_{1} + q_{2}) + l_{c3}Cos(q_{1} + q_{2} + q_{3})).$$
(25)

Con las expresiones de la energía cinética y energía potencial para cada vínculo del exoesqueleto es posible calcular la función Lagrangiano definida en la ecuación (2) para cada uno de los tres vínculos de exoesqueleto.

2.2.4 Modelo dinámico del exoesqueleto

El modelo dinámico del exoesqueleto se obtiene a partir de la ecuación (1), considerando las funciones Lagrangiano para cada uno de los vínculos de los exoesqueletos. Una forma común de representar el resultado de evaluar la ecuación (1) es el llamado modelo dinámico en forma matricial definido como [21]:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) + f_f(q, f_e),$$
(26)

donde \ddot{q} es el vector de aceleraciones angulares, M(q) es la matriz de inercia, $C(q, \dot{q})$ es la matriz de fuerzas centrípetas y de Coriolis, G(q) es el vector de pares gravitacionales y $f_f(q, f_e)$ es una función de fricción dada. Considerando la función lagrangiano para cada vínculo, se tienen las siguientes expresiones para la ecuación (31):

$$M(q) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix},$$
(27)



en donde:

$$\begin{split} M_{11} &= I_1 + I_2 + I_3 + I_1^2 m_3 + I_2^2 m_3 + I_{c1}^2 m_1 + I_{c2}^2 m_2 + I_{c3}^2 m_3 + 2I_1 I_{c3} m_3 Cos(q_2 + q_3) + 2I_1 I_2 m_3 Cos(q_2) + \\ 2I_1 I_{c2} m_2 Cos(q_2) + 2I_2 I_{c3} m_3 Cos(q_3), \quad M_{12} &= I_2 + I_3 + m_3 (I_2^2 + 2I_2 I_{c3} Cos(q_3) + I_1 I_2 Cos(q_2) + I_{c3}^2 + \\ I_1 I_{c3} Cos(q_2 + q_3)) + I_{c2} m_2 (I_{c2} + I_1 Cos(q_2)), \quad M_{13} &= I_3 + I_{c3} m_3 (I_{c3} + I_1 Cos(q_2 + q_3) + I_2 Cos(q_3)), \\ M_{21} &= I_2 + I_3 + m_3 (I_2^2 + 2I_2 I_{c3} Cos(q_3) + I_1 I_2 Cos(q_2) + I_{c3}^2 + I_1 I_{c3} Cos(q_2 + q_3)) + I_{c2} m_2 (I_{c2} + I_1 Cos(q_2)), \\ M_{22} &= I_2 + I_3 + H_3 (I_2^2 + 2I_2 I_{c3} Cos(q_3) + I_2^2 Cos(q_3) + I_{c3}^2), \\ M_{23} &= I_3 + m_3 (I_{c3}^2 + I_2 I_{c3} Cos(q_3)), \\ M_{31} &= I_3 + I_{c3} m_3 (I_{c3} + I_1 Cos(q_2 + q_3)) + I_2 Cos(q_3)), \\ M_{32} &= I_3 + m_3 (I_{c3}^2 + I_2 I_{c3} Cos(q_3)), \\ M_{33} &= I_3 + m_3 (I_{c3}^2) + I_1 I_2 Cos(q_3)), \\ M_{33} &= I_3 + m_3 (I_{c3}^2) + I_1 I_2 Cos(q_3)), \\ M_{33} &= I_3 + m_3 (I_{c3}^2) + I_1 I_2 Cos(q_3)), \\ M_{33} &= I_3 + m_3 (I_{c3}^2) + I_1 I_2 Cos(q_3)), \\ M_{33} &= I_3 + m_3 (I_{c3}^2) + I_1 I_2 Cos(q_3)), \\ M_{34} &= I_3 + m_3 (I_{c3}^2 + I_2 I_{c3} Cos(q_3)), \\ M_{35} &= I_3 + m_3 (I_{c3}^2 + I_2 I_{c3} Cos(q_3)), \\ M_{35} &= I_3 + m_3 (I_{c3}^2 + I_2 I_{c3} Cos(q_3)), \\ M_{35} &= I_3 + m_3 (I_{c3}^2 + I_2 I_{c3} Cos(q_3)), \\ M_{35} &= I_3 + m_3 (I_{c3}^2 + I_2 I_{c3} Cos(q_3)), \\ M_{35} &= I_3 + m_3 (I_{c3}^2 + I_2 I_{c3} Cos(q_3)), \\ M_{35} &= I_3 + m_3 (I_{c3}^2 + I_2 I_{c3} Cos(q_3)), \\ M_{35} &= I_3 + m_3 (I_{c3}^2 + I_2 I_{c3} Cos(q_3)), \\ M_{35} &= I_3 + m_3 (I_{c3}^2 + I_2 I_{c3} Cos(q_3)), \\ M_{35} &= I_3 + m_3 (I_{c3}^2 + I_2 I_{c3} Cos(q_3)), \\ M_{35} &= I_3 + m_3 (I_{c3}^2 + I_2 I_{c3} Cos(q_3)), \\ M_{35} &= I_3 + m_3 (I_{c3}^2 + I_2 I_{c3} Cos(q_3)), \\ M_{35} &= I_3 + m_3 (I_{c3}^2 + I_2 I_{c3} Cos(q_3)), \\ M_{35} &= I_3 + m_3 (I_{c3}^2 + I_2 I_{c3} Cos(q_3)), \\ M_{35} &= I_3 + m_3 (I_{c3}^2 + I_2 I_{c3} Cos(q_3)), \\ M_{35} &= I_3 + m_3 (I_{c3}^2 + I_2 I_{c3} Cos(q_3)), \\ M$$

De igual manera:

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix},$$
(28)

en donde:

$$\begin{split} \mathcal{C}_{11} &= 0, \ \mathcal{C}_{12} &= -2I_1\dot{q}_1 \big(I_2 m_3 Sen(q_2) + I_{c2} m_2 Sen(q_2) + I_{c3} m_3 Sen(q_2 + q_3) \big) - I_1 \dot{q}_2 \big(I_2 m_3 Sen(q_2) + I_{c2} m_2 Sen(q_2) + I_{c3} m_3 Sen(q_2 + q_3) \big) - I_1 I_{c3} m_3 \dot{q}_3 Sen(q_2 + q_3), \ \mathcal{C}_{13} &= -\dot{q}_1 (2I_1 I_{c3} m_3 Sen(q_2 + q_3) + 2I_2 I_{c3} m_3 Sen(q_3) - m_3 \dot{q}_2 \big(2I_2 I_{c3} m_3 Sen(q_3) + I_1 I_{c3} Sen(q_2 + q_3) \big) - I_{c3} m_3 \dot{q}_3 (I_1 Sen(q_2 + q_3) + I_2 Sen(q_3)), \\ \mathcal{C}_{21} &= 0, \ \mathcal{C}_{22} &= -\dot{q}_1 (m_3 \big(I_1 I_2 Sen(q_2) + I_1 I_{c3} Sen(q_2 + q_3) \big) + I_1 I_{c2} m_2 Sen(q_2)), \ \mathcal{C}_{23} &= -I_{c3} m_3 (2I_2 \dot{q}_1 Sen(q_3) + 2I_2 \dot{q}_2 Sen(q_3) + I_2 \dot{q}_3 Sen(q_3) + I_1 \dot{q}_1 Sen(q_2 + q_3)), \ \mathcal{C}_{31} &= 0, \\ \mathcal{C}_{32} &= -I_1 I_{c3} m_3 \dot{q}_1 Sen(q_2 + q_3) \ y \ \mathcal{C}_{33} &= -I_{c3} m_3 \dot{q}_1 \big(I_1 Sen(q_2 + q_3) + I_2 Sen(q_3) \big) - I_2 I_{c3} m_3 \dot{q}_2 Sen(q_3). \end{split}$$

Finalmente, el vector de pares gravitacionales es:

$$G(q) = \begin{bmatrix} G_{11} \\ G_{21} \\ G_{31} \end{bmatrix},$$
 (29)

en donde:

$$\begin{aligned} G_{11} &= gm_3 \big(I_2 Sen(q_1 + q_2) + I_1 Sen(q_1) + I_{c3} Sen(q_1 + q_2 + q_3) \big) + gm_2 \big(I_{c2} Sen(q_1 + q_2) + I_1 Sen(q_1) \big) + \\ &2 gI_{c1} m_1 Sen(q_1), \ G_{21} &= gm_3 \big(I_2 Sen(q_1 + q_2) + I_{c3} Sen(q_1 + q_2 + q_3) \big) + gI_{c2} m_2 Sen(q_1 + q_2) \ y \ G_{31} = \\ &gI_{c3} m_3 Sen(q_1 + q_2 + q_3) \end{aligned}$$

2.3 Sistema de control del exoesqueleto

Para ilustrar el funcionamiento del diseño propuesto en la reproducción de movimientos de las extremidades inferiores, se propone resolver un problema de control de seguimiento de trayectorias utilizando un esquema de control PID que calcule los pares para cada una de las articulaciones del exoesqueleto. La idea general del sistema de control del exoesqueleto se ilustra en la Figura 4, tanto para la cadena abierta de tres grados de libertad que representa la pierna derecha, como para la izquierda.



Figura 4. Sistema de control del exoesqueleto. El problema de seguimiento de trayectoria se resuelve usando un esquema de control con PID para cada una de las cadenas que representan la pierna derecha y la pierna izquierda del exoesqueleto.



Consideramos $q_d = [q_{d1} q_{d2} q_{d3}]^T$ como las trayectorias de referencia que se desean reproducir en cada una de las piernas del exoesqueleto, entonces considerando la posición angular *q* definida en la ecuación (5) se define el error de posiciones como el vector:

$$e = \begin{bmatrix} q_{d1} - q_1 \\ q_{d2} - q_2 \\ q_{d3} - q_3 \end{bmatrix}.$$
 (30)

A partir del vector de error *e*, se define la ley de control PID como [20]:

$$\tau = K_{p}e + K_{v}\dot{e} + K_{i}\int_{0}^{t} e(\mu)d\mu,$$
(31)

en donde $\tau = [\tau_1 \tau_2 \tau_3]^T$ son los pares en las tres articulaciones de cada pierna y K_p , K_v , $K_i \in R^{3x3}$ son las matrices de ganancias definidas positivas, llamadas ganancia proporcional, derivativa e integral, respectivamente. Es bien sabido que, para mecanismos, la ley de control PID no genera un punto de equilibrio del sistema en lazo cerrado con características de estabilidad asintótica global, únicamente tiene estabilidad asintótica local siempre y cuando las ganancias puedan satisfacer ciertas condiciones de sintonía [23]. Sin embargo, para los alcances de este trabajo, el valor numérico de las matrices de ganancia fue propuestos heurísticamente, tal que la respuesta del sistema en lazo cerrado converge a las trayectorias de referencia. Para resolver el problema de control, se requiere entonces contar con las trayectorias de referencia q_d . En este trabajo se utilizaron como trayectorias de referencias los datos reportados por Ribeiro y *et al.* [24] sobre las posiciones angulares de cadera, rodilla y tobillo (ambas piernas) en sujetos de estudio que realizaban actividades de caminata. En la Tabla 2 se muestran algunos valores de posiciones angulares en cada articulación y pierna, los cuales fueron considerados como trayectorias angulares de referencia de cada una de las articulaciones de interés.

Articulación						Dato	s					Magnitud
Cadera derecha	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	Tiempo (s)
	35	33	22	15	5	0	5	25	36	37	35	Posición (°)
Cadera izquierda	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2	Tiempo (s)
	35	33	22	15	5	0	5	25	36	37	35	Posición (°)
Rodilla derecha	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	Tiempo (s)
	15	27	23	18	16	20	50	70	63	30	15	Posición (°)
Rodilla izquierda	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2	Tiempo (s)
	15	27	23	18	16	20	50	70	63	30	15	Posición (°)
Tobillo derecho	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	Tiempo (s)
	-2.5	-4	2.5	5	7.5	5	-12.5	-10	0	0	-2.5	Posición (°)
Tobillo izquierdo	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2	Tiempo (s)
	-2.5	-4	2.5	5	7.5	5	-12.5	-10	0	0	-2.5	Posición (°)

Tabla 2. Mediciones de tiempo y posición angular de las articulaciones de cadera, rodilla y tobillo reportadas por Ribeiro *et al.* [21] y consideradas para la obtención de trayectorias de referencia.

3. Resultados

Una vez planteado el desarrollo metodológico, en esta sección se presentan los resultados del desarrollo del diseño mecánico del exoesqueleto, del modelo dinámico a partir de las ecuaciones de movimiento de Euler Lagrange y la solución del problema de control de seguimiento de trayectorias usando un esquema PID.

En este trabajo se propone el desarrollo de un modelo CAD del exoesqueleto cuyos parámetros fueron calculados a partir de las reglas presentadas en la Tabla 2 considerando una altura promedio (H) de 1.65 m y un peso promedio (W) de 70 kg. Sin embargo, para fines posteriores de implementación física el diseño se realizó a escala 1:2 y de esta manera se obtuvieron las medidas antropométricas de



los vínculos del exoesqueleto (muslo, pantorrilla y pie). Los valores numéricos de estas medidas tanto el tamaño real como la escalada se resumen en la Tabla 3.

Vínculos	Medida antropométrica	Medida real	Medida 1:2
	Longitud	0.3828 m	0.1914 m
	Peso	7.35 kg	3.675 kg
Muslo	Centro de Masa	0.1657 m	0.08287 m
	Radio de Giro	0.1022 m	0.05118 m
	Momento de Inercia	0.0767	0.00962
Pantorrilla	Longitud	0.4075 m	0.2037 m
	Peso	3.325 kg	1.6625 kg
	Centro de Masa	0.1764 m	0.0882 m
	Radio de Giro	0.1145 m	0.05723 m
	Momento de Inercia	0.0435	0.00544
	Longitud	0.0701 m	0.03506 m
Pie	Peso	1.001 kg	0.5 kg
	Centro de Masa	0.0350 m	0.01753 m
	Radio de Giro	0.0180 m	0.00901 m
	Momento de Inercia	3.247x10 ⁻⁴	4.059x10 ⁻⁵

 Tabla 3. Cálculo de las medidas antropométricas promedio considerando escala 1:2.

Una vez conocidos los parámetros del modelo CAD, estos se usan en el modelo dinámico definido por la ecuación (26) para así obtener el modelo dinámico del exoesqueleto con parámetros nominales. Este modelo se programó en Matlab-Simulink para obtener las soluciones numéricas de las posiciones y velocidades de las tres articulaciones del exoesqueleto. Para resolver el problema de seguimiento de trayectorias se utilizó la librería *PID* de Matlab-Simulink considerando los valores de ganancia mostrados en la Tabla 4.

Articulación	Кр	Kv	Ki
Cadera derecha	300	0	250
Rodilla derecha	220	4	100
Tobillo derecho	110	10	100
Cadera izquierda	300	0	250
Rodilla izquierda	220	4	100
Tobillo izquierdo	1	0	1

Tabla 4. Valores de ganancias de los controladores PID usados para calcula	r
el par de las articulaciones del exoesqueleto.	

Las trayectorias de referencia para cada articulación de ambas piernas se obtuvieron a partir de la Tabla 2 y con las librerías *polyfit* y *polyval* para realizar un ajuste polinomial y obtener una mayor cantidad de datos para el sistema de control. En la Figura 5, 6 y 7 se muestran las gráficas del tiempo contra la posición angular para mostrar la trayectoria angular de referencia deseada en cada una de las articulaciones.





Figura 5. Graficas de las trayectorias de referencia de la cadera para la pierna izquierda y derecha.



Figura 6. Gráficas de las trayectorias de referencia de la rodilla para la pierna izquierda y derecha.



Figura 7. Gráficas de las trayectorias de referencia del tobillo para la pierna izquierda y derecha.



El diagrama de bloques para resolver el problema de control se implementó en Matlab-Simulink. En la Figura 8 y 10, se muestran las respuestas en la salida considerando las referencias y las posiciones angulares del modelo matemático de la cadera y rodilla. La Figura 9 y 11 muestran las señales de entrada y error para las mismas articulaciones.



Figura 8. Respuesta en la salida de la cadera derecha e izquierda.



Figura 9. Señales de entrada (parte superior de la figura) y señales error (parte inferior de la figura) para el segmento de la cadera derecha e izquierda.





Figura 10. Respuesta en la salida de la rodilla derecha e izquierda.



Figura 11. Señales de entrada (parte superior de la figura) y señales error (parte inferior de la figura) para el segmento de la rodilla derecha e izquierda.

Respecto a la articulación de tobillo, en la Figura 12, se muestran las respuestas en la salida considerando las trayectorias de referencia y las posiciones angulares del modelo matemático, para resolver el seguimiento de trayectoria. Además, en la Figura 13, se muestran las señales de entrada y error para la cadera derecha e izquierda. En el caso del control de articulaciones de cadera y rodilla, las



figuras anteriores muestran que, si bien el problema de control de seguimiento de trayectorias se resuelve (Figuras 8 y 10), las señales de par requeridas (Figura 9 y 11, parte superior) pueden ser mejoradas, principalmente en la respuesta transitoria. Sin embargo, en la articulación de tobillo es seguimiento de trayectoria es deficiente (Figura 12), por lo que se requiere más estudio al respecto para proponer un esquema de control apropiado. Esto es evidente en la deficiente señal de control (Figura 13, superior) y el incremento de la señal de error, en relación con las articulaciones anteriores (Figura 13, inferior).



Figura 12. Respuesta en la salida del tobillo 1 y 2.



Figura 13. Señales de entrada (parte superior de la figura) y señales error (parte inferior de la figura) para el segmento del tobillo derecho e izquierdo.



4. Conclusiones

El desarrollo metodológico propuesto en este trabajo permitió el diseño de un exoesqueleto de extremidades inferiores considerando medidas antropométricas calculadas a partir de datos de altura y peso promedios. Con ellos pudimos obtener un conjunto de valores paramétricos que pueden ser usados en el modelo dinámico del exoesqueleto calculado a partir de las ecuaciones de Euler-Lagrange. Esto permitió tener un modelo nominal útil para realizar simulaciones numéricas de la dinámica del exoesqueleto en Matlab-Simulink. Además, con el modelo nominal se pudo plantear un problema de control de seguimiento de trayectorias utilizando un esquema PID, si bien se logró que trayectorias de las articulaciones del exoesqueleto converjan a las trayectorias de referencia, queda como trabajo futuro realizar el análisis de estabilidad del sistema en lazo cerrado. Los resultados obtenidos en la simulación del modelo dinámico indican que las articulaciones de la cadera y rodilla tuvieron un desempeño adecuado usando el esquema de control PID; sin embargo, para la articulación del tobillo, es necesario ajustar los parámetros de las ganancias para obtener un resultado optimo. Por lo tanto, como trabajo futuro se propone utilizar un tipo de control con acciones acotadas para mejorar las señales de control generadas y el seguimiento de trayectoria en el tobillo; considerando métricas de desempeño para poder evaluar cuantitativamente el funcionamiento de los esquemas de control. Además, se planea implementar una maqueta física escala 1:2 considerando el uso de sensores, actuadores y manufactura por modelado por deposición fundida (MDF) mediante impresión 3D.

Referencias

- [1] Chan, M. "World report on disability 2011", World Health Organization (WHO). http://www.who.int/entity/disabilities/world_report/2011/report.pdf. [En línea; acceso el 01-Sept-2022].
- [2] Brault, M. "*Americans with disabilities: 2010*", Current Population Reports, U.S. Census Bureau, pp. 70-131, Washington, DC, 2012.
- [3] Eurostat. "Population by type of basic activity difficulty, sex and age", http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=hlth_dp040&lang=en. [En línea; acceso el 01-Sept-2022].
- [4] Gutiérrez, J., Rivera, J., Shamah, T., Villalpando, S., Franco, A., Cuevas, L., Romero, M., Hernández, M. *"Encuesta nacional de salud y nutrición 2012. Resultados nacionales"*, Instituto Nacional de Salud Pública (MX), pp. 38-41, Cuernavaca, México, 2012.
- [5] "Congenital anomalies", World Health Organization (WHO). http://www.who.int, [En línea; acceso el 01-Sept-2022].
- [6] "Division of Birth Defects and Developmental Disabilities. Data & Statistics", Center for Disease Control and Prevention. http://www.cdc.gov, [En línea; acceso el 01-Sept-2022].
- [7] "Spinal cord injury", World Health Organization (WHO). http://www.who.int, [En línea; acceso el 01-Sept-2022].
- [8] Mackay, J., Mensah, G. "*The atlas of heart disease and stroke*", World Health Organization & Centers for Disease Control and Prevention (U.S.), Myriad, Suiza, 1ra edición, 2004.
- [9] Brown, R. "Accidente cerebrovascular", Mayo Clinic. https://www.mayoclinic.org, [En línea; acceso el 01-Sept-2022].
- [10] Sharifi M., Mehr J., Mushahwar V. and Tavakoli M. "Adaptive CPG-Based Gait Planning With Learning-Based Torque Estimation and Control for Exoskeletons", IEEE Robotics and Automation Letters. IEEE, vol. 6, no. 4, pp. 8261-8268, 2021.



- [11] Zhu, A., Tu, Y., Zheng, W., Shen, H., Zhang, X. "Adaptive Control of Man-machine Interaction Force for Lower Limb Exoskeleton Rehabilitation Robot", 2018 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), IEEE, pp. 740-743, Wuyishan, China, 2018.
- [12] Spada, S., Ghibaudo, L., Gilotta, S., Gastaldi L., Pia, M. "Analysis of Exoskeleton Introduction in Industrial Reality: Main Issues and EAWS Risk Assessment", Advances in Physical Ergonomics and Human Factors, Springer, vol. 602, pp. 236-244, 2018.
- [13] Fox, S., Aranko, O., Heilala, J., Vahala, P. "Exoskeletons: Comprehensive, comparative and critical analyses of their potential to improve manufacturing performance", Journal of Manufacturing Technology Management, Emerald, vol. 31, pp. 1261-1280, 2020.
- [14] Rodríguez, A., Lobo, J., Font, J. "Systematic review on wearable lower-limb exoskeletons for gait training in neuromuscular impairments", Journal of Neuroengineering and Rehabilitation, BMC, vol. 18,1, pp.1-16, 2020.
- [15] Donati, A., Shokur, S., Morya, E. "Long-Term Training with a Brain-Machine Interface-Based Gait Protocol Induces Partial Neurological Recovery in Paraplegic Patients", Scientific Reports, Nature, vol. 6, pp.1-13, 2016.
- [16] Tibaduiza D., Anaya M., Aya P. "Exoesqueleto para rehabilitación de miembro inferior con dos grados de libertad orientado a pacientes con accidentes cerebrovasculares", INGE CUC, vol. 15, no. 2, pp. 36-46, 2019.
- [17] Hongchul K., Young S., Jung K. "Design and locomotion control of a hydraulic lower extremity exoskeleton for mobility augmentation, Mechatronics", Elsevier, vol. 46, pp. 32-45, 2017.
- [18] Tovar-Estrada, M., Rodriguez-Liñan, A., & Quiroz, G. "Implementation of a Scale-Lab Lower-Limb Exoskeleton with Motion in Three Anatomical Planes", Cybernetics and Systems, vol. 50, num. 6, pp. 516-538, 2019.
- [19] Biao, L., Youwei, L., Xiaoming, X., Haoyi, W., & Longhan, X. "Design and Control of a Flexible Exoskeleton to Generate a Natural Full Gait for Lower-Limb Rehabilitation", Journal of Mechanisms and Robotics, vol. 15, num. 1, pp. 011005, 2022.
- [20] Hall S. "Basic biomechanics", McGraw-Hill Education., E.U.A, 6ta edición, 2012.
- [21] Kelly, R. Santibáñez, V. "*Control de movimiento de robots manipuladores*", Pearson Educación, España, 1ra edición, 2003.
- [22] Saha, S. K. "Introducción a la robótica", McGraw Hill, México, Primera edición, 2010.
- [23] Reyes F. "Robótica: control de robots manipuladores", Alfa Omega, México, Primera edición, 2011.
- [24] Sousa, A., Ribeiro, T., Galvão, E., Santiago, L., Spaniol, A., Lindquist, A. "Dual Task Walking Affects Gait Symmetry in Individuals with Parkinson's Disease?", European Journal of Physiotherapy, Taylor & Francis, vol. 21, pp. 8-14, 2019.



Diseño y Construcción de un Minisubmarino Explorador Equipado con un Sistema de Lastre

[∞]Barrales Romero Missael Eduardo, Flores Mena José Eladio y Michua Camarillo Antonio

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla barrales.missael@gmail.com

Resumen

En este trabajo presentamos el diseño y construcción mecánica de un mini submarino. Este estudio es una continuación de un trabajo anterior [1], en el cual, se presentó el modelo matemático y otros diseños. El mini submarino que se presenta en este documento fue construido con parámetros de diseño para explorar aguas tranquilas y poco profundas, 3m, y durante 1 hora. Se presentan los resultados de las pruebas de inmersión, la caracterización de los sensores utilizados y la manipulación de los motores de forma alámbrica, además de los resultados de las pruebas de inmersión, donde se exponen las diferencias con el anterior prototipo.

Palabras clave: Minisubmarino, lastre, sensores, exploración

1. Introducción

La exploración de lagos y lagunas con aguas tranquilas es un tema fundamental en estos días, debido a la contaminación que sufre este tipo de sistemas. El saneamiento de estos sistemas implica un diagnóstico de los mismos y con este fin es necesario un UV (por sus siglas en inglés, Underwater Vehicle) equipado con sensores, capaz de medir las condiciones del sistema. A partir de esta valoración es posible implementar estrategias para el saneamiento de lagos o lagunas contaminados. En la literatura existen diversos diseños de UVs manipulados por medio de cables. Si las dimensiones de dichos sistemas a explorar son grandes, el tamaño del cableado aumenta volviéndose este un problema. Esta es la motivación por la que se propone diseñar y construir un UV manipulado mediante comunicación alámbrica.

Los ROV son vehículos submarinos que están conectados mediante cables a una base control en la superficie y desde donde se realiza el manejo del vehículo, significa que los ROV requieren de la recepción de diversos comandos para su manejo y en algunos casos este puede ser programado para seguir patrones específicos o ir a localizaciones determinadas, también hay minisubmarinos con cables tensos para operaciones de remolque marino, inspección de cables y ductos subacuáticos mediante tecnologías AUV y ROV, así como inspección de cascos de barcos. Muestreo sistemático de fondo para toma de muestras biológicas o geológicas mediante tecnología ROV [1].

Las principales características del ROV [8] son:

- Posee propulsores, lo que le permiten navegar y posicionarse.
- Posee cámaras e hidrófonos, lo que dará a la base de control la capacidad de poder y escuchar lo que sucede bajo el agua.
- La capacidad de equipar diversos sensores como sensores de temperatura, de profundidad o sonares.



Por otra parte, los AUV son vehículos submarinos que funcionan sin la necesidad de la intervención de un operador ya que estos vehículos no tienen conexión física con el operador, esto significa que estos vehículos llevan consigo su propia fuente de energía además de que pueden guiarse sin intervención humana, por ejemplo, en la Figura 3 se muestra un mini-submarino de tipo multipropósito, el cual se encarga de explorar las profundidades de océanos [6].

Las perturbaciones ambientales pueden afectar el movimiento y estabilidad de un vehículo, es por eso que en esta sección narraremos algunas de las fuerzas que influyen en un minisubmarino.

- Fuerza de flotación. Ésta se calcula en base al principio de Arquímedes." La flotación es igual al peso del líquido desalojado por el cuerpo sumergido (minisubmarino)".
 - Estabilidad vertical y de Flotación. La estabilidad de un cuerpo parcial o totalmente sumergido es vertical y obedece al equilibrio existente entre el peso del cuerpo w y la fuerza de flotación. Ambas fuerzas son verticales y actúan a lo largo de la misma línea. La fuerza de flotación estar 'a aplicada en el centro de flotación (CF) y el peso estará aplicado en el centro de gravedad (CG).
- Fuerza de gravedad Es la fuerza que ejerce la tierra sobre cualquier objeto que está a su alrededor y el modelo más sencillo es masa por gravedad esta expresión es válida para alturas pequeñas en comparación con el radio de la tierra (6500 Km aproximadamente), esta fuerza es conocida como el peso de un objeto.
- Fuerza de masa añadida. En mecánica de fluidos ésta fuerza es conocida como la inercia añadida a un sistema porque un cuerpo acelerando o desacelerando debe mover algún volumen del fluido que lo rodea cuando este se mueve a través de él. Masa añadida es un tema común porque el objeto y el fluido que lo rodea no pueden ocupar el mismo espacio físico simultáneamente.

Por simplicidad esta puede ser modelada como algún volumen del fluido que se mueve con el objeto, pensando en realidad "Todo" el fluido debe ser acelerado [14]. Puede ser mostrado que la fuerza de masa añadida, para una partícula esférica sumergida en un líquido no viscoso.

Fuerza viscosa: estas fuerzas son el resultado de la fricción que ejerce la viscosidad del fluido sobre el cuerpo. Se suelen clasificar según el efecto sobre el cuerpo en: fuerza de arrastre y fuerza de sustentación. El arrastre es la fuerza sobre el cuerpo provocada por el fluido que resiste el movimiento en la dirección del recorrido del cuerpo. La sustentación es la fuerza provocada por el fluido en dirección perpendicular a la dirección del cuerpo recorrido.

En la actualidad existen dos maneras diferentes de sumergir un submarino, de manera estática y de manera dinámica. Varios modelos de submarinos y de minisubmarinos hacen uso de un sistema dinámico de inmersión, mientras que mayoritariamente los submarinos militares hacen uso de sistemas estáticos de inmersión y en algunas ocasiones la combinación de ambos. Inmersión Estática.

Puede modificar la flotabilidad de un submarino mediante la introducción de agua en sus tanques de lastre. Estos tanques pueden estar ubicados de tres maneras diferentes.

- Dentro del casco presurizado.
- Fuera del tanque presurizado como tanques adicionales.
- Entre el casco exterior y el casco presurizado.

Una de las principales desventajas de tenerlo dentro del casco el tanque es el espacio que ocupa, ya que este podría ser ocupado para más personal o equipamiento. En este trabajo de tesis vamos a emplear el tipo de inmersión estática número uno.



Inmersión Dinámica. Los sistemas de inmersión dinámica son los más comúnmente existentes en la actualidad en diversos tipos de submarinos.

Los submarinos que aplican este método para sumergirse cuentan con una flotabilidad inherente en su construcción, por lo que en caso de dejar de aplicar control sobre estos ocasiona que regresen a la superficie.

En la actualidad existen distintos tipos de tanques de lastre, para este trabajo se enfocará específicamente en los siguientes tipos:

- Tanque de lastre a presión. Se compone de un depósito sellado capaz de permanecer con un aumento de presión significativo. Para llenar el tanque, se bombea agua dentro del tanque con una bomba de alta presión. Como el tanque no tiene una válvula para liberar el aire dentro del tanque, este se comprime. Para poder vaciar el tanque, la bomba funciona en sentido contrario con el fin de sacar el agua de tanque. Por la razón de que el aire dentro del tanque es comprimido, el tanque no puede ser llenado por completo, solo aproximadamente al 80 de su capacidad.
- 2. Tanque de lastre de pistón. Consiste en un cilindro y un pistón movible haciendo semejanza a una jeringa. El pistón se puede mover de manera lineal con un tornillo, una rueda dentada y un motor. La parte contraria del pistón está conectada a la parte externa del submarino. Al hacer girar el motor en un sentido el pistón empezará a moverse y a succionar agua con el fin de llenar el tanque. Al hacer esto, habrá una compresión de aire en el lado opuesto a la parte a llenar. Por eso mismo este tanque es similar al tanque a presión, ya que ésta aumentara considerablemente.

La primera parte del trabajo fue la reconstrucción del minisubmarino utilizado de manera alámbrica (Figura 1).



Figura 1. a) Diseño minisubmarino anterior, b) Mini submarino anterior ensamblado en SolidWorks

A partir del cual se analizaron las ventajas y desventajas, que existían en su construcción, con la cual se propuso una actualización basada en su construcción mecánica y electrónica. De las cuales se pudo observar que el prototipo 1 contaba con un buen punto de gravedad lo que le permitía tener una flotación más equilibrada, aunque, por otro lado, es inestable en el tiempo que se mantiene a flote pues otro de los puntos negativos que se pudo observar era el método de sellado en las capsulas.

Por otra parte, el prototipo 2 es mas ligero, estable y al tener un sistema de inmersión pasivo, evita perturbar el medio ambiente llegando a comportarse más como una sonda.

En este artículo se reportan los avances de la nueva propuesta, la construcción del nuevo minisubmarino, la caracterización de los motores, las pruebas de inmersión, pero principalmente en la



mejora que se logró en la toma de muestras, del cual el prototipo se equipó con sensores de temperatura [4], Ph [5] y altitud [2].

1.1 Principio de operación

- a) Temperatura: En física, la temperatura se refiere a una magnitud utilizada para medir la energía cinética de un sistema termodinámico, que se genera con los movimientos de las partículas que son parte del sistema. A mayor movimiento, aumenta la temperatura, mientras que, a menor movimiento, la temperatura tiende a disminuir.
- b) Ph: El pH es una medida de acidez o alcalinidad que indica la cantidad de iones de hidrógeno presentes en una solución o sustancia. El pH se puede medir en una solución acuosa utilizando una escala de valor numérico que mide las soluciones ácidas (mayor concentración de iones de hidrógeno) y las alcalinas (base, de menor concentración) de las sustancias.
- c) Presión atmosférica: Presión que ejerce la atmósfera que rodea la tierra (barométrica) sobre todos los objetos que se hallan en contacto con ella (la presión atmosférica cambia con la altura sobre el nivel del mar y las condiciones atmosféricas. Es la presión absoluta de la atmósfera en un punto e instante dado).
- d) Presión atmosférica normal (estándar): Presión atmosférica equivalente a una atmósfera igual a 101325 Pa.
- e) Presión hidrostática: La presión hidrostática es la presión que se somete un cuerpo sumergido en un fluido, debido a la columna de líquido que tiene sobre él. Partiendo de que en todos los puntos sobre el fluido se encuentran en equilibrio, la presión hidrostática es directamente proporcional a la densidad del líquido, a la profundidad y a la gravedad.
- f) Altitud: Se denomina como altitud a la distancia vertical que existe entre cualquier punto de la Tierra en relación al nivel del mar

2. Desarrollo

2.1 Diseño del prototipo

La estructura del mini-submarino está basada considerando las ventajas y desventajas que se encontraron del prototipo anterior, con lo cual se pudieron proponer maneras para lograrlo mejorar. El diseño se llevó a cabo en el software SolidWorks. Los dos cilindros con los que se contaban, donde estaba instalada la parte electrónica (tarjeta, baterías, controlador, entre otros) fueron reutilizados y optimizados, gracias a que se incorporó un sistema de lastre, se pudo reducir la cantidad de componentes necesitados.

Uno de los cilindros antes mencionados fue reutilizado como contenedor para el agua que ayudaba a descender el minisubmarino (Figura 2), el ingreso y salida del agua fue hecho con dos bombas una para cada acción, esto permitió que la cantidad de perturbaciones en el entorno disminuyera considerablemente.

De los tres motores que se habían usado en el prototipo anterior se conservaron 2 solamente, ambos usados para el movimiento horizontal. Ambos motores fueron equipados con su respectiva propela, las cuales también fueron rediseñadas permitiendo un mejor flujo del agua a través de ellas, aplicando un análisis con el software SolidWorks, permitiéndonos llegar a un diseño óptimo (Figura 3).





Figura 2. Sistema de lastre en operación.



Figura 3. Análisis de fuerzas en las propelas.

2.2 Caracterización de los motores

En la tabla 2 podemos observar la caracterización de los motores, los cuales son brushless del tipo out runner.

RPM/V	750 kV	Potencia Máxima	265W
Voltaje máximo	15 V	Resistencia	0Ω
Corriente máxima	18A	Masa	87 g

Tabla 1. Especificaciones de Motores Brushless.

En la tabla 3 se muestran las especificaciones del ESC (por sus siglas en inglés, Electronic Speed Controller) utilizado, el cual, es programable y funciona mediante PWM.

Tabla 2 Especificaciones del ESC

Corriente constante	30 A	Corriente máxima	40 A		
Voltaje máximo	15 V	Configuraciones			
Tipo de motor	Sensorless brushless	programables:			
Masa	53 kg.	Tipo de batería Aceleración Rotación Modo de operación			



2.3 Sistema de lastre

El diseño que se realizo fue tomando en cuenta el análisis de fluidos que interactúan dentro del prototipo que se propuso. Se calculo la cantidad de aire y agua que podía ingresar en el diseño propuesto. Al iniciar el análisis se había hecho la propuesta de inyectar el aire por una válvula para expulsar el agua que se encuentra dentro para crear una burbuja de aire controlada que le permita subir y bajar según se requiera con la ayuda de un tanque de aire a presión.

La presión que ejerce el agua en Puebla debido a la altitud es de 99600 Pa, la presión que se busca para poder usar el sistema como un apoyo en el control de ascenso y descenso del minisubmarino es de 101325 Pa.

El diseño que se realizó para el sistema de lastre fue con una idea de vacío mediante una bomba que mete y saca el agua del dispositivo, este se modelo en el programa SolidWorks para poder llevar a cabo el análisis de fuerzas correspondiente.

Al final se llegó a la conclusión que serían necesarias 2 bombas. Las características de las bombas, que se utilizaron se muestran a continuación:

- Voltaje de entrada: 2,5 a 6 Vcc
- Corriente: 130 a 220 mA
- Flujo: 80 a 120 l/h
- Consumo: 0,4 a 1,5 W
- Altura máxima de bombeo: 1 m
- Tubo conector: OD: 7,5 mm / ID: 4,85 mm
- Entrada de agua: Diámetro de 5 mm

Con estas bombas se ingresa y se expulsa el agua del sistema de lastre. Con esta inclusión se aligera el diseño que se tenía, por lo que los motores que se tenían pensados para apoyar el descenso y ascenso del mismo ya no serían necesarios. Gracias a la introducción de agua en este dispositivo podemos controlar la densidad media del mismo, con lo cual podemos hacer que desciendo o ascienda según se requiera.

Al estar vacío la densidad del agua es mayor, por lo que el modelo se queda en la superficie, pero gracias a la ayuda de las bombas antes mencionadas podemos cambiar su densidad media equilibrando la cantidad de agua en su interior con el aire que mantiene y así llevar el modelo a un punto requerido debajo del agua. Esto también es gracias a que la densidad de los materiales es baja, pues su densidad volumétrica es de 1.19, ligeramente más pesado que el agua. Su densidad equivale a la mitad de la del vidrio, y un 43 % la densidad del aluminio. Consiguiendo así la propiedad de flotabilidad.

También se realizó la caracterización de dicho sistema de lastre presentando los resultados a continuación (Figura 4).

2.4 Caracterización de sensores

En el análisis de los hábitats que se busca diagnosticar, es necesario conocer primero algunos parámetros básicos para así poder tomar una mejor decisión al momento de sanearlos y rehabilitarlos, entre ellos podemos encontrar la temperatura y el pH, ambos a ciertas profundidades por lo que se buscó primero encontrar los que mejor se adaptaran a las necesidades del dispositivo.

Antes de pasar a comparar los resultados debemos tener en cuenta que para poder confiar en los datos recopilados primero debemos saber a partir de qué punto en el tiempo y a que profundidad los sensores han estabilizado su toma de valores en el entorno. A este proceso se le conoce como termalización.





Figura 4. Litros – Tiempo

Cada sensor tiene un tiempo diferente para termalizarse, a continuación, se mostrarán los resultados de los sensores instalados a una profundidad de 0.3 m (Figura 5).



Figura 5. Termalización sensores.



3. Resultados

Existen dos maneras diferentes de sumergir un submarino, de manera estática y de manera dinámica. Varios modelos de submarinos y de mini submarinos hacen uso de un sistema dinámico de inmersión, mientras que mayoritariamente los submarinos militares hacen uso de sistemas estáticos de inmersión y en algunas ocasiones la combinación de ambos. La ilustración siguiente se presenta la estabilidad del submarino, así como la flotabilidad que se genera debido al aire concentrado en sus cilindros (Figura 6).

A diferencia del modelo anterior que funcionaba con inmersión dinámica este prototipo usa inmersión estática impulsada con bombas para la introducción y expulsión de agua como se especifica en la sección anterior.



Figura 6. Estabilidad de prototipo minisubmarino.

3.1 Pruebas con los sensores

En esta sección vamos a mostrar los resultados de los sensores que se han obtenido. Usando el programa LabVIEW se pudo hacer un control para activar y desactivar la toma de datos de los sensores. De esta forma el muestreo se ha podido limitar a ciertas zonas específicas.

El muestreo es un proceso o conjunto de métodos para obtener una muestra finita de una población finita o infinita, con el fin de estimar valores de parámetros o corroborar hipótesis sobre la forma de una distribución de probabilidades o sobre el valor de un parámetro de una o más poblaciones.

En las Ciencias Exactas, el diseño de muestras resulta fundamental a la hora de realizar cualquier investigación pues, en comparación con otras ciencias, es posible ejercer control exhaustivo de las variables y tiene facetas donde hay alta variabilidad.



De este muestreo que se obtuvieron, los datos se sintetizaron para su estudio y análisis en las siguientes tablas y gráficas. Para poder ser más preciso en los datos a comparar, para cada valor se realizó un promedio estadístico de 20 datos del muestreo realizado.

3.2 Valores medios de sensores

Antes de comenzar a analizar los resultados obtenidos, es importante definir las magnitudes que estamos por analizar en el muestreo que se ha realizado, por lo que primero definamos los conceptos de:

Comencemos por los valores medios de los sensores externos, en los que podemos observar 3 variables, temperatura, pH y presión, (Figura 7), el comportamiento de las mediciones en los sensores del dispositivo tiende a ir en aumento, el cálculo que se hizo con respecto al comportamiento esperado fue en el caso de la presión con una pequeña diferencia, pues en el cálculo que se realizó la presión esperada era de 1038.62 hPa, algo que podemos ver en la gráfica se acerca al valor esperado.



Figura 7. Valores medios.

Si bien el comportamiento de la temperatura se comparó con un termómetro de mercurio, el valor tampoco vario mucho en cuestión con el obtenido. Sin embargo, en el caso del Ph, algo que podemos concluir es que debido a la pequeña oleada que se causaba en algunos casos que la medición que se toma es de agua fría y en otras con agua más caliente debido al efecto de la convección de calor que tiene lugar dentro de la alberca, gracias al movimiento constante de las partículas.



4. Conclusiones

Con respecto al diseño que se realizó se trató de aprovechar todo el material posible, si bien se pudo reutilizar gran parte del modelo con el que ya se contaba gracias a pequeñas adaptaciones, son estos cambios los que logran darle mayor estabilidad en la toma de muestras. El uso de los programas de simulación SolidWorks y Comsol fueron de gran ayuda al momento de aproximar las modificaciones necesarias y el posible comportamiento que tendría.

Este cambio no solo nos ayuda con el descenso y ascenso del dispositivo de una manera más eficiente, sino que el ruido que se genera en el ambiente, en este caso el agua del entorno no se perturba al punto de poder alterar los datos obtenidos dándonos una medición más precisa. Este fue uno de los mayores retos a tratar, por lo que se habían estado buscando opciones, el dispositivo original, que se tomó como punto de partida fue un modelo antes trabajado, este modelo usaba dos propelas que ayudaban en su descenso, sin embargo, esto causaba una alteración en los datos recopilados, haciendo dudar de la veracidad de la información analizada. Problema en el que se trató como prioridad durante este trabajo, llegando a considerar más viable el método de un sistema de lastre.

El uso correcto de los sensores y el equipamiento adecuado también es un paso importante para poder tener éxito en nuestro objetivo, sumado a la correcta interpretación de los datos que vamos a analizar, por lo que es importante tener claros conceptos como termalización.

Como paso siguiente se tiene pensado en un sistema de control para el movimiento horizontal del prototipo, ya que en este momento solo se ha usado un sistema de guía, además de que podemos ver que una de las limitaciones que tiene es que su uso es solo para ubicaciones con agua estática, es decir, que no tengan movimiento, pues el equipo y el diseño necesario para poder soportar corrientes de agua no se tiene por el momento.

Finalmente podemos corroborar que el sistema de lastre logro el objetivo de mejorar en la toma de datos, pues tras haber hecho una comparación de las graficas en donde se puede ver mas claramente el comportamiento de estos, iniciando por la presión (Figura 8), donde se puede observar que en el prototipo anterior las lecturas son muy aleatorias, sin embargo, en el segundo prototipo se pude ver como existe una lectura con mas cercanía a la realidad, pues no solo se esta comparando con el grafico anterior, sino que también tiene una aproximación más cercana a la calculada.



Figura 8. a) Comparación presión profundidad dispositivo anterior, b) comparación presión-número de muestras (Minisubmarino con sistema de lastre)

Se debe considerar que en el prototipo anterior las tomas de datos fueron hechas mientras iba descendiendo, en comparación con el prototipo actual, en el cual se hicieron 8 tomas de datos, donde,



las primeras 4 se hicieron a 0.3 m de profundidad y las siguientes 4 se realizaron a 3m de profundidad, para poder comparar las diferencias que podrían existir en estas dos zonas.

Como segunda comparación, podemos ver la temperatura (Ilustración 9), en donde en a) podemos observar la relación que hubo con la temperatura y la profundidad, la temperatura llega a variar demasiado por el actuar de las propelas que llegan a calentar el agua a su alrededor, mientras que en el prototipo con sistema de lastre la temperatura se nota mas acorde al sensor de mercurio que se utilizo para corroborar los datos y así poder validarlos.



Figura 9. a) Relación temperatura-profundidad (prototipo anterior), b) Relación temperaturanúmero de muestras (Minisubmarino con sistema de lastre).

Con lo anterior mostrado en las ilustraciones 8 y 9 podemos comprobar que el uso de un sistema de lastre permite diagnosticar de una forma mas precisa el ambiente deseado, pues el ruido no solo se elimino considerablemente, sino que ahora podemos confiar en los datos obtenidos para crear una estrategia que pueda ayudar el entorno elegido.

Referencias

- [1] Anon, (2016), dispinible en: http://www.ashteadtechnology.com/rentalequipment/ecahy tecrovingbat/.
- [2] Bmp280 digital pressure sensor.
- [3] C.scout, autonomous underwater vehicle: What is an auv web engr.mun.ca.
- [4] Ds18b20 programmable resolution 1-wire digital thermometer.
- [5] E201-bnc ph electrode.
- [6] Noaa ocean explorer, technology submersibles, <u>http://oceanexplorer.noaa.gov/technology/subs/subs.html</u>.
- [7] Remotely operated vehicle committee of the marine technology society, web rov.org. (Revisado en diciembre del 2021)
- [8] Rovexchange and rovs, what are rovs, what is an rov (2020) disponible en: <u>http://www.rovexchange.com</u>
- [9] Water quality lake sciencist, disponible en: <u>http://www.lakescientist.com/lakefacts/water-quality/</u>. (revisado en diciembre de 2021)
- [10] (2017). Noaa office of coast survey: Autonomous underwater vehicles (auv) web. (revisado en enero de 2022)



- [11] Antonelli, G. and Robots, U. (2006). Motion and force control of vehiclemanipulator systems. Underwater Robot, Springer-Verlag. (revisado en enero de 2022)
- [12] Herrador, R. E. (2009). Guía de usuario de arduino.
- [13]Lamb, H. (1957). Hydrodynamics, cambridge university press, london, 1932. Jj stoker, water waves.
- [14] Newman, J. N. (2018). Marine hydrodynamics. The MIT press.
- [15] Ortiz-Torres, G., Schacht-Rodriguez, R., Guerrero-Sánchez, M., Reyes-Reyes, J., and Garcia-Beltrán, C. Desarrollo y construcción de una plataforma experimental de un uav para pruebas de control automático.
- [16] Popoca Rodríguez, L. et al. (2017). Diseño y construcción de un mini submarino explorador guiado a distancia. B.S. thesis.



Efectos de Falla en el Control de Seguimiento del Turtlebot 3

Castro Daniel Arturo Rafael, Alcorta García Efraín y Martínez Torres César

^{1⊠}Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Posgrado en Ingeniería Eléctrica, México.²Universidad de las Américas, Puebla, México.

[⊠]arturo.castroda@uanl.edu.mx

Resumen

En este trabajo se presenta un método para inducción de fallas multiplicativas de actuador, mediante la alteración de la señal de control. El efecto en el seguimiento de una trayectoria para un robot de tracción diferencial (Turtlebot 3) es analizado para obtener las limitantes de un controlador robusto. Los resultados se obtuvieron mediante el uso de librerías del sistema operativo robótico y simulados en Gazebo.

Palabras Clave: Control tolerante a fallas, tracción diferencial, falla de actuador, Turtlebot3.

1. Introducción

Con el auge de la automatización en el contexto de la Industria 4.0, por ejemplo, en almacenes, la implementación de robot móviles para el transporte de mercancía ha ido en aumento. Se han reportado diversos algoritmos utilizados para el control de robots diferenciales, ver por ejemplo Carrera (2008), Myint and Win (2016). Nurmaini et al. (2017). Debido a esta situación, hay una gran cantidad de algoritmos para el control de estos sistemas, ver por ejemplo Guajardo Benavides et al. (2021) y las referencias de este trabajo.

Una de las propiedades que da valor agregado a los lazos de control es la característica de tolerancia a fallas por parte de los lazos de control de dichos robots. Partiendo de que todo lazo de retroalimentación brinda cierta información para que el sistema pueda corregir errores en las variables de estado, Leal and Alcorta García (2020). Existen reportes en la literatura sobre esquemas de control tolerante a fallas para robots diferenciales. En Yazdjerdi and Meskin (2018) un enfoque de tolerancia a fallas en actuadores es diseñado e implementado basado en modelos-múltiples, lo cual requiere de un esfuerzo adicional para la implementación. Utilizando teoría de información en B., Najjar et al. (2019) se propone un esquema de diagnóstico y tolerancia a fallas el cual también es implementado. El esquema utiliza un modelo estimado y otro asimétrico además de predicciones. Un esquema de tolerancia a fallas utilizado modos deslizantes es propuesto en Yazdjerdi and Meskin (2017).

En este trabajo se utiliza un método para inducir pérdidas de velocidad en los actuadores de un robot diferencial, sin la necesidad de alterarlos físicamente. Esta implementación se basa en el conocimiento del modelo nominal, el cual, queda intacto y sólo se modifican las entradas de control. Se utilizó esta aproximación debido a que una falla de actuador, por ejemplo,pérdida de eficiencia en el suministro de energía, deterioro de la rueda o algún objeto que bloquee el giro del motor pueden ser representadas a manera de pérdida de velocidad de giro. Una vez que se tiene la falla implementada con el método descrito anteriormente, se procedió a mostrar el efecto de diferentes magnitudes de falla en una trayectoria predefinida. La trayectoria se compone por una línea recta, así como giros en ambas direcciones. Se propone un intervalo de \pm 5% de la anchura del robot alrededor de la variable de posición para considerar el comportamiento aceptable. En base a este valor, se determina los tamaños de falla



que pueden ser tolerados por el controlador. En este estudio se seleccionó un controlador robusto obtenido de Guajardo Benavides et al. (2021), dicho controlador fue adaptado y programado en un robot de tracción diferencial (Turtlebot 3), utilizando el sistema operativo robótico (ROS Noetic) y Gazebo.El conocer los límites del controlador, nos permitirá a futuro ajustar la estrategia de respuesta ante una falla, pasando de tipo pasiva, a activa, en razón de la magnitud de la pérdida de velocidad de rotación.

La estructura del documento es la siguiente, en la sección 2 se revisan algunos preliminares generales sobre fallas y su tolerancia en lazos de control. En la sección 3 se discute el modelo del Turtlebot3 y sus parámetros además de presentar la manera de incluir las fallas. En la sección 4 se discute el tamaño de fallas tolerables mediante el control nominal y el intervalo de la magnitud de las fallas que produce trayectorias fuera del intervalo considerado como aceptable. En la sección 5 se presentan las conclusiones.

2. Preliminares

Un primer aspecto para considerar es la definición de falla. Siguiendo la literatura aceptada en la comunidad de Diagnóstico de fallas, una falla se define como un cambio del valor de un parámetro fuera de los límites de tolerancia. Ver por ejemplo Verde et al. (2013).

Con la intención de contar con un criterio para poder determinar si un sistema tolera o no a una falla determinada se introducen la definición siguiente.

Definición 1. Considerar un sistema dinámico en lazo cerrado estable y que satisface un objetivo de control dado. Suponer que una falla $f_i(t)$ afecta al sistema en el tiempo $t = t_f$. Si la desviación de la salida del sistema en cuestión, después del tiempo en el que se presenta la falla, se mantiene dentro de un intervalo alrededor de la salida nominal:

$$y_n(t) - y_m \le y(t) \le y_n + y_M \qquad y_n(t) - y_m \le y(t) \le y_n + y_M$$

donde $y_n(t)$ representa la salida nominal del sistema, y_m y y_M representan los valores por debajo y por arriba de la salida nominal respectivamente, que determinan el intervalo de comportamiento aceptable del sistema.

Note que la definición 1 permite discriminar entre fallas que son toleradas por el lazo de control nominal (si están dentro del intervalo) y las que no están siendo toleradas (que de acuerdo con esta definición significa que la salida del sistema está fuera de un intervalo aceptable alrededor del comportamiento nominal). Un aspecto interesante es que el hecho de que una falla no sea tolerada por un sistema de control en lazo cerrado no significa en automático que la salida del sistema diverge o que esta manifiesta las características de un sistema inestable. Esto permite también discutir la manera de hacer, por ejemplo, un incremento de la tolerancia a fallas.

3. Modelo del robot de tracción diferencial

En esta sección consideramos el modelo de un robot con tracción diferencial. El sistema bajo consideración puede ser apreciado en la Figura 1.

Un robot de tracción diferencial se muestra en la Figura (1), donde *b* es la distancia entre el centro del eje de las ruedas hasta el centro de una rueda, *r* es el radio de las ruedas, q_A es el centro del eje de las ruedas, d_{AB} es la distancia del centro de masa hacia q_A y q_B es la posición del centro de masa del cual se obtienen las posiciones generalizadas. Este es un robot que puede moverse hacia adelante, hacia atrás y girar sobre el centro del eje de las ruedas. Lo cual implica que existen restricciones de movimiento no holonómicas.

Para modelar el movimiento del robot se utilizó un modelo del sistema Hamiltoniano controlado por puerto como se muestra en el sistema (1)





Figura 1. Robot móvil de tracción diferencial.

$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -I & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial_q & H^T \\ \partial_p & H^T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ G(q) \end{bmatrix} u$$

$$y = G^T(q) \partial_P H^T$$
(1)

En el cual q son las coordenadas generalizadas y p los impulsos generalizados. Ambas están descritas en (2).

$$\boldsymbol{q} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{q}_{Bx} \\ \boldsymbol{q}_{By} \\ \boldsymbol{\theta} \end{bmatrix}, \boldsymbol{p} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{p}_{Bx} \\ \boldsymbol{p}_{By} \\ \boldsymbol{p}_{\theta} \end{bmatrix}$$
(2)

La entrada *u* representa la fuerza lineal y el torque aplicado al robot como se muestra en (3).

$$\boldsymbol{u} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{u}_f \\ \boldsymbol{u}_{\boldsymbol{\theta}} \end{bmatrix} \tag{3}$$

La matriz de entrada G(q) está definida en (4).

$$G(q) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0\\ \sin \theta & 0\\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(4)

Las restricciones en el movimiento están dadas por la matriz *S*, estas son de tipo no-holonómicas y nos dicen que el robot debe girar para ubicarse en el punto deseado.

$$S(q) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -d_{AB}\sin\theta\\ \sin\theta & -d_{AB}\cos\theta\\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(5)

La función de energía es $H = \frac{1}{2}p^T M^{-1}p$ para una matriz de inercia $M = diag(m, m, I_{cm})$ con I_{cm} siendo la inercia del centro de masa y *m* la masa total del robot. La dinámica del robot móvil en el espacio de estados con restricciones de dirección de movimiento está descrita en (6) y (7).

$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & S(q) \\ -S^{T}(q) & \bar{\mathcal{C}}(\bar{p}) - \bar{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial_{q} \bar{H}^{T} \\ \partial_{\bar{p}} \bar{H}^{T} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} U$$
(6)

$$\mathbf{y} = \boldsymbol{\partial}_{\overline{q}} \overline{\mathbf{H}}^T \tag{7}$$


Con una función de energía $H = \frac{1}{2}\bar{p}^T \bar{M}^{-1}\bar{p}$ y una matriz de inercia $\bar{M} = diag(M, I_{cm})$. El centro de masa no se encuentra en el eje de las ruedas, la distancia entre estos dos se denomina d_ab y la matriz de fuerzas centrifugas y de Coriolis evaluada en las trayectorias deseadas (q_d,q'_d) está definida en (8).

$$\overline{C}(\overline{p}) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{md_{ab}}{md_{AB}^2 + I_{cm}} \overline{p}_{\theta} \\ \frac{md_{ab}}{md_{AB}^2 + I_{cm}} \overline{p}_{\theta} & 0 \end{bmatrix}$$
(8)

El controlador robusto para este sistema es el que se muestra en (9) fue seleccionado de Guajardo Benavides et al. (2021) debido a que este ya presenta cierta tolerancia a fallas por su estructura. La intención de un futuro control es agrandar el marco de tolerancia de este sin la necesidad de modificarlo. Para ello se está realizando el análisis del efecto de fallas presentado.

$$u = -\bar{C}\bar{M} - 1\bar{p} + \bar{M}\dot{S} - 1\dot{q}d + \bar{M}\dot{S} - 1\ddot{q}d - (\bar{M}^{-1} + K_d)S^T K_p(q - q_d) - (K_d + K_p\bar{M}^{-1})(\bar{p} - \bar{p}_d) + K_i\dot{z} + (I + K_d)K_iz$$
(9)

Donde ż está definido por (10).

$$\dot{z} = -(\overline{M}^{-1} + I)S^T K_p (q - q_d) - (\overline{p} - \overline{p}_d)$$
(10)

Las ganancias utilizadas son diferentes a las propuestas inicialmente para el controlador *u* estas fueron obtenidas de manera experimental debido a que el desempeño en el simulador variaba considerablemente al modelado. Esto se presentó debido al cambio de frecuencia de acción del controlador que bajó de 1000Hz a 20 Hz para adaptarse a las limitaciones del simulador y a la futura respuesta de los sensores del robot en la implementación planeada. A continuación, se presentan los valores de las ganancias:

- 1. $K_p = 16 * I K_p = 16 * I$
- 2. $K_d = 19 * I K_d = 19 * I$
- 3. $K_i = 2 * I K_i = 2 * I$

3.1 TurtleBot3

Para terminar de definir el controlador, necesitamos conocer los parámetros físicos del robot con el que se está trabajando. En este caso es el Turtlebot3, los parámetros de interés, obtenidos de ROBOTIS (2022), se muestran en la Tabla 1.

Parámetro	Valor
Velocidad de traslación máxima	0.26 m/s
Velocidad de rotación máxima	1.82 rad/s
Torque	3.7 N.m @14.8V,2.7A
Distancia 2b	0.287 m
Distancia dAB	0.0265 m
Radio de las ruedas	0.033 m
Masa del cuerpo	1.64 kg
Masa de las ruedas	0.08 kg

Tabla 1. Parámetros del Turtlebot3



A partir de estos parámetros y las ganancias antes mencionadas, podemos definir completamente $M^{-}(q), C^{-}(q), y S(q), \overline{M}(q), \overline{C}(q) y S(q).$

3.2 Trayectoria

Se eligió una trayectoria en la que ambos actuadores requirieran un desempeño similar. Para esto se implementó una trayectoria con segmentos rectos intercalados con medios círculos en ambas direcciones como se ve en la Figura 2. El tempo de recorrido está establecido en 40 segundos.



Figura 2. Trayectoria Deseada.

3.3 Simulación

ROS (Robot Operating System) es un conjunto de librerías de software y herramientas que permiten construir aplicaciones robóticas. Los elementos base de ROS son conocidos como nodos, tópicos y mensajes (ROS Wiki. (2022)). Cada nodo tiene una función determinada y estos pueden comunicarse entre sí mediante tópicos y mensajes. En este trabajo, utilizaremos el paquete proporcionado por ROBOTIS, el cuál incluye algunas librerías y el modelo 3D del turtlebot 3. El robot está diseñado para recibir instrucciones de velocidad lineal y angular. Estas mismas instrucciones son las que recibe el robot real en la implementación, por lo que la salida del sistema de control deben ser las velocidades, ω , V, para velocidad angular y lineal respectivamente.

Como se mencionó anteriormente, el entorno de trabajo se construye en base a nodos que se comunican entre sí por medio de tópicos y mensajes. El tópico que envía la información al robot acerca de su velocidad lineal y angular es el /cmd_vel. Se programó un nodo llamado /odom_x_y_th el cual recibe información de odometría de /sub_odom en formato de cuaterniones y lo transforma a coordenadas cartesianas. En la figura 3 se puede ver una representación gráfica (ROS computation graph) de la comunicación entre cada uno de los nodos.



Figura 3. Diagrama de flujo entre los nodos de ROS.



Se utiliza el software Gazebo con el objetivo de simular como operaría el robot real. Esto facilita las pruebas , ya que no se necesita un espacio de trabajo físico y la odometría es generada de manera automática por el simulador. En la figura 4 se puede apreciar el modelo del robot dentro del ambiente de simulación.



Figura 4. Turtlebot3 Waffle Pie en el simulador Gazebo.

3.4 Inducción de falla

La falla de actuador fue inducida en la respuesta de los actuadores a las entradas del control, limitando la capacidad de estos. Al ser una falla multiplicativa, se limita la velocidad máxima de giro de las ruedas, las cuales son componentes de las velocidades angular y lineal del robot diferencial, como se muestra en el diagrama de la Figura 3.



Posicion del centro de masa

Figura 5. Diagrama de bloques del sistema estudiado

Se probarán fallas de pérdida de potencia en los motores. Esto significa una disminución de la velocidad real con la solicitada por el control por la pérdida de voltaje a la entrada de los mismos. Estas pérdidas serán del 5,10,20,30,40%, a partir del segundo 10 de la simulación. Para inducir estas fallas se tomaron las velocidades lineal y angular, calculadas por el modelo del robot y se transformaron a las velocidades independientes de cada rueda.

$$\begin{bmatrix} V_B \\ 0 \\ W_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{q}B_x \\ \dot{q}B_y \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$$
(11)



$$\begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\varphi}}_{R} \\ \dot{\boldsymbol{\varphi}}_{L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2b} & \frac{-1}{2b} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \boldsymbol{V}_{B} \\ \boldsymbol{W}_{B} \end{bmatrix}$$
(12)

En (12), 2*b* es la distancia entre las dos ruedas y $\dot{\phi}_{R,L}$ es la velocidad de desplazamiento de cada rueda. Habiendo obtenido las velocidades independientes de las ruedas, estas se multiplican por un factor de falla mayor a 0 y menor que 1.

- *F_{md}* falla motor derecho
- F_{mi} falla motor izquierdo

Estas velocidades con la falla inducida se regresan las velocidades lineal y angular utilizando (13), donde V_{fB} y ω_{fB} son las velocidades lineal y angular con falla inducida.

$$\begin{bmatrix} V_{fB} \\ W_{fB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2b} & \frac{-1}{2b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_R F_{md} \\ \dot{\varphi}_L F_{mi} \end{bmatrix}$$
(13)

Para esta simulación se implementará una falla del 40% en el actuador derecho, la cual limitará su velocidad de desplazamiento. Este efecto de la falla sobre el actuador puede verse en la comparativa de la velocidad nominal y la de falla inducida en las Figuras (6) y (7) respectivamente.

Se puede apreciar que, en desempeño nominal, la rueda llega a una velocidad máxima de 2.6*m/s* mientras que con la falla inducida del 40% esta llega a un máximo de 1.56m/s. El análisis de los efectos de estas limitaciones se describirá en la siguiente sección.



Figura 6. Velocidad nominal de la rueda derecha con la trayectoria seleccionada.



Velocidad rueda derecha con falla en el motor derecho a los 10 segundos. Pérdida del 40.0 % de potencia.





4. Resultados

Se ejecutaron las simulaciones con las condiciones de falla propuestas anteriormente. Se obtuvo el error máximo y el final en todos los escenarios. A continuación, se muestra la tabla 2 con los resultados de error máximo y final en milímetros.

Magnitud de falla	Error Max	Error Final
0%	1.13	0.356
5%	2.15	0.3568
10%	3.72	0.442
20%	7.48	0.929
30%	11.86	1.636
40%	16.67	2.457

Tabla 2. Resultados de error en mm

Para fines de comparación, se definión una banda de $\pm 6mm$ alrededor de la trayectoria nominal (referencia), entonces podemos decir que fallas hasta de 15% pueden ser toleradas por el control nominal (9). Por lo tanto, fallas mayores a 15% no son toleradas por el control robusto utilizado. Si se desea mantener un correcto seguimiento de la trayectoria de referencia, será necesario implementar un control tolerante a fallas activo, es decir, que sea capaz de detectar, aislar y reconfigurar el controlador de acuerdo a la severidad de la falla presentada.

Graficando los valores de la Tabla 2, podemos indagar en la respuesta del sistema a la aparición de una falla en cuanto a el tamaño del error máximo y del error final. El comportamiento del error máximo presenta una relación casi lineal con la magnitud de la falla inducida. Mientras que el error final presenta un crecimiento parabólico. Estos comportamientos se pueden ver en las Figuras 6 y 7.

En las Figuras 10 y 11 se pueden ver los picos de error causados por los cambios entre trayectoria curva y recta. Estos se agravan con el tamaño de la falla. Si una trayectoria terminara en un recorrido curvo, el error final aumentaría significativamente. Esto se debe a en este escenario un actuador debe girar más rápido que el otro ya que el eje de las ruedas está fijo al cuerpo del robot.





Figura 8. Velocidad con falla inducida de la rueda derecha con la trayectoria seleccionada.



Figura 9. Velocidad con falla inducida de la rueda derecha con la trayectoria seleccionada.



Figura 10. Comportamiento del error con una falla del 5% en el actuador derecho.





Error con falla en el motor derecho a los 10 segundos. Pérdida del 60.0 % de potencia.

Figura 11. Comportamiento del error con una falla del 60% en el actuador derecho.

5. Conclusión

En este trabajo se consideró el estudio del efecto de fallas en un robot de tracción diferencial (Turtlebot3). Se propone un procedimiento para la implementación de fallas de pérdida de potencia del drive del motor. El esquema propuesto no requiere la modificación física del sistema. En base a la Definición 1 se establece un criterio para poder discriminar si un sistema de control en lazo cerrado tolera o no una falla.

En este contexto se obtienen el conjunto de fallas (y los tamaños de fallas) que pueden ser tolerados por el control y también el conjunto de fallas que no están siendo toleradas por el control. Esto permite ver el tipo de problema que se enfrentará puede ser analizado en base a las gráficas mostradas en las Figuras 10 y 11. Es interesante hacer notar que el conjunto de fallas que pueden ser toleradas depende del intervalo que se utilice alrededor de la trayectoria nominal (o bien la referencia) debido a que por la geometría de esta, los actuadores se someten a diferentes demandas del controlador, al observar las magnitudes de velocidades nominales, falla inducida y error, podemos concluir que la máxima falla tolerable es inversamente proporcional a el porcentaje de velocidad máxima demandada en ese instante. La asignación de los valores y_m y y_M dependen de cada aplicación que se tenga y de las limitaciones de movimiento del sistema analizado.

Este conocimiento se puede poner en práctica al momento de diseñar el algoritmo de seguimiento de trayectoria para que este tenga un margen entre la velocidad solicitada y la velocidad máxima de un actuador para que el funcionamiento del robot esté preparado para tolerar fallas de pérdida de velocidad máxima en caso de que estas se presenten.

Referencias

- B., Najjar, M.E.B.E., Cocquempot1, V., and Dherbomez1, G.. An informational approach for sensor and actuator fault diagnosis for autonomous mobile robots. Journal of Intelligent & Robotic Systems (2019).
- [2]. Carrera, F.R.F.. Control de las ruedas delanteras de robots móviles. *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, 3, 40–45 (2008).



- [3]. Guajardo Benavides, E.J., Alcorta García, E., and Alcorta García, M.A.. Port-hamiltonian control of a differential robot. In Moreno, H.A., Carrera, I.G., Ramírez-Mendoza, R.A., Baca, J., Banfield, I.A. (eds) Advances in Automation and Robotics Research. LACAR 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 347. Springer (2021).
- [4]. Leal Leal, I.E. and Alcorta Garcia, E. Increased fault tolerance through generalized pi control. In Memorias del Congreso Nacional de Control Automático (2020).
- [5]. Myint, C. and Win, N.N. Position and velocity control for two-wheel differential drive mobile robot. International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR), 5(9), 2849–2855 (2016)..
- [6]. Nurmaini, S., Dewi, K., and Tutuko, B. Differential-drive mobile robot control design based on linear feedback control law. In IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 1–7 (2017)..
- [7]. Verde, C., Gentil, S., and Morales Menendez, R. Monitoreo y diagnóstico automático de fallas en sistemas dinámicos. Trillas (2013)..
- [8]. Yazdjerdi, P. and Meskin, N. Fault-tolerant control of differential drive mobile robots using sliding mode controller. In 5th International Conference on Control, Instrumentation, and Automation (ICCIA), 270–274 (2017)..
- [9]. Yazdjerdi, P. and Meskin, N. Design and real-time implementation of actuator fault-tolerant control for differential-drive mobile robots based on multiple model approach. *Proc IMechE Part I: J Systems and Control Engineering*, 232(6), 652–661 (2018)..
- [10]. ROS/Introduction ROS Wiki ROS/Introduction ROS Wiki. (2022). Recuperado 20 junio 2022, de http://wiki.ros.org/ROS/Introduction
- [11]. ROBOTIS e-Manual. Recuperado 25 enero 2022, de <u>https://emanual.robotis.com/docs/en/platform/turtlebot3/features/#:~:text=Small%20Size,the%20si</u> ze%20of%20the%20predecessor



Monitoreo en Tiempo Real con Almacenamiento en la Nube de Cultivos in Vitro

☑Ramiro Ramiro José, Ortega Luna Miguel Ángel y Esteban Ortega Margarita del Rocío

Instituto Tecnológico Superior de Zacapoaxtla, División de Ingeniería Mecatrónica Cuerpo Académico de Instrumentación y Control Carretera Acuaco- Zacapoaxtla, Km. 8, Col. Totoltepec, Zacapoaxtla, Pue. ⊠jose.rr@zacapoaxtla.tecnm.mx

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados que se obtuvieron al llevarse a cabo la automatización de un prototipo de una cámara de germinación; se expone la creación del código, los elementos que se ocuparon en el diseño del prototipo determinado para el cultivo in vitro y/o micro bacteriológico, donde se buscó que el sistema controle la temperatura y la humedad; de esta manera los cultivos crecen en un ambiente bajo condiciones óptimas para que posteriormente puedan ser trasplantados en campo abierto. Al mismo tiempo se utilizó una interfaz basada entre LabVIEW y Arduino con el fin de recolectar datos, almacenarlos en un documento y guardarlo en la nube, lo que nos permitió realizar un monitoreo en tiempo real desde cualquier lugar en distintos dispositivos

Palabras clave: Palabras que por si mismas dan idea del tema o área del artículo. Usar letras de tipo Arial, normal de 10 puntos.

1. Introducción

Hoy en día con las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC), se ha logrado adelantos importantes en la recolección, análisis y distribución de información relacionada con el estado climático, monitoreo de variables medioambientales, estudios de biodiversidad, entre otras. [1]

La relación agricultura y tecnología, ha tomado una gran relevancia en los últimos años en el ámbito de la investigación, el principal objetivo es obtener un alto grado de producción; impactando lo mínimo posible el suelo y el medio ambiente. De esta manera, se puede obtener el máximo potencial, ahorro en insumos, rendimientos óptimos y menores costos. [2]

La ciencia y la tecnología han creado sistemas artificiales con las condiciones climáticas, promoviendo la facilidad de cultivar todo tipo de plantas en cualquier tiempo del año. Es así como la tecnología le otorga al agricultor mayores ingresos económicos y a los consumidores la factibilidad de no tener escasez de productos. [3]

Los germinadores automatizados, son una herramienta indispensable para optimizar los procesos agrícolas. Sin embargo, tienen altos costos, por lo que se requiere del diseño, construcción y operación de aparatos con precios accesibles para pequeños productores. [4]

El registro permanente de variables durante largos periodos de tiempo en zonas remotas o inhóspitas, sin contar con la presencia de un personal capacitado que se encargue de proporcionar datos presentables con el menor porcentaje de error, hace que aparezca la necesidad de automatizar procesos que anteriormente se hacian de manera manual. [5]



Por otro lado, toda la información que se enviá, es almacenada a un equipo de cómputo, sin embargo es bastante que se puede llegar a saturar, por lo tanto, es recomendable utilizar otros métodos para almacenar esa información y tener acceso a ella cuando se requiera y desde cualquier lugar; a esto se le conoce como la nube (informática o computación); se refiere a servidores desde internet encargados de atender las peticiones en cualquier momento. Se puede tener acceso a su información o servicios mediante una conexión a internet desde cualquier dispositivo móvil o fijo ubicado en cualquier lugar. Sirven a sus usuarios desde varios proveedores de alojamiento repartidos frecuentemente también por todo el mundo. Esta medida reduce los costos y garantiza un mejor tiempo de utilización. [6]

El proceso del monitoreo permite recolectar, tratar, analizar y difundir la información a un conjunto de actores involucrados, y esto a su vez, les permitirá considerar la mejor desición al respecto de los resultados propuestos con los esperados. El monitoreo permite obtener enseñanzas de la acción que permiten una mejor comprensión de la problemática o una nueva organización, el reacondicionamiento de una actividad o la revisión de un enfoque. Los datos recolectados deben ser concentrados para su posterior procesamiento. [7]

Las germinadoras son una gran herramienta utilizada por diferentes áreas del conocimiento, estas permiten crear las condiciones de clima adecuada para hacer que crezcan diferentes cultivos que, requieren de diferentes características en cuanto a la temperatura y a la humedad se refiere correspondiente a sus climas nativos, lo que permite el cultivo de diferentes plantas en lugares con características climáticas totalmente diferentes.

En la institución se cuenta con cámaras de germinación, una de ellas es la cámara de clima constante de la serie BINDER, la cual permite unas condiciones de temperatura óptimas y homogéneas. El control de humedad se realiza mediante un sensor de humedad capacitivo y un sistema de humidificación por vapor. Las cámaras climáticas funcionan en un rango de temperatura de 0 °C a 70 °C. Además, funcionan en un rango de humedad del 10% al 80%. Estas presentan un alto nivel de rendimiento y funcionalidad con un manejo cómodo y una calidad sólida y robusta. (GmbH, 2022). Sin embargo, la cantidad de muestras que se realizan, hacen que el equipo ya no abastesca lo suficiente, por lo que se optó por realizar un prototipo a bajo costo, debido a que actualmente es dificil requerir equipamiento para los laboratorios

El término SCADA (Sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos) usualmente se refiere a un sistema que comprende la captura de información de un proceso o planta industrial (aunque no es absolutamente necesario que pertenezca a este ámbito), para que, con esta información, sea posible realizar una serie de análisis o estudios con los que se pueden obtener valiosos indicadores que permitan una retroalimentación sobre un operador o sobre el proceso mismo. [8]

Gracias a la diversificación de tecnologías aplicadas en los SCADA, hoy en día es factible crear sistemas de monitoreo a bajo costo y con relativa sencillez a la hora de su implementación. Las posibilidades de diseño que ofrecen programas de desarrollo como LabVIEW, facilitan la creación de sistemas aplicables tanto a la investigación como a la industria, integrando una serie de soluciones en instrumentación y comunicación. Por esto, los SCADA constituyen hoy en día una poderosa herramienta cuando se requiere monitoreo y control de cualquier proceso industrial; contribuyen en la tecnificación de procesos críticos, mejorando la calidad en la ejecución de éstos y por ende la del producto final. [9]

La radícula es la primera parte de una plántula que emerge de la semiila durante el proceso de germinación, es la raíz embrionaria de la planta y crece hacia abajo en el suelo. Por otra parte, en la actualidad no se cuenta con información sobre desarrollo de radícula(s) en plántulas. Estudios previos han encontrado que es la longitud y no el diámetro de radícula lo que potencia el desarrollo de una plántula, ya que una mayor elongación de la radícula logra incrementar de manera eficiente la superficie exploratoria y la absorción de las raíces. [10]





Figura 1. Estructura de una plántula

El xilema es el componente anatómico del sistema vascular de las plantas superiores, directamente involucrado en el movimiento del agua de la raíz a los diferentes órganos aéreos. El floema es el principal actor en el movimiento de nutrientes y energía a los diferentes órganos de la planta. El hipocótilo, es otra parte fundamental de una planta, se refiere al tallo de la plántula, este está presente entre los cotiledones y la radícula. [11]

La semilla es la primera fase del desarrollo de una nueva planta. Es un embrión de planta perfectamente protegido por una serie de envueltas exteriores y acompañado por un almacén de alimento. La germinación es el conjunto de procesos que se producen en la semilla desde que el embrión comienza a crecer hasta que se ha formado una pequeña planta que puede vivir por sí misma, independiente del alimento almacenado en la semilla. El alimento almacenado en una semilla está formado por proteínas, hidratos de carbono y grasas, aunque las proporciones varían según la especie de que se trate. [12]

De acuerdo al documento citado anteriormente, las condiciones para que se dé una germinación pueden ser externas o intrínsecas. Dentro de las condiciones externas se presentan la disponibilidad de agua, una semilla tiene que disponer de agua para poder germinar. El agua es el factor ambiental más limitante para la germinación y ha de estar disponible en una cantidad adecuada, ya que tanto su exceso como su defecto traen consecuencias negativas para la germinación.

Otra condición es la temperatura adecuada. Respecto a la influencia que la temperatura tiene sobre la germinación cabe destacar que, para cada especie, existe una temperatura máxima, por encima de la cual sus semillas no podrán germinar, una temperatura óptima a la cual las semillas germinan mejor y con mayor rapidez, y una temperatura mínima, por debajo de la cual las semillas de esa especie no pueden germinar.

Y por último la presencia o ausencia de luz. En muchos casos las semillas germinan indiferentemente bajo la luz o en la oscuridad. Sin embargo, muchas semillas sólo germinarán en presencia de luz, mientras que la germinación de otras queda fuertemente inhibida por efecto de la misma.

Las condiciones intrínsecas que se consideran son: que la semilla debe estar viva y bien constituida, debe ser o estar madura y debe ser permeable al agua y al oxígeno.

Por lo tanto, lo que interesa de este trabajo es obtener la germinación en distintas semillas; controlando la temperatura, la iluminación y la humedad. En este caso la humedad tanto del sistema como de la semilla germinada son importantes, ya que sin ella no se lograría el crecimiento de la semilla, pero la temperatura es indispensable para acelerar el proceso de germinación, pero sin pasarse, porque también afecta o quema la muestra. La iluminación es el otro componente, ya que siin la iluminación, la muestra no crecería de manera adecuada.



2. Metodología

2.1 Diseño del prototipo

El diseño del prototipo consiste en un cajón aislante, el cual se encuentra dividido en 3 bloques para colocar las muestras de cultivo. (ver figura 2). En un primer momento se colocaron termómetros analógicos donde se realizó el proceso manualmente, lo que permitió familiarizarse con el mismo.





Figura 2. Diseño y plano del prototipo en SolidWorks



2.2 Programación en tarjeta de desarrollo Arduino

Para lograr el control de las variables dentro de la cámara, se realizó un código basado en la plataforma Arduino, tal como se muestra en el diagrama de la figura 3.



Figura 3. Diagrama de flujo correspondiente al control de temperatura y humedad de la germinadora

Se realizaron las pruebas de las conexiones pertinentes, conectando la tarjeta de desarrollo, etapa de sensores, la etapa de potencia y visualizador LCD. Este tipo de etapas constituyen el sistema de hardware propuesto, donde cada una de las partes es fundamental para lograr el alcance del proyecto. En este proceso también se desarrolló la parte blanda o el desarrollo del software, la cual permite obtener la información del sistema, así como trasladarla y traducirla a un lenguaje común para el ser humano y que a su vez pueda ser manipulado para condicionar ciertas variables. Ver figura 4.



Figura 4. Etapas de sistema propuesto para el monitoreo y almacenamiento de datos.



A continuación, se presenta de manera general algunas de las etapas que se consideran pueda ser de gran apoyo para los interesados en esta área del conocimiento. Se describe

Tal como se muestra en la figura 5, se realizó la programación de la tarjeta de desarrollo haciendo uso de la librería liquidcrystal, y DHT11, cuyo funcionamiento es la visualización de los datos en una pantalla LCD y registrar e interpretar la información otorgada por el sensor de temperatura, respectivamente.

```
void setup() {
Serial.begin(9600);
lcd.begin(16,2);// establece tamaño de pantalla
pinMode(12,OUTPUT);// pin 12 como salida
pinMode(11,OUTPUT);
pinMode(A7, INPUT);
digitalWrite(11,HIGH);
1
void loop() {
while (tem < Tmax)
ł
  lectura();
  serial(tem, hum);
  v display(tem,hum);
  humedad (hum);
  digitalWrite(12,HIGH);//rle
  delay(15000);
  calibrador();
}
  for(int t=0;t<42;t++) {</pre>
      lectura();
```

Figura 5. Fragmento del código de programación en Arduino para mostrar en una pantalla LCD la información de la temperatura sensada cada 15 segundos.

2.3 Programación en LabVIEW

Mediante LabView se realizó un programa que estableciera la comunicación con Arduino, estos dos componentes realizan la interfaz, tal como se observa en la figura 6. LabView toma los datos de Arduino y los convierte en formatos específicos con los que pueden colaborar de manera directa. La aplicación se encarga de darle un formato a los datos, esta es capaz de presentar la fecha y hora de la toma de la muestra, temperatura y humedad actual, para posteriormente almacenarlos en un archivo. Es decir, se hace una conversión de datos flotantes a una cadena de caracteres para ser interpretados, tanto por el usuario, como por la pantalla y la computadora.

Para la interfaz con el usuario se diseñó una aplicación que fuera interactiva con el usuario, se colocaron 2 gráficos, uno para la humedad y otro para temperatura que muestra en tiempo real su comportamiento, tal como se muestra en la figura 7.

En esta interfaz también se colocó un cuadro donde el usuario especifica el puerto donde se realiza la comunicación entre el equipo de cómputo y Arduino, así como también, un cuadro donde el



usuario puede especificar la ubicación donde se guardará el archivo con los datos. Al terminar de colocar los datos necesarios, el usuario puede correr el programa, el cual da inicio y almacena los datos.



Figura 6. Diagrama de bloques que representa la programación gráfica del sistema y muestra la interfaz entre labview y Arduino mediante el protocolo de comunicación serial.



Figura 7. Ventana destinada al usuario para realizar el monitoreo en tiempo real.

En este caso, al dar inicio en Labview, también está vinculado de manera directa con Arduino, por lo tanto, Arduino lee la información que está enviando el sensor (Temperatura y Humedad), esta es



enviada a través de un puerto serial tanto para la pantalla de cristal (LCD), como para Labview. Los datos adquiridos en Labview se representa de manera gráfica. Esta información es refrescada cada 30 segundos, sin embargo, puede ser programada para cualquier otro tiempo.

2.3 Almacenamiento en la nube

Existen diferentes plataformas en la nube, las cuales ofrecen diferentes paquetes de acuerdo con la cantidad de almacenamiento que se requiera, sin embargo, se seleccionó Google drive, por ser una plataforma que proporciona una opción gratuita, los usuarios que participaron en este proyecto cuentan con dispositivos vinculados con cuentas de Gmail, por lo que se sienten familiarizados con esta y es relativamente sencilla. Para almacenar los datos en la nube, el equipo de cómputo debe contar con la aplicación de escritorio de Google Drive, en la cual el usuario debe iniciar sesión con una cuenta de correo de dominio Gmail y dar el permiso requerido para realizar la vinculación del equipo de cómputo con la cuenta. De esta manera aparecerá un icono con la figura de un disco duro, lo que significa que tanto el dispositivo como la cuenta están vinculadas para almacenar y transmitir información a un archivo externo de la nube. Observe la figura 8.



Figura 8. Equipo de cómputo vinculado a la nube a través de una cuenta en Gmail.

Dentro de la dirección de la nube se creó una carpeta en la cual se pueden almacenar los datos. Para lograr el monitoreo en tiempo real, el usuario deberá especificar en la interfaz visual de LabVIEW la dirección de dicha carpeta y nombre del archivo, que en caso de que no exista se generará automáticamente.

Una vez completado este paso, Labview almacenará los datos en la ruta especificada, al mismo tiempo que drive subirá el archivo a la nube, permitiendo que cualquiera tenga acceso a dicho archivo mediante un enlace, o por permiso directo del propietario de la cuenta, lo que permite visualizar los datos generados en cualquier momento y en cualquier dispositivo; siempre y cuando se cuente con una conexión a internet.

Un ejemplo claro de estos datos adquiridos por el sistema se presenta en la figura 9. A su vez, se muestra la comparación de como era el procedimiento de manera manual.

El ir escribiendo la información, toma demasiado tiempo, sin embargo cuando se trata de crecimiento bacteriológico, estar observando el comportamiento de la muestra es de vital importancia, ya que en algunos casos el crecimiento se da de manera exponencial en los primeros minutos, y si se toma en cuenta que para tomar la medición de la humedad y temperatura de manera manual, lleva un minuto en realizar dichas mediciones, por lo que no es viable estar haciendo este proceso y no visualizar la muestra de manera directa.

En este primer momento, solo se está guardando los datos de temperatura y humedad del sistema, sin embargo en otro momento se le agregará una cámara que permita ir capturando imágenes y video para analizar el tamaño de las muestras de manera automática.





Figura 9. Monitoreo y adquisición de datos almacenados en la nube en tiempo real y visto desde un equipo de cómputo externo contra datos adquiridos de forma manual.

3. Resultados

Se introdujeron muestras de semillas, para percibir como es el crecimiento dentro de este prototipo de germinadora, así como en las industriales con las que cuenta la institución, esto para poder tener una comparativa de los resultados que se pueden obtener con el dispositivo creado y las industriales. Observar figura 10.



Figura 10. Equipos industriales y prototipo utilizados para realizar la parte experimental



Con diferentes condiciones de temperatura se obtuvieron resultados similares en los cultivos hortícolas, tanto en las cultivadoras industriales como en el prototipo, lo que nos permite competir frente a ellos con una inversión mucho menor. La intención no es sustituir a los equipos que ya se tienen, sino más bien dar abasto sobre la cantidad de muestras que se analizan, ya que solo existen 2 equipos en la institución y hay varios estudiantes de licenciatura en biología de distintos semestres que las utilizan, otros más de servicio social y residencia profesional que necesitan realizar pruebas sobre muestras de cultivos que son base de proyectos de investigación y que no pueden avanzar debido a que todo el tiempo están utilizados los equipos, además, para que crezca una muestra debe tardar de 3 a 8 días, lo cual dificulta aún más el uso de ese equipo especializado.

En la figura 11, se presentan 2 muestras de rábano, una fue germinada en una germinadora industrial y la otra fue germinada en la del prototipo propio. Ambas fueron sacadas a los 4 días de germinación. En la imagen se puede apreciar el crecimiento de las muestras. En el sistema creado no se alcanzó la longitud del crecimiento alcanzada con una germinadora industrial, los resultados son confortadores, ya que si se logró que la semilla germinara y creciera con pocas diferencias de desarrollo.





a) Muestra obtenida de Germinadora industrial b) Muestra obtenida de Germinadora (diseño propio) Figura 11. Crecimiento de muestras de semillas de rábano con 4 días de germinación.

El crecimiento de las muestras permitió que se continuara con el avance del proyecto, por lo que se siguieron realizando más pruebas sobre el funcionamiento del equipo. En un segundo momento, se cultivaron muestras de rábano, sin embargo, en ninguna de las germinadoras funcionó el método.

Se siguió trabajando en el control de la temperatura y humedad, se sugirió por parte del experto en el crecimiento de cultivo *in vitro* que la humedad debe permanecer entre el 60% y 100% de humedad, por lo que se le atribuye ese problema al segundo intento de las muestras, ya que de acuerdo con el análisis que se presenta en la adquisición de datos, la humedad máxima fue del 54% y la mínima de 5%.

Se estuvo trabajando en el control de humedad, para que no bajara del 70% de humedad, en caso contrario, se active de manera automática una bomba de riego que hace la función de irrigación y mantenga el sistema de la humedad de acuerdo con lo solicitado.

En la figura 12, se muestra la medición de muestras en medios de cultivo *in vitro* de semillas hortícolas de rábano y pepino. Ambas muestras fueron obtenidas del prototipo. En ellas se muestra las mediciones realizadas a través de un vernier para determinar la longitud de su raíz.





a) Plántula de Pepino



b) Plántula de Rábano

Figura 12. Medición de las muestras en la germinadora prototipada.

En la tabla 1, se muestra algunas de las medidas tomadas a algunas de las muestras obtenidas con el prototipo. En estas muestras lo que se mide es la radícula, el hipocótilo y el cotiledón, partes esenciales de una plántula y que, de acuerdo con sus medidas, puede garantizar el traspaso de la plántula a un cultivo de campo abierto.

Mediante la tarjeta Arduino se realizó el control de temperatura y humedad acompañada del sensor DHT11, el cual con la información se regula el ambiente dentro de la germinadora, y esta a su vez es enviada a través de la interfaz entre Arduino-LabVIEW, la cual permite ser observada en el panel frontal de manera gráfica.

Cabe señalar que hay distintos sensores de temperatura, tales como el Im35, el DTH22, el BME280 que pueden ser mejores, sin embargo, se tomó el DTH11 porque fue el sensor con el que se contaba en ese momento. Se realizaron pruebas con termómetros analógicos y se verificó que la temperatura que marcaba el sensor DTH11 fuera equivalente.

Muestra	Descripción	Hortaliza	Radícula	Hipocótilo	Cotiledón	Fecha	Observación
1	Medio líquido al 100%	Pepino	2.13cm	3.05cm	1.77cm	21/09/2022	Color verde. 1 semilla sin germinar.
2	Medio Iíquido al 100%	Pepino	2.1cm	3.68cm	2.39	21/09/2022	Color verde 3 cotiledones 2 semillas sin germinar ramificaciones
3	Medio Líquido al 100%	Rábano	0.80cm	6.71cm	0.54	21/09/2022	Color verde 2 cotiledones Presenta ramificación
4	Medio líquido al 100	Rábano	0.79cm	8.53cm	1.2cm	21/09/2022	Color verde 2 cotiledones Presenta ramificaciones

Tabla 1.	Descripción de	las mediciones	tomadas con	vernier de	e algunas de	e las muestras
----------	----------------	----------------	-------------	------------	--------------	----------------



4. Conclusiones

Con el desarrollo de este trabajo, se logró la automatización de un proceso común dentro de un campo de la investigación que de momento se sigue realizando de manera manual. Esto conlleva a tener un margen de error mayor a la hora de realizar las mediciones de manera manual, ya que, al incrementarse el número de variables, crece de manera exponencial el tamaño de error. El monitoreo en tiempo real permite que desde cualquier lugar podamos ver el comportamiento de la germinadora, esto es posible gracias a la comunicación creada con la aplicación de LabVIEW y el documento que es vinculado mediante un enlace generando los datos en la nube.

Otra ventaja es que podemos estar al tanto del experimento sin estar de manera presencial para estarlo monitoreando. Nos permite conocer cuando deja de estar en condiciones óptimas y con ello determinar cuáles pueden ser las posibles causas o en su caso tomar una decisión oportuna ante cualquier situación detectada. De momento solo se ha alcanzado el monitoreo, sin embargo, el área de oportunidad que se presenta es la de implementar el control de manera remota, para que desde el exterior se puedan activar o desactivar ciertas variables.

Con este proyecto se logra abordar dar solución a problemáticas reales y que son de cierta manera enfocados al área de la carrera en la que apoyaron los estudiantes, los cuales son de Ingeniería Mecatrónica y de Biología, quienes participaron dentro del programa denominado "Verano Científico 2022" por parte del Tecnológico Nacional de México y que gracias al trabajo colaborativo y multidisciplinario se puedo lograr este alcance.

Ahora bien, las áreas de oportunidad se reflejan en seguir realizando más pruebas experimentales, se sugiere realizar modificaciones al sistema, de tal forma que la tecnología que se desarrolle sea propuesta para alcanzar diseño de patentes. Por otra parte, el interés dentro del proyecto ha crecido y ha tenido demanda no solo por estudiantes de dichas áreas mencionadas, sino también por parte de otras áreas que aún más van a abonar con sus conocimientos al desarrollo de este proyecto.

La idea de este prototipo surge como una necesidad, ahora que ya se tiene habilitado ha estado funcionando de manera continua durante los 7 días de la semana, trabajando de forma automática. Por lo que de cierta forma también tenemos un ahorro de energía. Se ha utilizado para crecer muestras de estudiantes que se encuentran realizando servicio social y residencia profesional. Está funcionando también como base de proyectos internos de la institución que permite analizar muestras de crecimiento *in vitro*, se sigue acondicionando para un mejor control.

Se le considera agregar más etapas en otros momentos para realizar otras funciones. Por otra parte, se plantea realizar más dispositivos similares para que pueda seguir abasteciendo los laboratorios y no queden sin realizar las pruebas necesarias dentro de su proceso enseñanza-aprendizaje los estudiantes de biología.

Referencias

- [1] M. Quiñonez, V. Gonzales, R. Torres y M. Jumbo, «Sistemas de monitoreo de variables medioambientales usando una red de sensores inalámbricos y plataformas de internet de las cosas,» *Enfoque UTE Revista*, vol. 7, nº 1, pp. 229-243, 2017.
- [2] A. Hernández, A. X. Ávila, N. Mendoza y H. Hernández, «Diseño, construcción, verificación y prueba de un germinador de bajo costo.,» *Revista Mexicana de Clencias Agrícolas*, vol. 10, nº 2, pp. 431-440, 2019.
- [3] P. Martín Gomez, J. Montoya Gómez y G. Muñoz Serrano, «Sistema de riego autónomo para pequeños cultivos basado en medición de temperatura y humedad,» *Revista Politécnica*, vol. 13, nº 25, pp. 65-74, 2017.
- [4] J. Martínez R., D. Pérez L., C. Otamendi V. y I. Hernández C., «Automatización de un sistema de germinación para plántula,» *Latin American Journal of Science Education,* p. 22004, 2019.



- [5] B. Cabral V., «Consideraciones para el almacenamiento de archivos digitales en la nube informática en bibliotecas universitarias,» *Investigación Bibliotecnológica,* pp. 55-75, 2018.
- [6] D. C. Ruiz-Ayala, C. A. Vides-Herrera y A. Pardo- García, «Monitoreo de variables meteorológicas a través de un sistema inalámbrico de adquisión de datos,» *Investigación, Desarrollo, Innovación,* vol. 8, nº 2, pp. 333-341, 2018.
- [7] N. Lauriac, «Diseño e Implementación de un sistema de monitoreo,» *Terre des hommes,* pp. 1-48, 2016.
- [8] B. GmbH, «Binder,» 3 10 2022. [En línea]. Available: https://www.binderworld.com/es/productos/camaras-de-clima-constante/serie-kbf-p.
- [9] C. Robles, R. Caputo y A. Sánchez, «Diseño de un sistema Scada basado en labview, implementando el protocolo de comunicación inalámbrica zigbee,» *Prospect*, vol. 10, nº 1, pp. 44-52, 2012.
- [10] N. National Instruments, «Labview,» 4 10 2022. [En línea]. Available: https://www.ni.com/esmx/shop/labview.html.
- [11] J. Espinoza, J. Valdés y J. Alcalá, «Morfología y anatomía de las radículas múltiples en plántulas de maíz derivadas de cariopsis con poembrionomía,» *Polibotánica,* pp. 207-221, 2012.
- [12] E. J. Barrios, C. López, J. Kohashi y J. A. Acosta, «Comparación de las estructuras morfológicas en raíz e hipocótilo de frijol,» *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 3, nº 4, pp. 655-669, 2012.
- [13] C. De la Cuadra, «Gerinación, Latencia y Dormición de las Semillas,» *Hojas divulgadoras,* pp. 1-24, 1993.



Sistema de Monitoreo de Parámetros Físicos en Apiarios de la Región Huasteca Hidalguense

Meneses Flores Arturo Elfego, [⊠]Salazar Casanova Hermes, Mendoza San Juan Luis Alberto y García Morales Ricardo

Universidad Tecnológica de la Huasteca Hidalguense ⊠hermes.salazar@uthh.edu.mx

Resumen

La apicultura como profesión en México es muy poco valorada a pesar de ser uno de los países que más exporta miel al extranjero. Las ventas internacionales de miel alcanzaron, de enero a noviembre de 2020, las 26 mil 77 toneladas, volumen superior en 3.3 por ciento con lo registrado en el mismo lapso del 2019. La demanda internacional de miel de México lo ha situado como el tercer país exportador del producto, que resalta por su calidad y sabor [1]. Este estudio fue realizado en apiarios ubicados en la Huasteca Hidalguense. Los productores pecuarios de esta región ejercen su profesión de manera tradicional. los apiarios son instalados en zonas alejadas de la población para evitar accidentes según la Norma Oficial Mexicana NOM-002-SAG/GAN-2016, sin embargo, el apicultor pierde noción del estado de las colmenas durante un periodo de 15 a 8 días. En ese lapso de tiempo, las abejas pueden estar bajo alguna amenaza sin que alguien pueda asistirlas, por ejemplo, presencia de humedad, altas temperaturas que causan enfermedades o el ataque de algún depredador. La implementación de un sistema electrónico con sensores analógicos y digitales para obtener datos (peso, temperatura, humedad, sonido) desde el sistema operativo de una microcomputadora Raspberry PI 3, instalados dentro de la cámara de crianza de una colmena, permitió obtener los datos suficientes para determinar la integridad de las colmenas y para la realización de esta investigación. La humedad y la temperatura permiten reconocer el estado de las abejas; de igual forma, analizando las grabaciones de sonido, se determinó que al estar bajo amenaza las abejas comienzan a emitir vibraciones en frecuencias más altas, situación que provoca que aumente su temperatura ambiental; por tal situación existen dos parámetros principales en el monitoreo del sistema, estos indicadores detonaran la activación de alarma. Esta investigación permitirá obtener información relevante que indica el estado en el que se encuentran las abejas dentro de la colmena y con la instalación de nuevas tecnologías en los apiarios, se facilitará el monitoreo de las mismas, mejorando la seguridad e integridad del enjambre.

Palabras clave: Apicultura de precisión, Monitoreo, Sistema.

1. Introducción

En nuestro país, la apicultura es una de las actividades de mayor relevancia por el impacto que tiene en el desarrollo sostenible. Por ello, se realizan acciones en pro de concientizar a la población sobre la importante contribución de las abejas en la producción de alimentos y el equilibrio de ecosistemas, así como promover su cuidado y conservación.

Las abejas meliponas son la especie nativa de México, éstas son de vital importancia debido a su función como polinizadoras de plantas de interés como el café, el chile, variedades de granos, semillas y frutos. Asimismo, la fabricación de miel es muy importante, existen más de 43 mil apicultores a nivel nacional, quienes en los últimos 10 años su trabajo ha colocado a México como el quinto lugar como exportador de miel y el noveno lugar como productor de miel. [2]



La apicultura, tiene una gran importancia no sólo por los propios productos generados, sino también por su rol fundamental en la polinización de especies vegetales productivas. En los últimos años, diferentes estudios científicos han señalado el declive de las abejas por múltiples amenazas

A pesar de los problemas que implican la presencia de la *abeja africana* en México (desde 1986) y la *Varroa* (desde 1992), los cambios climáticos y el deterioro de los recursos naturales vinculados a la producción apícola en los últimos años, la apicultura nacional ha mantenido sus niveles de producción, lo que refleja el arduo trabajo de los apicultores mexicanos. [3]

La nueva tecnología aplicada al sector pecuario trae como consecuencia el surgimiento de la apicultura de precisión. Enfocarse en la manera de realizar monitoreo no presencial en los apiarios para ahorro de tiempo del apicultor, pero más importante para resguardar el bienestar de las abejas y actuar de inmediato ante cualquier amenaza presente.

La Norma Oficial Mexicana NOM-002-SAG/GAN-2016 establece las actividades técnicas y operativas que un apiario debe tener, dicha norma indica que cada establecimiento debe instalarse a un mínimo de 200 metros de distancia de cualquier vivienda o carretera para evitar accidentes, esto implica que la mayoría de los apiarios se encuentran en zonas alejadas de la ciudad y del lugar de residencia de los apicultores [4].

El apicultor tradicionalmente realiza una revisión de las colmenas de manera semanal o quincenalmente dependiendo de la distancia en la que se encuentre el apiario, dentro de ese lapso de tiempo las colmenas pueden sufrir amenazas sin que el apicultor esté al tanto, desde robo, hasta ser atacadas por distintos depredadores o elementos naturales.

Debido a lo mencionado, se propone la construcción y puesta en marcha de un sistema electrónico de monitoreo con sensores analógicos y digitales para obtener datos (peso, temperatura, humedad, sonido) desde el sistema operativo de una microcomputadora Raspberry PI 3 que permita saber si existe algún riesgo para las abejas durante el periodo donde el apicultor no se encuentra cerca del apiario; este sistema utiliza una microcomputadora con la que se podrá realizar el monitoreo en tiempo real de forma remota, utilizando conexión 3G y posteriores.

2. Planteamiento del problema

La apicultura en México ha tenido que enfrentar graves problemas debido a la africanización de las colonias [6], la presencia del ácaro *Varroa destructor*, precipitaciones pluviales erráticas, el embate de los huracanes sobre la infraestructura de producción y la flora [5, 6], entre otros más.

La apicultura es una actividad de gran importancia dentro de la ganadería en México, ya que genera empleos, es compatible con otras actividades agrícolas y ganaderas, y a la vez genera divisas y dinero para el sector campesino. En nuestro país existen aproximadamente 40 mil productores y dos millones de colmenas, que permiten a México estar siempre en los primeros lugares mundiales como productor y exportador de miel.

Uno de los problemas más grandes que aquejan a esta actividad es la presencia de los ácaros Varroa. Son parásitos de las abejas melíferas cría y adultas (especies del género Apis) que originalmente infestaban abejas melíferas asiáticas nativas estrechamente relacionadas con Apis cerana. [7]

Se han descrito cuatro especies ectoparásitas obligadas: Varroa jacobsoni, V underwoodi, V. rindereri y V. destructor. Dos haplotipos de la especie V. destructor, el haplotipo coreano y el japonés/tailandés, parasitan a Apis mellifera [8]

A lo largo de las décadas, V. destructor ya está presente en la mayoría de los países que crían A. mellifera y en todo el mundo quedan muy pocas poblaciones de abejas melíferas resistentes a los ácaros. [9]



Aunado a lo antes descrito, es importante mencionar que también existen otros factores que pueden alterar el ambiente y salud de las abejas, como son la humedad que es creadora de microorganismos dañinos como hongos, diferentes depredadores, invasión de especies y el mismo ser humano a través de las prácticas de robo y destrucción de colmenas que dañan la estructura de las mismas.

Todos estos factores forman parte y favorecen el proceso de declive de las poblaciones y desapariciones de las diferentes especies de abejas.

3. Desarrollo

Para el desarrollo de esta investigación se utilizó la metodología de diseño Gugedot, debido a que se caracteriza por la integración del proceso de diseño en el proceso de producción y por la elaboración de una metodología proyectual, es decir, por dotar de carácter metodológico al proceso de creación [10]



Figura 1. Estructura de método de diseño de Gugelot.

1. Etapa de información.

Dentro de esta etapa se recolectó toda la información sobre la situación particular de los apiarios de la región de la Huasteca Hidalguense para los que se va a crear el diseño del prototipo. Se investigaron los posibles componentes que se consideraron emplear y que se adaptaron mejor a las necesidades de esta investigación.

2. Etapa de investigación.

En esta fase se definieron los requerimientos del sistema electrónico de monitoreo con sensores analógicos y digitales con base a las necesidades de los usuarios y aspectos específicos de funcionamiento. En esta etapa se recolectó información acerca de las necesidades que imperan en las colmenas de la región; esto se logró acudiendo de manera presencial a los diferentes apiarios para recabar de primera mano a través de entrevistas todos los datos necesarios.



3. Etapa de diseño.

En este apartado se creó el bosquejo más adecuado a través de diagramas esquemáticos que incluyen los diferentes circuitos que componen el prototipo. Este sistema de monitoreo se diseñó con base a las dimensiones específicas de las colmenas objeto de estudio.

4. Etapa de decisión.

En esta etapa, el diseño fue presentado a las personas encargadas de los apiarios, explicando las decisiones tomadas para la elección del mismo. Después de analizar varias opciones en esta etapa se deciden los componentes que se utilizaron.

5. Etapa de cálculo.

En esta fase se acordó el diseño del sistema de monitoreo con base a las normas estándares de materiales y producción. En esta etapa se seleccionan los tipos de componentes y software empleado para el diseño y construcción del prototipo, así como dimensiones del mismo.

6. Construcción del prototipo.

Por último, una vez construido el prototipo se realizaron pruebas para comprobar su funcionalidad. En esta etapa se realizaron mediciones de peso, humedad, temperatura y sonido, verificando y determinando que los registros realizados de manera manual y a través de los sensores, no presentaban variaciones considerablemente diferentes.

La presente investigación tuvo lugar en 3 apiarios situados en la región de la Huasteca Hidalguense, específicamente en las comunidades de Tehuetlan, Tepeolol y Apuleyo Viniegra Castro dentro del municipio de Huejutla de Reyes, Hidalgo.



Figura 2. Apiario ubicado en Apuleyo Viniegra Castro, Hgo.

Después de realizar un análisis de los parámetros que se necesitan a monitorear, se determinó que se utilizaría un sensor de peso, humedad, temperatura y sonido.

El sensor de peso se instaló debajo de la colmena para saber si las abejas aún se encuentran trabajando dentro. Previo a la instalación de dicho sensor, se tomaron los datos de cuanto pesaban las colmenas con las abejas dentro; con estos datos y el monitoreo de peso en tiempo real se puede determinar si habían abandonado la colmena, o incluso si ésta sobrepasa el peso aproximado de la población, se determina si hay existencia de miel necesaria para su cosecha.





Figura 3. Apiario ubicado en Tehuetlán, Hgo.

Para medir el peso se utilizó una galga extensiométrica, que es un transductor capaz de convertir una fuerza en una señal eléctrica, esto lo hace a través una o más galgas internas que posee, configuradas en un puente Wheatstone. Existen varios tipos de Celdas de carga, la empleada en la presente investigación es una celda con capacidad de carga de 20Kg que es el valor máximo que puede censar; de igual forma se utilizó un trasmisor de celda de carga HX711, con este módulo se creó una interface entre las celdas de carga y la microcomputadora, permitiendo poder leer el peso de manera sencilla. Internamente se encarga de la lectura del puente Wheatstone formado por la celda de carga, convirtiendo la lectura analógica a digital con su conversor A/D interno de 24 bits.

El sensor de temperatura se instaló dentro de la cámara de crianza y ayudó a obtener datos sobre la estabilidad de la colmena, ya que cuando las abejas se encuentran bajo amenaza aumenta la temperatura. El modelo empleado fue un DS18B20, su funcionamiento consiste en entregar la información correspondiente a la temperatura del ambiente por medio de un protocolo de comunicación específico implementado en su pin de señal, la tarjeta Raspberry PI 3 a su vez recibe la señal y la lee con uno de sus GPIO.

El sensor de humedad permite saber si las abejas están propensas a adquirir enfermedades derivadas de la misma. Se usó el modelo DHT11 por ser un sensor con una alta fiabilidad y estabilidad debido a su señal digital calibrada, utilizando la librería disponible para el sensor se configuró la adquisición de datos de una forma práctica y estable.



Figura 4. Sensor de temperatura y humedad.

El sensor de sonido fue colocado dentro de la colmena para monitorear el sonido emitido por el zumbido de las abejas, después de realizar pruebas donde intencionalmente se alteraba a los insectos, se determinó cual era el umbral de activación del sensor; se empleó la placa KY-038 que incorporan un micrófono junto con un comparador LM393, que permite obtener la lectura tanto como un valor analógico como de forma digital.

El uso habitual de este tipo de sensores no amplificados es emplear la salida digital para detectar el sonido cuando este supera un cierto umbral, regulado a través de un potenciómetro ubicado en la placa.





Figura 5. Diagrama esquemático general del sistema electrónico de monitoreo con sensores analógicos y digitales para obtener datos (peso, temperatura, humedad, sonido) desde el sistema operativo de una microcomputadora Raspberry PI 3.

4. Pruebas y resultados.

Una vez elaborado el sistema electrónico, se realizaron pruebas de recolección de datos durante 15 días en los apiarios seleccionados, donde se monitoreo de forma manual con métodos tradicionales (peso bascula digital, humedad higrómetro, temperatura termómetro digital), y con el sistema de monitoreo automático, los parámetros físicos de humedad, temperatura y peso, en 1 colmena durante 15 días.

De igual forma se increpó de manera física a las abejas en 7 ocasiones para probar que la alarma propuesta funcionara de forma correcta.

Se compararon los resultados obtenidos de forma manual en la tabla 1 con respeto a los obtenidos de forma automática como se muestra en la tabla 2.

MONITOREO MANUAL							
DÍAS	PESO (kg)	HUMEDAD (%)	TEMPERATURA (° C)				
1	13.2	77	39				
2	13.5	77	38				
3	14.1	77	39				
4	14.1	77	35				
5	14.3	77	39				
6	14.5	77	38				
7	15.5	77	42				
8	14.7	77	42				
9	15.5	77	40				
10	15.5	70	39				
11	15.6	70	35				
12	15.6	70	39				
13	15.9	70	39				
14	15.9	77	39				
15	15.9	77	39				

Tabla 1: Monitoreo manual de peso, humedad y temperatura.



Se puede observar que la variación de los datos que se obtuvieron por ambos métodos fue mínima, también se pudo determinar que en todas las ocasiones que las abejas fueron increpadas de forma intencional se activó la alarma con un 100% de efectividad debido a que excedieron el umbral permitido.

MONITOREO POR SENSORES								
DÍAS	PESO (Kg)	HUMEDAD (%)	TEMPERATURA (° C)					
1	13.7	77	39					
2	13.5	77	38					
3	14.1	77	39					
4	14.1	77	35					
5	14.3	77	39					
6	14.5	77	38					
7	15.3	77	42					
8	14.7	77	42					
9	15.5	77	40					
10	15.5	70	39					
11	15.6	70	35					
12	15.3	70	39					
13	15.9	70	39					
14	15.4	77	39					
15	15.5	77	39					

Tabla 2: Monitoreo por sensores de peso, humedad y temperatura.

Al hacer una revisión y comparativa de los resultados obtenidos de peso, humedad y temperatura a partir del registro de manera manual y mediante sensores (tabla 1 y tabla 2), se puede determinar que las variaciones entre ambas son mínimas, conservando en la mayor cantidad de ocasiones las mismas mediciones, por lo que se determina que la implementación de este sistema electrónico con sensores analógicos y digitales para obtener estos datos de las colmenas es eficaz, eficiente y confiable.

5. Conclusiones

Los resultados parciales obtenidos de la presente investigación muestran que el prototipo propuesto es una buena opción para monitorear de forma remota a las colmenas que se encuentren ubicadas lejos de los apicultores. Se requieren realizar más pruebas en diferentes condiciones para ver si el sistema continúa con la eficiencia mostrada. Este tipo de técnicas son una opción de mejora con respecto a los métodos tradicionales, sin embargo, el costo del prototipo puede ser un impedimento para la implementación a gran escala.

Referencias

- Gobierno de México. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Comunicado: Crecen exportaciones de miel mexicana: Agricultura. Obtenido de: https://www.gob.mx/agricultura/prensa/crecen-exportaciones-de-miel-mexicana-agricultura?idiom=es#:~:text=Ciudad%20de%20M%C3%A9xico-,Las%20ventas%20internacionales%20de%20miel%20alcanzaron%2C%20de%20enero%20a%2 Onoviembre,por%20su%20calidad%20y%20sabor.
- [2] Gobierno de México. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. La apicultura en México. Obtenido de: https://www.gob.mx/agricultura/articulos/la-apicultura-en-mexico?idiom=es
- [3] Gobierno de México. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Abejas y apicultura. La apicultura como actividad económica. Obtenido de: https://atlas-abejas.agricultura.gob.mx/cap2.html
- [4] Diario Oficial de la Federación. Obtenido de: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5455751&fecha=05/10/2016#gsc.tab=0



- [5] Güemes, R. F. J.; C. Echazarreta y R. Villanueva. 2002. Condiciones de la apicultura en Yucatán y del mercado y sus productos.
- [6] Villanueva, R. y Collí, W. 1997. La apicultura en la Península de Yucatán, México y sus perspectivas. Apitec 6. México.
- [7] Dietemann V., Nazzi F., Martin S.J., Anderson D., Locke B., Delaplane K.S., Wauquiez Q., Tannahill C., Frey E., Ziegelmann B., Rosenkranz P. & Ellis J.D. (2013). Standard methods for Varroa research. In: The Coloss Beebook, Volume II: standard methods for Apis mellifera pest and pathogen research, Dietemann V., Ellis J.D. & Neumann P., eds. J. Apic. Res., 52.
- [8] Anderson D.L. & Trueman J.W.H. (2000). Varroa jacobsoni (Acari: Varroidae) is more than one species. Exp. Appl. Acarol., 24, 165–189.
- [9] Locke B. (2016). Natural Varroa mite-surviving Apis mellifera honey bee populations. Apidologie, 47, 467–482
- [10] Universidad Dr. José Matías Delgado. Red Bibliotecaria Matías. Obtenido de: https://webquery.ujmd.edu.sv/siab/bvirtual/Fulltext/ADQD0000748/C4.pdf



Sistema de Adquisición de Datos con Arduino y ADS8688 para Obtención de Curvas de Fluorescencia de Clorofila en las Hojas de Plantas

[∞]López Gutú Melissa Guadalupe y Landaverde Ramirez Adolfo

Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería [⊠]meligutu07@gmail.com

Resumen

Actualmente la agricultura ha experimentado una gran evolución y se está viendo beneficiada por las grandes novedades que está proporcionando la tecnología como son satélites, drones, cámaras, sensores e imágenes, entre otras herramientas en los últimos años. Una de las tecnologías donde se ha tenido un gran impacto y progreso, es aplicada para determinar cómo las plantas son afectadas por varios factores bióticos y abióticos, esto se produce gracias al desarrollo del estudio de la fotosíntesis. Uno de los equipos con los que se cuenta en el mercado para determinar estos factores son los fluorómetros, los cuales son dispositivos que miden la fluorescencia de clorofila en las hojas de plantas, en particular la fluorescencia variable Fv del fotosistema II. Esta fluorescencia variable se puede utilizar para medir el nivel de estrés de la planta. En este proyecto se propone un sistema de adquisición de datos para obtener las curvas de fluorescencia de clorofila en hojas de plantas utilizando como tarjeta de adquisición de datos un Arduino Uno y el ADS8688 con el propósito de aportar un método de análisis asequible a la agricultura de precisión de los invernaderos, ya que como se mencionaba anteriormente existen este tipo de herramientas, sin embargo, son escasas y además tienen un costo increíblemente alto en comparación con el sistema propuesto. Para poder adquirir la señal se desarrolló un sensor para adquirir la curva de fluorescencia de clorofila en hojas de plantas. Para guardar y mostrar los datos adquiridos de manera gráfica se utilizó el entorno de Spyder (Python 3.7). Actualmente se han realizado pruebas con hojas de plantas donde la curva se ha obtenido con éxito, pero aún se continua con la investigación.

Palabras clave: Adquisición de datos, Fluorescencia de clorofila, Monitoreo de Señales, Arduino, Python, Convertidor ADC.

1. Introducción

Con el aumento de la población y la cada vez más creciente demanda de alimentos, la agricultura se ha visto obligada a evolucionar [1]. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) se proyecta que la población mundial crecerá unos 3 mil millones de personas antes de 2050, que, sumado al requerimiento de una dieta enriquecida, resultará en una demanda global de 1.5 a 2 veces más comida en 2030 [2].

Además del crecimiento de la población, factores como el cambio climático y la escasez de agua están afectando a todo el mundo por igual, por esta razón se requieren nuevas tecnologías para producir la cantidad y calidad de comida necesaria [3].

La agricultura ha experimentado una gran evolución y es beneficiada por las grandes novedades que está proporcionando la tecnología como son satélites, drones, cámaras, sensores e imágenes, entre otras herramientas en los últimos años. El conjunto de tecnologías aplicadas al trabajo en campo se le denomina Agricultura de Precisión (AP) [4]. La AP se enfoca en obtener datos con la ayuda de dicha



tecnología e interpretarlos para proponer soluciones y optimizar la producción permitiendo mejorar niveles de eficiencia productiva, disminuyendo los costos de producción y minimizando el impacto ambiental [5] [6].

Dentro de las tecnologías que conforman la AP, podemos encontrar instrumentos portátiles para la medición de estrés en las plantas. Entre los instrumentos más comúnmente usados son los que están relacionados con los parámetros de medida de la fotosíntesis (contenido de clorofila, fluorescencia de la clorofila y el intercambio de gases). Sin embargo, la fluorescencia de la clorofila tiene la ventaja de ser una técnica no destructiva, sencilla y de rápida respuesta [7] [8].

Para fabricar su propia materia orgánica las plantas realizan un proceso llamado fotosíntesis. Durante este proceso los pigmentos fotosintéticos como las clorofilas, se encargan de absorber la luz necesaria para generar dicho proceso, pero no toda la luz absorbida por las clorofilas en las hojas es capaz de ser aprovechada en la fotosíntesis por lo que es convertida a otras formas de energía no acumulable como calor, o emitiendo energía en forma de luz de mayor longitud de onda que la que absorben, fenómeno conocido como fluorescencia de clorofila [9] [10] [11].



Figura 1. Formas de disipación de la energía [10].

La competencia entre estos procesos por la energía absorbida garantiza que la reducción de eficiencia de un proceso se asocie a un aumento correspondiente de la eficiencia de los procesos competidores, por ejemplo, una reducción de la disipación de energía por la fotosíntesis se reflejará en un aumento de la disipación de energía como la producción de calor y la fluorescencia de la clorofila [12].

Cualquier forma de estrés biótico o abiótico que tenga un efecto sobre el rendimiento fotosintético de la muestra, alterará por tanto la intensidad de la emisión de fluorescencia de la clorofila. No obstante, lo que puede ser visto como un inconveniente de eficiencia, es bien aprovechado para investigar y sacar información acerca de los comportamientos fisiológicos en las plantas [12] [13].

Los fluorómetros, son dispositivos que miden la eficiencia cuántica máxima Fv/Fm. Este índice se puede utilizar para medir el nivel de estrés de la planta. Sin embargo, la mayoría de estos equipos provienen del extranjero y son de un costo elevado por lo que se necesita de una inversión económica para obtenerlos, además de una dependencia del extranjero [14].

En este trabajo se propone un sistema de adquisición de datos para obtener las curvas de fluorescencia de clorofila en hojas de plantas utilizando como tarjeta de adquisición de datos un Arduino Uno y el ADS8688 con el propósito de aportar un método de análisis asequible a la agricultura de precisión de los invernaderos, ya que como se mencionaba anteriormente existen este tipo de herramientas, sin embargo, son escasas y además tienen un costo increíblemente alto en comparación con el sistema propuesto. Para poder adquirir la señal se desarrolló un sensor para adquirir la curva de fluorescencia de clorofila en hojas de plantas. Para guardar y mostrar los datos adquiridos de manera



gráfica se utilizó el entorno de Spyder (Python 3.7). Actualmente se han realizado pruebas con hojas de plantas donde la curva se ha obtenido con éxito, pero aún se continua con la investigación.

2. Materiales y métodos

El sistema de adquisición de datos que se presenta está conformado por tres partes. La primera está compuesta por una cámara de aislamiento que se compone de un dispositivo OPT101, un filtro óptico y un led para la excitación de la hoja (Estos elementos conforman el sensor de fluorescencia de clorofila). La segunda es la adquisición de los datos obtenidos mediante la tarjeta Arduino Uno y el ADS8688, en esta segunda parte se llevó a cabo el acondicionamiento de la señal adquirida mediante un filtro digital media móvil en el software Matlab R2020b, y la tercera parte consiste en la obtención y visualización de los datos en el IDE Spyder (Python 3.7), los cuales se guardan en un archivo con extensión .CSV y tambien se obtiene una imagen con extensión .PNG.



Figura 2. Diagrama general de la metodología a utilizar.

En la figura 3 se observa los elementos que conforman el sistema de adquisición de datos. Donde se puede observar que la etapa 3 de la metodología mostrada anteriormente en la figura 2 se llevan a cabo con Arduino.



Figura 3. Elementos que conforman el sistema de adquisición de datos.



2.1 Cámara de aislamiento.

Al medir la fluorescencia de la clorofila, nos encontramos con que sus valores no permanecen constantes, sino que van variando según se desarrolla la medida. Este es el denominado "Efecto Kautsky". Si una muestra se adapta a la oscuridad, y de repente es iluminada con luz de muy baja irradiancia lo suficientemente débil de tal manera que no se produzca disipación de la energía lumínica a través de vías fotoquímicas, la hoja emite una señal baja de fluorescencia denominada fluorescencia basal (Fo) en condiciones de aclimatación a la oscuridad Esta señal procede principalmente de los pigmentos antena del fotosistema II [15].

Fo y Fm (Fluorescencia máxima) son parámetros que se utilizan desde hace tiempo en las mediciones de la fluorescencia de la clorofila. A partir de estos 2 valores absolutos, el parámetro de Fv (Fluorescencia Variable) puede ser calculado como la diferencia entre los niveles de Fm y Fo. A su vez, el valor de Fm puede representarse en función del parámetro Fv para obtener el parámetro Fv/Fm.

Fv/Fm ha sido utilizado y ampliamente aceptado durante muchos años como una indicación de la máxima eficiencia del fotosistema II. Es un parámetro muy eficaz y sensible que puede utilizarse como indicador del estrés de la muestra [16].

La cámara de aislamiento se utiliza para replicar las condiciones anteriormente mencionadas. En las siguientes subsecciones se describen los componentes que conforman la cámara de aislamiento.

2.1.1 Sensor para medir fluorescencia de clorofila.

De acuerdo con lo anterior para obtener Fv/Fm debemos obtener los siguientes parámetros:

- Fm: Este valor se obtiene a partir de que la hoja es sometida de repente a condiciones de iluminación saturante, el valor de la fluorescencia aumenta hasta obtener una fluorescencia máxima.
- Fo: La fluorescencia basal se obtiene antes de someter la hoja de la planta a la excitación de luz.
- Fv: La fluorescencia variable se obtiene a partir de la diferencia entre los niveles de Fm y Fo.

Cabe mencionar que para que este fenómeno suceda la hoja debe estar adaptada a la oscuridad y luego someterse a luz.

Para sensar la fluorescencia de la clorofila se seleccionó el dispositivo OPT101 de Texas Instruments. Este dispositivo se integra por un fotodiodo y un amplificador de transimpedancia, en la Figura 4 se observa el diagrama de bloque y su respuesta espectral y en la Tabla 1 las conexiones de pines.



Figura 4. Diagrama de bloques (a) y Respuesta espectral (b) de OPT101 [16].



Numero de Pin	1	2	3	4	5	6	7	8
Vs	Х							
-In		х						
-V			х					
1Mohms Feedback				х				
Output					х			
Common								х
NC						х	х	

Tabla 1	Conexiones	de pines	del	OPT101 .

De acuerdo con lo revisado en la literatura [17], para adquirir la fluorescencia de clorofila se buscará medir alrededor de los 685 nm hasta los 730 nm como se muestra en la figura 5.





Sin embargo, debido a que el fotodiodo seleccionado tiene un amplio rango de respuesta espectral de los 300 hasta los 1100 nm, se utilizó un filtro óptico FGL695 pasa altas con una transmisión en 50% en 695 de la marca Thorlabs, esto permitirá obtener la respuesta de la fluorescencia de clorofila en el espectro mencionado anteriormente. Por último, como fuente excitadora de luz se seleccionó un Led RGBW de alta potencia de 3W el cual consta de 8 pines., pero solo se utilizó la luz azul.

2.1.2 Diseño de cámara de aislamiento.

El diseño de la cámara de aislamiento se llevó a cabo en el software SolidWorks 2020, y posteriormente se imprimió el diseño en 3D. El diseño se observa en la Figura 6.

La cámara de aislamiento está conformada por 3 piezas principales, dos de ellas están unidas con una bisagra y permiten formar un estilo de pinza para poder tomar la hoja sin maltratarla, la tercera pieza es para el soporte del filtro óptico.



Figura 6. Diseño de cámara de aislamiento (a) y diseño de cámara de aislamiento con los componentes.



En la Figura 7 de lado izquierdo se presenta el montaje del filtro óptico en el soporte, de lado derecho se aprecian los componentes que conforman el sensor de fluorescencia de clorofila, donde se puede observar que el ángulo de incidencia del led con respecto a la muestra es de 45 °.



Figura 7. (a) Montaje filtro óptico en el soporte. (b) Componentes que conforman sensor de fluorescencia de clorofila.

2.2 Adquisición de datos y acondicionamiento de señales.

En esta sección se llevó a cabo la adquisición de datos del dispositivo OPT101 se alimentará a 5V DC. El rango leído en Arduino será de 0 – 65535 puesto que se utiliza el ADS8688.

2.2.1 Arduino como tarjeta de adquisición de datos.

Arduino actualmente es una plataforma de código abierto que facilita las interfaces que nos pueden servir en proyectos diversos, en este caso se utiliza por ser una placa de desarrollo basada en hardware y software libre, flexible y práctica. Como señala [18] el microcontrolador de Arduino posee lo que se llama una interfaz de entrada, que es una conexión en la que podemos conectar en la placa diferentes tipos de periféricos.

2.2.2 ADS8688.

El ADS8688 es un sistema integrado de adquisición de datos de 8 canales basado en un convertidor analógico-digital (ADC) de 16 bits por aproximación sucesiva, que funciona a un rendimiento de 500 kSPS.

El dispositivo cuenta con circuitos analógicos frontales integrados para cada canal de entrada con protección contra sobretensiones de hasta ±20 V, un multiplexor de 8 canales con modos de exploración automática y manual, y una referencia de 4,096 V en el chip con baja deriva de temperatura. Al funcionar con una única alimentación analógica de 5 V, cada canal de entrada del dispositivo puede admitir rangos de entrada bipolares reales de ±10,24 V, ±5,12 V y ±2,56 V, así como rangos de entrada unipolares de 0 V a 5,12 V. Ofrece una impedancia de entrada resistiva constante de 1 M Ω independientemente del rango de entrada seleccionado.

El ADS8688 permite una sencilla interfaz serie compatible con SPI para el host digital y también admiten la conexión en cadena de varios dispositivos.

2.2.3 Funcionamiento general del algoritmo utilizado en Arduino.

El funcionamiento general del algoritmo utilizado en el IDE de Arduino se observa en la Figura 8. Para poder inicializar la adquisición de los datos el puerto serial debe recibir un carácter, en este caso



una "p". Al inicializar la adquisición se toman 3000 muestras con un tiempo de muestreo de 1 ms, el programa está configurado para que en la muestra 1000 se active el led durante 300 ms, creando así el "Efecto Kautsky". mencionado en la sección 2. Este algoritmo se ejecutará solamente una vez, para repetir el algoritmo se debe enviar nuevamente el carácter, pero esto se realiza en el IDE Spyder (Python 3.7).



Figura 8. Funcionamiento general del algoritmo utilizado en IDE de Arduino.

2.2.4. Filtro media móvil y Matlab.

MATLAB es un sistema de cómputo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio. Cuenta con muchas herramientas, entre ellas los filtros digitales

Un filtro de media móvil de orden 4 consiste en un filtrado de la señal consistente en la realización de la media aritmética entre la muestra actual y las muestras anteriores. Las señales para filtrar en nuestro caso provienen de un conversor A/D de 16 bits.

2.3 Obtención de datos y validación de datos.

Para la obtención de los datos se utilizó el IDE Spyder (Python 3.7), el funcionamiento se muestra en la Figura 9.

Primero se importaron las bibliotecas como *numpy, serial.time* y *matplotlib.pyplot*. Después se creó un archivo con el nombre *"datos.csv"*, el cual es guardado en una ruta específica de la computadora y se declara la variable *samples* = 3000.
Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 17, pp. 238 - 250. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022



Luego se abre el puerto serial y se define el puerto COM, y la velocidad de transmisión (en ambos IDE'S la velocidad de trasmisión fue de 115200 y el puerto COM3), se cierra el puerto serial para guardar la configuración.

Nuevamente abrimos el puerto serial y se escribe un carácter en el puerto, en este caso una "p", con la linea de comando ser.write("p"), lo que permite el inicio de la adquisición de los datos por Arduino.



Figura 9. Funcionamiento general del algoritmo utilizado en IDE Spyder (Python 3.7).

Posteriormente se inicializan dos variables i=0 y pos=0. Si la variable i<0 se reciben los datos del canal analógico A0 del ADS8688, a través del puerto serial, se abre el archivo creado "datos.csv" y se almacenan los datos adquiridos. La variable pos se incrementa pos = pos +1 hasta llegar a las 3000 muestras para finalmente cerrar el puerto serial, crear el archivo "graficadedatos.PNG" y visualizarlos en el IDE de Spyder.

Para la validación de los datos se utilizo un generador de señales en donde se colocaban señales a ciertas frecuencias y con ayuda de la función FFT (Fast Fourier Transform) en Matlab se comprobaba que fueran las frecuencias especificadas.

3. Resultados

3.1 Cámara de aislamiento.

La cámara de aislamiento, es decir la pinza y el sensor para medir fluorescencia de clorofila, junto con la tarjeta de adquisición de datos Arduino Uno y ADS8688 se muestra en la Figura 10.





Figura 10. Sistema de monitoreo.

En la Figura 11 se observa el prototipo de la cámara de aislamiento con el caso de estudio donde el daño a la hoja es mínimo gracias al diseño propuesto.



Figura 11. Sistema de monitoreo con caso de estudio.

3.2 Adquisición de los datos y validación.

En la Figura 12 la primera imagen muestra la señal senoidal de 20 Hz obtenida con el generador de señales, y en la segunda imagen los datos obtenidos y el espectro de la FFT obtenida. Donde se puede observar que ambas frecuencias coinciden.

Después se llevo a cabo la prueba para validar el funcionamiento del algoritmo planteado en la sección 2.2.3. En la figura 13 se observa que el pulso del led comienza en la muestra número 1000 y finaliza en la 1300, y que en total se adquieren 3000 muestras. En esta prueba el filtro óptico no estaba dentro de la cámara de aislamiento, por lo que el valor en el eje Y es de 65536.

Una vez validado el funcionamiento del adquisidor de datos, se llevó a cabo la experimentación con hojas de plantas. El caso de estudio fue *Capsicum annuum* más comúnmente llamado Chile Jalapeño. La semilla utilizada es Harris moran variedad Everman, el sustrato es arenilla al 100% y la nutrición utilizada fue Steiner al 70%.

Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 17, pp. 238 - 250. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022





Figura 12. Señal generada y espectro de frecuencia de la FFT obtenida.



Figura 13. Señal obtenida para validación del funcionamiento del algoritmo.



Figura 14. Caso de estudio.

Se tomo una planta de 3 meses de post-germinación y utilizando el sistema de adquisición de datos se obtuvieron las curvas de fluorescencia de clorofila de una de sus hojas durante 3 días como se muestra en la Figura 15. En la gráfica del día 1 (color azul) se puede observar que antes de la muestra 1000 la hoja emite un valor del ADC entre los 9000 y 9500, pero que a partir de la muestra 1000 comienza a subir a los valores entre los 10500 y 11000.

Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 17, pp. 238 - 250. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022



En la gráfica del día 2 (color rojo) se puede observar que antes de la muestra 1000 la hoja emite un valor del ADC entre los 8000 y 8500, pero que a partir de la muestra 1000 comienza a subir a los valores entre los 9500 y 10000.

En la gráfica del día 3 (color amarillo) se puede observar que antes de la muestra 1000 la hoja emite un valor del ADC entre los 6500 y 7000, pero que a partir de la muestra 1000 comienza a subir a los valores entre los 8000 y 8500.

Es importante mencionar que la hoja de planta está respondiendo a el fenómeno conocido como "El efecto Kautsky" mencionado anteriormente ya que las señales obtenidas no se parecen a la señal obtenida en la Figura 13, que es cuando la cámara de aislamiento no tiene hoja. Con estas graficas obtenidas se pueden encontrar los parámetros indicados en la sección 2.1.1 Fo, Fm y Fv.



Figura 15. Curvas obtenidas con hoja de planta.

En la figura 16 se muestra los archivos .CSV y .PNG guardados por Spyder (Python 3.7) una vez que se comienza a obtener las curvas.

	Fecha	Тіро	Tamaño	Etiquetas
Is1msLe300ms20minoscuridadsinhojad3p2	25/11/2021 07:02 p.m.	Archivo de valores	29 KB	
Ts1msLe300ms20minoscuridadsinhojad3p2	25/11/2021 07:02 p.m.	Archivo PNG	11 KB	
Ts1msLe300ms20minoscuridadhojaSVd3p2	25/11/2021 06:59 p.m.	Archivo de valores	29 KB	
Ts1msLe300ms20minoscuridadhojaSVd3p2	25/11/2021 06:59 p.m.	Archivo PNG	10 KB	
Ts1msLe300ms20minoscuridadhojaRVd3p2	25/11/2021 06:37 p.m.	Archivo de valores	29 KB	
Ts1msLe300ms20minoscuridadhojaRVd3p2	25/11/2021 06:37 p.m.	Archivo PNG	10 KB	
Ts1msLe300ms20minoscuridadhojaSJd3p2	25/11/2021 06:15 p.m.	Archivo de valores	29 KB	
Ts1msLe300ms20minoscuridadhojaSJd3p2	25/11/2021 06:15 p.m.	Archivo PNG	10 KB	
Ts1msLe300ms20minoscuridadhojaRJd3p2	25/11/2021 05:53 p.m.	Archivo de valores	29 KB	
Ts1msLe300ms20minoscuridadhojaRJd3p2	25/11/2021 05:53 p.m.	Archivo PNG	12 KB	
Ts1msLe300ms20minoscuridadhojaverded3p1	25/11/2021 02:03 p.m.	Archivo de valores	32 KB	
Ts1msLe300ms20minoscuridadhojaverded3p1	25/11/2021 02:03 p.m.	Archivo PNG	14 KB	
Ts1msLe300ms20minoscuridadsinhojad3p1	25/11/2021 02:02 p.m.	Archivo de valores	32 KB	
Ts1msLe300ms20minoscuridadsinhojad3p1	25/11/2021 02:02 p.m.	Archivo PNG	13 KB	
Ts1msLe300ms20minoscuridadhojaSVd3p1	25/11/2021 02:01 p.m.	Archivo de valores	32 KB	

Figura 16. Archivos .CSV y .PNG obtenidos durante algunas pruebas realizadas.



Cabe mencionar que en el eje vertical en las gráficas mantuvo los valores del ADS8688 porque el objetivo a futuro es encontrar el índice de eficiencia cuántica máxima Fv/Fm, que es adimensional, para calcularlo se necesita el valor de Fv obtenido en la curva y Fo. Este índice nos da valores entre 0-1, indicando que las plantas sanas se encuentran en un valor de 0.8.

Como trabajo a futuro se llevará a cabo la experimentación en un grupo de plantas que estarán sometidas a estrés por sequía, se obtendrán las curvas y se obtendrá este índice mencionado Fv/Fm, y se verificará que las plantas que en teoría no estén sometidas a estrés mantengan el índice entre 0.8. Obteniendo así un sistema de adquisición de datos de bajo costo que pueda apoyar al agricultor.

4. Conclusiones

La aplicación de tecnología al sector agrícola es cada vez mayor, en la búsqueda de una solución para satisfacer la demanda alimentaria de una población en crecimiento. Con la AP, los beneficios son una mayor sostenibilidad, una mayor productividad, un aumento de los beneficios económicos y la protección del medio ambiente.

Si bien ya existen equipos que permiten medir parámetros para indicar que tan estresada esta una planta, la mayoría de estos equipos provienen del extranjero y son de un costo elevado. Por tanto, el desarrollo de una herramienta que pueda apoyar al agricultor una aproximación de si la planta esta estresada puede ser de gran utilidad.

En este trabajo se propone un sistema de adquisición de datos para obtener las curvas de fluorescencia de clorofila de hojas de plantas utilizando un Arduino Uno y el ADS8688. Se utilizo Spyder (Python 3.7) para guardar y mostrar los datos adquiridos de manera gráfica. En lo que respecta Arduino Uno y Spyder tienen la ventaja de ser software libre por lo cual el costo del sistema es mucho menor que los ya existentes.

La construcción y el desarrollo de la cámara de aislamiento junto con el sensor de fluorescencia de clorofila son parte fundamental para el desarrollo del trabajo, ya que sin esto "El efecto Kautsky" no sería posible de originar y adquirir. Es verdad que aún falta trabajar más con esta propuesta, quizá más adelante se pueda obtener un indicador como Fv/Fm pero esto es solo el principio.

Referencias

- [1] Bongiovanni, R, Mantovani, E, Stanley, B, and Álvaro, R. Agricultura de precisión integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Procisur IICA Pag 8, 2006.
- [2] Srbinovska, M., Gavrovski, C., Dimcev, V., Krkoleva, A., & Borozan, V. Environmental parameters monitoring in precision agriculture using wireless sensor networks. Journal of cleaner production, 88, 297-307, 2015.
- [3] Alexandratos, N., & Bruinsma, J. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision.
- [4] Ojha, T., Misra, S., & Raghuwanshi, N. S. Wireless sensor networks for agriculture: The state-of the-art in practice and future challenges. Computers and Electronics in Agriculture, 118, 66-84, 2015.
- [5] Espinosa, A. Desarrollo de un sistema no invasivo de medición de fotosíntesis en Capsicum annuum L. Tesis, 2012
- [6] Krause, G. and Weis, E. Chlorophyll fluorescence and pho-tosynthesis: the basics. Annual review of plant biology, 1991 42(1):313–349
- [7] Maxwell, K. and Johnson, G. N. (2000). Chlorophyll fluorescence—a practical guide.Journal of Experimental Botany, 51(345):659–668.
- [8] Valdés, M and Ramón, P Areny. Microcontroladores fundamentos y aplicaciones con PIC, Volume 1149. Marcombo, 2007.
- [9] Rango, A., Laliberte, A., Herrick, J. E., Winters, C., Havstad, K., Steele, C., & Browning, D. Unmanned aerial vehicle-based remote sensing for rangeland assessment, monitoring, and



management, Journal of Applied Remote Sensing, 3(1), 033542, 2009.

- [10] Peters, A. J., Walter-Shea, E. A., Ji, L., Vina, A., Hayes, M., & Svoboda, M. D. Drought monitoring with NDVI-based standardized vegetation index. Photogrammetric engineering and remote sensing, 68(1), 71-75, 2009.
- [11] Khalil, A. A., Essa, Y. H., & Hassanein, M. Monitoring agricultural land degradation in Egypt using MODIS NDVI satellite images. Nat. Sci, 12(8), 15-21, 2014.
- [12] Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. Remote sensing and image interpretation. John Wiley & Sons, 2015.
- [13] Zhao, A., Zhang, A., Cao, S., Liu, X., Liu, J., & Cheng, D. Responses of vegetation productivity to multi-scale drought in Loess Plateau, China. Catena, 163, 165-171, 2018.
- [14] Hunt, E. R., Cavigelli, M., Daughtry, C. S., Mcmurtrey, J. E., & Walthall, C. L. Evaluation of digital photography from model aircraft for remote sensing of crop biomass and nitrogen status. Precision Agriculture, 6(4), 359-378, 2005.
- [15] Lelong, C. C., Burger, P., Jubelin, G., Roux, B., Labbé, S., & Baret, F. Assessment of unmanned aerial vehicles imag
- [16] "OPT101 Monolithic Photodiode and Single-Supply Transimpedance Amplifier datasheet (Rev. B)." 2015. OPT101 Monolithic Photodiode And Single-Supply Transimpedance Amplifier.
- [17] Schreiber, U. Pulse-amplitude-modulation (PAM) fluorometry and saturation pulse method: an overview. Chlorophyll a fluorescence, pages 279–319



La Importancia del Reacondicionamiento (retrofitting) para la Transición Tecnológica de la Manufactura 3.0 a la Industria 4.0

^{IIII} ^{III} ^{IIII} ^{III} ^{III} ^{III} ^{III} ^{II}

 ^{1,4} Centro de Investigación Aplicada en Automatización y Mecatrónica (CIAAM) de la Universidad Tecnológica del Sur de Sonora-ULSA Noroeste, <u>ejimenezl@msn.com</u>
 ²Centro de Investigación en Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)
 ³Cuerpo Académico de Sistemas Mecatrónicos (SISMEC), Universidad Tecnológica de Hermosillo
 ⁵Departamento de Electromecánica, Instituto Tecnológico de Sonora
 ⁶Universidad La Salle Noroeste

Resumen

La incursión de nuevas y poderosas tecnologías disruptivas, como el Internet Industrial de las cosas, el Big data, el cómputo en la nube, la Inteligencia Artificial, los gemelos digitales y los sistemas ciber-físicos a los sistemas de manufactura, está generando un cambio profundo en los procesos productivos y como consecuencia está impactando a las empresas que no cuentan con suficientes recursos económicos que les permitan adquirir equipos, sistemas o productos para hacerle frente a los retos y desafíos de la cuarta revolución industrial. Las industrias se enfrentan al problema de tomar decisiones orientadas a decidir si realizan un cambio radical en sus sistemas de producción (sustitución tecnológica) o modernizar sus equipos a través de estrategias tecnológicas como el reacondicionamiento (retrofitting) para poder competir en la Industria 4.0. En este artículo se presentan las definiciones más generales de los sistemas ciber-físicos y gemelos digitales, ya que representan el corazón de la Industria 4.0, y un análisis sobre la importancia de reacondicionamiento tradicional y el reacondicionamiento orientado a la Industria 4.0. Se discuten algunos ejemplos de las metodologías del retrofitting que existen en el estado del arte. El reacondicionamiento tecnológico es una estrategia vital y viable para que las empresas puedan alinearse a los nuevos requerimientos que marca la cuarta revolución industrial.

Palabras clave: Industria 4.0, reacondicionamiento, manufactura 3.0.

1. Introducción

En la actualidad se está presentando una nueva ola de innovaciones tecnológicas disruptivas lo que ha afectado a la industria manufacturera, ya que la demanda personalizada en masa de los consumidores y el aumento de los niveles de sostenibilidad, impulsan la eficacia operativa y la flexibilidad para la adaptación a los nuevos cambios. Estos nuevos conceptos, tecnologías y procesos destinados a transformar el panorama de la fabricación se han denominado colectivamente la cuarta revolución industrial, es decir, la Industria 4.0 [1]. Este nuevo paradigma industrial significa la integración total del mundo real, es decir, de máquinas de producción con el mundo virtual por Internet y tecnologías de la información y la comunicación (TIC). En la Industria 4.0, máquinas, personas y los sistemas de información trabajan juntos. Las empresas utilizan sistemas informáticos y de información, y máquinas de control numérico con acceso al Internet Industrial de las Cosas y Servicios (IIoT e IIoS) para ser más inteligentes en sus operaciones comerciales [2].

La Industria 4.0 representa un ecosistema empresarial conectado donde los socios de la cadena de valor crean redes globales para conectar sus activos, recursos, máquinas, conocimientos e

Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 18, pp. 251 - 261. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022



infraestructura como los sistemas ciber-físicos que se comunican y controlan entre sí de forma descentralizada y mediante el intercambio de información que desencadenan decisiones y acciones. La Industria 4.0 ofrece nuevas posibilidades que tienen el potencial de desafiar los procedimientos tradicionales de las organizaciones industriales. A medida que aumenta el número de nuevas tecnologías digitales, la Industria 4.0 tiene una amplia gama de implicaciones y aplicaciones en todas las operaciones principales. Al mismo tiempo, la tecnología puede tener efectos variables en los diferentes procesos; ciertas tecnologías pueden tener un impacto horizontal en todos los procesos, mientras que otras pueden centrarse principalmente en procesos específicos [3].

Por otro lado, las tecnologías facilitadoras de la Industria 4.0 se agrupan en la llamada lista de "nueve pilares", las cuales son: 1) Internet industrial de las cosas (IIoT); 2) Big Data; 3) Integración horizontal y vertical de sistemas; 4) Simulación; 5) Cómputo en la Nube; 6) Realidad aumentada; 7) Robots autónomos; 8) Impresión 3D y 9) Ciberseguridad [4]. Sin embargo, la cuarta revolución industrial tiene como núcleo tecnológico a los sistemas ciber-físicos. De hecho, hay un gran número de investigadores que afirman que los sistemas ciber-físicos son los elementos críticos [5] y el núcleo [6] de la Industria 4.0. Estos sistemas representan la integración de la computación y los procesos físicos. Las computadoras y las redes integradas supervisan y controlan los procesos físicos, normalmente con bucles de retroalimentación en los que los procesos físicos afectan a los cálculos y viceversa [7].

Otra tecnología de suma importancia en la Industria 4.0 es el gemelo digital (DT). Un sistema DT puede considerarse una réplica de un sistema físico objetivo. Aprovecha un modelo para simular continuamente diferentes funciones de los sistemas físicos. Para ello, el DT debe tener una conexión con la entidad física de destino para poder recoger y actualizar el estado de las cosas físicas. Así, un modelo de DT puede utilizarse para predecir, controlar u optimizar la funcionalidad de las cosas y, al mismo tiempo, aprender de las cosas que representa [8]. La Industria 4.0 y las tecnologías disruptivas, han venido entonces a revolucionar a los sistemas de producción y a impulsar la modernización de las empresas, para poder alinearse a las cadenas de valor de los grandes consorcios industriales. Muchas empresas en el mundo enfrentan serios problemas al transformarse en entes de la Industria 4.0, en particular aquellas industrias que no cuentan con los recursos para invertir en nuevas tecnologías, de hecho, se enfrentan al reto de decidir si es pertinente una actualización tecnológica (cambio casi total de los sistemas de producción) que implica una inversión económica considerable o una reconversión tecnológica que implica una mejora sustancial a los sistemas de producción que ya tienen y, por lo tanto, una menor inversión económica [9].

El reacondicionamiento tecnológico (retrofitting) de la maquinaria antigua para su uso en el contexto de la Industria 4.0 puede representar una alternativa a la sustitución en términos de tiempo, costo e impacto medioambiental. Un programa de retrofitting inteligente y altamente conectivo puede permitir a los responsables de las empresas reintroducir las instalaciones antiguas en la Industria 4.0. Además de las características clásicas de la readaptación, la readaptación inteligente implica la aplicación de las herramientas de la Inteligencia Artificial y otras tecnologías proporcionadas por la Industria 4.0. El reacondicionamiento de diferentes tipos de máquinas puede llevarse a cabo desde una perspectiva de Industria 4.0 para dar una segunda vida a máquinas-herramienta que, de otro modo, serían desechadas [10]. El retrofitting ofrece una oportunidad también a las empresas que no son digitales en absoluto, sino que se caracterizan por las tecnologías electromecánicas, para rediseñar la relación entre el hombre y la máquina y abrir nuevos horizontes como el mantenimiento predictivo y el control de calidad y eficiencia [11].

Existen diversos estudios relacionados con las aplicaciones del retrofitting a la mejora de sistemas ciber-fisicos, máquinas herramientas y robots. Por ejemplo, en [12] se presenta la estandarización del proceso de retrofitting para transformar un equipo antiguo en un CPPS (Cyber Physical Production Systems). La estandarización se realiza con el apoyo de una plataforma computacional que tiene características para trabajar independientemente del modelo o tipo de equipo. En [13] se presenta un proceso de reacondicionamiento de una máquina herramienta de perforación tradicional, por lo que la arquitectura del software de la unidad de control fue el principal objeto de estudio. La máquina fue equipada con modernas tecnologías de adquisición y comunicación



de datos. En [14] se presenta un proceso de retrofitting para el robotizado de un vehículo de volteo. En dicho trabajo fueron propuestos un módulo de control, un módulo de sensores internos, un modelo cinemático del movimiento del sistema y un detector de obstáculos. En [15] se presenta un proyecto en donde se actualiza una máquina síncrona de imanes permanentes. En este trabajo los autores utilizan la técnica del elemento finito como parte del método de diseño aplicado. Fueron propuestas cuatro estrategias de modificación del rotor de la máquina que proporcionan una solución económica y eficiente.

Bajo este contexto, en este artículo se presentan una visión general de la metodología del retrofitting aplicada a diversos sistemas productivos con el objetivo de conocer su importancia en la reconversión tecnológica necesaria para hacerle frente a la Industria 4.0, así como las definiciones básicas relacionadas con los conceptos tecnológicos de gemelo digital y sistema ciber-físico, ya que de alguna u otra manera el retrofitting deberá tomar en cuenta algunos requerimientos de estos conceptos.

2. Los sistemas Ciber-físicos y los gemelos digitales

Si bien la Industria 4.0 se basa en nueve pilares tecnológicos [4], los sistemas ciber-físicos y los gemelos digitales son la base o corazón de la cuarta revolución industrial. Algunos conceptos con el pasar del tiempo, como Internet de las cosas (IoT), el Big Data y la Inteligencia Artificial, se orientaron más hacia la Industria 4.0, sin embargo, un concepto avanzando de sistema ciber-físico es el que contribuye al desarrollo de la Industria 4.0. Los Sistemas Ciber-físicos (CPS) representan la tecnología central que permite la transición de la Industria 3.0 a la Industria 4.0 y está transformando la fabricación avanzada en términos globales [16].

En muchos sistemas del mundo real, los recursos informáticos y físicos están estrictamente interconectados; las computadoras integradas y las redes de comunicación gobiernan los actuadores físicos que operan en el mundo exterior y reciben entradas de los sensores, creando un circuito de control inteligente capaz de tener adaptación, autonomía y eficiencia mejorada. Dichos sistemas se definen común y ampliamente como sistemas ciber-físicos [17]. No obstante, los CPS no son nuevos, estos fueron concebidos bajo la visión de la manufactura 3.0 (revolución industrial cuyo eje tecnológico es la automatización y las tecnologías de la información) y se operan actualmente bajo la filosofía del CIM (Computer Aided Manufacturing). Una máquina CNC o un Máquina de Medición por Coordenadas (MMC) o una línea de producción robotizada pueden considerarse ejemplos de sistemas ciber-físicos concebidos bajo la influencia de la Industria 3.0. En estos sistemas prácticamente no existen sistemas inteligentes ni tienen grandes servidores y procesadores computacionales. Sus acciones son prácticamente secuenciales y sus procesos son automatizados, generalmente controlados por PLCs (Programmable Logic Controlers). En estos sistemas no existe colaboración entre humanos-máquinas y su diseño está orientado más hacia los sistemas electromecánicos y en la automatización de la información para la toma decisiones. En general son sistemas que se basan en las integraciones CAD/CAM/CAPP/CIM.

Los sistemas ciber-físicos concebidos bajo la filosofía de la Industria 4.0 tienen otras características que los diferencian de aquellos CPS de la Industria 3.0. Los elementos que constituyen a los actuales CPS se enlistan a continuación [18, 19]:

- Tecnologías de apoyo: el Internet de las cosas (IoT), que proporciona comunicaciones "máquinahumano", "máquina-máquina", la computación ubicua, los sistemas embebidos, las tecnologías en la nube, las tecnologías de intercambio de redes especiales y la lógica difusa.
- 2) Los componentes del entorno físico: en particular, la identificación, la medición y transmisión de datos, herramientas de procesamiento de datos, diferentes interfaces, equipos de servidores, equipos de diagnóstico, equipos de producción, incluidos los elementos de automatización: sensores dispositivos de control, actuadores, robots, máguinas herramienta y sistemas inteligentes.



3) Componentes del entorno de la información: como el sistema de gestión del ciclo de vida del producto, el sistema de gestión de datos de productos, el sistema de planificación de recursos empresariales, el sistema de ejecución de la fabricación, el sistema de control y adquisición de datos (SCADA), el controlador lógico programable (PLC) y el OpenStack (un paquete de software que implementa las funciones de la plataforma en la nube).

Los CPS de la Industria 4.0 son sistemas que comparten sus procesos en la nube, utilizan ampliamente el Internet de las cosas para establecer comunicaciones entre los usuarios y las máquinas, y tienen sistemas de adquisición y control de datos, usan sistemas inteligentes y tecnologías físicas modernas como elementos de sensado y de trabajo, y generalmente administran a los llamados "gemelos digitales" [20]. La Figura 1 muestra una arquitectura general de un CPS concebido bajo el enfoque de la Industria 4.0.



Figura 1. Arquitectura general de un Sistema Ciber-físico productivo [20]

Dentro de los sistemas ciber-físicos se pueden definir los llamados CPPS (Cyber Physics Production Systems) como sistemas de elementos autónomos y cooperativos que se conectan entre sí en función de la situación, en todos los niveles de producción y a través de ellos, desde los procesos, pasando por las máquinas hasta las redes de producción y logística, mejorando los procesos de toma de decisiones en tiempo real, la respuesta a condiciones imprevistas y la evolución a lo largo del tiempo [21]. Los CPPS se caracterizan por tener: 1) Un sistema inteligente de adquisición de información, 2) Capacidad de conexión y comunicación entre elementos del sistema y 3) Capacidad de respuesta en tiempo real a cambios internos y externos [22]. Los CPS se pueden utilizar en una amplia gama de campos de aplicación, incluyendo el transporte inteligente, agricultura de precisión, salud, monitoreo de agua y minas y aplicaciones aeroespaciales, etc. [23].

Por otro lado, los gemelos digitales o Digital Twnis (DT) representan otra tecnología de gran importancia en la Industria 4.0. El DT consiste en un espacio real, un espacio virtual y una conexión con flujo de datos/información entre el espacio virtual y el espacio real [24]. El DT integra todos los datos (pruebas, datos de operación, etc.), modelos (dibujos de diseño, modelos de ingeniería, análisis, etc.) y otra información (requisitos, pedidos, inspecciones, etc.) de un activo físico generados a lo largo de su ciclo de vida que apalancan oportunidades de negocio. El papel del gemelo digital es predecir y optimizar el rendimiento. Para ello se utilizan métodos de simulación y/o métodos basados en datos [25]. La Figura 2 muestra una configuración simple de un gemelo digital.

Los gemelos digitales son tecnologías que se potencian con la ayuda y la introducción de la Inteligencia Artificial, el manejo de grandes cantidades de datos y el internet industrial de las cosas, entre otras tecnologías disruptivas. De esta manera un activo físico, una máquina, una línea de producción o una fábrica pueden ser representadas por medio de una serie de activos digitales que son equivalentes a la parte física pero que pueden ser utilizados para diversos propósitos, según los modelos matemáticos, numéricos y computacionales, entre otros, que tenga integrado el gemelo



digital (ver Figura 2). La información es obtenida del activo físico por medio de sensorizado y esta alimenta los modelos integrados al DT, que simulan, pronostican o mejoran el rendimiento y proporcionan valor agregado a la toma de decisiones, entre otras tareas importantes. Una vez procesada la información, esta es enviada de regreso al activo físico para mejorar sus tareas o para mejorar las operaciones, entre otras funciones de retroalimentación. Los usos y las aplicaciones de los DT son extensas. En [26] se presenta un concentrado de las diversas aplicaciones y el soporte que pueden dar los gemelos digitales, las cuales se resumen a continuación:

- Dar soporte a los análisis de salud del sistema para una mejor actividad y planificación del mantenimiento; en particular incluye: a). Monitorizar anomalías, fatiga, trayectorias de grietas en el gemelo físico, b) Monitorizar la deformación geométrica y plástica en el material del gemelo físico y c). Modelar la fiabilidad del sistema físico.
- 2) Reflejar digitalmente la vida de la entidad física: a) Estudiar el comportamiento a largo plazo del sistema y predecir sus prestaciones teniendo en cuenta los diferentes efectos sinérgicos de las condiciones ambientales, b) Para dar continuidad a la información a lo largo de las diferentes fases del ciclo de vida, c) Para la puesta en marcha virtual del sistema y d) Para gestionar el ciclo de vida de los dispositivos del Internet de las Cosas.
- 3) Se han propuesto DT para apoyar la toma de decisiones a través de la ingeniería y los análisis estadísticos que incluyen: a). Optimización del comportamiento del sistema durante la fase de diseño y b). Optimización del ciclo de vida del producto, ya que, conociendo los estados pasados y presentes, es posible predecir y optimizar los rendimientos futuros.



Figura 2. Configuración básica de un gemelo digital (Elaboración propia)

Los gemelos digitales y los sistemas ciber-físicos son las dos tecnologías centrales de la cuarta revolución industrial, cuyo estudio debe ser obligatorio para todos aquellos interesados en incursionar en las aplicaciones de la Industria 4.0 y 5.0 (Nuevo paradigma industrial basado en Cobots).

3. La Industria 3.5 y la importancia del retrofitting

En la actualidad el mundo productivo se encuentra en una transición tecnológica entre dos revoluciones industriales. Más precisamente, entre la Manufactura 3.0 centrada en la automatización y la computación y en la Industria 4.0 centrada en los sistemas ciber-físicos y los gemelos digitales. Esta transición se le conoce como la Industria 3.5 y es considerada como una estrategia híbrida y no solamente una transición tecnológica entre sistemas productivos. Tiene como función gestionar cualquier impacto disruptivo, como la gestión total de los recursos para la sostenibilidad [27]. En este sentido la Industria 3.5 se considera un marco de referencia estratégico global que relaciona e integra diversas tecnologías disruptivas buscando desarrollar una base para la producción inteligente [28]. La transición tecnológica representa una serie de acontecimientos importantes, ya que, por un lado,



existen empresas altamente competitivas que actualizan sus sistemas productivos conforme a los requerimientos que le demanda la Industria 4.0. Sin embargo, existe otro tipo de empresas, como las Pymes, que, por el contrario, luchan por sobrevivir y buscan adaptarse a los cambios, tomando en cuenta estrategias de reacondicionamiento de sus sistemas productivos ya que no poseen el suficiente capital para adquirir los equipos modernos. Diversas empresas en el mundo se enfrentan al reto de decidir si es pertinente una actualización tecnológica que implica una inversión económica considerable o una reconversión tecnológica (Retrofitting) que implica una mejora sustancial a los sistemas de producción que ya tienen y, por lo tanto, una menor inversión económica [29]. Como la tecnología está emergiendo en la vida diaria a pasos agigantados y con enfoques disruptivos, la retroadaptación o retrofitting es el mejor método para actualizar los sistemas productivos con la tecnología actual, de manera que puedan interactuar con máquinas avanzadas.

En este sentido, el retrofitting puede ser utilizado para mejorar y reconvertir maquinaria, sistemas productivos y sistemas ciber-físicos (concebidos en la Manufactura 3,0) que puedan dar servicio a requerimientos de la Industria 4.0. En términos generales, el reacondicionamiento o retrofitting es un proceso de revitalización y modernización que sustituye la necesidad de comprar o construir un equipo completamente nuevo. Por ello, el término retrofitting se utiliza cada vez más en industrias, aplicándose al proceso de actualización de los equipos industriales. Más que una simple reforma, este proceso implica una serie de acciones de modernización utilizando nuevas tecnologías. El objetivo del retrofitting es preservar la funcionalidad de los equipos existentes y adaptarlos a las necesidades actuales, así como prolongar su vida útil [12]. Además, ofrece numerosas ventajas en el ámbito del ahorro de costos y en el mantenimiento de calidad [30]. La reconversión también conlleva beneficios imprevistos, como un alto rendimiento, la reducción del consumo de energía, la disminución de los costos energéticos y el aumento de la eficiencia operativa, entre otros. Entre muchas variables que afectan la decisión del retrofitting está el costo de la actualización. En la Figura 3 se observa una ruta para decidir cuándo optar por un reacondicionamiento de maquinaria vieja.



Figura 3. Retrofitting tradicional [31].

Más que actualizar un equipo, el retrofitting puede revigorizar todo el parque industrial instalado, permitiendo, además de la inclusión de modelos de gestión más avanzados, el conocimiento continuamente actualizado del papel de cada activo en el proceso [32]. La identificación de los puntos comunes en la readaptación, como adaptaciones, tecnologías y recursos, es una forma de facilitar, agilizar y aumentar el número de migraciones a la Industria 4.0. El retrofitting puede clasificarse en: 1) Retrofitting tradicional y 2) Retrofitting inteligente. El primero se refiere a la sustitución de piezas o subsistemas para conseguir la optimización de algunas variables del proceso como, por ejemplo, la reducción del tiempo de mantenimiento, la velocidad de las máquinas y procesos, así como la



precisión de diversas tareas, entre otras; mientras que el segundo se centra en la adaptación a bajo costo de subsistemas, máquinas o equipos ya existentes en las empresas [33].

No existe un método único para realizar un proceso de retrofitting ya que son diversas las variables involucradas. La Figura 4 muestra un proceso de retrofitting de una planta de proceso utilizado con el objetivo de mejorar la seguridad y el rendimiento del mantenimiento bajo la filosofía de la Industria 4.0. Dicho proceso consta de cuatro fases [34]. La primera fase consiste definir los objetivos que busquen mejorar las condiciones de la planta o bien optimizar el proceso. Se busca seleccionar los objetivos más estratégicos que se reguieran alcanzar. La segunda fase se orienta al estudio de la planta, en particular a conocer sus principales funciones y a determinar las variables más importantes como por ejemplos; la temperatura, la presión, el caudal, etc. Se busca determinar las variables que va se monitorean y las que deben ser controladas. Es posible considerar la experiencia de los trabajadores de la planta en esta fase para definir con claridad las variables más significativas. La tercera fase se refiere al proceso de reacondicionamiento del sistema o retrofitting que consiste desarrollar el subsistema de adquisición de datos y el control, así como la simulación de los diferentes escenarios planeados. En esta fase se pueden utilizar diferentes herramientas de simulación y de Inteligencia Artificial. Finalmente, la cuarta fase consiste en diseñar las interfaces para que los empleados especializados y no especializados puedan utilizar las aplicaciones desarrolladas. Para el caso de la propuesta de retrofitting mostrada en la Figura 4, los objetivos fueron dirigidos hacia la seguridad y el mantenimiento, por lo que las variables consideradas se orientaron hacia esas necesidades. Los autores implantaron en la fase tres algoritmos de Deep Learning y Swarm Intelligence (SI) orientados a la predicción y prevención de anomalías [34].



Figura 4. Marco de referencia para realizar un proceso de retrofitting en una planta [34]

Si bien los procesos de retrofitting se llevan a cabo en maquinaria que es apta para mejorarla, en diversas ocasiones se requiere introducir métodos de la Ingeniería Inversa para poder analizar el estado y las funciones de los sistemas de producción. No siempre se tienen documentadas las máquinas ni se conoce su diseño por parte de quienes las operan, por ello es necesario que se haga un análisis más detallado y con herramientas sistemáticas como es el caso de la Ingeniería Inversa, para poder tener con cierta certeza la información necesaria para poder decidir si la máquina o sistema productivo puede ser reconvertido a funciones de la Industria 4.0. En [35] proponen un método integrado por cuatro fases que asocia un proceso de Ingeniería Inversa y un gemelo digital desarrollado en el software de emulación Simumatik3D. En este proceso el emulador ayuda a planificar la Ingeniería Inversa de la máquina o sistema a reconvertir. Este método tiene varias



ventajas ya que se pueden reducir los errores en la planeación y se puede probar el proceso en forma virtual.

El retrofitting, cualquiera que sea su metodología, es una herramienta práctica que ayuda aquellas empresas que estén buscando mejorar sus sistemas productivos a transformar productos viejos o funcionales a un nuevo estado de operación cuyo rendimiento y rentabilidad debe ser mejor y mayor que las máquinas originales o de referencia. De la misma manera, el retrofitting es una opción viable para las empresas que busquen orientar sus procesos bajo el enfoque de la Industria 4.0. El retrofitting para la Industria 4.0 generalmente exige mejoras de la infraestructura, las comunicaciones y de la conectividad del sistema reconvertido, de esta manera el internet de las cosas proporciona sensores inteligentes y redes, las cajas inteligentes (Smart Box) concentran la información de diversos sensores conectados a los activos físicos y la envían pre-procesada a la nube, y generalmente se requiere implementar o diseñar gemelos digitales que hagan posible optimizar y mejorar diversos procesos mediante la aplicación de las herramientas de toma decisiones o de la Industria 4.0 son la hiper-conectividad, la alta automatización y la ciberseguridad, ya que la información de las empresas es clave para su competitividad y esta debe ser resguardad o protegida.



Figura 4. Metodología que incluye a la ingeniería inversa en el proceso de retrofitting

Los procesos de retrofitting en las empresas deben ir acompañados por la modernización de los sistemas de suministros e insumos que ofrecen los gobiernos de las localidades donde están instaladas. Por ejemplo, se debe garantizar un flujo de corriente eléctrica estable, un suministro de agua limpia constante, sistemas de comunicación de amplio espectro que garanticen la hiperconexión y suministro de combustibles, entre otras muchas mejoras. La Industria 4.0 es por naturaleza esbelta (lean) por lo que las máquinas o sistemas reconvertidos y los procesos productivos en general, deben estar integrados a proyectos de sustentabilidad, en otras palabras, aspectos de sustentabilidad poco a poco se han estado incorporando a los procesos de reconversión industrial con enfoque en la filosofía de la Industria 4.0. Finalmente, es posible aplicar el retrofitting a diversos activos físicos y digitales viejos pero operativos, desde una pieza hasta una fábrica, siempre y cuando se cumplan con los requerimientos de evaluación de costos, se apliquen métodos sistemáticos para conocer el estado, la función y el diseño de la maquinaria a reconvertir, como es el caso de la Ingeniería Inversa, la



experiencia de los ingenieros y trabajadores y la información tecnológica relacionada con los activos físicos que existe en la red, y tener en claro los objetivos de la reconversión y los requerimientos de la Industria 4.0

4. Conclusiones

En este artículo se han presentado algunas metodologías utilizadas para llevar a cabo el reacondicionamiento de máquinas o procesos productivos en el contexto de la Industria 4.0. Las principales conclusiones se describen en los puntos siguientes:

- El retrofitting es la base para la reconversión tecnológica de la maquinaria y equipos de aquellas empresas que busquen alinear sus objetivos productivos hacia la visión de la industria 4.0.
- El retrofitting debe ser practicado por las empresas con sumo cuidado y por especialistas, ateniéndose a los criterios de costos y de capacidades. Se debe considerar que el retrofitting requerido por la Industria 4.0 tiene criterios distintos que el retrofitting normal (mejoramiento de la maquinaria sin enfoque en la industria 4.0). Aunque no es regla general, el retrofitting de la Industria 4.0 requiere que se consideren cuando menos una conexión a la nube, un banco de comunicaciones y una caja inteligente (Smart Box), elementos y sistemas del Internet de las cosas (sensorizado especial), cuando menos un gemelo digital en el sistema reacondicionado y un sistema de seguridad informática, entre otras tecnologías.
- Los sistemas ciber-físicos y los gemelos digitales representan el corazón de la Industria 4.0, por lo que ambos deben ser dominados por aquellos profesionistas que realizarán el proceso del retrofitting y la operación de las fábricas inteligentes, ya que son y serán las tecnologías comunes y necesarias en los sistemas de producción concebidos y operados en el contexto de las industrias 4.0 y 5.0.
- No existe un método único o universal para realizar el retrofitting, por lo que es necesario ubicar o bien, diseñar un método propio para lograr los objetivos. En este trabajo se presentaron dos métodos; uno relacionado con el retrofitting de una planta y otro asociado con maquinaria. Ambos métodos son distintos debido a que sus objetivos son diferentes, y son propuestas que deben ser mejoradas de acuerdo con sus autores.
- El objetivo principal de la Industria 4.0 es optimizar a la Manufactura 3.0, por lo tanto, el retrofitting debe buscar que los activos físicos y/o digitales a reconvertir, tengan mejoras que permitan optimizar sus funciones y operaciones.

Referencias

- [1] Hughes, L., Dwivedi, Y.K., Rana, N.P., Williams, M.D. y Raghavan, V. Perspectives on the future of manufacturing within the Industry 4.0 era, *Production Planning & Control*, pp.1-21, 2020.
- [2] Gajdzik, B, Wolniak, R. Influence of Industry 4.0 Projects on Business Operations: Literature and Empirical Pilot Studies Based on Case Studies in Poland. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*; 8(1):44, pp. 1-20. 2022.
- [3] Ng, T.C., Lau, S.Y., Ghobakhloo, M., Fathi M. y Liang, M.S. The Application of Industry 4.0 Technological Constituents for Sustainable Manufacturing: A Content-Centric Review. *Sustainability*; 14(7), pp.1-21. 2022.
- [4] Forcina, A., y Falcone, D. The role of Industry 4.0 enabling technologies for safety management: A systematic literature review, *Procedia Computer Science*, 180, pp. 436-445. 2021.



- [5] Putnik, G.D., Ferreira, L., Lopes, N. y Putnik, Z. What is a Cyber-Physical System: Definitions and models spectrum. *FME Trans*; 47(4): pp. 663–74. 2019.
- [6] Mladineo, M., Veza, I. y Gjeldum, N. Solving partner selection problem in cyber-physical production networks using the HUMANT algorithm. *Int J Prod Res*, 55(9): pp. 2506–2521. 2017.
- [7] Dafflon, B., Moalla, N. y Ouzrout, Y. The challenges, approaches, and used techniques of CPS for manufacturing in Industry 4.0: a literature review. *Int J Adv Manuf Technol* 113, pp. 2395– 2412. (2021).
- [8] Qian, C., Liu, X., Ripley, C., Qian, M., Liang, F. y Yu, W. Digital Twin—Cyber Replica of Physical Things: Architecture, Applications and Future Research Directions. *Future Internet*, 14, pp.1-25. 2022.
- [9] Jiménez, E., Ochoa, F.J., Luna, G., Muñoz, F., Cuenca, F. y Maciel M. A. Competency-based Education of the Mechatronics Engineer in the Transition from Manufacturing 3.0 to Industry 4.0, 2nd IFSA Winter Conference on Automation, Robotics & Communications for Industry 4.0 (ARCI' 2022), 2-3 February 2022, Andorra la Vella, Andorra, pp. 84-87. 2022.
- [10] Ilari, S., Carlo, F.D., Ciarapica, F.E.y Bevilacqua, M. Machine Tool Transition from Industry 3.0 to 4.0: A Comparison between Old Machine Retrofitting and the Purchase of New Machines from a Triple Bottom Line Perspective. *Sustainability*, 3, 1-21. 2021.
- [11]Ermini, S., Bernabini, D., Burresi, G., Lorusso, M. y Rizzo, A. (2021). Human-Centered Retrofitting, *ECCE 2021: European Conference on Cognitive Ergonomics 2021, April 2021*, Siena, Italy, pp.1–6. 2021.
- [12] Lins, T. y Rabelo, R.A. Cyber-physical production systems retrofitting in context of industry 4.0, *Computers & Industrial Engineering*, 139, pp. 1-19. 2020.
- [13] Dietrich, A., van de Sand, R. y Reiff, J. Implementation of a machine tool retrofit system, 2nd German-West African Conference on Sustainable, Renewable Energy Systems SusRes Kara 2021 CPS & IOT (IIOT), Kara, Togo, pp. 239-247. 2021.
- [14] Komatsu, T. et al. Autonomous Driving of Six-Wheeled Dump Truck with a Retrofitted Robot. In: Ishigami, G., Yoshida, K. (eds) Field and Service Robotics. Springer Proceedings in Advanced Robotics, vol 16. Springer, Singapore, pp. 59-72. 2021.
- [15]Marusina, M. Y., Silaev, A. A., y Nevmerzhitsky, D. A. Method of Converting an Induction Motor to a Permanent Magnet Synchronous Motor (Ls-Pmsm) with Linear Starting Using FEA for Mechatronic Systems. 2019 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies, Sochi, Russia, pp. 356-358. 2019.
- [16] Trappey, J. C., Trappey, C. V., Govindarajan, U. H., Sun, J. J. y Chuang, A. C. A Review of Technology Standards and Patent Portfolios for Enabling Cyber–Physical Systems (CPS) in Advanced Manufacturing, *IEEE ACCESS*. 4, pp. 7356–7382. 2016.
- [17]Lee, E.A. Cyber Physical Systems: Design Challenges, Proc. 11th IEEE Int'l Symp. On Object and ComponentOriented Real-Time Distributed Computing (ISORC 08), Orlando, Florida 5-7 May pp. 363–369. 2008.
- [18] Palkina, E.S.; Zhuravleva, N.A.; Panychev, A.Y. New Approach to Transportation Service Pricing Based on the Stakeholder Model of Corporate Governance. *Mediterr. J. Soc. Sci.*, 6, pp. 299–308. 2015.
- [19] Kupriyanovsky, V.P., Namnot, E.D. y Sinyakov, S.A. Cyber-Physical Systems as the Basis of the Digital Economy. *Int. J. Open Inf. Technol.*, 4, pp. 18–25. 2016.
- [20] Pérez, F. Irisarri, E., Orive, D., Marcos, M. y Estevez, E. A CPPS Architecture approach for Industry 4.0, 2015 IEEE 20th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), Luxembourg, Luxembourg, pp. 1-4, 2015.
- [21] Cardin, O. Classification of cyber-physical production systems applications: proposition of an analysis framework. *Comput. Ind.* 104, pp.11–21. 2019.
- [22] Amrita, M.A. y Akhilesh, K.B. Operations Management of Cyber-Physical Production Systems. In: Akhilesh, K., Möller, D. (eds) Smart Technologies. Springer, Singapore, pp.137-145. 2020.
- [23] Ahmed, S. H., Kim, G. y Kim, D. Cyber Physical System: Architecture, applications and research challenges, 2013 IFIP Wireless Days (WD), Valencia, Spain, pp. 1-5, 2013.
- [24] Kruger, K., Redelinghuys, A.J.H., Basson, A.H. y Cardin, O. Past and Future Perspectives on Digital Twin Research at SOHOMA. In: Borangiu, T., Trentesaux, D., Leitão, P., Cardin, O., Lamouri, S. (eds) Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for



Industry of the Future. SOHOMA 2020. Studies in Computational Intelligence, vol 952. Springer, Cham, pp. 81-98. 2021.

- [25] Hartmann, D. y Van der Auweraer, H. (2021). Digital Twins. In: Cruz, M., Parés, C., Quintela, P. (eds) Progress in Industrial Mathematics: Success Stories. SEMA SIMAI Springer Series(5), vol 5. Springer, Cham, pp. 3- 17. 2021.
- [26] Negri, E., Fumagalli, L. y Macchi, M. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems, *Procedia Manufacturing*, 11, pp. 939-948. 2017.
- [27] Yadav, S. y Prakash, S. Blockchain critical success factors for sustainable supply chain, *Resour Conserv Recycl*, 152: pp. 1-11. 2020.
- [28] Yu, T., Simbara, F.A. y Chien, H. Developing a framework for Industry 3.5 to strengthen manufacturer performance, *Int. J. Logist. Appl. Res. Appl.*, pp.1-22. 2021.
- [29] Jiménez, E., Cuenca, F., Luna, G., Ochoa, F.J., Maciel, M.A., Muñoz, F. y Limón, P.A. Technical Considerations for the Conformation of Specific Competences in Mechatronic Engineers in the Context of Industry 4.0 and 5.0. *Processes*, 10, 1445, pp-1-45. 2022.
- [30] Pratumsuwan, P. Retrofitting of Machine Based Learning in Mechatronics Engineering. The International Journal of E-Learning and Educational Technology in the Digital Media, 1(3), pp. 167-174. 2015.
- [31] Vikrant, D., Neha, S. y Bhadak, M.D. Retrofitting for Lathe Machines, *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management (IJSREM)*, 6(01), pp.1-4. 2022.
- [32]Lins, T., Oliveira, R. A. R., Correia, L. H., & Silva, J. S. Industry 4.0 Retrofitting. In 2018 VIII Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC) (pp. 8-15). IEEE. Salvador, Brazil, pp.8-15. 2019.
- [33]Al, S. S. S. H., Kuhnhen, C., Engel, B. y Schiller, M. Smart retrofitting of machine tools in the context of industry 4.0. *Procedia CIRP*; 88: 369-374. 2020.
- [34]Di Carlo, F., Mazzuto, G., Bevilacqua, M. y Ciarapica, F.E. Retrofitting a Process Plant in an Industry 4.0 Perspective for Improving Safety and Maintenance Performance, *Sustainability*, 13: 1-18. 2021
- [35] Ayani, M., Ganebäck, M. y Amos, H.C. Ng. Digital Twin: Applying emulation for machine reconditioning, *Procedia CIRP*, 72, 243-248. 2018.



Aprendizaje Automático para la Detección del Daño Pulmonar a través de Parámetros Clínicos

Leyva López Sheila¹, [⊠]Salazar Colores Sebastián², Hernández Nava Gerardo¹ y Pedraza Ortega Jesús-Carlos¹.

¹ Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería, Querétaro, Querétaro, México. ² Centro de Investigaciones en Óptica, León, Guanajuato, México. ⊠sebastian.salazar@cio.mx

Resumen

El aprendizaje automático es un campo de la inteligencia artificial especializado en la tarea de clasificación a partir de patrones extraídos de datos. En los últimos años sus aplicaciones en medicina han tenido un éxito sin precedentes. Enfermedades como la fibrosis pulmonar idiopática requieren un correcto diagnóstico temprano para favorecer la calidad de vida del paciente. Esta enfermedad ha sido diagnosticada mayormente desde el enfoque de visión artificial. Sin embargo, no siempre es posible proveer imágenes médicas a estos sistemas de visión. En esta investigación se presentan los resultados de realizar una exploración en la tarea de clasificación del daño pulmonar sobre únicamente parámetros clínicos: edad y sexo del paciente, su relación con el tabaco, y el resultado de su capacidad vital forzada. Tres populares paradigmas de inteligencia artificial fueron desarrollados y analizados: una red neuronal artificial, bosques aleatorios, y regresión logística. Bajo las métricas de exactitud, sensitividad y puntaje-F1 se muestra que bosques aleatorios obtuvo el puntaje más alto para esta tarea con 92%, 93% y 94%, respectivamente.

Palabras clave: Fibrosis Pulmonar, Capacidad Vital Forzada, Redes Neuronales Artificiales, Árboles Aleatorios, Regresión Logística.

1. Introducción

La fibrosis pulmonar idiopática (FPI) es una enfermedad crónica, progresiva y limitante que principalmente se caracteriza por una tos persistente que evoluciona a lo largo de meses, y en la mayoría de los casos le precede un cuadro respiratorio agudo [1]. Hasta el día de hoy, la FPI no tiene cura. Sin embargo, un diagnóstico certero podría ayudar a reducir el riesgo de muerte del paciente e incluso mejorar su esperanza y calidad de vida, dado que el promedio de supervivencia después de presentar los primeros síntomas se ubica entre los 3 y 5 años.

Utilizada para detectar FPI, la prueba de función pulmonar (PFP) es una evaluación para conocer el funcionamiento de los pulmones, es decir, conocer si los pulmones están realizando su función de inspiración y expiración de aire, correctamente [2]. Dicha evaluación puede incluir espirometrías, pruebas de volumen pulmonar, oximetría, pruebas de fracción de óxido nítrico espirado y/o pruebas de gases en sangre arterial [3], [4]. Una de las pruebas de función pulmonar más reconocida y estandarizada es la espirometría. La cual es no invasiva, y mediante la medición de flujos y volúmenes de aire exhalado e inspirado ayuda a identificar si existen obstrucciones al flujo respiratorio. Dentro de esta prueba se manejan dos principales parámetros fisiológicos: volumen espiratorio forzado en el primer segundo (FEV1) y capacidad vital forzada (CVF), esta última se refiere al volumen máximo de aire exhalado de manera forzada por la boca después una inspiración máxima [5]. Específicamente, se considera que la CVF es normal cuando es mayor al 80% de su valor teórico [6] y suele disminuir en pacientes con fibrosis pulmonar idiopática.



Por otro lado, la inteligencia artificial (IA) y en concreto el aprendizaje automático (ML, por sus siglas en inglés) generalmente trabaja con grandes cantidades de datos, obteniendo a partir de ellos patrones y predicciones. Una de las tareas básicas y fundamentales donde el ML tiene mayor aplicación es en la clasificación, la cual puede ser definida como la tarea de asignar una o varias etiquetas de clase a un conjunto de características o señales basado en patrones aprendidos. Lo anterior tiene un inmenso campo de aplicaciones, desde decidir si un correo es spam o no [7], hasta clasificar a partir de una imagen médica, si el tumor que se observa es benigno o maligno [8].

Una de las áreas de aplicación del ML más importante, debido a su impacto, es el área de la salud. Entre las aplicaciones más importantes se pueden mencionar: clasificación para la predicción de falla cardíaca [9], clasificación de venas/arterias [10], y la clasificación de enfermedades glomerulares e identificación de lesiones [11], solo por mencionar algunas. Específicamente hablando del área de imagenología médica, la clasificación densa píxel-a-píxel conocida también como segmentación semántica es enfocada a la detección de órganos y patrones atípicos utilizando imágenes médicas, incluso, existen estudios que demuestran que una segunda opinión en el análisis de imágenes médicas puede incrementar significativamente la exactitud del diagnóstico [12]. Entre los principales tipos de imágenes médicas sobre los que se aplica se pueden mencionar rayos X [13], tomografía computarizada (TC) [12] y resonancia magnética (RM) [14].

Sin embargo, para el ML en neumología, a pesar de que las imágenes médicas pueden proveer de información sumamente valiosa, el utilizar información, tal como las pruebas de función pulmonar (PFP) en la etapa del diagnóstico de los pacientes - que generalmente padecen enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), hipertensión arterial pulmonar, enfermedades del sueño y enfermedades pulmonares intersticiales [15] - resulta bastante favorable para los modelos de clasificación. Ejemplo de lo antes mencionado es un modelo basado en árboles de decisión diseñado por el investigador Topalovi y su equipo [16], quienes en 2017 alcanzaron una precisión del 68% con una validación cruzada de 10 particiones en la detección de patologías como EPOC, asma y enfermedades pulmonares intersticiales haciendo uso de información como la capacidad difusora de monóxido de carbono (DLCO, por sus siglas en inglés), FEV1, CVF, edad, sexo e índice de masa corporal (IMC).

Inspirado en lo anterior y por dos motivos fundamentales, el primero, dado que -hasta donde los autores saben- el daño pulmonar se ha detectado mayormente mediante ML utilizando imágenes médicas, y el segundo, que en determinadas situaciones es más fácil acceder a parámetros clínicos que a imágenes médicas; en este trabajo se muestran los resultados de intentar clasificar si el paciente presenta daño pulmonar o no, es decir, si su función pulmonar ha disminuido en función de su resultado de CVF, su situación actual con el tabaco: fumador, ex-fumador o nunca ha fumado, edad y sexo. En esta investigación tres enfoques de ML utilizados en investigaciones anteriores, con cierta similitud, fueron desarrollados y comparados: redes neuronales artificiales, árboles aleatorios y regresión logística. Pruebas de desempeño realizadas con métricas adoptadas por la comunidad científica del área, tales como exactitud, sensitividad y puntaje-F1, junto con la metodología de evaluación K-fold cross muestran que es posible predecir con una confiabilidad destacable el daño pulmonar usando exclusivamente parámetros clínicos y ML.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se describe la metodología y los conceptos teóricos necesarios para llevar a cabo el diseño del modelo de clasificación propuesto; en la sección 3 se muestran los resultados obtenidos y el análisis de los mismos, para finalmente en la sección 4 abordar las conclusiones producto del desarrollo de la investigación realizada.

2. Material y métodos

En esta sección, se muestra información acerca del proceso de investigación llevado a cabo. Inicialmente es descrita la base de datos junto con los resultados de un análisis de correlación de Pearson y el preprocesamiento que se ha definido. A continuación, se explica brevemente los paradigmas de IA utilizados: redes neuronales artificiales, bosques aleatorios y regresión logística. También se ilustra información del hardware y software junto con los hiperparámetros utilizados durante



la experimentación. En la Figura 1 se visualiza de forma general la metodología seguida en el presente trabajo.



Figura 1. Metodología de la investigación.

2.1 Base de datos

Claramente, los datos son una parte esencial en el diseño de un sistema de IA. La calidad de estos datos influye directamente en el desempeño de los modelos desarrollados. En esta ocasión los datos fueron obtenidos de la plataforma Kaggle, los cuales son libres y gratuitos. La base de datos está conformada por información de 1549 pacientes con FPI, de los cuales 1224 son hombres y 325 mujeres. De cada paciente se poseen cinco parámetros clínicos: edad, sexo, CVF, la relación del paciente con el tabaco: ex-fumador, nunca ha fumado, actualmente fuma, y el porcentaje de CVF [17].

2.2 Análisis exploratorio de los datos

Con la finalidad de conocer si existe una relación entre las cinco variables descritas previamente con el daño pulmonar. Se decidió realizar un análisis basado en la correlación de Pearson. La correlación de Pearson (ρ) mide el grado de relación lineal entre dos variables *X* y *Y*. Esta medida de correlación puede entenderse como un análisis de covarianzas normalizado. Matemáticamente, suele ser descrita en términos de la varianza (*Var*) y Covarianza (*Cov*), tal como se muestra en la Ecuación 1.

$$\rho_{X,Y} = \frac{Cov(X,Y)}{\sqrt{Var(X)Var(Y)}} \tag{1}$$

En la Figura 2 es mostrada la matriz con los coeficientes de correlación de Pearson. Es importante mencionar que dichos coeficientes están limitados entre -1 y 1. Donde -1 representa relaciones negativas perfectas y 1 denota relaciones positivas perfectas, mientras que, el valor intermedio 0 se presenta cuando no existe una relación entre variables. Por tanto, es posible observar en la Figura 2 que el sexo y el estado del fumador están mayormente relacionados con la CVF de la persona.

1.1 Preprocesamiento de los datos

Originalmente, las variables de la base de datos son descritas mediante variables numéricas y alfabéticas. Evidentemente, para hacerlos entendibles para los modelos de inteligencia artificial que se usarán en este proyecto se requiere codificar los datos de tipo alfabético a numérico.

La variable "sexo" fue pasada de las categorías H y M a los valores 1 y 0, respectivamente. Mientras que, el estatus de fumador fue convertido a valores 0 para el estado "fumador", 1 para "nunca ha fumado" y 2 asignado a "actualmente fuma". Asimismo, los atributos "Edad" y "Porcentaje" fueron normalizados.



Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 19, pp. 262 - 271. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022



Figura 2. Matriz de correlación de Pearson.

1.2 La inteligencia artificial y el aprendizaje automático

La tarea de definir la inteligencia artificial (IA) es muy compleja, pero en términos generales puede decirse que es un campo de las ciencias de la computación que da la habilidad a las computadoras de tener un comportamiento al que pueden mostrar los seres inteligentes biológicos al realizar una tarea [7], [18], [19].

Ahora bien, dentro del inmenso campo de la IA, existe una subárea llamada aprendizaje automático (ML, por sus siglas en inglés), en la cual una computadora desarrolla la capacidad de realizar tareas sin haber sido explícitamente programada para ello. Lo anterior lo logra mediante la experiencia y la obtención de patrones a través de los datos. Por ejemplo, en la salud, el ML es capaz analizar millones de datos clínicos para crear modelos de predicción y diagnóstico, y de esta forma mejorar sistemas de salud [20].

Como se ha ilustrado en la introducción, aunque con orígenes y perspectivas distintas las redes neuronales artificiales, bosques aleatorios y regresión logística han mostrado tener un rendimiento destacado en tareas similares a la abordada en esta investigación. Es por lo que han sido elegidas para ser desarrolladas y aplicadas en este contexto: la detección de daño pulmonar. A continuación, se describe brevemente en qué consisten junto con los detalles de su implementación.

1.3 Bosques aleatorios

Los bosques aleatorios son un algoritmo de ensamble, principalmente usados para la regresión y la clasificación. Se encuentran constituidos por múltiples árboles de decisión, los cuales son mezclados mediante *bagging*, para tener resultados más precisos y estables, esto es que cada árbol se entrena con subconjuntos de entrenamiento diferentes y conseguir compensar los errores entre sí. Una de las ventajas al utilizar estos algoritmos es que no tienden al sobreajuste, por otro lado, una desventaja



es el costo computacional que va relacionado con el número de árboles que contendrá el bosque [21], [22].

1.4 Red neuronal artificial

Las redes neuronales artificiales (RNA), son un modelo computacional cuya unidad de procesamiento se denomina neurona artificial. Las neuronas artificiales realizan conexiones entre sí, formando estructuras con distintas arquitecturas. Las neuronas artificiales se conglomeran y forman estructuras conocidas como capas. Normalmente las RNA tienen una capa de entrada, salida y una capa intermedia de neuronas llamada capa oculta [23].

La capa de entrada es la etapa donde se reciben los datos, por el contrario, la capa de salida, que es la última etapa, es donde se toman las decisiones. Para que una RNA tome mejores decisiones los datos pueden ser procesados por una o más capas ocultas. Se considera que la introducción de este concepto fue a partir del artículo publicado por McCulloch y Pitts en 1943 [24], [25]. El tipo de neurona artificial más utilizada en la actualidad es el perceptrón.

Perceptrón multicapa. El perceptrón multicapa (MLP) es una generalización del perceptrón simple, el cual solo tiene la capacidad de resolver problemas lineales. Cada capa a excepción de la de entrada se calcula mediante una suma ponderada del producto de sus pesos por sus entradas. Luego para dar propiedades no lineales a las neuronas una función de activación o transferencia es aplicada. Esta función puede ser de varios tipos tales como tangente hiperbólica, sigmoide, o softmax.

1.5 Regresión logística

Ahora bien, la regresión logística es una técnica matemática utilizada en aprendizaje automático para la clasificación de datos. Recibe este nombre, dado que, primero se realiza una combinación lineal de los parámetros θ con las entradas *X* llamada *z* y después se aplica una función logística (σ), o bien, una función sigmoide.

$$z_{\theta}(X) = X \cdot \theta \tag{2}$$

Donde:

- $z_{\theta}(X)$: combinación lineal.
- θ : parámetros a ajustar mediante entrenamiento.
- X: vector de entrada del modelo.

Finalmente, la combinación lineal $z_{\theta}(X)$ es pasada por la función de transferencia logística sigma σ .

$$\sigma(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \tag{3}$$

1.6 Configuración del experimento

El desarrollo de los métodos fue realizado en Python 3.8, TensorFlow 2.8 y Pycaret 2.3.9, Las características de Hardware utilizados son: CPU, Intel Xenon @2.30 GHz; GPU, Tesla T4; y memoria RAM de 12GB.

A continuación, se enuncian los hiperparámetros de entrada con los cuales se configuraron: la red neuronal propuesta: (MLP), el modelo basado en un bosque aleatorio y el de regresión logística.

1.7 Hiperparámetros utilizados

Los hiperparámetros para los algoritmos de bosques aleatorios y regresión logística fueron definidos después de un proceso de elección realizado con el software especializado Pycaret. Mientras que, los hiperparámetros definidos para la red neuronal artificial se eligieron mediante prueba y error.



Red neuronal artificial (MLP). Estudios [26] han demostrado que el gradiente descendente estocástico (SGD, por sus siglas en inglés) es en general mejor que otros métodos de optimización tales como Adam o RMSprop cuando se intenta reducir el error de aprendizaje. Por lo anterior el modelo neuronal propuesto utiliza el método SGD. De forma experimental fue definida una tasa de aprendizaje de 0.5. La función de pérdida utilizada es la entropía cruzada binaria. A continuación, se muestran los hiperparámetros más importantes utilizados y sus valores:

- función de activación = sigmoide,
- tasa de aprendizaje = 0.5,
- optimizador = SGD,
- épocas = 1000.

Para el diseño de la arquitectura del MLP el conjunto de datos fue dividido mediante la regla 60-20-20, método que consiste en la creación de subconjuntos, en los cuales el 60% de los datos se considera para el entrenamiento, mientras que un 20% es para la validación y otro 20% corresponde a pruebas del modelo de clasificación. La arquitectura del MLP que se propone en este trabajo se compone de 5 neuronas de entrada, tres capas ocultas con 2, 16 y 16 neuronas respectivamente y una neurona de salida (ver Figura 3)



Figura 3. Arquitectura del MLP propuesto.

Bosques aleatorios. Estos son los hiperparámetros más importantes del bosque aleatorio diseñado:

- Profundidad máxima de los árboles = no restringida, los nodos son expandidos hasta que las hojas son puras o se alcanza el número mínimo de muestras requeridas,
- Número mínimo de muestras requeridas antes de dividir este nodo = 2,

Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 19, pp. 262 - 271. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022



- Número máximo de nodos finales = no definidos,
- Número mínimo de muestras que debe haber en un nodo final = 1,
- Número de árboles que contiene el bosque aleatorio = 100.

Regresión logística. Éstos son los hiperparámetros más importantes del método de regresión logística diseñado:

- Parámetro de regularización = 2.604,
- Balanceo entre clases = activado,
- Regularización ='l2',
- Criterio de detención temprana = 0.0001.

1.8 Metodología de evaluación

Tres métricas ampliamente utilizadas en la literatura fueron utillizadas: exactitud, sensitividad, y puntaje-F1.

La exactitud se refiere a la relación del número de clasificaciones correctas entre el número total de muestras predichas por el modelo de IA. Aunque esta métrica es muy usada, no describe de forma completa el desempeño de los modelos evaluados, por lo anterior sensitividad y puntaje-F1 fueron incorporados para tener una evaluación más completa del rendimiento. Sensitividad es definida en la ecuación (4) y el puntaje-F1 está expresado en (5).

$$sensitividad = \frac{PV}{PV + FN}$$
(4)

$$Puntaje - F1 = \frac{2 * PV}{2 * PV + FP + FN}$$
(5)

Donde:

- PV: Positivos Verdaderos.
- NV: Negativos Verdaderos.
- PF: Positivos Falsos.
- NF: Negativos Falsos.

Adicionalmente, para obtener valores confiables de rendimiento de cada uno de los métodos fue utilizada la metodología de validación cruzada. La validación cruzada permite dividir el conjunto de datos, de forma que, los datos se pueden utilizar en el entrenamiento y en prueba. Específicamente en la validación cruzada de k iteraciones (K - fold cross validation) se divide el conjunto de datos original en subconjuntos, de modo que, durante el entrenamiento se toma cada k subconjunto como un conjunto de prueba total, mientras que los demás subconjuntos se toman como entrenamiento, esto se repetirá k veces, y cada vez el conjunto de prueba será diferente y el resto de los datos se utilizará para entrenamiento [27]. En cada iteración se calcula un valor de Exactitud E_k, tal que, al final la exactitud del modelo es el promedio de todas.

Los números más comunes para iteraciones son 5 y 10, en este proyecto se utiliza una validación cruzada con k igual a 10 (ver Figura 4)

2. Resultados

En la Tabla 1 se muestra el desempeño del perceptrón multicapa (MLP) propuesto, así como el desempeño de las redes basadas en bosques aleatorios y en regresión logística en la tarea de clasificar, a partir de únicamente parámetros clínicos, si el paciente presenta daño pulmonar. Cabe mencionar que está clasificación no indica los niveles de daño.



Total de datos



Figura 4. Validación cruzada k-fold.

Asimismo, se puede observar como el método de bosques aleatorios obtuvo el valor de exactitud más alto con 0.92, seguido por la RNA basada en bosques aleatorios. El patrón anterior se repite para las métricas sensitividad y puntaje-F1. Además, el tiempo de entrenamiento de bosques aleatorios es mucho menor.

Paradigma de IA	Exactitud	Sensitividad	Puntaje-F1	Tiempo de entrenamiento [s]
Red neuronal artificial (MLP)	0.88	0.87	0.88	872.6
Bosques aleatorios	0.92	0.93	0.93	6.3
Regresión Logística	0.87	0.92	0.90	59.3

3. Conclusiones

Los resultados de la presente investigación muestran que detectar el daño pulmonar generado por la fibrosis pulmonar idiopática con un alto nivel de exactitud (0.92, en el caso de bosques aleatorios) es posible utilizando exclusivamente parámetros clínicos. De los tres paradigmas utilizados en la investigación, bosques aleatorios mostró ser superior a la red neuronal artificial y regresión logística alcanzando valores de 0.92 en exactitud y 0.93 tanto en sensitividad como puntaje-F1. Además, el tiempo de entrenamiento requerido por bosques aleatorios es menor en al menos 10 veces que lo requerido por los otros dos modelos de IA. Lo anterior, motiva la intención de realizar en el futuro más investigaciones con más parámetros clínicos y con más paradigmas de IA para realizar detecciones aún más confiables. Cabe mencionar que en este proyecto no se plantea el uso de IA para sustituir el papel del médico en el diagnóstico de los pacientes, sino que busca ser una herramienta auxiliar en el proceso.

Referencias

- [1] Á. U. P., "FIBROSIS PULMONAR IDIOPÁTICA," *Rev. Médica Clínica Las Condes*, vol. 26, no. 3, pp. 292–301, May 2015, doi: 10.1016/J.RMCLC.2015.06.006.
- [2] National Lung Health Education Program, "American Thoracic Society."



http://www.nlhep.org/Pages/Spirometry.aspx

- [3] Instituto Nacional del Cáncer, "Definición de funcionamiento pulmonar Diccionario de cáncer del NCI," 2021.
- [4] National Heart Lung and Blood Institute, "Pruebas de la función pulmonar," 2021. https://www.nhlbi.nih.gov/health-topics/espanol/pruebas-de-la-funcion-pulmonar (accessed Nov. 02, 2021).
- [5] R. E. Benítez-Pérez *et al.*, "Espirometría: recomendaciones y procedimiento," *NCT Neumol. y Cirugía Tórax*, vol. 78, no. S2, pp. 97–112, 2019, doi: 10.35366/NTS192C.
- [6] Fundación Argentina del Tórax, "Capacidad vital forzada Fundacion Argentina del Torax." https://fundaciontorax.org.ar/page/index.php/metodos-de-diagnostico/1211-capacidad-vitalforzada (accessed Dec. 30, 2021).
- [7] L. Rouhiainen, INTELIGENCIA ARTIFICIAL 101 COSAS QUE DEBES SABER HOY SOBRE NUESTRO FUTURO INTELIGENCIA ARTIFICIAL. Alienta, 2018. [Online]. Available: www.planetadelibros.com
- [8] Q. D. Buchlak, N. Esmaili, J.-C. Leveque, C. Bennett, F. Farrokhi, and M. Piccardi, "Machine learning applications to neuroimaging for glioma detection and classification: An artificial intelligence augmented systematic review," *J. Clin. Neurosci.*, vol. 89, pp. 177–198, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.jocn.2021.04.043.
- [9] M. R. K. Mookiah *et al.*, "A review of machine learning methods for retinal blood vessel segmentation and artery/vein classification," *Med. Image Anal.*, vol. 68, p. 101905, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.media.2020.101905.
- [10] C. R. Olsen, R. J. Mentz, K. J. Anstrom, D. Page, and P. A. Patel, "Clinical applications of machine learning in the diagnosis, classification, and prediction of heart failure," *Am. Heart J.*, vol. 229, pp. 1–17, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.ahj.2020.07.009.
- [11] C.-K. Yang *et al.*, "Glomerular disease classification and lesion identification by machine learning," *Biomed. J.*, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.bj.2021.08.011.
- [12] B. Sousa Santos, C. Ferreira, J. S. Silva, A. Silva, and L. Teixeira, "Quantitative evaluation of a pulmonary contour segmentation algorithm in x-ray computed tomography images1," *Acad. Radiol.*, vol. 11, no. 8, pp. 868–878, Aug. 2004, doi: 10.1016/j.acra.2004.05.004.
- [13] H. Su *et al.*, "Horizontal and vertical search artificial bee colony for image segmentation of COVID-19 X-ray images," *Comput. Biol. Med.*, vol. 142, p. 105181, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.compbiomed.2021.105181.
- [14] F. Guo, D. P. Capaldi, D. G. McCormack, A. Fenster, and G. Parraga, "Ultra-short echo-time magnetic resonance imaging lung segmentation with under-Annotations and domain shift," *Med. Image Anal.*, vol. 72, p. 102107, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.media.2021.102107.
- [15] L. Vargas-Ramirez, "INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN NEUMOLOGÍA," 2022, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/358040724
- [16] M. Topalovic, S. Laval, J.-M. Aerts, T. Troosters, M. Decramer, and W. Janssens, "Automated Interpretation of Pulmonary Function Tests in Adults with Respiratory Complaints," *Respiration*, vol. 93, no. 3, pp. 170–178, Feb. 2017, doi: 10.1159/000454956.
- [17] "OSIC Pulmonary Fibrosis Progression," *OSIC Pulmonary Fibrosis Progression* | *Kaggle*. https://www.kaggle.com/competitions/osic-pulmonary-fibrosis-progression/data
- [18] Alberto García Serrano, *INTELIGENCIA ARTIFICIAL Fundamentos, práctica y aplicaciones*, vol. 2. Alfaomega, 2012. [Online]. Available: www.rclibros.es
- [19] F. Escolano Ruiz, M. Á. Čazorla Quevedo, M. I. Alfonso Galipienso, O. Colomina Pardo, and M. Á. Lozano Ortega, Inteligencia artificial: modelos, técnicas y áreas de aplicación. Thomson, 2003. Accessed: Apr. 08, 2022. [Online]. Available: https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=_spC6S7UfZgC&oi=fnd&pg=PP1&dq=intelig encia+artificial&ots=sQivMFTsCW&sig=cauqHI1Qfhx3whEULfjCYsdpTMY&redir_esc=y#v=one page&q=inteligencia
- [20] M. Álvarez Vega, L. M. Quirós Mora, and M. V. Cortés Badilla, "Inteligencia artificial y aprendizaje automático en medicina," *Rev. Medica Sinerg.*, vol. 5, no. 8, p. e557, Aug. 2020, doi: 10.31434/rms.v5i8.557.
- [21] P. Harrington, *Machine learning in action*. Manning Publications Co., 2012.
- [22] M. A. A. Fernández, *Inteligencia artificial para programadores con prisa*. Universo de Letras, 2022. [Online]. Available: https://books.google.com.mx/books?id=ieFYEAAAQBAJ



- [23] E. S. Olivas, Handbook of Research on Machine Learning Applications and Trends: Algorithms, Methods, and Techniques: Algorithms, Methods, and Techniques. IGI Global, 2009.
- [24] SmartPanel, "¿Qué es el Deep Learning?," *Smart Panel*, Apr. 2010. https://www.smartpanel.com/que-es-deep-learning/ (accessed May 27, 2021).
- [25] S. Kulkarni, G. Harman, and W. I. (Online service), An Elementary Introduction to Statistical Learning Theory. Hoboken, N.J.: Wiley, 2011. [Online]. Available: http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=e000xww&AN=391376&lang=es&site= ehost-live&scope=site&custid=s4768653
- [26] L. Luo, Y. Xiong, Y. Liu, and X. Sun, "Adaptive Gradient Methods with Dynamic Bound of Learning Rate," Feb. 2019, [Online]. Available: https://github.com/Luolc/AdaBound.
- [27] L. Laura-Ochoa, "Evaluación de Algoritmos de Clasificación utilizando Validación Cruzada," in Proceedings of the 17th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Industry, Innovation, and Infrastructure for Sustainable Cities and Communities," 2019, pp. 24–26. doi: 10.18687/LACCEI2019.1.1.471.



Desarrollo de Control Tolerante a Falla Total de Rotor para Cuadricópteros

Martínez Hernández Isaí Mahonri, Estrada Antonio y Fletes Barajas José Ramón

Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial CIDESI [™] i.martinez@posgrado.cidesi.edu.mx

Resumen

Los cuadricópteros son dispositivos aéreos que cuentan con cuatro rotores que le permiten elevarse, maniobrar en el aire y aterrizar. La pérdida parcial o total de cualquiera de sus rotores puede llegar a significar una pérdida parcial o total de la aeronave. En el presente trabajo se propone un esquema de control tolerante a falla dirigido específicamente al problema de pérdida total de un rotor. Esta falla es particularmente compleja de atacar al representar un cambio fundamental en la dinámica del sistema. El esquema propuesto explota la estrategia conocida como "reduced attitude control" para encontrar condiciones que permitan mantener al cuadricóptero en el aire una vez que la falla del rotor se presente. Se analiza el cambio en la estructura de la matriz de entrada y se propone un esquema de control basado en un control por modos deslizantes multivariable. Se presentan resultados en simulación del cuadricóptero sin la activación del esquema de control así como con la activación de mismo al inyectar un fallo total en uno de sus rotores.

Palabras clave: Cuadricóptero, rotor, falla, control, algoritmo, pérdida, esquema, controlador.

1. Introducción

Los vehículos aéreos no tripulados (UAVs) han sido el objeto de gran interés en años recientes y han sido desarrollados dentro de una tecnología madura aplicada a áreas tales como defensa, búsqueda y rescate, agricultura, manufactura y protección ambiental [1]. Los tipos más comunes de UAVs son multi-rotor, de ala fija, de ala abatible, y sistemas híbridos, de los cuales el sistema multi-rotor es el más popular debido a su uso en diversas aplicaciones. El rango de rotores puede ser de 1 a 12, siendo el más popular el cuadricóptero un sistema de cuatro rotores [2]. Las aplicaciones civiles mencionadas anteriormente llevarán a los UAV a situaciones nuevas y difíciles, como el vuelo en entornos urbanos, donde la confiabilidad es particularmente crítica, la poca confiabilidad de los vehículos no tripulados actuales presenta un obstáculo para su éxito en nuevos entornos de vuelo exigentes [3]. A pesar de que los cuadricópteros son un buen ejemplo de sistemas de seguridad crítica, existen restricciones tales como que los actuadores tienen una autonomía limitada debido al rendimiento de energía, y por otro lado, existen restricciones en el estado del sistema que surgen debido a la dinámica de vuelo y limitaciones físico-estructurales [4].

Las fallas totales en los rotores de los cuadricópteros pueden llegar a dar paso a graves accidentes donde se involucren personas, animales y objetos importantes. Una estrategia para mitigar los riesgos debidos a falla de rotor es usar multicópteros de seis o más rotores, en vez de utilizar uno de cuatro ya que al hacerlo, el vehículo es capaz de mantener su vuelo de manera normal si uno de sus rotores falla [5] reduciendo así probabilidad de accidentes. Dentro de la literatura enfocada a estudiar el problema de falla de rotor existen diversos trabajos donde se han proponen diferentes esquemas de control que atacan la falla parcial de rotor [6]-[8]. Hassan Noura [9] propone un control activo tolerante a fallas basado en un banco de 13 controladores pasivos que sintonizan fallas del 20%, 30% y 40% en cada rotor. Ngoc Phi Nguyen [10] propone un control por modos deslizantes adaptativo mejorado mediante una red neuronal de base radial inyectando una falla de 50% al rotor. José Ramón Barajas [11] propone un control robusto por modos deslizantes con el propósito de mantener el cuadricóptero



en el aire ante una pérdida de eficiencia de uno de los rotores teniendo buenos resultados en la falla parcial de rotor.

En contraste con la importante cantidad de información disponible en la literatura en lo referente al problema de falla parcial de rotor, son pocos los artículos que abordan de manera formal un estudio e implementación de un algoritmo de control que permita al cuadricóptero mantenerse en el aire al perder de manera total uno de sus rotores. Entre las estrategias de control se tiene la usada por Merheb y Noura [12] que contempla añadir un subsistema mecánico basada en una masa móvil, esto con la finalidad de mover el centro de gravedad del cuadricóptero cuando el rotor se ha perdido y de esta manera modelarlo como un tricóptero. Así mismo, En un trabajo posterior, Ngoc Phi Nguyen [13] propuso un control tolerante a fallas basado en un observador Thau basado en modos deslizantes adaptativo el cual al momento de detectar una falla de uno de los rotores cambia el esquema de control reduciendo así el efecto de la falla.

Raffaello D´Andrea en [14] reporta resultados en los que logra con éxito mantener un cuadricóptero en el aire tras perder uno de sus rotores. La estrategia está basada en el uso del llamado "reduced attitude control" para encontrar condiciones que mantengan al cuadricóptero en el aire usando únicamente 3 rotores. Posteriormente un algoritmo de control LQR, es usado para establecer las condiciones antes mencionadas. El éxito de la propuesta también requiere de una etapa previa a la introducción del control LQR en la que se llega a una región de operación dentro de la cual el control LQR puede lograr su objetivo.

Publicación	Falla	Esquema de Control	Simulación	Experimental
Flight control of a quadrotor vehicle subsequent to a rotor failure. [6]	Parcial	H∞loop shaping	Si	No
Fault tolerant control of a quadrotor UAV using sliding mode control. [7]	Parcial	Modos delizantes	Si	No
Actuator Fault Estimation and Reconfiguration Control for Quad-rotor Helicopter. [8]	Parcial	H∞ fault observer	Si	Si
Active Fault-Tolerant Control of Quadrotor UAVs Based on Passive Controller Bank. [9]	Parcial	Modos delizantes	Si	No
Fault-Tolerant Control of Quadcopter UAVs Using Robust Adaptive Sliding Mode Approach. [10]	Parcial	Modos delizantes	Si	No
Fault Tolerant Control for a Quad-Rotor Subjected to Partial Single-Actuator Fault. [11]	Parcial	Modos delizantes	Si	Si
Emergency Control of AR Drone Quadrotor UAV Suffering a Total Loss of One Rotor. [12]	Total	PID	Si	Si
Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control Scheme for Quadcopter UAVs with a Total Loss of Actuator. [13]	Total	Modos delizantes	Si	No
Stability and control of a quadrocopter despite the complete loss of one, two, or three propellers. [14]	Total	LQR	Si	SI

Tabla 1. Estado del arte de esquemas de control para fallas parciales y totales de rotor en los cuadricópteros.

El presente trabajo retoma los resultados en [14], específicamente en la parte de usar "reduced attitude control" pero proponiendo un esquema de control que permita estabilizar al sistema una vez ocurrida la falla sin necesidad de otra etapa intermedia. Dicho esquema está basado en el control de vector unitario por modos deslizantes [15] y se presentan resultados de simulación mostrando la eficiencia y robustez de dicho esquema. Para llegar a ello, en las siguientes secciones se encuentra la obtención del modelo matemático del cuadricóptero, el planteamiento del problema en cuestión, la



propuesta de solución seguido de los resultados simulados y finalizando con la conclusión de los resultados obtenidos.

2. Modelado del cuadricóptero

En esta sección se describirá de manera resumida y consistente las ecuaciones dinámicas del cuadricóptero. Para obtener tal modelo dinámico se supone el vehículo como un cuerpo rígido en el espacio, sujeto a una fuerza principal (empuje) y tres momentos (pares). En la figura 1 se muestra las fuerzas que ejercen las distintas hélices para generar el movimiento del vehículo.



Figura 1. Fuerzas ejercidas por hélices en el cuadricóptero. [14]

El movimiento del cuadricóptero puede ser descrito en dos sistemas de referencia: El marco inercial y el marco del cuerpo. El vector $[\mathbf{x} \ \mathbf{y} \ \mathbf{z} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{\phi}]^T$ contiene las posiciones lineales y angulares del cuadricóptero en el marco inercial y el vector $[\mathbf{u} \ \mathbf{v} \ \mathbf{w} \ \mathbf{p} \ \mathbf{q} \ \mathbf{r}]^T$ que contendrá las velocidades lineares y angulares en el marco del cuerpo. La dinámica establece que los dos marcos de referencia están conectados por las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{v}_I &= \mathbf{R} \cdot \boldsymbol{v}_B \\ \boldsymbol{w}_I &= \mathbf{T} \cdot \boldsymbol{w}_B \end{aligned} \tag{1}$$

Donde:

$$\boldsymbol{v}_B = [\boldsymbol{u} \, \boldsymbol{v} \, \boldsymbol{w}]^T \qquad \boldsymbol{w}_B = [\boldsymbol{p} \, \boldsymbol{q} \, \boldsymbol{r}]^T \tag{2}$$

Donde las matrices $R_{zyx}(\phi, \theta, \psi)$ y **T** de las ecuaciones (2) y (3) son las matrices de rotación y transformación respectivamente y están definidas de la siguiente manera:

$$R_{zyx}(\phi, \theta, \psi) = \begin{bmatrix} c(\theta)c(\psi) & s(\phi)s(\theta)c(\psi) - c(\phi)s(\psi) & c(\phi)s(\theta)c(\psi) + s(\phi)s(\psi) \\ c(\theta)c(\psi) & s(\phi)s(\theta)s(\psi) + c(\phi)c(\psi) & c(\phi)s(\theta)s(\psi) - s(\phi)c(\psi) \\ -s(\theta) & s(\phi)c(\theta) & c(\phi)c(\theta) \end{bmatrix}$$
(3)
$$T = \begin{bmatrix} 1 & s(\phi)t(\theta) & c(\phi)t(\phi) \\ 0 & c(\phi) & -s(\phi) \\ 0 & \frac{s(\theta)}{c(\theta)} & \frac{c(\phi)}{c(\theta)} \end{bmatrix}$$
(4)

Al realizar las operaciones de la ecuación (1) se obtiene el modelo cinemático del cuadricóptero como se puede visualizar en la ecuación (5).

Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 20, pp. 272 - 285. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022



$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w[c(\phi)s(\theta)c(\psi) + s(\phi)s(\psi)] - v[c(\phi)s(\psi) - s(\phi)s(\theta)c(\psi)] + u[c(\phi)c(\theta)] \\ v[s(\phi)s(\theta)s(\psi) + c(\phi)c(\psi)] - w[s(\phi)c(\psi) - c(\phi)s(\theta)s(\psi)] + u[s(\phi)c(\theta)] \\ w[c(\phi)c(\theta)] - u[s(\theta)] + v[s(\phi)c(\theta)] \\ p + r[c(\phi)t(\theta)] + q[s(\phi)t(\theta)] \\ q[c(\phi)] - r[s(\phi)] \\ r\frac{c(\phi)}{c(\theta)} + q\frac{s(\theta)}{c(\theta)} \end{bmatrix}$$
(5)

Ahora considerando la dinámica del cuadricóptero que contemplan las fuerzas y los torques actuantes que existen sobre el cuadricóptero, así como aquellas que son externas al mismo.

A continuación se presentan las fuerzas actuantes sobre el cuadricóptero.

Considerando las velocidades lineales v_B y angulares en el marco del cuerpo w_B en (1), se procede a calcular la fuerza f_B que actúa sobre el cuadricóptero en el marco del cuerpo:

$$\boldsymbol{m}(\boldsymbol{w}_B \, \boldsymbol{x} \, \boldsymbol{v}_B + \, \boldsymbol{v}_B) = \boldsymbol{f}_B \tag{6}$$

Se puede ver de la ecuación (6) que f_B depende de v_B , w_B así como de la masa m.

La fuerza resultante en el marco del cuerpo f_B es también dependiente de las fuerzas externas que impacta el movimiento del cuadricóptero.

$$f_B = mgR^T \cdot \hat{e}_z - f_t \hat{e}_3 + f_w \tag{7}$$

Donde \hat{e}_z es un vector unitario en **z** y $f_t \hat{e}_3$ es el empuje total generado por los rotores, f_w son las fuerzas producidas por el viento sobre el cuadricóptero.

Por lo tanto considerando las ecuaciones (6) y (7) se igualan para obtener la fuerza total actuante sobre el cuadricóptero.

$$f_{B} = m \left(\begin{bmatrix} \dot{u} + qw - rv \\ \dot{v} + ru - pw \\ \dot{w} + pv - qu \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} -mg(s(\theta)) + f_{wx} \\ mg(s(\phi)c(\theta)) + f_{wy} \\ mg(c(\phi)c(\theta)) + f_{wz} - f_{t} \end{bmatrix}$$
(8)

Para la obtención del torque total aplicado al cuadricóptero se procede de la siguiente manera. Los torques en el marco del cuerpo solo dependen de las velocidades angulares en el marco del cuerpo w_B .

El marco del cuerpo tiene tres ejes perpendiculares entre sí, debido a ello, los momentos de fuerza son respecto a estos ejes. Por lo anterior, se calcula el torque m_B que actúa sobre el cuadricóptero.

$$I \cdot \dot{w_B} + w_B x (I \cdot w_B) = m_B \tag{9}$$

Se puede ver de la ecuación (10) que m_B depende de w_B así como de una matriz de inercias I. Los torques resultantes en el marco del cuerpo m_B es también dependiente de los torques externos que impactan el movimiento del cuadricóptero.

$$m_B = \tau_B - g_a + \tau_w \tag{10}$$

Donde g_a corresponden a los momentos giroscópicos causados por la rotación combinada de los cuatro rotores. τ_B son los torques generados por las diferencias de velocidades y τ_w son los torques producidos por el viento sobre el cuadricóptero como se muestra en (11).

$$\boldsymbol{\tau}_{B} = [\boldsymbol{\tau}_{x} \ \boldsymbol{\tau}_{y} \ \boldsymbol{\tau}_{z}]^{T} \qquad \boldsymbol{\tau}_{w} = [\boldsymbol{\tau}_{wx} \ \boldsymbol{\tau}_{wy} \ \boldsymbol{\tau}_{wz}]^{T} \qquad (11)$$

Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 20, pp. 272 - 285. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022



Por lo tanto considerando las ecuaciones (9) y (10) se igualan para obtener la fuerza total actuante sobre el cuadricóptero.

$$m_B = \begin{bmatrix} \dot{p}I_x - qrI_y + qrI_z \\ \dot{q}I_x + prI_y - prI_z \\ \dot{r}I_x - pqI_y + pqI_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_x + \tau_{wx} \\ \tau_y + \tau_{wy} \\ \tau_z + \tau_{wz} \end{bmatrix}$$
(12)

Finalmente considerando el análisis de la cinemática y dinámica descrita anteriormente, obtenemos el modelo completo del cuadricóptero descrito en la ecuación (13).

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{y}$$

3. Planteamiento del problema

Entre las unidades UAVs multi-rotor los cuadricópteros tienen la virtud de tener una estructura simple y una eficiencia aerodinámica relativamente alta [16]. No obstante debido a la poca redundancia de motores, también son más vulnerables a falla de rotores enfrentándose a muchos factores, tanto internos como externos, que potencian los fallos posibles de las unidades:

Externos:

- Impacto con objetos o animales en el mismo espacio aéreo.
- Condiciones climáticas.
- Densidad de población (personas u objetos en área de vuelo)
- Interferencia electromagnética.

Internos:

- Falsos contactos en el controlador de la unidad.
- Problemas de alimentación por la batería.
- Perdida de los circuitos de potencia impidiendo el despegue.

Los cuadricópteros son frecuentemente equipados con unidades de medición de inercia (IMU), las cuales son susceptibles a fallo de bias debido en gran parte por las causas antes mencionadas [17]. Aunado a las fallas anteriores existen diversas fallas que afectan el funcionamiento de los rotores al momento del despegue y vuelo de las UAVs. Una de estas fallas es la sincronización entre el motor y



el variador. Este último debe enviar la señal en el momento adecuado para la activación de cada uno de los grupos de embobinados para el correcto giro del motor. De no hacerlo puede haber una alta tasa de falla en la estabilidad del motor. Sin embargo, la falla más crítica para un rotor llega al momento que este mismo pierde su funcionalidad ya sea por daño en el sistema de potencia, daño en la hélice y/o daño en el rotor. Se hace por lo tanto necesario realizar un estudio, investigación y desarrollo de un control tolerante a falla total de rotor, con la finalidad de que el cuadricóptero pueda mantener su altura ante la pérdida total de un rotor, al modificar su objetivo del control.

Por lo anterior obtenemos las entradas de control del cuadricóptero que fueron definidas en el modelado matemático del cuadricóptero de la ecuación (13) tal y como se muestran a continuación.

$$f_{t} = b(\Omega_{1}^{2} + \Omega_{2}^{2} + \Omega_{3}^{2} + \Omega_{4}^{2})$$

$$\tau_{x} = bl(\Omega_{3}^{2} - \Omega_{1}^{2})$$

$$\tau_{y} = bl(\Omega_{2}^{2} - \Omega_{4}^{2})$$

$$\tau_{z} = d(\Omega_{2}^{2} + \Omega_{4}^{2} - \Omega_{1}^{2} - \Omega_{3}^{2})$$
(14)

De la ecuación (14) se puede observar que la fuerza total f_t , así como cada uno de los torques (τ_x, τ_y, τ_z) dependen del factor de empuje del rotor b, la distancia del rotor al centro de gravedad del cuadricoptero l, el factor de arrastre d y de las velocidades Ω de los rotores, que al perder uno de estas producirá torques con respecto a su centro de gravedad. Tal y como se ilustra en la figura 2 cuando se controla velocidad y por ende la fuerza de empuje en cada uno de los rotores, el cuadricóptero podrá controlar altura y posición. Sin embargo sí al menos uno de los rotores falla, perderá el control de ambos.





Figura 2. Arriba: simulación operación normal. Abajo: simulación con un motor con velocidad cero.



4. Propuesta de solución

Conforme al estudio de arte brevemente descrito en la sección de introducción. Se llegó a la conclusión de proponer un esquema de control vector unitario de modos deslizantes teniendo las siguientes consideraciones:

- Es posible obtener señales de control f_1 , f_2 y f_3 basándose en un vector unitario de error e entre la orientación real y la orientación (reducida) deseada del cuadricóptero al momento de perder la influencia de f_4 .
- Basándose en la solución anterior realizar un escalamiento para lograr la suma de fuerzas $\overline{\sum F}$ $\overline{n}_z = m ||g||$. Donde $\overline{\sum F}$, es la suma de fuerzas de los rotores, \overline{n}_z es un vector unitario en dirección de z, *m* la masa del cuadricóptero y ||g|| el módulo de la gravedad.
- Lo anterior lleva de forma natural a un control por modos deslizantes con el método de vector unitario con ganancia variable.

La siguiente ecuación matricial (15) representa la fuerza de empuje total F_t y así como la obtención de los torques τ_x , τ_y y τ_z en el caso ideal que todos los rotores del cuadricóptero estén funcionando correctamente.

$$\begin{bmatrix} F_t \\ \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -l & 0 & l & 0 \\ 0 & l & 0 & -l \\ d & d & -d & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix}$$
()

En (16) se secciona la matriz en tres parte como resultado de eliminar la columna 4 debido a la pérdida de influencia del rotor 4, es decir, $f_4 = 0$.

					→ Se elimina la influencia de la columna debido a la perdida del rotor	
$\begin{bmatrix} F_t \\ \tau_x \\ \tau_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ \end{bmatrix}$	$ \begin{array}{c} 1 \\ -l \\ 0 \\ -l \end{array} $	1 0 d	1 l 0	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -l \\ f_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}$	$(f_4 = 0).$	(16)
$\lfloor \tau_z \rfloor $	-a	а	-a	a_{τ}		

Separando la sección verde el sistema (15) y (16) anterior se convierte en este nuevo sistema.

$$\begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l & 0 & l \\ 0 & l & 0 \\ -d & d & -d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}$$
(17)

De (17) resolvemos para f_1 , f_2 y f_3 haciendo estas fuerzas queden en función de los torques τ_x , τ_y y τ_z como se muestra en (18)

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2l} & \frac{1}{2l} & -\frac{1}{2d} \\ 0 & \frac{1}{l} & 0 \\ \frac{1}{2l} & \frac{1}{2l} & -\frac{1}{2d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix}$$
(18)



De (13) tomamos obtenemos la ecuacion matricial (19) para \dot{p} , \dot{q} y \dot{p} .

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{I_x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{I_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{I_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{(I_y - I_z)qr - \tau_{wx}}{I_x} \\ (I_z - I_x)pr - \tau_{wy} \\ \frac{(I_z - I_y)pq - \tau_{wz}}{I_z} \end{bmatrix}$$
(19)

Se tiene entonces los valores de las velocidades angulares deseadas $[p_d \ q_d \ r_d]$ calculadas para establecer soluciones periódicas en un sistema de grado relativo uno respecto a las señales de control $[\tau_x \ \tau_y \ \tau_z]$.

Por lo tanto, se propone usar la técnica de control vector unitario para calcular $[\tau_x \ \tau_y \ \tau_z]$ de la siguiente manera.

Se define el error e en (20).

$$\boldsymbol{e} = [\boldsymbol{p} \quad \boldsymbol{q} \quad \boldsymbol{r}] - [\boldsymbol{p}_d \quad \boldsymbol{q}_d \quad \boldsymbol{r}_d] \tag{20}$$

Tal que la señales de control $[\tau_x \quad \tau_y \quad \tau_z]$ sean el resultado del multiplicación una ganancia $\delta(f_t)$ que depende de la fuerza de empuje total de los rotores por la norma del error e tal y como se muestra en (21).

$$\begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \delta(f_t) \frac{e}{\|e\|}$$
(21)

Por las consideraciones hechas en un principio la fuerza total de empuje es la siguiente:

 $f_t = f_1 + f_2 + f_3 = mg + u_{sz}$, donde mg y u_{sz} (término estabilizador) son conocidos.

Dicho lo anterior se procede a hallar $[\tau_x \quad \tau_y \quad \tau_z]$ encontrando el valor de $\delta(f_t)$. Se despeja para la norma de error como se muestra en (22).

$$\frac{1}{\delta(f_t)} \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \frac{e}{\|e\|}$$
(22)

Para fines prácticos, se hace $\delta(f_t) = \gamma$, de esta manera (22) se convierte en (23).

$$\frac{1}{\gamma} \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \frac{e}{\|e\|}$$
(23)

Retomando la ecuación matricial (18) para f_1, f_2 y f_3 . Se Multiplica por $\frac{1}{\gamma}$ ambos lados de la ecuación como se muestra en (24)

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{\gamma} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2l} & \frac{1}{2l} & -\frac{1}{2d} \\ 0 & \frac{1}{l} & 0 \\ \frac{1}{2l} & \frac{1}{2l} & -\frac{1}{2d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{\gamma} \\ \tau_z \end{bmatrix}$$
(24)



Los valores de las fuerzas f_1, f_2 y f_3 son modificadas por $\underline{\gamma}$ en (25).

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{\gamma} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{1\gamma} \\ f_{2\gamma} \\ f_{3\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2l} & \frac{1}{2l} & \frac{1}{2d} \\ \frac{1}{l} & 0 & l \\ -\frac{1}{2l} & \frac{1}{2l} & -\frac{1}{2d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{\gamma} \end{pmatrix}$$
(25)

Por lo tanto: $\gamma = \delta(f_t) = \delta(f_{1\gamma} + f_{2\gamma} + f_{3\gamma})$ y como $f_t = mg + u_{sz}$ se despeja $\delta(f_t)$ dando el siguiente resultado:

$$\delta(f_t) = \frac{mg + u_{sz}}{\delta(f_{1\gamma} + f_{2\gamma} + f_{3\gamma})}$$
(26)

Donde cada uno de los valores del lado derecho de $\delta(f_t)$ son valores conocidos. Debido a ello, se puede conocer el valor de los torques como se expresa a continuación.

$$\begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \frac{mg + u_{sz}}{\delta (f_{1\gamma} + f_{2\gamma} + f_{3\gamma})} \frac{e}{\|e\|}$$
(27)

4.1 Orientación Reducida.

En esta subsección se visualiza la respuesta del cuadricóptero al perder uno de sus rotores, cual es la respuesta de sus velocidades angulares, fuerza de empuje únicamente con tres rotores. La figura 3 muestra de arriba hacia abajo la velocidad angular, la dirección del eje primario, la fuerza de empuje y el radio del movimiento horizontal tomando en cuenta las precondiciones propuestas en la sección 4, cuando $f_4 = 0$ se impone la condición $f_1 = f_3$. Adicionalmente, se hace que $f_2 = pf_1$ A medida que la fuerza f_2 incrementa, se puede ver que el eje primario \overline{n} del vehículo se mueve inicialmente lejos del eje z del cuerpo, mientras que el pitch resultante \overline{q} incrementa. Notar la discontinuidad en p = 2, cuando $\overline{r} = \overline{n_z} = 0$ el sentido de rotación se revierte.



Figura 3. El estado de equilibrio de un cuadricóptero, usando tres rotores, como una función de $p = \frac{f_2}{f_1}$.


5. Simulaciones y resultados

A continuación, se presentan los resultados simulados de la propuesta de solución bajo las siguientes condiciones:

- La simulación se ejecutó considerando que el cuadricóptero estaba en el aire.
- Las perturbaciones producidas por los momentos generados por el viento τ_w y la fuerza del viento f_w fueron consideras cero para la obtención de los resultados mostrados.
- La tabla 2 muestra los parámetros de diseño del cuadricóptero con los que la simulación se ejecuto

I _x (Momento de inercia en X)			X)	9.5e ⁻³ Nms ²	9.5e ⁻³ Nms ² b (Factor de empuje del rotor)		
I_{V} (Momento de inercia en Y)				9.5 e ⁻³ Nms ²	I (Distancia del rotor al CDG)	0.24 m	
I_z (Momento de inercia en Z)				18.6 e ⁻³ Nms ²	d (Factor de arrastre (Drag))	1.1 e ⁻⁶ ms ²	
Irotor (Inero	cia del Roto	or)		104 e ⁻³ Nms ²	g (gravedad)	9.8 ms⁻²	
K _{fax} (Co	oeficiente	de	fricción	5.56e ^{-₄} Nrad/s	m (masa)	1Kg	
aerodinám	ico en X)					-	
K _{fay} (Co	oeficiente	de	fricción	5.56e ^{-₄} Nrad/s	K _{ftx} (Coeficiente de Arrastre en X)	5.56e ⁻⁴ Nm/s	
aerodinám	ico en Y)						
K _{faz} (Co	oeficiente	de	fricción	6.354e ⁻⁴ Nrad/s	K _{ftz} (Coeficiente de Arrastre en Z)	6.354e ⁻⁴ Nm/s	
aerodinám	ico en Z)						
K _{fty} (Coefic	iente de Arı	rastre	en Y)	5.56e ^{-₄} Nm/s			

Tabla 2. Parámetros de simulación del cuadricóptero.

En la figura 4, se pueden observar como los ángulos θ (teta) y φ (phi) concentran sus valores respectivos en torno a cero, evitando de esta manera los torques tanto en x y y, mientras que el ángulo ψ (psi) crece indicando un giro entorno al eje z. Para la figura 5, las velocidades angulares p y q tienen valores más cercanos a cero mientras que r alcanza un valor cercano a 20 rad/s.



Figura 4. Ángulos ϕ , θ y ψ resultantes.





Figura 5. Velocidades angulares p, q, r.

Es importante denotar en la figura 6 el comportamiento de cada una de las posiciones, en el eje X y Y muestran un incremento y decremento respectivamente mientras que el movimiento en Z se conserva alrededor del cero tal como se puede ver de una mejor manera en la figura 6.



Figura 6. Posiciones en X, Y, Z.

En la figura 7 se puede ver de una manera minuciosa el comportamiento de la posición en el eje Z que ronda cerca del cero, haciendo que del cuadricóptero se pueda conservar en una altura deseada.

En la figura 8 se puede ver la norma del error que por momentos converge a cero mientras que en ese mismo instante de tiempo las fuerzas f1, f2 y f3 conmutan a alta frecuencia, ver figura 9.

La naturaleza del control propuesto puede ser vista en la figura 9 y 8 ya que para garantizar que el error converja a cero el control debe de conmutar las fuerzas f1, f2 y f3 para que de esta manera el cuadricóptero pueda lograr su objetivo de permanecer en el aire.





Figura 7. Posición en Z.









6. Conclusiones

Los resultados obtenidos al menos en la parte de simulación permiten dar un resultado preliminar de la eficacia de esta propuesta de solución para el control de la altura de la aeronave. A diferencia de los esquemas de control propuestos para la pérdida total de rotor que se mencionan al inicio de esta documento [12]-[14], el control por modos deslizantes con el método de vector unitario con ganancia variable propuesto en este trabajo permite compensar la pérdida del rotor al ser activado de manera inmediata. Por lo tanto, cubre la brecha descrita en [14] donde antes de la activación del controlador se necesita llevar al cuadricóptero a un punto de operación específico para que el control pueda lograr su objetivo. No obstante a los resultados obtenidos, se seguirá trabajando con la finalidad de lograr una respuesta más suave y consistente para disminuir la norma del error en los momentos que su valor es diferente de cero. De esta misma manera, en trabajos futuros se considerará una plataforma que cumpla los requerimientos mínimos necesarios para implementar la estrategia de control descrita y de esta manera validar su funcionamiento y alcance de manera experimental.

Referencias

- [1] Klippstein, H.; Diaz De Cerio Sanchez, A.; Hassanin, H.; Zweiri, Y.; Seneviratne, L. Fused Deposition Modeling for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Review. Adv. Eng. Mater. 2017, 20, 1700552.
- [2] Keane, J.; Carr, S. "A Brief History of Early Unmanned Aircraft". Johns hopkins apl technical digest, Vol. 32, Edition 3, 2013.
- [3] Y. Zhang, A. Chamseddine, "Development of advanced FDD and FTC techniques with application to an unmanned quadrotor helicopter testbed", in Journal of the Franklin Institute, vol. 350,pp. 2396-2422, November 2013, doi: 10.1016/j.jfranklin.2013.01.009
- [4] Kaynama, S.; Claire, J. "Benchmark: Flight Envelope Protection in Autonomous Quadrotors," in Electrical Engineering and Computer Sciences University of California at Berkeley, Vol. 0.1, 2018, pp. 1-7



- [5] Marks, A.; Whidborne, J. F.; Yamamoto, I. "Control allocation for fault tolerant control of a VTOL octorotor," in UKACC International Conference on Control. IEEE, 2014, pp. 357–362.
- [6] A. Lanzon, A. Freddi, and S. Longhi, "Flight control of a quadrotor vehicle subsequent to a rotor failure," J. Guid., Control, Dyn., vol. 37, no. 2,pp. 580–591, 2014.
- [7] Sharifi, F.; Mirzaei, M.; Gordon, B.W.; Zhang, Y. "Fault tolerant control of a quadrotor UAV using sliding mode control". In Proceedings of the Conference on Control and Fault Tolerant Systems, Nice, France, 6–8 October 2010.
- [8] Chen, F.; Lei, W.; Tao, G.; Jiang, B. "Actuator Fault Estimation and Reconfiguration Control for Quad-rotor Helicopter". Int. J. Adv. Robot. Syst. 2016, 13, doi:10.5772/62224.
- [9] Merheb, A.; Noura, H. "Active Fault-Tolerant Control of Quadrotor UAVs Based on Passive Controller Bank," Mechanisms and Machine Science. IEEE/ASME, Vol. 58, 2018, pp. 231–241
- [10] Nguyen, N.P.; Hong, S.K. "Fault-Tolerant Control of Quadcopter UAVs Using Robust Adaptive Sliding Mode Approach", Energies 2019, 12, 95. https://doi.org/10.3390/en12010095
- [11] J. Barajas, A. Estrada, "Fault Tolerant Control for a Quad-Rotor Subjected to Partial Single-Actuator Fault", 2021 the 5th International Conference on Robotics, Control and Automation, 2021, pp. 7-12, doi: 10.1145/3471985.3471987
- [12] A. -R. Merheb, H. Noura and F. Bateman, "Emergency Control of AR Drone Quadrotor UAV Suffering a Total Loss of One Rotor", in IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 22, no. 2, pp. 961-971, April 2017, doi: 10.1109/TMECH.2017.2652399.
- [13] Nguyen, N.P.; Hong, S.K. "Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control Scheme for Quadcopter UAVs with a Total Loss of Actuator", in Energies 2019, 12, 1139. doi: 10.3390/en12061139
- [14] M. W. Mueller and R. D'Andrea, "Stability and control of a quadrocopter despite the complete loss of one, two, or three propellers", 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2014, pp. 45-52, doi: 10.1109/ICRA.2014.6906588.
- [15] V. Utkin, "Sliding mode control in mechanical systems," Proceedings of IECON'94 20th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 1994, pp. 1429-1431 vol.3, doi: 10.1109/IECON.1994.398023.
- [16] S. Sun, G. Cioffi, C. de Visser and D. Scaramuzza, "Autonomous Quadrotor Flight Despite Rotor Failure With Onboard Vision Sensors: Frames vs. Events", in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 6, no. 2, pp. 580-587, April 2021, doi: 10.1109/LRA.2020.3048875.
- [17] R. Avram, X. Zhang, J. Campbell, J. Muse, " IMU Sensor Fault Diagnosis and Estimation for Quadrotor UAVs ", in IFAC-PapersOnLine, vol. 48,pp. 380-385, December 2015, doi: 10.1016/j.ifacol.2015.09.556



Validación del Diseño un Transformador de Corriente por medio de Simulación Numérica en la Industria 4.0

^{III} Ibáñez Olvera Mario, Jaramillo Sierra Bethsabet, Blanco Flores Alien, Balderas Gutiérrez Juan Nabor y Bobadilla López Ángel

TecNM – Tecnológico de Estudio Superiores de Tianguistenco [⊠]mario_mecatronica@test.edu.mx

Resumen

En este trabajo se muestra la simulación numérica de un trasformador de corriente; este transformador de corriente fue desarrollado por nuestro equipo de investigadores. La simulación del transformador de corriente ayudara a validar el correcto funcionamiento y diseño del transformador de corriente, comparando las señales medidas en el transformador de corriente real respecto a las simuladas. La simulación numérica se desarrolló en un ambiente similar en comparativa al transformador de corriente real, considerando; materiales, morfología del transformador de corriente, estructura mecánica, aplicación, y excitaciones. Se consideraron todas las variables posibles con el fin de obtener un resultado preciso de la simulación numérica, en comparativa al real. El diseño asistido por computadora (CAD), se desarrolló con las medidas proporcionadas por la hoja características de diseño que mostraremos más adelante, al igual que las características eléctricas, y de materiales con lo que se fabricó el transformador de corriente. La simulación numérica se realizó en un software que utilizan el método de elemento finito. El software utilizado es Ansys Electronics; usando la parte de bajas frecuencias, en específico la biblioteca de Ansys Maxwell. La simulación se diseñó en solución trasiente. Esta solución nos permitió analizar en un tiempo específico la señal de entrada y los campos magnéticos inducidos en el secundario del transformador de corriente. La simulación numérica está comprendida por la línea alimentación que tiene como carga un motor de corriente alterna (CA) alimentado a 120V 60Hz; la línea de alimentación del motor de CA será considerada como el primario del transformador de corriente, y el secundario del transformador es la bobina con el núcleo.

Palabras clave: Simulación numérica, trasformador de corriente, inducción magnética, e industria 4.0.

1. Introducción

Actualmente, en la industria se desarrollan infinidad de prototipos para los nuevos diseños de los productos. El diseño de un trasformador de corriente, por ejemplo, pasa por una gama de prototipos y pruebas antes de contar con el desarrollo final. Esto representa una inversión significativa en el desarrollo de los prototipos, por lo que una alternativa para evitar la fabricación de múltiples prototipos y en consecuencia la disminución de costo de producción y tiempo, es utilizar la simulación numérica; también para validar, comprobar el funcionamiento de los productos ya existentes, prediciendo fenómenos no considerados.

La simulación numérica es parte fundamental de la industria 4.0, ya que como se sabe tiene muchos beneficios en la parte del desarrollo de nuevos productos, validación de productos y mejora de los productos ya existentes. Desarrollar nuevos productos virtualmente y mejorarlos nos ayuda a disminuir los riegos que normalmente conllevan los nuevos desarrollos. Técnicas como la optimización topológica para la disminución de material, el diseño de gemelos digitales para virtualización real de sistemas, etc. Son técnicas que el día de hoy son tecnologías que se está aplicando en la industria 4.0.



La inducción magnética para la generación de transformadores de corriente o sensores

de inducción magnética es un tema de interés en las empresas que producen este tipo de producto y que generalmente trabajan con máquinas o herramientas que funcionan con este mismo principio. Con la implementación de la simulación numérica facilita el desarrollo de los productos, y valida el funcionamiento de estos tanto en forma experimental como analíticamente.

Un transformador de corriente es un dispositivo que tiene una vida útil casi eterna, sin embargo, a partir de diversos estudios se ha demostrado que la edad media para los transformadores en general es de los 25 a 30 años, durante este lapso los transformadores de corriente se encuentran sometidos a diferentes estados de carga y de sobretensiones transitorias que influyen en el grado de envejecimiento [1]. Con la validación de la simulación podemos conocer los factores antes mencionados y colocarlos en la hoja final de especificaciones del diseño final, y por lo tanto dar garantía a los usuarios y la eficiencia de funcionamiento del trasformador de corriente, y el tiempo de vida del dispositivo.

2. Experimentación

El desarrollo de la simulación numérica para la validación del transformador de corriente, consta de diferentes etapas. La creación de la geometría descrito como el diseño asistido por computadora (CAD), la colocación de la excitación, la caracterización de los materiales, la configuración de la solución, y por último la interpretación de resultados.

2.1 Geometría

El desarrollo de la geometría del transformador de corriente [3] se diseñó conforme a los datos que tiene la hoja de especificaciones donde describimos los datos necesarios para generar el diseño, Este mismo consta del núcleo, bobina, y cable (primario). Como se muestra en la figura1, que es el diseño del núcleo, y en la figura 2 el diseño de la bobina con la carcasa.



Figura 1. Información del CAD del núcleo.





Figura 2. Información eléctrica y del CAD de la bobina, con la carcasa que la cubre.

Con los datos mostrados se realizó el CAD del sistema. Como ya se había mencionado este CAD está compuesto por tres componentes (toroide, bobina, y el cable o línea que es el secundario). Como se muestra en la figura 3.

2.2 Excitación

Dentro del CAD de la bobina se generó un corte; la función que tiene de ese corte, es el de poder colocar una excitación [4], y esa excitación corresponde al valor inducido por el primario en el trasformador de corriente, que es el valor que calculara el software. En la figura 4, se ve la colocación de la excitación en la bobina, y las flechas amarillas indican la dirección de la corriente excitada en el transformador de corriente debido a la inducción magnética del primario.





Figura 3. CAD del sistema utilizado en la simulación



Figura 4. Corte y dirección de la corriente

En este caso el software calculara la corriente que se genera debido a la inducción magnética provocada por la línea. Por lo tanto, los valores colocados para caracterizar la excitación en el secundario fueron obtenidos con los valores que podemos encontrar la hoja de datos que representa la figura 2. Por lo que los datos proporcionados al software para la configuración de la excitación del secundario (trasformador de corriente), son los mostrados en la tabla 1.

Descripción	Valor
Número de vueltas	2000
Resistencia	4.8 Kohm
Inductancia	100 H
Voltaje	0 (Valor que calculará el software)

Tabla 1	I Datos	de entrada	nara la	excitación	en el	secundario
Tabla	1. Datos	ue enuaua	para ra	excitation	CII CI	Secultuallo

La línea tiene una excitación de entrada y una de salida, este valor de excitación corresponde al valor de entrada y frecuencia. En la figura 5 se muestra la entrada y salida de la excitación de la línea.

Los datos proporcionados al software para la configuración de la excitación del primario (línea de entrada), son los mostrados en la tabla 2.







Figura 5. Entrada y salida de corriente de línea.

Descripción	Valor			
Número de conductores	80 cable lits wire			
Resistencia	7 Ohm			
Inductancia	40 H			
Voltaje	120*sin(2*pi*60*time)			

El voltaje de entrada está definido por la siguiente ecuación:

$$V_{in} = 120 * \sin(2 * pi * 60 * t) \tag{1}$$

Donde: 120 es la amplitud de la señal. El argumento de la función del seno este compuesto por *t* (time) que es el tiempo de aplicación, *pi* son los grados de la onda, 60 es la frecuencia de la señal, y por último el 2 representa la multiplicación por pi para generan los 360 grados de la senoide.

2.3 Caracterización de materiales

Sobre la caracterización de los materiales utilizados en la simulación, son los mismos que especifican en las hojas de datos que retomamos [5]. Para el núcleo se introdujeron los siguientes datos como se muestran en la tabla 3.

Para la bobina se utilizó cobre, que es un material que se encuentra dentro de las bibliotecas de materiales que tiene el software.

Las librerías de materiales contienen los datos necesarios para el cálculo que requiere el software para obtener los resultados deseados.



MATERIAL PROPERTIES								
Project	Unit Symbol	Reference value						
Saturated magnetic induction strength (B_s)	Т	1.20						
Initial Permeability (µj)	-	8.0×10 ⁴						
Max. Permeability (µ _{màx})	-	40×10 ⁴						
Curie Temperature (Tc)	℃	570						
Filling Coefficient (k)	-	> 0.7						

Tabla 3. Datos del núcleo del transformador de corriente.

2.4 Configuración de solución

Para la configuración de los análisis de solución se muestra en la figura 6.

Stop time:	0.048	s 💌
Time step:	0.001665	s 👻

Figura 6. Configuración de setup.

Para esta configuración, se desea mostrar el resultado de tres ciclos de entrada de la línea, y esos tres ciclos muestreados en treinta pasos. Lo que significa que el software realizara un análisis de treinta pasos dividido en los tres ciclos, que es el tiempo corresponde a 0.001665 segundos (Primer paso) y 0.048 segundos, que es el tiempo que transcurren en los tres ciclos [6].

3 Resultados

Los resultados que se mostrarán serán en dos partes. En la primera parte se obtendrán la visualización de la densidad de campo magnético (*B*), tanto en el primario como en el secundario, esto para corrobora que el sistema tenga una coherencia en el funcionamiento. En la segunda parte se mostrarán las gráficas del voltaje inducido en el trasformador de corriente, así como la gráfica real obtenida en el osciloscopio del voltaje inducido en el trasformador de corriente real.

3.1 Visualización de la densidad del campo magnético

En la figura 7 se muestra la línea primaria y el transformador de corriente en una vista lateral, el resultado que se observa es la inducción generada por la línea principal en el núcleo del transformador, tal como se muestra tiene el mayor valor numérico en todo el sistema. Esto nos indica que el funcionamiento de la simulación numérica del sistema es correcto, como es sabido esto es el principio de funcionamiento de un transformador de inducción magnética, ya que conduce el flujo magnético por el núcleo, y este flujo hace que se genere un voltaje inducido en la bobina del transformador de corriente.

En la figura 8 se muestra la vista frontal del trasformador de corriente y la línea principal, donde al igual que la figura 7, podemos observar que el mayor valor numérico lo tiene el núcleo, con lo que podemos resaltar que los resultados son coherentes.













Figura 8. Vista Frontal

3.2 Visualización del voltaje inducido de la simulación numérica

Por último, visualizamos los resultados obtenidos en la simulación numérica como se muestra en la figura 9, la cual es comparable con la lectura real de un osciloscopio representada en la figura 11.



Figura 9. Resultado de la señal de voltaje inducido en el transformador de corriente.

Lo que se ve en la figura 9 es el resultado obtenido en el transformador de corriente, donde llega a un máximo pico de 7.6 V. Este valor se puede ver en el recuadro que se encuentra marcado con color verde, en la esquina superior izquierda de la figura 9.

3.3 Visualización del voltaje inducido en el transformador de corriente real

Para obtener la señal inducida en el trasformador de corriente real, y compararla con el de la simulación, se realizaron los siguientes pasos. El primer paso fue colocar el trasformador de corriente dentro de la línea que alimenta un motor de corriente alterna. El segundo paso fue el de conectar una resistencia de 1kohm como carga en la salida de la bobina del transformador de corriente, y por último conectar paralelamente las puntas de osciloscopio en la salida del transformador de corriente para obtener el voltaje inducido, tal y como se muestra en la figura 10.





Figura 10. Conexión del transformador de corriente en la línea de alimentación del motor

Por último, la gráfica obtenida en el osciloscopio al conectarlo en las puntas de salida del trasformador de corriente, en paralelo a la resistencia de carga donde podemos observar que la amplitud es de 7.33 V, esto se debe a que en la simulación tenemos circunstancias ideales que de manera física no son obtenidas y por ello tenemos un margen de error de \pm 0.035%, como se muestra en la figura 11.



Figura 11 gráfica de salida del voltaje inducido en el transformador de corriente real.

4 Conclusiones

Como conclusiones podemos comentar, que la señal que nos proporciona la simulación numérica del transformador de corriente es muy similar a la señal del transformador de corriente real, donde solo existe diferencias de decimas de volts. Esto fue logrado gracias a que se consideraron la mayoría de variables que involucraron al sistema. Por ejemplo, las características del material del núcleo que se introdujeron al software incluyendo la gráfica B-H; esto fue primordial para poder obtener este resultado, ya que como es sabido en núcleo dentro del transformador de corriente. Al igual se consideraron todas las propiedades de cobre, propiedades como la permeabilidad relativa, conductividad eléctrica, la densidad de masas, el módulo de Young, por mencionar algunas. Por lo que definitivamente en una simulación



numérica si no se cuenta con esta información difícilmente se podrá obtener un resultado preciso como en este caso. En este caso, afortunadamente para esta simulación obtuvimos toda esa información gracias a nuestro equipo de desarrollo, que proporciono toda la información necesaria para el desarrollo de esta simulación. Un aventaja de utilizar este software Ansys, en específico Ansys Maxwell, fue que el software contiene una amplia librería de materiales utilizados para el desarrollo de transformadores. Esto a su vez permitió complementar la información necesaria para caracterización de los materiales en la simulación numérica de este transformador de corriente. Otro factor importante que facilito la simulación, fue la técnica que utiliza el software para la discretización del sistema (en mallado), la técnica que utiliza el software para el en mallado del CAD, es la malla adaptativa. Este tipo de técnica de malla adaptativa facilita el trabajo de la generación de la malla, esto gracias a que el software contiene internamente algoritmos genéticos cuya función es la de adaptar la mejor malla al sistema, considerando como puntos importantes las excitaciones colocadas en el CAD.

Respecto a la validación por medio de simulación numérica, sin duda alguna permitió darle un soporte analítico al dispositivo. Estos datos obtenidos en la simulación numérica, la empresa los integrará en la hoja de datos del transformador de corriente, para dar más soporte técnico e información al usuario. Por último, deseamos seguir implementando la simulación numérica como parte de sus procesos para el desarrollo de nuevos productos y optimización topológica de los productos que actualmente tienen ya desarrollados, por lo que en esa empresa se puede decir, que están ya implementado uno de los pilares de la industria 4.0 que es la simulación numérica. Poco a poco la industria mexicana tendrá que adoptar estas tecnologías como apoyo para el desarrollo y mejora de sus productos que fabrican.

Referencias

- [1] Dianelis Abreu Alemida . (2010). simulación Dinamica de Transformadores. Facultad de Ing. Eléctrica. UCLV.
- [2] Eduardo Frías Valero. (22 de enero de 2016). MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS (MEF) de Departamento de Ingeniería Eléctrica. UPC.
- [3] Severino Argüelles García. TRANSFORMADORES. de SEMINARIO DE TECNOLOGÍA Sitio web: http://www.ingenieros.es/files/Proyectos_1/ELECTROTECNIA_TRANSFORMADORES.pdf
- [4] khanacademy. (1017). ¿Qué es la ley de Faraday?, de ¿Qué es la ley de Faraday? Sitio
- [5] web: https://es.khanacademy.org/science/physics/magnetic-forces-andmagneticfields/magnetic-flux- faradays-law/a/what-is-faradays-law
- [6] R. E. Álvarez, M. del pozo. (24 mayo 2007). Mantenimiento de transformadores de
- [7] potencia. de cigre Sitio web: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/36793/Documento-
- [8] %20completo.04 Alvarez.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [9] Ana María de la cruz. (mayo 30, 2019). Tipos De Transformadores De Potencia, Que Son
- [10] Y Cómo Funcionan. de Unitaria Sitio web: https://unisalia.com/tipos-de-transformadoresde-potencia/
- [11] Héctor Daniel Villanueva Hernández. (2007). Obtención de parámetros en transformadores mediante elementos finitos usando ANSYS. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.



Diseño de Banco de Pruebas de Sistema Pelota y Plataforma por medio de Visión Artificial

Ortega Cisneros Benjamín Eliel, Ramírez Villa Goretti, Traslosheros Michel Alberto y Torres Rivera Moisés.

Universidad Aeronáutica en Querétaro

Resumen

Con la finalidad de estudiar metodologías asociadas a la identificación y control de sistemas, se propone el desarrollo de un sistema que a través de una cámara web y la implementación de algoritmos de visión artificial permitan conocer la posición de una pelota en una plataforma cuyo movimiento es ajustado a través de dos servomotores. Se desarrolla un prototipo en el que se realizan pruebas de procesamiento de los datos obtenidos con la cámara web y una vez optimizado el algoritmo de visión se ejecutan algunos experimentos para recopilar información que permita la identificación paramétrica del sistema retroalimentado por medio del método de mínimos cuadrados.

Palabras clave: Sistema pelota y plataforma, visión artificial, modelo matemático, sistemas de control,

1. Introducción

El desarrollo de sistemas de control ha permitido mejorar las capacidades en diferentes áreas de la ingeniería, por ello, el estudio de sistemas simplificados permite el entendimiento de metodologías desde la perspectiva clásica del control automatizado hasta nuevos esquemas aplicables a sistemas complejos. Un ejemplo de ello es el sistema pelota y plataforma; el cual se basa en el problema de "bola en viga", agregándole un nivel de desafío al implicar el control de la posición angular de un plato con dos grados de libertad. La idea principal es tener una placa movible y enganchada a dos servomotores que se encargarán de mantener una bola siempre en el centro del plato en presencia de perturbaciones. Cuando la pelota comience a moverse, rodará por el extremo del plato si no se toman medidas de control.

El sistema descrito anteriormente ha sido un tema de interés abordado en la literatura desde diferentes perspectivas. En (Medina Cervantes et al., 2017) se desarrolla un prototipo con la finalidad de apoyar el aprendizaje de estudiantes en temas relacionados con sistemas control procesando las imágenes en MATLAB e implementando un controlador PID en un microcontrolador. La implementación de este sistema para fines didácticos es muy popular, por ejemplo, en el Centro de Técnicas Modernas de Control e Informática Industrial (CMCT\& II), FEEI, TUKE cuentan con un prototipo para fines de investigación, en el cual se explora la implementación de aplicaciones con altas exigencias en el rendimiento del hardware, donde se requieren tasas de muestreo más altas de los algoritmos de control (Březina et al., 2019). Otro ejemplo se aborda en (Fabregas et al., 2017) pues se ha desarrollado un laboratorio en la Universidad Complutense de Madrid, compuesto por dos partes, la primera es un laboratorio virtual desarrollado en Easy Java Simulations (EJS), que es una simulación 3D interactiva del sistema; y como segunda parte un laboratorio remoto (desarrollado con EJS y LabVIEW) para conectarse vía Internet a una planta piloto del sistema.

El sistema pelota y plano presenta varios desafíos como lo son la integración de tecnología que permita desarrollar un prototipo adecuado, el modelado matemático, el desarrollo de algoritmos de visión por computadora que permitan identificar correctamente al cuerpo en movimiento, el diseño del



controlador, etc. La comunidad científica ha desarrollado diferentes soluciones a muchos de las dificultades que presenta este sistema, proponiendo diferentes herramientas y metodologías.

Por ejemplo, para el procesamiento de imagen en (Krishnan Kiran G. and Dutta, 2020) se propone utilizar OpenCV mientras que en (Ho et al., 2013) se canalizan e implementan en un FPGA algoritmos de procesamiento de imágenes con la finalidad de trabajar en tiempo real, mientras en (Moarref et al., 2008) se introduce una técnica heurística para el procesamiento de imágenes.

El diseño de sistemas de control adecuados que permitan mantener la pelota en equilibrio en el sistema antes mencionado ha sido ampliamente estudiado, logrando el diseño e implementación de diferentes estrategias de control. En (Pahlawan et al., 2021) se propone un controlador PID implementado en un microntrolador, en (Parandian et al., 2015) se explora la implementación de una red neuronal artificial para resolver el sistema. La perspectiva de control adaptativo es explorada en (Xiao & Buttazzo, 2016). Otras perspectivas de control como LQR y modos deslizantes se exploran en (Spacek Lubos and Bobal, 2017) y (Debono & Bugeja, 2015) respectivamente.

Sin duda alguna hay muchos enfoques de control para abordar el sistema pelota y plano, y estos permiten comparaciones relevantes asociadas con los requerimientos del sistema y las características de cada esquema propuesto. En (Bdoor et al., 2016) se proponen diferentes técnicas de control haciendo un énfasis de comparación entre estrategias clásicas y modernas. Por otro lado, en (Spacek Lubosand Bobal, 2017) se implementa un controlador LQR que permita determinar el camino correcto a través de un laberinto y hacer que la bola navegue por dicho camino. En (Debono & Bugeja, 2015) se propone e investiga la aplicación del control por modo deslizante al problema de la bola y el plano.

Como se puede observar este tipo de plataformas permite aplicar la teoría de control por medio de diferentes herramientas, así como la implementación de software y hardware mientras resuelven un problema de regulación de posición. Es por ello que muchos de los desarrollos asociados al sistema de pelota persiguen objetivos relacionados con el aprendizaje en un entorno estudiantil o la investigación científica como se plantea en: (Bay & Rasmussen, 2016), (Stander et al., 2017), (Březina et al., 2019) entre otros.

El objetivo de este tipo de plataformas educativas es estudiar las características de diferentes sistemas de control e incluso hacer una comparativa que facilite la implementación de sistemas de control de acuerdo con sus requerimientos como se explora en (Morales et al., 2017).

En este artículo se presenta el diseño y desarrollo de un sistema pelota y plataforma, con la finalidad de que en un futuro se puedan explorar y comparar diferentes sistemas de control con base en la dinámica del sistema propuesto. Para lograrlo, una parte importante de este proyecto es obtener el modelo matemático del sistema a partir de la identificación, así como proponer un esquema de control preliminar.

2. Desarrollo del prototipo

La estructura del sistema de pelota y plataforma fue desarrollada mediante un programa CAD/CAM (Solidworks), para visualizar el comportamiento físico de la estructura mediante acotaciones y restricciones (límite del motor). Una vez validado el diseño 3D, se procedió a exportar los archivos en STL, y con ayuda de un programa de slicing (Cura) poder imprimir en 3D las piezas de acople motor plataforma. Dicho programa nos permite tener un control del peso y estructura interna de la pieza a imprimir, lo cual mejora el rendimiento del motor debido a que minimiza el esfuerzo dado por este (torque).

Suponiendo que se realiza la impresión 3D de todo el prototipo se incrementarían los costos y el tiempo de desarrollo, por lo cual, se decidió utilizar madera para la base y para la plataforma se utilizó MDF como se puede apreciar en la Figura 1.





Figura 1. Ensamblaje parcial del sistema pelota y plataforma.

2.1 Adquisición de datos

El primer paso para obtener la posición de la pelota fue identificarla en el plano. Para esto debemos definir la imagen capturada con ayuda de OpenCV utilizando Qt como entorno de desarrollo en C++, de esta forma la cámara se utilizó como un sensor para capturar las imágenes a procesar. Se debe hacer una conexión serial para comunicar la posición obtenida con el microcontrolador. El diagrama de flujo para realizar el proceso de adquisición se muestra en la figura 2.



Figura 2. Diagrama de flujo para la obtención de datos.



3. Identificación del sistema

Una vez desarrollado el prototipo se requería realizar un modelo matemático del sistema; ya que como paso previo a la implementación de un sistema de control es necesario conocer la función de transferencia que modela un sistema. La identificación de sistemas juega un papel de gran importancia en el desarrollo de nuevas estrategias de control con alta precisión, respuesta rápida y robustez a perturbaciones externas e incertidumbres.

Debido a la respuesta dinámica del sistema se recurrió a un método de identificación en lazo cerrado. La figura 3, nos muestra el esquema de control propuesto, como se puede observar primero se tiene el control del sistema con su respectiva salida hacia el bloque de la planta, que corresponde a los dos servomotores (los cuales modelaremos como motores DC) que mueven la plataforma en el eje x y en el eje y; el siguiente bloque es la cámara que se comunica con la computadora mediante USB (la tasa de muestreo de la cámara es de 30 cuadros por segundo). A la derecha se puede ver el bloque de la computadora, que desempeña el procesamiento de las imágenes con la finalidad de obtener la posición y referencia para enviarla al microcontrolador, en el que se encuentra implementado el sistema de control, en la siguiente sección describiremos con más detalle los bloques del control y la planta.



Figura 3. Esquema de control del sistema.

Para el análisis del sistema descompondremos la planta en los siguientes elementos: el control (diseño a priori), el control de posición del motor (internamente cada servomotor tiene uno), motores (uno para cada eje), la plataforma, la pelota y la cámara que retroalimentar al sistema. El control se encarga de introducir la corriente a cada uno de los motores, que a su vez mueven internamente un arreglo de engranajes para modificar la inclinación de la plataforma con un torque entregado por cada motor, esta inclinación tiene como efecto que se origine un movimiento a lo largo del eje x y y de la plataforma, lo cual se aprecia en el diagrama de bloques de la figura 4.



Figura 4: Esquema de bloques del control de la planta.

3.1 Modelado del motor

La figura 5 presenta las características eléctricas y de par de un motor de DC que se utilizó para modelar el mismo que se usara en esta sección:





Figura 5: Circuito equivalente de un motor DC tomado de (Bolton, 2003).

Donde R corresponde a la resistencia de la armadura y L corresponde a la inductancia de la armadura. V es el voltaje con el que se alimenta el circuito, también sabemos que el par del motor es proporcional a la corriente del motor i y se define como:

$$T_E = k_t i \tag{2}$$

Por lo tanto,

$$\frac{T_E}{i} = k_t \tag{3}$$

Donde k_t es la constante de torque del motor (Bolton, 2003) La función de transferencia del motor para esta aplicación es constante.

3.2 Modelado de la plataforma

La figura 6 es la representación de la plataforma vista de forma lateral que se utilizó para obtener la función de transferencia para cada eje.



Figura 6: Vista lateral del sistema pelota plataforma, figura tomada de (Nokhbeh & Khashabi, 2011).

La energía cinética de la plataforma (despreciando la influencia del peso y la inercia de la pelota sobre la plataforma) se expresa como:

$$T_p = \frac{1}{2} I_P \left(\dot{\alpha}^2 + \dot{\beta}^2 \right) \tag{4}$$

Donde α y β son el ángulo de inclinación de la plataforma respecto al eje x y del eje y, respectivamente. Por lo tanto $\dot{\alpha}$ y $\dot{\beta}$ son la rapidez de rotación de la plataforma e I_p es el momento de inercia de la plataforma, entonces: $L = T_p$ y conociendo esto, podemos obtener las ecuaciones de Euler-Lagrange:



$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} = I_p \dot{\alpha} \tag{5}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\beta}} = I_p \dot{\beta} \tag{6}$$

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} - \frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} = I_p \ddot{\alpha} - I_p \dot{\alpha}$$
(7)

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{\beta}} - \frac{\partial L}{\partial \dot{\beta}} = I_p \ddot{\beta} - I_p \dot{\beta}$$
(8)

Y a partir de la ecuación (7) y (8), se puede obtener la función de transferencia dado un torque de entrada a la plataforma.

$$\tau_x = I_P \ddot{\alpha} + I_P \dot{\alpha} \tag{9}$$

$$\tau_Y = I_P \ddot{\beta} + I_P \dot{\beta} \tag{10}$$

Utilizamos la transformada de Laplace para obtener las funciones de transferencia a partir de las ecuaciones (9) y (10), entonces:

$$\tau_x(s) = I_P \alpha(s) s^2 + I_P \alpha(s) s \tag{11}$$

$$\tau_{y}(s) = I_{P}\beta(s)s^{2} + I_{P}\beta(s)s$$
(12)

Agrupamos:

$$\tau_{\chi}(s) = \alpha(s)(I_P s^2 + I_P s) \tag{13}$$

$$\tau_{y}(s) = \beta(s)(I_{P}s^{2} + I_{P}s)$$
(14)

Y obtenemos la función de transferencia para cada eje:

$$\frac{\alpha(s)}{\tau_x(s)} = \frac{1}{I_P s^2 + I_P s} \tag{15}$$

$$\frac{\beta(s)}{\tau_{\gamma}(s)} = \frac{1}{I_P s^2 + I_P s} \tag{16}$$

3.3 Modelado de la pelota sobre un plano inclinado

La figura 7 representa a la pelota sobre un plano (plataforma), de la misma manera se tiene una vista lateral para obtener el modelado de la pelota.







La energía cinética de la pelota se compone de su energía de rotación con su respectivo centro de masa y de su energía de traslacional, que se describe de la siguiente manera:

$$T_b = \frac{1}{2}m_b(\dot{x}_b^2 + \dot{y}_b^2) + \frac{1}{2}I_b(\omega_x^2 + \omega_y^2)$$
(17)

Donde:

- m_b = Es la masa de la pelota en kg.
- I_b = Es el momento de inercia de la pelota Nms^2/rad .
- \dot{x}_b, \dot{y}_b = Es la velocidad de traslación de la pelota a lo largo de su respectivo eje en m/s.
- ω_x, ω_y = Es la velocidad de rotación de la pelota a lo largo de su respectivo eje rad/s.

La relación entre las velocidades de traslación y las velocidades de rotación son:

$$\dot{x}_b = r_b \omega_y \tag{18}$$

$$\dot{y}_b = r_b \omega_x \tag{19}$$

En la que r_b es el radio de la pelota en m. Ahora sustituimos las ecuaciones (18) y (19) y obtenemos:

$$T_b \frac{1}{2} = m_b \left[(\dot{x}_b^2 + \dot{y}_b^2) + \frac{I_b}{r_b^2} (\dot{x}_b^2 + \dot{y}_b^2) \right] = \frac{1}{2} \left(m_b + \frac{I_b}{r_b^2} \right) (\dot{x}_b^2 + \dot{y}_b^2)$$
(20)

La energía potencial de la pelota en relación con el plano horizontal de la plataforma inclinada, la cual se puede calcular como:

$$V_b = m_b g = m_b g(x_b \sin \alpha + y_b \sin \beta)$$
(21)

Ahora podemos obtener las ecuaciones del sistema por el Lagrangiano, que definimos como:

$$L = T_b - V_b \tag{22}$$

$$L\frac{1}{2}\left(m_{b} + \frac{I_{b}}{r_{b}^{2}}\right) = (\dot{x}_{b}^{2} + \dot{y}_{b}^{2}) - m_{b}g(x_{b}\sin\alpha + y_{b}\sin\beta)$$
(23)

Usamos L para derivar el sistema de ecuaciones:

$$\frac{\partial L}{\partial x_b} = m_b g \sin \alpha \tag{24}$$

$$\frac{\partial L}{\partial y_b} = -m_b g \sin\beta \tag{25}$$

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_b} = \left(m_b + \frac{I_b}{r_b^2}\right) \ddot{x_b}$$
(26)

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{y_b}} = \left(m_b + \frac{I_b}{r_b^2}\right) \ddot{y_b}$$
(27)

Obtenemos las ecuaciones de Euler-Lagrange:



$$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_b} - \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_b} = \left(m_b + \frac{I_b}{r_b^2}\right) \ddot{x}_b + m_b g \sin \alpha$$
(28)

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{y}_b} - \frac{\partial L}{\partial \dot{y}_b} = \left(m_b + \frac{I_b}{r_b^2}\right) \ddot{y}_b + m_b g \sin\beta$$
⁽²⁹⁾

Para simplificar el sistema obtenido se linealizan las ecuaciones anteriores, considerando el valor aproximado del momento de inercia de una bola sólida es $I_{ball} = \frac{2}{5}m_b r_b^2$. Por lo tanto, las ecuaciones (28) y (29) pueden escribirse como:

$$m_b \left[\frac{5}{7} \ddot{x_b} + g \sin \alpha \right] \tag{30}$$

$$m_b \left[\frac{5}{7} \ddot{y_b} + g \sin\beta\right] \tag{31}$$

Podemos linealizar las ecuaciones anteriores suponiendo que para un pequeño ángulo de inclinación de la plataforma($\pm 10^{\circ}$) :

$$\alpha \ll 1 \to \sin \alpha \approx \alpha \tag{32}$$

$$\beta \ll 1 \to \sin \beta \approx \beta \tag{33}$$

Por lo cual podemos escribir a las ecuaciones (30) y (31) como:

$$m_b \left[\frac{5}{7} \ddot{x_b} + g\alpha\right] \tag{34}$$

$$m_b \left[\frac{5}{7} \ddot{y_b} + g\beta\right] \tag{35}$$

A partir de la ecuación (34) y (35) se puede obtener la función de transferencia para el eje x:

$$\mathcal{L}\left\{\frac{5}{7}\ddot{x_b} + g\alpha\right\} = 0 \tag{36}$$

$$\frac{5}{7}s^2y_b(s) + g\alpha(s) = 0$$
(37)

$$\frac{5}{7}s^2x_b(s) = -g\alpha(s) \tag{38}$$

$$\frac{X_b(s)}{\alpha(s)} = -\frac{g}{\frac{5}{7}s^2}$$
(39)

Para el eje y:

$$\mathcal{L}\left\{\frac{5}{7}\ddot{y_b} + g\beta\right\} = 0\tag{40}$$

$$\frac{5}{7}s^2y_b(s) + g\beta(s) = 0$$
(41)

$$\frac{5}{7}s^2y_b(s) = -g\beta(s) \tag{42}$$



$$\frac{y_b(s)}{\beta(s)} = -\frac{g}{\frac{5}{7}s^2}$$
(43)

3.4 Modelo empleado y simplificaciones

Una vez que tenemos todas las funciones de transferencia del sistema con sus respectivas entradas y salidas, que se observan en la figura 8, donde podemos notar que la figura tiene un cuadrado punteado, que encierra al control del motor, al bloque de la función de transferencia del motor y la función de transferencia de la plataforma, esto nos indica que esta sección tiene una dinámica más rápida que la respuesta de la pelota. Por lo anterior consideramos que los polos de la sección punteada están más alejados que los polos de la pelota, entonces es más significativa la dinámica de la pelota por consiguiente el modelo de la pelota tendrá mayor peso en la identificación.



Figura 8: Funciones de transferencia de cada subsistema de la planta.

Debido a lo anterior nuestro sistema quedaría reducido al siguiente esquema de bloques, donde K presenta al control del motor, a la función de transferencia del motor y de la plataforma.



Figura 9: Esquema de bloques del control de la planta.

Por lo tanto, el modelado empleado es la función de transferencia de la pelota del eje x y y la cuales corresponden a la ecuación (39) y (43) y son multiplicadas por la ganancia k.

$$\frac{X_b(s)}{\alpha(s)} = -\frac{g}{\frac{5}{7}s^2}k$$
(44)

$$\frac{y_b(s)}{\beta(s)} = -\frac{g}{\frac{5}{7}s^2}K$$
(45)

Simplificamos la ecuación (44) y (45) haremos que \bar{a} sea la constante de la función de transferencia:

$$\frac{X_b(s)}{\alpha(s)} = \frac{\bar{a}}{s^2} \tag{46}$$



$$\frac{y_b(s)}{\beta(s)} = \frac{\bar{a}}{s^2}$$

Donde \bar{a} es $\frac{-g}{5/7}K$.

Control a priori

Dado que el sistema es inestable, para poder identificar el sistema se realiza un controlador a priori, el cual tiene como objetivo estabilizar al sistema que interactúa con la pelota para poder aplicar señales y estudiar el sistema de manera que se pueda identificar la función de transferencia. Es preciso señalar que se usó el método de Ziegler Nichols en lazo cerrado para lograr la sintonía del controlador.

Tabla 1: Valores del controlador PD a priori.

Controlador	Valor
Р	0.8
D	16

La integración del control a priori con la función de transferencia obtenida del modelado de la pelota sobre un plano inclinado, la cual podemos ver en la figura 10.



Figura 10: Esquema planta con control a priori.

De la figura 10 podemos deducir que:

$$\frac{P_{ctrl}\frac{\bar{a}}{s^2}}{1 + P_{ctrl}\frac{\bar{a}}{s^2}}$$
(48)

$$\frac{\bar{a}P_{ctrl}}{s^2 + \bar{a}P_{ctrl}} = \frac{\bar{a}(k_p + k_d s)}{s^2 + \bar{a}k_d s + \bar{a}k_p}$$
(49)

La ecuación (49) nos servirá como referencia para la identificación del sistema y proponer un Modelo Autorregresivo de Media Móvil (ARMA) para aplicar el algoritmo de mínimos cuadrados.

4. Descripción del banco de pruebas

De forma general, el sistema consiste en un plano montado sobre una unión universal que permitía el movimiento de la plataforma en los ejes X y Y. Además, la base estaba unida a los servomotores que modifica el ángulo de cada eje respectivamente.

En cuanto a la cámara usada fue una cámara web Logitech C920 con una resolución de 1080p a 30fps con reducción automática de ruido y corrección automática de poca luz y un clip universal para montar sobre un tripee o cualquier superficie desea.





Figura 11: Prototipo en funcionamiento



Figura 12: Base del prototipo.



Figura 13: Soporte para el servomotor.





Figura 14: Cámara web Logitech C920.

5. Identificación del sistema dinámico

La función de transferencia en tiempo continuo del sistema es de segundo orden por lo cual el modelo ARMA a usar tendría que ser de segundo orden, sin embargo, se hicieron pruebas experimentales y se observó que el modelo ARMA de cuarto orden daba mejores resultados para la identificación del sistema dinámico.

Como primer paso proponemos el modelo ARMA de cuarto orden que se expresa como una ecuación racional de polinomios en la cual se agrupan las constantes que se indican como b_n y a_m , esto se hace con el fin de simplificar los polinomios:

$$Y(z) = \frac{Z^4 b_0 + Z^3 b_1 + Z^2 b_2 + Z b_3}{Z^4 a_0 + Z^3 a_1 + Z^2 a_2 + Z a_3}$$
(50)

La ecuación (50) se debe expresar como polinomios en z con exponente negativo esto se puede hacer simplemente multiplicando por el mayor exponente de nuestra función y con eso obtenemos la ecuación (51) y reordenando términos se tiene (52)

$$Y(z) = \left(\frac{Z^4 b_0 + Z^3 b_1 + Z^2 b_2 + Z b_3}{Z^4 a_0 + Z^3 a_1 + Z^2 a_2 + Z a_3}\right) \left(\frac{Z^{-4}}{Z^{-4}}\right)$$
(51)

$$Y(z) = \frac{b_0 + Z^{-1}b_1 + Z^{-2}b_2 + Z^{-3}b_3}{a_0 + Z^{-1}a_1 + Z^{-2}a_2 + Z^{-3}a_3}$$
(52)

Para la aplicación de la identificación a través de mínimos cuadrados y modelo ARMA, se toma como referencia la publicación System Idetification-A Survey (Aström & Eykhoff, 1971)}, que nos muestra que, considerando un modelo lineal, invariante en el tiempo, de tiempo discreto con una entrada y una salida se puede hacer la identificación del sistema, pero primero el modelo tiene que estar en la forma canónica. La cual se muestra a continuación:

$$y_m(k) + a_1 y_m(k-1) + \dots + a_n y_m(k-n) = b_1 u(k-1) + \dots + b_n u(k-n)$$
(53)

Donde u es la entrada y y_m es la salida del modelo. Aplicamos la forma canónica a la ecuación (52):

$$y(k) + a_1 y(k-1) + a_2 y(k-2) + a_3 y(k-3) = b_0 u(k) + b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2) + b_3 u(k-3)$$
(54)

Finalmente, para la identificación se deben acomodar los datos obtenidos del sistema de la siguiente manera $Y = \Phi\beta$. Donde *Y* y Φ son los datos obtenidos de la planta para obtener los parámetros



del modelo ARMA ($b_0, b_1, ..., b_m, a_1, a_2, ..., a_n$), que se contienen en la matriz β . Para formar la matriz Φ , primero despejamos y(k) del modelo ARMA.

$$y(k) = -a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) - a_3 y(k-3) + b_0 u(k) + b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2) + b_3 u(k-3)$$
(55)

Ahora que se tiene lo necesario, pasamos a formar nuestro sistema de matrices que tienen la forma:

$$y = \begin{bmatrix} y(n+1) \\ y(n+2) \\ \vdots \\ y(n+N) \end{bmatrix}$$
(56)

$$\Phi = \begin{bmatrix} -y(n) & -y(n-1) & \cdots & -y(1) & u(n) & u(n-1) & \dots & u(1) \\ -y(n+1) & -y(n) & \dots & -y(2) & u(n+1) & u(n) & \dots & u(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -y(N+n-1) & -y(N+n-2) & \cdots & -y(N) & u(N+n-1) & \dots & \dots & u(N) \end{bmatrix}$$
(57)

$$\beta' = [a_1 a_2 \quad \dots \quad a_n b_1 b_2 \quad \dots \quad b_u]$$
(58)

Modelo Identificado

En esta sección, se divide en dos partes ya que se tiene dos grados de libertad, el primero corresponde al eje x y el segundo al eje y, para cada uno se tiene distintos datos, se utiliza mínimos cuadrados y una vez se tiene β se utiliza Simulink para obtener los nuevos valores del controlador PD a posteriori para cada eje y posteriormente hacer una comparación de los nuevos datos obtenidos con el control PD a posteriori y así realizar una comparación como se apreciará en la siguiente sección.

En el eje y, obtenemos la tabla 2, la cual resultó de realizar diez pruebas, las cuales fueron realizadas de manera arbitraria con el objetivo de tener datos similares y estudiar que tan grande es la dispersión de dichos datos. De igual forma se realizaron diez pruebas para el eje x, que se muestran en la tabla 3.

β	Pr.1	Pr.2	Pr.3	Pr.4	Pr.5	Pr.6	Pr.7	Pr.8	Pr.9	Pr.10	Promedio
<i>a</i> ₁	-1.739	-1.534	-1.672	-1.667	-1.588	-1.564	-1.613	-1.491	-1.352	-1.464	-1.568
<i>a</i> ₂	0.170	0.026	0.011	0.919	0.353	0.225	0.315	0.174	-0.076	-0.176	0.194
<i>a</i> ₃	0.982	0.652	1.072	-0.646	0.281	0.424	0.341	0.322	0.448	0.887	0.476
<i>a</i> ₄	-0.409	-0.123	-0.401	0.406	-0.007	-0.063	-0.028	0.026	0.029	-0.226	-0.080
<i>b</i> ₁	0.017	0.000	0.000	0.015	0.003	0.005	0.007	0.000	0.000	0.117	0.016
b ₂	-0.014	-0.020	0.001	-0.012	-0.002	-0.003	-0.005	-0.071	-0.023	-0.066	-0.022
<i>b</i> ₃	0.032	0.013	-0.001	0.007	-0.004	0.003	0.027	0.042	0.010	-0.055	0.007
<i>b</i> ₄	-0.021	0.006	0.001	0.001	-0.002	0.003	-0.021	-0.017	-0.032	0.058	-0.002

Tabla 2: Pruebas para el eje x.



β	Pr.1	Pr.2	Pr.3	Pr.4	Pr.5	Pr.6	Pr.7	Pr.8	Pr.9	Pr.10	Promedio
<i>a</i> ₁	-1.739	-1.534	-1.672	-1.667	-1.588	-1.564	-1.613	-1.491	-1.352	-1.464	-1.568
<i>a</i> ₂	0.170	0.026	0.011	0.919	0.353	0.225	0.315	0.174	-0.076	-0.176	0.194
<i>a</i> ₃	0.982	0.652	1.072	-0.646	0.281	0.424	0.341	0.322	0.448	0.887	0.476
<i>a</i> ₄	-0.409	-0.123	-0.401	0.406	-0.007	-0.063	-0.028	0.026	0.029	-0.226	-0.080
<i>b</i> ₁	0.017	0.000	0.000	0.015	0.003	0.005	0.007	0.000	0.000	0.117	0.016
<i>b</i> ₂	-0.014	-0.020	0.001	-0.012	-0.002	-0.003	-0.005	-0.071	-0.023	-0.066	-0.022
b ₃	0.032	0.013	-0.001	0.007	-0.004	0.003	0.027	0.042	0.010	-0.055	0.007
<i>b</i> ₄	-0.021	0.006	0.001	0.001	-0.002	0.003	-0.021	-0.017	-0.032	0.058	-0.002

Tabla 3: Pruebas para el eje y.

Una vez que se tiene β podemos graficar los datos muestreados contrastando con la función reconstruida con el algoritmo de mínimos cuadrados, las cuales podemos observar en la figura 15 y figura 16.







Figura 16: Gráfica del eje y.



La metodología propuesta requería identificar el sistema en lazo cerrado con un control a priori para posteriormente sustituir dicho control por un controlador a posteriori diseñado a partir del sistema identificado. Para ello se propone un controlador PD con nuevos valores que permitirá tener un sistema con una respuesta mejorada dado que el controlador ahora se va a diseñar con un modelo que se aproxima de mejor manera y no con la metodología de Ziegler-Nichols. Las figuras 17 y 18 corresponden a la respuesta del sistema con las nuevas ganancias del controlador PD.



Figura 17: Respuesta a entrada escalón eje x.



Figura 18: Respuesta a entrada escalón eje y.

Dentro de los resultados obtenidos finalmente está que los tiempos de asentamiento con las nuevas ganancias del controlador son 5 segundos para el eje x y 5.2 segundos para el eje y, mientras que el sobrepaso es de 37% para el eje x y 28.8% para el eje y lo cual mejora sustancialmente el control a priori alcanzado y estabiliza el sistema que originalmente era inestable, validando así la identificación del sistema y diseño del controlador

6. Conclusiones

A partir de la construcción del sistema se pudo obtener la estructura de la función de transferencia, esto permitió sintonizar un controlador PD con el método de Ziegler-Nichols. El diseño del sistema del control permitió llevar la pelota a los puntos de referencia, dichos datos fueron obtenidos por una cámara web y usando procesamiento de imágenes se obtuvo la posición, posteriormente se aplicó el algoritmo de mínimos cuadrados para obtener una aproximación del sistema y tener un controlador PD con mejor respuesta del sistema ya que las oscilaciones de la pelota se vieron eliminadas, además el tiempo que le tomaba al sistema en estabilizar a la pelota en un punto se vio reducido.



En este trabajo se implementó una metodología para la identificación de sistemas en lazo cerrado, en el cual se revisó y validó la información obtenida en las pruebas, ya que estos datos debían ser procesados por el algoritmo de mínimos cuadrados, pues cualquier modelo estimado a partir de datos contaminados con errores nunca será adecuado.

Por otro lado, es importante la definición de la estructura del modelo, ya que una definición errónea del proceso puede conducir a errores en las estimaciones o a complicar la función de transferencia obtenida, lo cual a su vez dificultará el procesamiento y afectará el tiempo de respuesta del sistema.

Finalmente se puede resaltar que el prototipo desarrollado podrá ser utilizado para diseñar diferentes esquemas de control, considerando la dinámica del sistema y modelos obtenidos en este artículo y permitiendo que se puedan estudiar sistemas con mayor complejidad.

Referencias

Aström, K., & Eykhoff, P. (1971). System identification A survey. Automatica, 7, 123–162.

- Bay, C. J., & Rasmussen, B. P. (2016). Exploring controls education: A re-configurable ball and plate platform kit. 2016 American Control Conference (ACC), 6652–6657. https://doi.org/10.1109/ACC.2016.7526718
- Bdoor, S. R., Ismail, O., Roman, M. R., & Hendawi, Y. (2016). Design and implementation of a visionbased control for a ball and plate system. 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 1–4. https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7910965
- Bolton, W. (2003). Circuito equivalente de un motor DC. In Pearson Education Limited (Ed.), Mechatronics: electronic control systems in mechanical and electrical engineering (Sixth Edition).
- Březina, A., Tkáčik, M., Tkáčik, T., & Jadlovská, S. (2019). Upgrade of the Ball and Plate Laboratory Model. *IFAC-PapersOnLine*, 52(27), 277–282. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.673
- Debono, D., & Bugeja, M. (2015). Application of sliding mode control to the ball and plate problem. 2015 12th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO), 01, 412–419.
- Fabregas, E., Dormido-Canto, S., & Dormido, S. (2017). Virtual and Remote Laboratory with the Ball and Plate System. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 9132–9137. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1716
- Ho, M.-T., Rizal, Y., & Chu, L.-M. (2013). Visual Servoing Tracking Control of a Ball and Plate System: Design, Implementation and Experimental Validation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10(7), 287. https://doi.org/10.5772/56525
- Krishnan Kiran G. and Dutta, K. and E. S. A. and M. M. and J. J. (2020). Control of Two Degrees of Freedom Ball Balancer Using Image Processing. In R. and B. R. and A. G. Saini Harvinder Singh and Sayal (Ed.), *Innovations in Computer Science and Engineering: Proceedings of 7th ICICSE* (pp. 497–507). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2043-3_54
- Medina Cervantes, J., Villafuerte Díaz, R., & Juárez Rivera, V. (2017). Implementación y control del sistema bola en placa. *Revista Electrónica Sobre Tecnología, Educación y Sociedad, 4*.
- Moarref, M., Saadat, M., & Vossoughi, G. (2008). Mechatronic design and position control of a novel ball and plate system. 2008 16th Mediterranean Conference on Control and Automation, 1071–1076. https://doi.org/10.1109/MED.2008.4602212
- Morales, L., Gordón, M., Camacho, O., Rosales, A., & Pozo, D. (2017). A Comparative Analysis among Different Controllers Applied to the Experimental Ball and Plate System. 2017 International Conference on Information Systems and Computer Science (INCISCOS), 108–114. https://doi.org/10.1109/INCISCOS.2017.27

Nokhbeh, M., & Khashabi, D. (2011). *Modelling and Control of Ball-Plate System*.

Pahlawan, D. A., Wibowo, A. S., & Susanto, E. (2021). Realization of Ball on Plate Control using PID Controller and Webcam. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1077(1), 12056. https://doi.org/10.1088/1757-899x/1077/1/012056



- Parandian, Y., Arabshahi, H. Z., Nasr, A., & Moosavian, S. A. A. (2015). Time optimized digital image processing of ball and plate system using artificial neural network. *2015 3rd RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM)*, 146–151. https://doi.org/10.1109/ICRoM.2015.7367775
- Spacek Lubos and Bobal, V. and V. J. (2017). Maze Navigation on Ball & Plate Model. In R. and K. O. Z. and P. Z. and S. P. Silhavy Radek and Senkerik (Ed.), *Cybernetics and Mathematics Applications in Intelligent Systems* (pp. 206–215). Springer International Publishing.
- Stander, D., Jiménez-Leudo, S., & Quijano, N. (2017). Low-Cost "ball and Plate" design and implementation for learning control systems. 2017 IEEE 3rd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC), 1–6. https://doi.org/10.1109/CCAC.2017.8276472
- Xiao, J., & Buttazzo, G. (2016). Adaptive Embedded Control for a Ball and Plate System. ADAPTIVE 2016: The Eighth International Conference on Adaptive and Self-Adaptive Systems and Applications, 40–45.



Análisis de Modelos de Segmentación de Atrofia Peripapilar Alfa y Beta en Imágenes de Fondo de Ojo

Anguiano Almejo Javier¹, Hernández Nava Gerardo¹ y Alfonso Francia Gendry¹

¹Universidad Autónoma de Querétaro Anguiano_javier@outlook.com

Resumen

La atrofia peripapilar (APP) es un hallazgo clínico que refleja la atrofia de la capa de la retina y el epitelio pigmentario de la retina. La extensión y el desarrollo de la APP son factores de evaluación médica de interés para los especialistas de la visión, ya que se relacionan estrechamente con la gravedad de diversas enfermedades y afecciones oculares, lo cual destaca la importancia de separar el área APP de las imágenes retinianas. Esta es una tarea desafiante debido a que las áreas de APP son irregulares y no uniformes con cambios graduales en sus límites. En este trabajo se comparan los modelos: Segnet, Segnet Mobilenet, Segnet Vgg, Segnet Resnet50, Unet ,Unet Vgg, Unet Resnet50, Unet Mobilenet, Unet Mini, FCN 8, FCN 8 Vgg, FCN 8 Mobilenet, FCN 32, FCN 32 Vgg y FCN 32 Mobilenet; mediante puntuaje f1, intersección sobre la unión, sensitividad y precisión. Se utiliza una muestra de 300 del conjunto de datos ORIGA, que contiene imágenes de fondo de ojo de pacientes sanos y con glaucoma. Como resultado se observó que las redes MobileNet obtuvieron métricas superiores al resto, entre ellas se destacó Unet Mobilenet.

Palabras clave: Atrofia Peripapilar, Segmentación, Aprendizaje Profundo, Visión Artificial, Glaucoma, Redes Neuronales.

1. Introducción

El análisis automatizado de imágenes biomédicas es un área de gran interés en la inteligencia artificial (IA), dada su relevancia en el apoyo al diagnóstico de enfermedades. La oftalmología es un área de la medicina, donde se han incorporado técnicas de IA para agilizar el trabajo de los médicos. El estudio de fotografías de fondo de ojo es una de ellas, ya que, a partir de estas, es posible determinar enfermedades como glaucoma, hipertensión, retinopatía diabética y degeneración macular [1].

En el análisis de imágenes de fondo de ojo, se pueden examinar diferentes estructuras morfológicas, entre las que se encuentran: el disco óptico, nervio neuro retiniano, capas de fibras nerviosas retinianas, atrofia peripapilar (APP) y hemorragias retinianas o del disco óptico [2]. Estudios clínicos ha demostrado que la APP presenta una fuerte correlación con el diagnóstico de glaucoma [3]. La APP es un biomarcador que se expresa como un adelgazamiento y degeneración del tejido coriorretiniano alrededor del nervio óptico [4]. El área de APP se puede presentar como una estructura de medialuna o de circunferencia completa en la periferia del nervio óptico con bordes irregulares. Esta suele estar conformada por dos tipos: la zona alfa y la zona beta [5].

La zona alfa, se caracteriza por una región de hiper e hipopigmentación irregular del epitelio pigmentario de la retina (EPR) y generalmente se encuentra en pacientes con miopía [6]. La zona beta se expresa con mayor frecuencia en pacientes con glaucoma, que tiene como característico



una pigmentación con alta iluminación a diferencia de la zona alfa, que presenta una pigmentación de baja iluminación [3], [7].

Ambos tipos de APP están ubicados fuera del área del disco óptico (DO). La zona beta bordea directamente al DO, mientras la zona alfa, se encuentra adyacente a la periferia de la zona beta [4]. En la Figura 1, (a) se muestra un acercamiento del nervio óptico en una imagen de fondo de ojo con área de APP alfa y beta. Mientras que en la Figura 1, (b) muestra la atrofia beta delimitada por una región blanca y el daño alfa por una región gris.



Figura 1. Imagen de fondo de ojo con atrofia peripapilar alfa y beta, imagen modificada de [8]. (a) Acercamiento de DO. (b) Área de APP alfa y beta delimitada.

La extensión y el desarrollo de la APP son factores de evaluación médica de interés para los especialistas de la visión, ya que, se relacionan estrechamente con la gravedad de diversas enfermedades y afecciones oculares [3], [7]. Lo cual destaca la importancia de separar el área APP de las imágenes retinianas. Aunque los resultados de la segmentación fina pueden ser generados por oftalmólogos experimentados, el proceso de segmentación manual es tedioso y requiere mucho tiempo [9]. Por lo tanto, es importante diseñar un modelo para segmentar APP automáticamente.

Durante la investigación de los últimos avances en el desarrollo de modelos de clasificación y segmentación de imágenes de fondo de ojo, se ha observado una tendencia hacia la integración de técnicas basadas en IA para la segmentación de imágenes de fondo de ojo. No obstante, estas se realizan de forma binaria, donde se extrae una región única de atrofia peripapilar, careciendo de la respuesta de su tipo de clase. Esto puede proporcionar conocimiento inadecuado para el uso de aplicaciones de inteligencia artificial en entornos de atención médica heterogénea del mundo real [1].

Dada la importancia de la segmentación de estructuras morfológicas en imágenes de fondo de ojo para el desarrollo de sistemas asistidos de diagnóstico en patologías oftalmológicas [10]. Se han realizado trabajos de segmentación basados en diferentes técnicas. Lu et al. propuso extraer APP utilizando una combinación de métodos que incluyen el filtro de exploración, umbralización, crecimiento y el modelo Chan-Vese [11]. Este método utiliza características para la segmentación de clases.

En los últimos años, los modelos basados en aprendizaje profundo han logrado un éxito notable con una mejora en términos de precisión y rendimiento. En estudios recientes, las técnicas basadas en el aprendizaje profundo crearon una nueva generación de modelos de segmentación de imágenes. Estos modelos se basan en el etiquetado semántico por píxeles y ganaron un interés de investigación significativo, como se encontró en el trabajo de Yidong Chai et al. Los autores



adoptaron las redes neuronales convolucionales (CNN), generando una propuesta de aprendizaje para segmentar objetos con formas complejas, transformando así, el problema de segmentación de APP en la obtención de dos máscaras. La primera, donde se incluya la APP con el DO y una segunda, en la cual se presente únicamente el DO. De esta forma proponen superar el problema de irregularidad e inconsistencia morfológica de la APP [7].

Lo que demuestra, que la integración de modelos de aprendizaje profundo tiene el potencial de proveer resultados alentadores en términos de precisión y eficacia. Inspirándose en los excelentes resultados de Yidong Chai et al., en este trabajo se exploran modelos de segmentación basados en aprendizaje profundo ampliamente utilizados como son: Unet [12], SegNet [13] y FCN [14] para la segmentación de APP alfa y beta.

2. Métodos

2.1 Adquisición de datos

Los datos empleados son un subconjunto de imágenes de la base de datos ORIGA [8]. La muestra contiene 300 imágenes con un tamaño uniforme de 3,072×2,048, a la cual se aplicó un preprocesamiento para adaptar las dimensiones de las imágenes a 480×320, para coincidir con el formato de entrada de los algoritmos. Se realizó un etiquetado manual de la atrofia peripapilar alfa y beta en las 300 imágenes. Las anotaciones de cada imagen fueron validadas por oftalmólogos especialistas en glaucoma. En la Figura 2, (a) se muestra una imagen de la base de datos redimensionada y en la Figura 2, (b) se muestra el etiquetado del área beta por una región roja y el área alfa por una región verde.



Figura 2. Imagen de fondo de ojo redimensionada y mascara de verdad. (a) Imagen de Fondo de ojo [8] (b) Mascara de verdad de APP alfa y beta.

2.2 Modelos

Con el conjunto de datos preprocesado, el siguiente paso es la selección, preparación y entrenamiento de los modelos. Para este trabajo se utilizaron arquitecturas ya creadas y disponibles en un paquete de código abierto basado en Keras y Tensorflow [15].

A través de este repositorio [15] es posible utilizar modelos pre-creados que ya han sido utilizados y evaluados por la comunidad, la Tabla 1 presenta los modelos que son comparados en este trabajo.



Modelo	Modelo Base	Modelo de Segmentación	
Unet	Vanilla CCN	U-Net	
Unet VGG	VGG 16	U-Net	
Unet Resnet50	Resnet50	U-Net	
Unet Mobilenet	MobileNet	U-Net	
Unet mini	Vanilla Mini CCN	U-Net	
Segnet	Vanilla CCN	Segnet	
Segnet VGG	VGG 16	Segnet	
Segnet Resnet50	Resnet50	Segnet	
Segnet Mobilenet	MobileNet	Segnet	
FCN 8	VGG 16	FCN 8	
FCN 8 VGG	VGG 16	FCN 8	
FCN 8 Mobilenet	MobileNet	FCN 8	
FCN 32	VGG 16	FCN 32	
FCN 32 VGG	VGG 16	FCN 32	
FCN 32 Mobilenet	MobileNet	FCN 32	

Tabla 1. Modelos de Segmentación.

Como es posible analizar en la Tabla 1 se implementaron diferentes modelos de segmentación que integran dentro de sus arquitecturas diferentes redes neuronales convolucionales que han sido seleccionadas por poseer un alto rendimiento en desafíos de clasificación.

ResNet es una red convolucional producida por la empresa Microsoft, que se dio a conocer tras ganar el concurso *ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge* (ILSVRC) del año 2015. El problema que ataca este modelo es la degradación de gradiente, el cual surge cuando las redes profundas comienzan a converger a medida que aumenta la profundidad de la red. De forma que la precisión se satura y se degrada rápidamente. Inesperadamente, tal degradación no es causada por el sobreajuste. Por lo que agregar más capas al modelo profundo provocaría más errores de entrenamiento. De esta manera, ResNet usa la conexión de salto para agregar la salida de una capa anterior a una capa posterior. Esto ayuda a mitigar el problema del gradiente de fuga [16].

El VGG es otra red que es comúnmente utilizada como columna vertebral para diversas tareas de visión artificial. Utiliza capas convolucionales apiladas una encima de otra generando mayor profundidad. Algunas variaciones de VGG, constan de dos capas completamente conectadas mediante 4096 canales, seguida de otra capa completamente conectada con canales para cada una de las clases de predicción. La última capa completamente conectada utiliza la capa softmax para fines de clasificación [17].

MobileNet tiene una propuesta diferente, presentándose como una red neuronal profunda ligera. Siendo una de las principales redes de interés para sistemas móviles de visión por computadora. Este modelo se basa en una arquitectura simplificada que utiliza circunvoluciones separables en profundidad para construir redes neuronales profundas y livianas [18].


Las redes convolucionales presentadas anteriormente han demostrado una importancia en tareas de visión artificial, por ello su inclusión dentro de este trabajo resulta adecuado. No obstante, estas redes, son solo una parte de los modelos de segmentación que se analizan en este trabajo.

Long et al. [14] presentó la arquitectura de redes totalmente convolucionales (FCN) para una segmentación robusta, en lugar de las últimas capas totalmente conectadas, como se muestra en la Figura 3. Este avance significativo permite que la red cree una predicción densa en píxeles. Para obtener el rendimiento de la localización, las salidas muestreadas se combinan con mapas de activación de alta resolución, que luego se transfieren a las capas de convolución para construir una salida precisa.



Figura 3. Arquitectura FCN [14].

En 2015, Ronneberger et al. propusieron la estructura Unet. Esta es una red de segmentación semántica basada en FCN, que actualmente es muy utilizada en el campo de la segmentación de imágenes biomédicas. El sistema de red de segmentación como se muestra en la Figura 4, incluye caminos de contracción (codificador) donde por medio de este, es posible capturar el contexto de una imagen, es decir, contiene un conjunto de capas de convolución, así como capas de agrupación maxima, con las cuales se consigue reducir el número de parámetros de la red. En esta investigación se emplearon variantes de la red Unet, donde la red de codificador fue sustituida por redes neuronales convolucionales. Así bien, la segunda ruta, también conocida como ruta de expansión simétrica o decodificador, se utiliza para obtener una localización precisa mediante la convolución transpuesta [12].



Figura 4. Arquitectura Unet [12].

Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 23, pp. 313 - 324. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022



Segnet sigue una arquitectura de FCN como se muestra en la Figura 5, que realiza una segmentación semántica por píxeles [13]. Su arquitectura consta de una red codificadora, seguida de otra decodificadora y finalmente una de clasificación por píxeles. La red del codificador es topológicamente idéntica a las trece capas convolucionales de la red VGG16 [17]. El papel de la red del decodificador es generar mapas de características con dimensiones iguales a la de la entrada para posteriormente hacer una clasificación por píxeles.

La novedad de Segnet radica en la forma en la cual el decodificador aumenta las muestras de sus mapas de características de menor resolución. Específicamente, el decodificador utiliza índices de agrupación calculados en el paso de agrupación máxima del codificador correspondiente para realizar un sobremuestreo lineal. Eliminando la necesidad de aprender por sobremuestreo. Estos mapas son dispersos y luego se combinan con filtros entrenables para producir mapas de características densas [13].



Figura 5. Arquitectura Segnet [13].

3. Experimentos

Este trabajo se propuso un análisis comparativo de modelos de segmentación de imágenes utilizados en una base de datos que contiene imágenes de fondo de ojo, con anotaciones que indican APP alfa y beta.

Se utilizaron modelos de segmentación disponibles en el repositorio Github [15], presentando resultados satisfactorios en sus segmentaciones utilizando modelos de implementación sencilla y reconocidos en la literatura. Durante el proceso comparativo, los modelos a evaluar fueron extraídos del repositorio sin realizar alguna modificación a la estructura algorítmica de cada uno. Además, se desarrolló una base de datos que contenía imágenes de enmascaramiento, indicando 3 clases distintas en cada imagen mediante distinción de píxeles (fondo, alfa y beta). Como se mencionó, las imágenes fueron etiquetadas manualmente y validadas por un especialista en glaucoma.

Los experimentos se realizaron en una computadora equipada con un CPU AMD Ryzen 7 5800X, GPU RTX 3080 y 32 GB de RAM. Para el entrenamiento de los modelos se seleccionó un *batch size* de dos, diez épocas, incorporando la técnica de paro temprano, que analiza el valor de perdida por época como criterio de paro, evitando un sobre ajuste en los entrenamientos; Optimizador Adam y entropía cruzada categórica como función de perdida.

Para hacer una comparación entre los modelos, se realizó una validación cruzada de cinco. Lo cual permite tener un menor sesgo al evaluar la eficacia de los modelos [19]. En comparativa a los trabajos relacionados, se ha visto la aplicación de varios criterios para calificar la segmentación, entre los cuales se encuentran: Puntuaje F1, Intersección sobre la unión (IoU), Sensitividad (*Recall*) y Precisión [20]. Para su evaluación es necesario definir los siguientes términos: Verdaderos Positivos (*TP*) los cuales denotan el número de píxeles contenidos en la intersección de APP segmentada por el algoritmo y la máscara de verdad; Falsos Positivos (*FP*) representan el número de pixeles que fueron clasificados como APP, pero que no pertenecen a la clase según la verdad



básica y Falsos Negativos (*FN*) son los pixeles que no fuero clasificados como APP, siendo parte de la clase APP en la máscara de verdad.

El puntuaje F1 o coeficiente de similitud *Dice* se utiliza para medir la superposición espacial de dos máscaras de segmentación y hace referencia a la cardinalidad de las máscaras generadas por el modelo y la verdad básica. La puntuación F1 es un valor entre 0 y 1, cuyo valor más cercano a 1 expresa la mayor similitud entre las muestras [21]. Su cálculo se muestra en la Ec.1.

$$Puntuaje F1 = \frac{2TP}{2TP + FP + FN}$$
(1)

El coeficiente de similitud *Jaccard* o IoU se utiliza para calcular la similitud de dos muestras. Siendo útil para analizar la precisión de las predicciones del modelo[21]. Esta se calcula entre la verdad de campo y la máscara predicha. Su definición matemática se expresa en la Ec. 2.

$$IoU = \frac{TP}{TP + FP + FN}$$
(2)

La sensitividad y precisión se consideran métricas de evaluación populares para técnicas clásicas de segmentación de imágenes [22]. Estas de determinan siguiendo la Ec. 3 y Ec. 4.

$$Precisión = \frac{TP}{TP + FN}$$
(3)

$$Sensitividad = \frac{TP}{TP + FN}$$
(4)

Para definir qué modelo funcionó mejor, todos se entrenaron con la misma base de entrenamiento y se compararon con las métricas puntuaje F1, IoU, sensitividad y precisión.

4. Resultados

En esta sección se realiza la comparación de los resultados obtenidos en la implementación de cada uno de los modelos propuestos. En la Tabla 2, se observan las métricas que califican el desempeño de cada modelo, expresando información como: Nombre de la arquitectura (primera columna), sensitividad (segunda columna), precisión (tercera columna), puntuaje F1 (cuarta columna) y por último se muestra el IoU. Cada uno de los valores mostrados representan el promedio de las clases.

Tabla 2. Métricas de evaluación promedio.

Modelo	Sensitividad	Precisión	F1	loU
Unet	0.422872538	0.578870096	0.445871648	0.371745326
Unet VGG	0.424668700	0.656726427	0.456783617	0.404989830
Unet Resnet50	0.450021967	0.726202610	0.494157316	0.431584518
Unet Mobilenet	0.509541283	0.694882211	0.566212375	0.480521759
Unet mini	0.331530693	0.332429490	0.331530801	0.333333224
Segnet	0.402613668	0.469181336	0.408177434	0.375648983
Segnet VGG	0.495574293	0.425872150	0.434548325	0.390540518



Segnet Resnet50	0.461445894	0.496516901	0.433895397	0.393720801
Segnet Mobilenet	0.482338111	0.589697126	0.495186544	0.434488554
FCN 8	0.423276589	0.593136416	0.441259860	0.395021014
FCN 8 VGG	0.361831946	0.515973570	0.372145080	0.353339558
FCN 8 Mobilenet	0.450834337	0.692384935	0.484729554	0.426341171
FCN 32	0.372461821	0.462829075	0.390366992	0.362941986
FCN 32 VGG	0.340752777	0.351304121	0.343261754	0.337405914
FCN 32 Mobilenet	0.407678427	0.509537711	0.424556399	0.385652328

El modelo con la mayoría de los puntuajes superiores corresponde a Unet Mobilenet, con resultados de 0.5095, 0.5662, 0.4805 respectivamente a sensitividad, puntuaje F1 e IoU. No obstante, con métricas posicionadas entre las mejores, se encuentra la Unet Resnet50 que además expresó el mayor puntuaje en precisión de 0.7262.

Ahora bien, la Tabla 3 muestra de manera detallada las métricas obtenidas por clase, siguiendo el orden presentado en la Tabla 2.

	Sensitividad	Precisión	F1	loU
Modelo	[Fondo, Alfa, Beta]	[Fondo, Alfa, Beta]	[Fondo, Alfa, Beta]	[Fondo, Alfa, Beta]
Unet	[0.998, 0.049, 0.220]	[0.995, 0.306, 0.434]	[0.997, 0.081, 0.258]	[0.994, 0.027, 0.192]
Unet-VGG	[0.999, 0.030, 0.244]	[0.996, 0.410, 0.564]	[0.997, 0.053, 0.320]	[0.995, 0.028, 0.192]
Unet-Resnet50	[0.999, 0.078, 0.272]	[0.996, 0.468, 0.715]	[0.998, 0.111, 0.373]	[0.995, 0.061, 0.238]
Unet-Mobilenet	[0.999, 0.152, 0.377]	[0.997, 0.350, 0.738]	[0.998, 0.205, 0.496]	[0.996, 0.114, 0.332]
Unet-mini	[1.000, 0.000, 0.000]	[0.995, 0.000, 0.000]	[0.997, 0.000, 0.000]	[0.995, 0.000, 0.000]
Segnet	[0.998, 0.000, 0.209]	[0.996, 0.000, 0.412]	[0.997, 0.000, 0.228]	[0.994, 0.000, 0.133]
Segnet -VGG	[0.990, 0.005, 0.492]	[0.997, 0.009, 0.271]	[0.994, 0.006, 0.304]	[0.988, 0.003, 0.181]
Segnet- Resnet50	[0.987, 0.000, 0.397]	[0.997, 0.097, 0.396]	[0.992, 0.001, 0.309]	[0.984, 0.000, 0.197]
Segnet- Mobilenet	[0.999, 0.097, 0.351]	[0.997, 0.186, 0.587]	[0.998, 0.070, 0.418]	[0.995, 0.038, 0.270]
FCN 8	[0.999, 0.048, 0.223]	[0.996, 0.356, 0.428]	[0.997, 0.073, 0.253]	[0.994, 0.039, 0.152]
FCN 8 VGG	[1.000, 0.027, 0.059	[0.995, 0.166, 0.386]	[0.997, 0.028, 0.092]	[0.995, 0.014, 0.051]
FCN 8 Mobilenet	[0.999, 0.038, 0.316]	[0.996, 0.436, 0.645]	[0.998, 0.050, 0.400]	[0.995, 0.030, 0.254]
FCN 32	[0.999, 0.009, 0.109]	[0.995, 0.047, 0.347]	[0.997, 0.012, 0.162]	[0.994, 0.006, 0.089]
FCN 32 VGG	[1.000, 0.000, 0.022]	[0.995, 0.000, 0.059]	[0.997, 0.000, 0.033]	[0.862, 0.000, 0.018]
FCN 32 Mobilenet	[0.999, 0.009, 0.215]	[0.996, 0.048, 0.485]	[0.997, 0.013, 0.263]	[0.995, 0.007, 0.156]

Analizando los resultados de la Tabla 2 y la Tabla 3, teniendo en cuenta las métricas basadas en clases, se observa que algunas redes no son eficientes en la clasificación de la clase alfa (APP alfa),



esto posiblemente se deba a la falta de componentes que indiquen márgenes fronterizos entre atrofias, ya que algunas redes utilizan la técnica de segmentación de imágenes semánticas, por lo tanto, los modelos clasificaron erróneamente la mayoría de las APP alfa designándolas como APP beta.

A pesar de que los modelos Unet presentaron alentadores resultados, el modelo Unet Mini, denoto el peor resultado en precisión, sensitividad, puntuaje f1 e IoU (0.3315, 0.3324 0.3315, 0.3333), mostrando una ausencia de segmentación en la APP. Lo que demuestra la importancia de emplear distintas versiones, con el fin de encontrar el modelo que mejor se adapte a la resolución del problema.

Para ilustrar más la eficacia de los modelos, se seleccionaron al azar algunas muestras del conjunto de prueba para mostrar los resultados de la segmentación como se observa en la Figura 6.



Figura 6. Resultados de segmentaciones de los modelos con altas métricas vs la verdad de campo.



Las imágenes retinales originales están en la primera fila. Las áreas de APP de las máscaras de verdad se muestran en la segunda y las predicciones de los modelos se encuentran en las siguientes filas.

La Figura 6 muestra una comparación entre los resultados de segmentación y la verdad de campo de los modelos con mayor puntuación en las métricas. Las predicciones obtenidas demostraron una variabilidad en la segmentación de las imágenes. No obstante, Unet Mobilenet expresó resultados que se acercan a la estructura morfológica y localización de los biomarcadores alfa y beta, las máscaras predichas son casi idénticas a su correspondiente verdad de campo. Sin embargo, se obtuvieron resultados experimentales con baja similitud, como se aprecian en la Figura 7.



Figura 7. Resultados de segmentaciones de los modelos con bajas métricas vs la verdad de campo.



5. Conclusiones

Se realizó un análisis de modelos de segmentación de APP alfa y beta en imágenes de fondo de ojo, utilizando quince modelos diferentes que seguían las arquitecturas de U-Net, SegNet y FCN. Para ello, se generó un conjunto de datos que contenía imágenes de enmascaramiento de atrofia peripapilar alfa y beta, indicando los elementos de interés en cada imagen con sus respectivas clasificaciones (fondo, alfa y beta) y validado por un especialista en el área. De los modelos evaluados, el modelo Unet Mobilenet mostró el mejor desempeño, obteniendo una precisión del % 35.0 para identificar APP alfa y del %73.8 para identificar APP beta.

Como se observó en los resultados obtenidos, la baja puntuación en las métricas de evaluación está relacionada con la presencia de hiperpigmentación peripapilar y límites indistintos de APP, además de contar con un desequilibrio de las clases, teniendo en menor proporción la clase alfa. Esto puede introducir distorsiones en los perfiles de intensidad a lo largo de los segmentos de atrofia, estableciendo dificultad en detección de los límites verdaderos. Otra razón es la presencia de APP estrecha. Lo cual es parte de la naturaleza de la base de datos utilizada.

Se propone como trabajo futuro, hacer una extracción de la región de interés alrededor del DO, para focalizar el área de APP alfa y beta. Además de la implementación de las métricas de clasificación AUC ROC y AUC PR. También la exploración de hiperparámetros para los modelos Unet; Y realizar el análisis de los modelos de forma manual por profesionales del área de oftalmología en base a la clasificación visual de cada imagen, interpretando y denotando el área de segmentación correctamente o no. De esta forma, es posible evaluar en el escenario real, qué modelo fue más efectivo en sus clasificaciones.

Los resultados generan una dirección hacia el análisis de las variantes de U-Net para resolver el problema de la segmentación de APP Alfa y Beta, sirviendo, así este trabajo como precedente en la búsqueda de identificación de biomarcadores en imágenes de fondo de ojo que permitan brindar un diagnóstico oportuno de glaucoma.

Referencias

- [1] A. Grzybowski, *Artificial Intelligence in Ophthalmology*. Olsztyn: Springer.
- [2] M. Fingeret, F. A. Medeiros, R. Susanna, y R. N. Weinreb, "Five rules to evaluate the optic disc and retinal nerve fiber layer for glaucoma".
- [3] Hector Darío Forero Angel, Julio Cesar Bernal Serna, y Angela María Garcés Valencia, "Optic Nerve and Peripapillary Retina Characteristics in Primary Open Angle Glaucoma".
- [4] P. Riordan-Evan y E. T. Cunningham Jr., "VAUGHAN Y ASBURY Oftalmología general", 2012.
- [5] / Morphomerric, D. Jost, B. Jonas, X. N. Nguyen, G. C. Gusek, y G. O. H. Noumonn, "Parapapillary Choriorefinal Atrophy in Normal and Glaucoma Eyes", 1989.
- [6] M. K. Song, K. R. Sung, J. W. Shin, J. Kwon, J. Y. Lee, y J. M. Park, "Progressive change in peripapillary atrophy in myopic glaucomatous eyes", *British Journal of Ophthalmology*, vol. 102, núm. 11, pp. 1527–1532, nov. 2018, doi: 10.1136/bjophthalmol-2017-311152.
- [7] Y. Chai, H. Liu, y J. Xu, "A new convolutional neural network model for peripapillary atrophy area segmentation from retinal fundus images", *Applied Soft Computing Journal*, vol. 86, ene. 2020, doi: 10.1016/j.asoc.2019.105890.
- [8] Zhuo Zhang et al., ORIGA-light : An Online Retinal Fundus Image Database for Glaucoma Analysis and Research.
- [9] J. Cheng *et al.*, "Peripapillary atrophy detection by sparse biologically inspired feature manifold", *IEEE Trans Med Imaging*, vol. 31, núm. 12, pp. 2355–2365, 2012, doi: 10.1109/TMI.2012.2218118.
- [10] J. M. Molina Casado, "Detección y Localización Automática de Estructuras Anatómicas en Imágenes de Retina utilizando Técnicas de Visión Artificial".
- [11] T. B. T. and A. F. M. Cheng-Kai Lu, *Automatic Parapapillary Atrophy Shape Detection and Quantification in Colour Fundus Images*. IEEE, 2010.

Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 23, pp. 313 - 324. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022



- [12] O. Ronneberger, P. Fischer, y T. Brox, "U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation", may 2015, [En línea]. Available: http://arxiv.org/abs/1505.04597
- [13] V. Badrinarayanan, A. Kendall, y R. Cipolla, "SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation", nov. 2015, [En línea]. Available: http://arxiv.org/abs/1511.00561
- [14] J. Long, E. Shelhamer, y T. Darrell, "Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation", nov. 2014, [En línea]. Available: http://arxiv.org/abs/1411.4038
- [15] G. Divam, "Image-segmentation-keras_ Implementation of Segnet, FCN, UNet, PSPNet and other models in Keras." https://github.com/divamgupta/image-segmentation-keras (consultado sep. 17, 2022).
- [16] K. He, X. Zhang, S. Ren, y J. Sun, "Deep Residual Learning for Image Recognition", dic. 2015, [En línea]. Available: http://arxiv.org/abs/1512.03385
- [17] K. Simonyan y A. Zisserman, "Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition", sep. 2014, [En línea]. Available: http://arxiv.org/abs/1409.1556
- [18] A. G. Howard *et al.*, "MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications", abr. 2017, [En línea]. Available: http://arxiv.org/abs/1704.04861
- [19] D. Berrar, "Cross-validation", en Encyclopedia of Bioinformatics and Computational Biology: ABC of Bioinformatics, vol. 1–3, Elsevier, 2018, pp. 542–545. doi: 10.1016/B978-0-12-809633-8.20349-X.
- [20] Y. H. Nai *et al.*, "Comparison of metrics for the evaluation of medical segmentations using prostate MRI dataset", *Comput Biol Med*, vol. 134, jul. 2021, doi: 10.1016/j.compbiomed.2021.104497.
- [21] V. Yeghiazaryan y I. Voiculescu, "Family of boundary overlap metrics for the evaluation of medical image segmentation", *Journal of Medical Imaging*, vol. 5, núm. 01, p. 1, feb. 2018, doi: 10.1117/1.jmi.5.1.015006.
- [22] L. Hanxiang, K. Jieliang, F. Yunlong, X. Jie, y L. Huiqi, "Automatic segmentation of PPA in retinal : 31 May 2 June 2018, Wuhan, China", 2018.



Implementación de un Controlador PID para un Sistema *"ball and beam"* Linealizado Utilizando Matlab y Computer Vision Toolbox de Simulink

León Bonilla Ambrosio Edén¹, Cerezo Sánchez Jorge², Sánchez Ramírez Edwards Ernesto³, Morales Perez Carlos⁴ y Salazar Berra Erika⁵

Universidad Tecnológica de Puebla.

ambrosio.leon@utpuebla.edu.mx¹, jorge.cerezo@utpuebla.edu.mx², edwards.sanchez@utpuebla.edu.mx³, arlos.morales@utpuebla.edu.mx⁴ y utp0144855@alumno.utpuebla.edu.mx⁵

Resumen

En este trabajo se realizó la simulación de un sistema "Ball and Beam" para fines educativos. Este sistema no lineal ha sido un desafío para los científicos e ingenieros debido a los criterios de estabilidad y respuesta rápida requeridos. Para este trabajo se utilizó un modelo linealizado con el fin de implementar un controlador PID sintonizable. Se utilizó Matlab para el ajuste de ganancias a través del método de asignación de polos. Las ganancias se ajustaron de acuerdo con un factor de amortiguamiento y frecuencia natural deseados. El comportamiento gráfico del sistema se diseñó utilizando el Toolbox "Computer Vision" de Simulink. Aunque hoy en día no se tiene una solución definitiva al problema de estabilización, presentamos dos perfiles de sintonización con diferente respuesta transitoria. Los resultados muestran una adecuada selección de ganancias, así como la correcta linealización del modelo.

Palabras clave: ball-and-beam, PID, sistema de control, Matlab, Simulink, Computer Vision Toolbox.

1. Introducción

El estudio de sistemas no lineales ha incrementado en las útlimas tres décadas debido a que el avance de la tecnología ha permitido controlar sistemas dinámicos cada vez más complejos. Por consiguiente, han surgido técnicas de control y estabilización de sistemas no lineales, como son la linealización aproximada, extendida y exacta [1].

Uno de los retos didácticos en ingeniería de control no lineal es la estabilización del sistema *"ball and beam"*, que por décadas ha sido abordado desde diferentes perspectivas de control, desde técnicas de control difuso hasta la retroalimentación de estado utilizando algoritmos de visión por computadora.

En [2], por ejemplo, se diseñó un controlador difuso en cascada para el sistema no lineal. El control se realizó en tiempo real utilizando un sistema de arquitectura abierta compuesto por una computadora, una tarjeta de adquisición de datos PCI (Quanser-PIDe), un servomotor, un sensor de posición y una fuente de voltaje. La programación del controlador se realizó en la plataforma Simulink. Se aplicaron pruebas experimentales para probar el desempeño del controlador difuso, el cual fue implementado en una computadora con una tarjeta de adquisición de datos PCI. Se diseñó el software necesario para lograr la comunicación en tiempo real con los diferentes elementos que componen el sistema.



En [3] se implementó un simulador para un sistema *"ball and beam"* con el objetivo de servir como una plataforma virtual. El sistema simulado está formado por una viga de 480 mm, cuyo ángulo de inclinación se puede configurar entre -15° y 15°.

En [4] el objetivo de este sistema de control es tomar una técnica recursiva, que puede ser entendida como una variación natural del ya conocido backstepping para derivar la ley de control dinámico. El objetivo de control es actuar en el torque aplicado en el pivote de la viga, de modo que la esfera pueda rodar sobre la viga y lograr la regulación de la posición de la esfera. Con el fin de validar el procedimiento de diseño de control propuesto y verificar su eficacia, se realizaron simulaciones en MATLAB. El sistema controlado ha sido implementado dentro del entorno MATLAB/SIMULINK.

En [5] se estudia el diseño de un controlador adaptativo por modelo de referencia para el control de un sistema *"ball and beam"*. Para este fin, se utiliza el método directo de Lyapunov para desarrollar un controlador adaptativo para que el sistema pueda seguir el modelo de referencia. Los resultados de las simulaciones muestran un buen desempeño del controlador adaptativo diseñado.

En [6] el prototipo utilizado fue construido a partir de placas de Sintra. El actuador es un servomotor de marca Hitec modelo HS-311 con un sensor resistivo que funciona de manera similar a un potenciómetro. Se obtiene la posición de la barra a través de un convertidor análogo digital. Se utiliza un divisor de voltaje que consiste en un potenciómetro y dos resistores en serie que entregan una variación de 0 a 5 V la cual es capturada por el ADC del Arduino Mega 2560.

En [7] se llevó a cabo el diseño de un controlador PD de primer orden para un sistema *"ball and beam"*. Se utilizó el software Proteus para el diseño del circuito electrónico y la herramienta sisitool de MATLAB para realizar la sintonización del controlador mediante el método clásico del lugar geométrico de las raíces. Se utiliza un controlador en cascada de corriente para medir la posición angular y un sensor láser para conocer la posición de la esfera en el eje.

En este trabajo se realiza la simulación de un sistema *"ball and beam"* estabilizado mediante un controlador PID para fines educativos. La dinámica del sistema no lineal fue simulada utilizando el software Simulink. Para poder diseñar el sistema de lazo cerrado fue necesario diseñar funciones de sintonización en Matlab. Para visualizar el comportamiento de la estabilización de la barra, se utilizó el Toolbox Computer Vision de Simulink. Los resultados de estabilización muestran una correcta sintonización del controlador PID.

2. Modelo Linealizado

Este sistema mecatrónico consta de una barra con un grado de libertad, que sobre ella aloja una esfera capaz de desplazarse libremente. Cuando esto ocurre, el centro de gravedad del sistema cambia, y la esfera podría llegar al extremo y caerse. Para compensar este efecto, existe un actuador que proporciona el torque necesario para rotar la barra y estabilizar el sistema.

El planteamiento del problema es el siguiente: dada una posición de referencia con respecto al centro de la barra, generar el torque necesario para colocar la esfera en dicha posición (figura N° 1).



Figura 1. Sistema mecatrónico "ball and beam".



Como variables de entrada se tienen la inclinación de la barra θ y la posición de la esfera x con respecto al centro la barra. Como variable de salida se tiene el torque τ generado por el actuador para estabilización (Fig. 1).

Para modelar la dinámica de este sistema es necesario considerar el movimiento de la esfera a lo largo de la barra. El modelo dinámico está determinado por la siguiente ecuación:

$$m_{ball}g \operatorname{sen} \theta - F_r = m_{ball}x'' - b_1x', \tag{1}$$

donde:

 F_r es la fuerza ejercida sobre la esfera,

 b_1 es el amortiguamiento de la esfera (efecto despreciable),

 m_{ball} es la masa de la esfera,

g es la aceleración de la gravedad,

 θ es el desplazamiento angular de la barra y,

x es el desplazamiento de la esfera.

También es necesario considerar el modelo electromecánico del sistema, el cual está determinado por las siguientes ecuaciones:

$$KI - J_{bm}\theta'' - b\theta' - xm_{ball}gcos\theta = 0,$$
⁽²⁾

$$J_{bm} = J_{beam} + J_{motor},\tag{3}$$

$$J_{beam} = \frac{1}{2} m_{beam} L^2{}_{beam},\tag{4}$$

donde:

 J_{motor} es el momento de inercia del motor, J_{beam} es el momento de inercia de la viga. m_{beam} es la masa de la viga y, L_{beam} es la longitud de la viga.

Finalmente, el modelo no lineal queda determinado por la siguientes ecuaciones:

$$\begin{pmatrix} x'\\ x''\\ \theta'\\ \theta''\\ \theta''\\ \theta''' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g / \left(1 + \frac{2}{5} \left(\frac{R_b}{a}\right)^2\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{Rm_{ball}g}{LJ_{bm}} - \frac{m_{ball}g}{J_{bm}} & 0 & -\left(\frac{Rb + K_eK}{LJ_{bm}}\right) - \left(\frac{R}{L} + \frac{b}{J_{bm}}\right) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \cos(\theta) x\\ \sin\theta\\ \theta'\\ \theta'' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0\\ K\\ LJ_{bm} \end{pmatrix} v,$$

$$y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\theta) x\\ \cos(\theta) x'\\ \sin\theta\\ \theta'' \end{pmatrix}.$$

$$(5)$$

Suponiendo que θ es demasiado pequeño, entonces $sen \theta \approx \theta$ y $\cos \theta \approx 1$ [8]. Con esta aproximación es posible obtener un modelo linealizado, el cual se muestra en las siguientes ecuaciones:

Diseño y Planeación Mecatrónica,Capítulo 24, pp. 325 - 331. ISBN: 978-607-9394-25-7 Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2022



$$\begin{pmatrix} x'\\x''\\\theta'\\\theta''\\\theta''\\\theta''' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g/\left(1 + \frac{2}{5}\left(\frac{R_b}{a}\right)^2\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{Rm_{ball}g}{LJ_{bm}} - \frac{m_{ball}g}{J_{bm}} & 0 & -\left(\frac{Rb+K_eK}{LJ_{bm}}\right) - \left(\frac{R}{L} + \frac{b}{J_{bm}}\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x\\x'\\\theta\\\theta''\\\theta'' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0\\0\\0\\0\\\frac{K}{LJ_{bm}} \end{pmatrix} v,$$
(7)
$$y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x\\x'\\\theta\\\theta'\\\theta'' \end{pmatrix}.$$
(8)

3. Controlador PID

Con el sistema linealizado es posible implementar un controlador PID para estabilización. Este controlador ha sido ampliamente utilizado en diversas aplicaciones de ingeniería debido a que sus parámetros son flexibles en cuanto a sintonización. La ecuación (9) representa el controlador PID clásico, con ganancias sintonizables K_P , K_I y K_D para los efectos proporcionales, integrales y derivativos, respectivamente.

$$u(t) = K_{P}e(t) + K_{D}\frac{de(t)}{dx} + K_{I}\int e(t) d(t).$$
(9)

La figura N° 2 muestra el sistema de lazo cerrado implementado en Simulink. Del lado derecho se tienen las entradas de referencia que corresponden a +/- 6/8 del valor de la mitad de la barra, donde el signo cambia de negativo a positivo después de cinco segundos. Del lado izquierdo se muestra la planta retroalimentada por la señal de referencia, con los valores de las ganancias diseñadas para el controlador PID y un bloque integrador. Como salida se tiene el vector de estados de la ecuación (8) de donde se obtiene la posición de la esfera sobre la barra y su ángulo de rotación.



Figura 2. Sistema "ball and beam" en lazo cerrado implementado en Simulink.

4. Simulación del sistema "ball and beam"

Para la simulación del sistema "ball and beam" las ganancias se calcularon mediante el método de asignación de polos de acuerdo a un factor de amortiguamiento y frecuencia natural deseados. Se diseñó en Matlab un programa de autosintonización (autotunning) que determina automáticamente los valores de las ganancias del controlador.

Para llevar a cabo un análisis del sistema en lazo cerrado, se propusieron dos perfiles de sintonización. En ambos se utilizó un factor de amortiguamiento con valor de 1 con el fin de que el



comportamiento se aproximara al de un sistema críticamente amortiguado. Con este parámetro se obtuvo la respuesta más rápida sin oscilaciones.

Se denominó al primer perfil como "lento" debido a que se utiliza una frecuencia natural baja, con valor de 5 [rad/s]. La figura N° 3 muestra los resultados de simulación obtenidos, donde se observa que el valor deseado se alcanza hasta los cuatro segundos (figura N° 3 a)). Los máximos valores de velocidad alcanzados son 0.15 y -0.3 [m/s] (figura N° 3 b)).



Figura 3. Perfil de estabilización lento. a) Posición de la esfera sobre la barra. b) Velocidad de la esfera sobre la barra.

El segundo perfil se denominó "rápido" ya que se utiliza una frecuencia natural más alta con valor de 10 [rad/s]. La figura N° 4 muestra los resultados de simulación obtenidos, donde se observa que el valor deseado se alcanza aproximadamente a los dos segundos (figura N° 4 a)). El valor deseado se alcanza dos veces más rápido que el caso anterior. Los máximos valores de velocidad alcanzados son 0.6 y -1.2 [m/s] (figura N° 4 b)).



Figura 4. Perfil de estabilización rápido. a) Posición de la esfera sobre la barra. b) Velocidad de la esfera sobre la barra.

Ambos perfiles de sintonización estabilizan el sistema de forma correcta. Sin embargo, los tiempos de convergencia varían. También resultó de importancia verificar que la respuestra transitoria del sistema muestra un ligero sobretiro que está asociado a su no linealidad.

Para la simulación gráfica se utilizó el Toolbox Computer Vision de Simulink. Se leyeron las posiciones generadas del lazo cerrado y se construyeron las imágenes correspondientes a cada instante de tiempo. La figura N° 5 muestra el diagrama de bloques para la generación de la simulación en video. Primero se genera una imagen vacía y después se agregan los demás componentes, como son las líneas que representan la barra, el marcador tipo círculo que representa la esfera, una etiqueta de texto,



un retenedor de orden zero para sincronización de tiempo y un generador de archivo de video. La línea simula la barra que rota de acuerdo al valor del ángulo θ obtenido en la ecuación (8). La posición de la esfera en la imagen se obtiene mediante funciones trigonométricas que utilizan el valor de la posición de la esfera sobre la barra x y la inclinación θ . Finalmente se utiliza un bloque de salida para generar un archivo de video en formato ".avi". Los videos resultantes se encuentran disponibles para visualización en las referencias [9-10].



Figura 5. Simulación gráfica utilizando el Toolbox Computer Vision de Simulink.

5. Conclusiones

Este trabajo está dirigido a la comunidad académica con el fin de analizar y comprender el comportamiento de un sistema no lineal. Para ello, se presentó el análisis y simulación de un sistema *"ball and beam"* linealizado. Para lograr estabilizarlo se implementó un controlador PID clásico en el que las ganancias fueron calculadas mediante el método de asignación de polos. La simulación gráfica fue realizada en el software Simulink, utilizando el Toolbox Computer Vision.

La característica más relevante de este trabajo fue el diseño de un programa de autosintonización que permitió determinar los valores de las ganancias en función de un factor de amortiguamiento y frecuencia natural deseados. Esto permitió que en el análisis se consideraran dos perfiles de sintonización para estabilizar el sistema de forma lenta o rápida. Los resultados obtenidos muestran que con ambos métodos es posible obtener un comportamiento estable con diferentes velocidades de respuesta.

El diseño de este controlador permitió analizar de forma didáctica la respuesta transitoria de un sistema linealizado. Como trabajo a futuro se implementará el controlador en una plataforma de pruebas *"ball and beam"* que utiliza un motor de corriente directa como actuador y un sensor de distancia láser. Los perfiles de sintonización diseñados se utilizarán de acuerdo a la velocidad de respuesta de la planta.



Referencias

- [1] Hebertt Sira-Ramírez, Richard Márquez, Francklin Rivas-Echeverría y Orestes Llanes-Santiago, *"Control de Sistemas No Lineales"*, Pearson Prentice-Hall, 2004.
- [2] Charre S., Vélez D., Gudiño J., Alcalá J., Fuentes A., *"Implementación De Un Control Difuso En Cascada Para El Sistema Ball And Beam"*, *XICUA*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Vol. 4, No. 8, 2016.
- [3] Real J., *"BB: an Ada Simulator of a Ball-on-Beam System"*, Universitat Politècnica de València, Spain, 2021.
- [4] Ayad Q., Amjad J., Pereira A., Ibraheem K., *"Adaptive backstepping control design ball and beam system"*, Federal University of Lavras, 2021.
- [5] Najafizadegan H., Zarabadipour H., *"Modelling and Adaptive Control of Ball and Beam System"*, Imam Khomeini International University, Qazvin, 2019.
- [6] Blas L., Martínez O., Montesinos J., Solís C., Malo A., *"El Sistema Barra-Esfera (Ball & Beam) en un Laboratorio de Robótica"*, Control Automático, Cinvestav, 2015.
- [7] Nuñez O., Trujillo B., *"Diseño de un controlador PD de posición para un 'ball and beam'"*, Perspectivas De La Ciencia Y La Tecnología, Vol. 3, No. 6, 2020.
- [8] Basil Hamed, *"Application of a LabVIEW for Real-Time Control of Ball and Beam System"*, IACSIT International Journal of Engineering and Technology, Vol.2, No.4, August 2010
- [9] Sánchez, E. [Visual tracking of moving objects]. (2022). *BALL_AND_BEAM_LENTO*. [Archivo de video]. Youtube. <u>https://youtu.be/n7GT-AbkfAo</u>
- [10] Sánchez, E. [Visual tracking of moving objects]. (2022). *BALL_AND_BEAM_RAPIDO*. [Archivo de video]. Youtube. <u>https://youtu.be/5ziQA0JNgQg</u>



Sistema para la Captura y Cálculo de Cargas Eléctricas Mensuales, Nivel Residencial

José Miguel Rodríguez González¹, Juan Morán Hernández², Liliana Vargas Oseguera¹, Arath Terán Soria¹ y Fernando Mercado Álvarez¹

¹Tecnológico Nacional de México / TES de Valle de Bravo

² Funkannabis S.A de C.V.

jose.rg@vbravo.tecnm.mx

Fecha de recepción: Fecha de aceptación:

Resumen

Hoy en día el ahorro de energía eléctrica es un elemento fundamental de las políticas públicas para el cuidado de los recursos energéticos no renovables, la pluralización energética, la defensa del medio ambiente, el incremento de productividad, y la competencia y el ahorro económico familiar. Dentro de esto se ha movilizado el desarrollo de nuevos sistemas que coadyuven a lograr realizar dicho ahorro, uno de estos es el uso del diagnóstico energético, y con ello los instrumentos digitales que lo soporten. Este trabajo presenta un sistema desarrollado en código abierto en la plataforma NetBeans, que ayuda en la contabilización y cálculo de cargas eléctricas de forma mensual para que realice diagnósticos energéticos residenciales, preocupándose específicamente de las medidas que se deben tomar una vez realizado dicho diagnostico residencial y no en lo secundario que será hacer conteo y cálculo, que se puede realizar con el sistema, de esto se presenta el desarrollo del código pasando por una plantilla realizada en una hoja de cálculo, puesto a punto por medio de diversas pruebas, las cuales fueron realizar el conteo de cargas en dos residencias, evaluando así su funcionamiento, el desempeño de la herramienta cumple con lo requerido, jerarquiza las cargas de acuerdo a su localización y se obtiene un cálculo correcto en kWh/mes.

Palabras clave: Sistema, diagnóstico energético, ahorro de energía, tecnología de ahorro, captura, cálculo, cargas eléctricas.

1. Introducción

La eficiencia energética definida como la reducción del consumo de energía, manteniendo los mismos servicios energéticos y actividades sin disminuir el confort y la calidad de vida de los usuarios, protegiendo el medio ambiente, fortaleciendo el abastecimiento y fomentando la sostenibilidad de la organización [1].

En la búsqueda de establecer un proceso para el fomento en la eficiencia energética mediante la implementación de buenas prácticas e innovación tecnológica, además de la utilización de herramientas de operación, control y seguimiento, que contribuyan al uso eficiente de los recursos y a la sustentabilidad. Actualmente hay programas de eficiencia energética consistentes en la elaboración de programas integrales de ahorro de energía que den pauta a la reducción tanto las demandas como los consumos energéticos [2].

La tecnología se ha convertido en parte fundamental de la tecnología de ahorro de energía en los últimos años. Entre sus ventajas se encuentran la rentabilidad, afabilidad con el medio ambiente y su eficiencia de procesos, el uso de dispositivos inteligentes como focos, electrodomésticos y dispositivos de entrenamiento con su respectiva aplicación en casas domóticas, todo bajo un esquema del IoT [3].



Sin embargo, antes de establecer y llevar a cabo programas, proyectos o acciones para reducir el consumo energético en un inmueble o instalación, se debe iniciar con la realización de un diagnóstico energético esto para permitirnos conocer la línea base sobre la cual se implementarán las acciones de ahorro y uso eficiente de energía. En el resultado del diagnóstico se podrán determinar que equipos de usos finales tienen el mayor potencial de ahorro de energético, para tomar las decisiones de cambio inmediato o a largo plazo de acuerdo con los indicadores de rentabilidad que resulten del diagnóstico [4].

El diagnostico energético representa una herramienta mediante la cual se pueden identificar las medidas de ahorro de energía susceptibles a ser implementadas, además de cuantificar los ahorros que se pueden alcanzar y un monto de la inversión necesaria para su implementación, y, por último, determinar su factibilidad técnica y rentabilidad financiera [5].

En México algunos servicios que actualmente se ofertan son de índole privada y ayudan en la realización de planes de ahorro de energía, proyectos de monitoreo y gestión energética. Dentro de estos se realizan los diagnósticos energéticos, no obstante, son procesos y técnicas que han sido desarrollados por las propias empresas basados en los procedimientos dictados por la CONUEE como el "protocolo de actividades para la implementación de acciones de eficiencia energética en inmuebles, flotas vehiculares e instalaciones de la administración pública federal" [6] o "La guía para elaborar un diagnóstico energético en inmuebles" [5].

A nivel global, se han desarrollado distintos proyectos que realizan propuestas en el ahorro de energía con el uso de herramientas digitales dentro de la industria, tales como; "An Internet-of-Things Design Approach to Real-Time Monitoring and Protection of a Residential Power System [7] que realiza la propuesta de monitoreo digital y una herramienta útil, que nos indica que las propuestas actuales llevan la dirección del "ahorro energético", adicional a esto, tenemos una propuesta como "An Intelligent Power Outlet System for the Smart Home of the Internet of Things" [8], en el cual el autor propone un sistema de monitoreo inteligente para evitar posibles fallas en los sistemas eléctricos. Por otro lado, tenemos a propuesta de "Energy Efficiency Diagnosis of Smart Grid Park Based on Multi-Level Energy Transfer Model, donde el modelo de transferencia de energía multinivel de proponer la optimización del uso global de la energía en un caso de estudio que puede replicarse, usando la metodología que proponen [9].

Este trabajo presenta el desarrollo de una herramienta que ayuda al diagnóstico energético de un inmueble residencial de manera digital, para el uso de esta, se tienen que obtener datos in situ y posteriormente genera un reporte cuantitativo de las cargas, el desarrollo de la herramienta se realizó por medio de la programación con software de uso libre como lo es NetBeans, usando el lenguaje programación JAVA. Obteniendo una tabla de datos con el consumo mensual [kWh/mes], con la metodología propuesta nos propusimos demostrar que el error relativo porcentual entre el conteo de cargas del sistema y el dato factura sería de al menos 20%. Además, podemos encontrar con facilidad aquellas cargas que tienen un mayor consumo dentro del inmueble por lo que se pueden tener alertas para tener claro cuáles serán las recomendaciones en lo que será el diagnóstico energético en forma.

2. Metodología

2.1 Modelo de Análisis

Basado en un diagrama de flujo del proceso de captura de datos y su procesamiento. Este modelo se muestra en la Figura 1.





Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de adquisición y procesamiento de datos.

El modelo propuesto en el sistema en la hoja de cálculo tiene como entrada las cargas, es decir, a partir del conteo de cargas iniciamos el cálculo de la carga total, posteriormente se especifica el lugar de la residencia donde se encuentran dichas cargas, después se especifica de que tipo de cargas se trata, por ejemplo; foco, lámpara, plancha, entre otros.

Una vez terminado el proceso anterior se tiene que realizar una entrevista por el especialista a los residentes, la cual consistió únicamente de dos preguntas, 1. ¿Cuánto tiempo usa cada carga al día en horas? y 2. ¿Cuántos días a la semana las utiliza?, una vez teniendo las respuestas se vacían estas en el sistema, con ello se determina la potencia utilizada por cada carga a la semana y al mes,



posteriormente se realiza la suma de todas las cargas, con lo que se llega al dato final de la potencia en kWh/mes, que es la medida estándar con la que se factura la energía eléctrica en México.

Lectura de placa de la Corriente (I) y el Voltaje (V) de la carga.

Posteriormente se realiza el cálculo unitario de la potencia de la carga (W), consecutivamente se especifica la cantidad de cargas y con esto se calcula la potencia total (W) de cada tipo de carga.

Las operaciones descritas en el proceso como los son, el cálculo de potencia por cargas, se realizaron en un primer momento en una hoja de cálculo de Excel, con el fin de realizar una plantilla de trabajo que sirviera como la base de la programación del software, esto sirvió para poder caracterizar cada una de las operaciones hasta llegar al cálculo final de kWh/mes.

				4	LCULO DE CONSUMO ELÉC	TREO				
LUGAR DE LA CARGA	CARGA	CANTERD	DATOS	DATOS DE PLACA		POTTINGA TOTAL (IN)	tiengo de funcionamiento		tiengo de funcionamiento	
RESIDENCIA			TTRIBON (V)	CONSIDER IN	(47)		Fromedio discio (h)	Dias de uso a la semana (dis)	Prometio semanel (h)	
					(0			0	0
					(0			0	1
						2 0			0	
		-				0			0	
									0	
						0			0	2
						0			0	
					6	2 13			0	
						0			0	3
					(0 0			0	
						n (1			0	
						2 0			0	
		-				0			0	
						e. 14			1014	
									kwh/d	0./

Figura 2. Plantilla para la contabilización y procesamiento de cargas en hoja de cálculo (Microsoft Excel).

El primer sistema de prueba fue a través de una hoja de cálculo como se observa en la Figura 2.

				PERIODO FAC			
				Concepto	Lectura actual Medida 💿 Estimada 🌒	Lectura anterior Medida 👁 Estimada 👁	Total periodo
				Energía (kWh) Básico Intermedio	18924	18663	261 150 111
PERIODO FAC	TURADO: 04 MA	Y 21 - 02 JUL 21					
Concepto	Lectura actual	Lectura anterior	Total				
	Medida 🕢 Estimada 🌖	Medida 🕤 Estimada 🌖	periodo				
Energía (kWh)	19172	18924	248				
Básico			150				
Intermedio			98				
Suma			248				

Figura 3. Lecturas bimestrales de los periodos reportados, en kWh

2.2 Algoritmo de Programación

Con base en el modelo y nuestra plantilla de trabajo se comenzó con el desarrollo del algoritmo de programación, definiendo a NetBeans como nuestra plataforma de desarrollo y en cual se trabajó dicho proceso.

NetBeans es un entorno de desarrollo que consiste en un IDE de código abierto y una plataforma de aplicaciones que ayudan a desarrolladores a establecer rápidamente aplicaciones web, empresariales, de escritorio y móviles. Brinda un IDE completo que se ejecuta en variadas plataformas y es compatible con casi todos los idiomas populares que utiliza [10].



Con esta herramienta se comenzó el desarrollo del sistema, desde la página principal Apache NetBeans, creamos un nuevo proyecto en "Java with Ant" y "Java application" (Figura 4), de aquí se asignaron nombres de ventanas y datos básicos del formulario y posteriormente los elementos de la ventana; labels, cajas de texto, botones, tables y títulos (Figura 5).

Stept	Choose Project				
1. Choose Project	Q, Filter				
	Categories	Projecte			
	In Jacob with Masser	2 luve Application			
	Arva with Gradie	 Java Class Library Java Project with Existing Searces 			
	Aurophy Sector Sec	副 Jazz Mozulus Project 通 Jazz Franci etm Project			
	Description				
	Creates a new Java SE applicat main class in the project. Standau build, nun, and debug your project	ion is a standard IDE project. You can also generate a Episjecta saw on IDE-generated Ant build accipt to			
128					

Figura 4. Creación del proyecto en "Java with Ant" y "Java application"

Des gn Preview (Tormulario)	_	
DIAGNÓSTICO		
ESPACIO DEL HOGAN		
Philipped		
APARTO O DISPOSITIVO		
teambre:		
Conidad		
DATOS DE PLACA		
Teor Wo IV's		
Contente (Als		
POTENCIA		
taite -		
Tirat		
TIEMPO DE FUNCIONAMIENTO		
Wornedia dash (het		
Ceo por verraixe (Diarts		
Prometic General		
Energia (Wh/s):		

Figura 5. Pantalla inicial con el formulario requerido para la contabilización de cargas.

01. INICIO ALGORITMO
02. ENTRAR: Espacio de la casa (nombre)
 ENTRAR: Nombre del dispositivo, aparato o electrodoméstico y cantidad
04. ENTRAR: Datos de placa (tensión y corriente)
05. ENTRAR: Tiempo de funcionamiento (por hora y por días)
06. ENTRAR: Botón EVALUAR
07. CALCULAR: Potencia (unitaria y total)
08. CALCULAR: Promedio de uso semanal y Gasto de energía
09. SALIDA: Cálculos realizados
10. ENTRAR: Botón REGISTRAR: Agrega registro a tabla
11. ENTRAR: Botón NUEVO: llenar nuevo formulario (Volver al paso 2)
12. ENTRAR: Botón MODIFICAR: Modifica registro de tabla
13. ENTRAR: Botón ELIMINAR: Elimina registro de tabla
14. ENTRAR: Botón CALCULAR: Calcula gasto de energía por hora, dia y mes
15. SALIDA: Cálculos realizados
16. FIN DEL ALGORITMO

Figura 6. Algoritmo para el diseño del sistema.

Los botones que se realizaron fueron evaluar, registrar, nuevo, modificar, guardar cambios, eliminar, calcular y generar reportes.

Esto es la interfaz del sistema, posteriormente se diseñó el algoritmo de la programación (Figura 6) que consistió en cinco etapas; 1) llenar la primera consiste en llenar el formulario con los datos acerca de los equipos que se conectan a la corriente, y especificaciones de instalación eléctrica, 2) posteriormente se evalúan los datos y se validad que sean correctos, 3) se registran los datos en una tabla, 4) esta consiste en eliminar o modificar algún registro, una vez este todo correcto a criterio del usuario, 5) el cálculo del total del consumo eléctrico de todos los dispositivos o cargas en la tabla de registro. Una vez realizado el algoritmo y programado dentro del sistema, se realizaron las pruebas al mismo.



La instalación del sistema para un agente especializado consta en recibir el paquete del software a partir de una carpeta comprimida en formato .rar o .zip, una vez realizada la instalación automáticamente se puede comenzar con el proceso de captura y validación de datos como lo marca el diagrama de flujo mostrado en la Figura 7.



Figura 7. Diagrama de flujo de captura y validación de datos en el sistema.

3. Resultados

Se evaluó al sistema con implementación de las pruebas domésticas realizadas en una primera fase del proyecto con la plantilla en Excel. Los resultados en kWh/mes coinciden en el sistema desarrollado en JAVA.



Se replico el trabajo hecho en la plantilla de la hoja de cálculo, contando con el mismo resultado, sin embargo, con una interfaz propia y un programa que puede ser ejecutable en cualquier equipo para un especialista, el trabajo del sistema se muestra en la Figura 8.

Como un resultado adicional, al realizar una prueba doméstica para el periodo primavera, de forma bimestral en marzo-mayo la factura arrojó un 261kWh y mayo-julio de 248kWh, mientras que el cálculo mensual con la hoja de cálculo nos arrojó un 147.01kWh/mes, que en un periodo bimestral se convierte en 294.02kWh demostrando su efectividad, teniendo un resultado de error relativo porcentual del 13.03% parar el primer bimestre reportado y de 18.55% para el segundo bimestre reportado.

DIAGNOSTICO								REGISTRAR	MODIFIC	AR ELIM	INAR X
FORMULARIO	TABLA	DE REGIS	TROS								
	Espacio	Dispositovo	Cantidad	Tension(V)	corriente(A)	P. Unitaria	P. Total	Uso diario(hrs)	Uso Semanal(Promedio Uso	Energia
ESPACIO DEL HOGAR	Recámara 1	Foco	1	117	0.055	6.435	6.435	4	7	28.0	25.74
Nombre: Planta Baia	Recámara 1	Luces Led	1	117	0.3	35.100002	35.100002	1	7	7.0	35,100002
Hombres (France Daja	Recámara 1	Monitor	1	117	0.9	105.299995	105.299995	2	5	10.0	150.42857
APARTO O DISPOSITIVO	Recámara 1	Lap Top	1	117	1	117.0	117.0	2	5	10.0	167.14285
	Recámara 1	Sistema de so	1	117	1.5	175.5	175.5	0.5	2	1.0	25.071428
Nombre: Impresora	Baño 1	Foco	1	117	0.07	8.19	8.19	0.2	7	1.4	1.6379999
the second s	Comedor	Foco	1	117	0.045	5.2650003	5.2650003	5	7	35.0	26.325
Cantidad: 1	Cocina	Refrigerador	1	117	1	117.0	117.0	2	7	14.0	234.0
	Cocina	Microondas	1	117	13	1521.0	1521.0	0.016	7	0.112	24.336
DATOS DE PLACA	Cocina	Foco	1	117	0.08	9.36	9.36	2	7	14.0	18.72
Tangila BR. 117	Cocina	Estufa	1	117	0.35	40.95	40.95	0.001	7	0.007	0.04095
rension (v):	Cocina	Tostador	1	117	4	468.0	468.0	0.001	1	0.001	0.066857144
Corriente (A): 5	Cocina	Licuadora	1	117	4	468.0	468.0	0.001	3	0.003	0.20057143
contraine prix	Sala	Pantalla	1	117	1	117.0	117.0	3	7	21.0	351.0
POTENCIA	Sala	Foco	1	117	0.09	10.530001	10.530001	5	7	35.0	52.65
and the second	Sala	Dispositivo de	2	117	0.5	58.5	117.0	20	7	140.0	2340.0
Unitaria: 585.0	Sala	Cargadores	2	117	0.12	14.04	28.08	2	7	14.0	56.16
	Cuarto de Lav	Lavadora	1	117	5	585.0	585.0	2	1	2.0	167.14285
Total: 585.0	Cuarto de Lav	Foco	1	117	0.07	8.19	8.19	6	7	42.0	49.139996
	Cuarto de Lav	Modem	2	117	0.01	1.17	2.34	24	7	168.0	56.16
TIEMPO DE FUNCIONAMIENTO	Recamara 2	Foco	1	117	0.045	5.2650003	5.2650003	6	7	42.0	31.590002
	Planta Baja	Foco	6	117	0.1	11.7	70.2	5	5	25.0	250.71426
Promedio diario (hrs): 0.09	Planta Baja	Computadora	1	117	2.3	269.1	269.1	3	5	15.0	576.6429
	Planta Baja	Terminal	1	117	0.1	11.7	11.7	9	7	63.0	105.299995
Uso semanal (Dias): 3	Planta Baja	Impresora	1	117	5	585.0	585.0	0.09	3	0.27	22.564287
Dromodio Semanak 0.27											
Promesio Semanal. 0.27								GASTO	TOTAL DE ENER	RGIA: 4767.87	55 kWh
Energia (Whid): 22 564287									CAETO DO	4 76707	
chergia (minu).									GASTOPO	4.10101	s/ kWh/dia
LIMPIAR									GASTO POP	R MES 147.804	14 kWd/Me
											CALCULAR

Figura 8. Interfaz del sistema con los datos recolectados en la prueba realizada a un inmueble residencial.

4. Conclusiones

A partir de la comparativa entre la hoja de cálculo y el sistema desarrollado en JAVA; así como de la comparación entre los kWh emitidos en la factura y el dato obtenido a partir del cálculo de cargas desarrollado en este proyecto se puede afirmar lo siguiente: 1. La comparativa entre la hoja de cálculo y el sistema desarrollado en JAVA, se replica el resultado, lo cual permite concluir y demostrar que los resultados son consistentes. 2. El error relativo porcentual entre el sistema de conteo y la factura fue de 13.03% para el primer periodo reportado y de 18.55% para el segundo, por lo tanto, se logra obtener un error menor al 20%, lo cual se ajusta al planteamiento hipotético de este proyecto.

Como parte de la discusión, esta herramienta digital de ayuda al diagnóstico energético, tiene una mejora en la interfaz para el especialista que como perspectiva futura llegará a contener las alertas para cargas que tienen mayor peso dentro del conteo, con ello se pueden crear de forma automática las sugerencias para el diagnóstico del especialista, para con el usuario e incluso podría generarse un reporte general de resultados que se pueda imprimir una vez realizada la visita y que comience el proceso del diagnóstico energético.



Referencias

[1] C. Sánchez y H. Fuquen Gonzalez, «Eficiencia energética,» Desarrollo tecnológico e innovación empresarial, pp. 9-13, 2014.

[2] CONUEE, «https://www.gob.mx/conuee,» 12 junio 2018. [En línea]. Available: https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/empresas-energeticas-160978.

[3] M. Peñaloza Acosta, F. Arévalo Cohen y R. Daza Suárez, «Impacto de la gestión tecnológica en el medio ambiente,» Revista de Ciencias Sociales, pp. 306-316, 2009.

[4] E. O. Hernandez, L. A. Sanchez-Viveros y I. S. Ramos, «DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO ELÉCTRICO APLICADO A UNA PLANTA DE,» IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference - Brasil (PCIC Brasil), pp. 87-93, 2014.

[5] CONUEE, Guía para realizar diagnósticos energéticos y evaluar medidas de ahorro en equipos de bombeo de agua, Ciudad de México: Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, 2014.

[6] secretaria de Energía, Protocolo de actividades para la implementación de acciones de eficiencia energética en inmuebles, flotas vehiculares e instalaciones de la Administración Pública Federal., Diario Oficial de la Federación, 2012, 13 de enero.

[7] M. O. N. I. N. & P. N. B. Onibonoje, «An Internet-of-Things Design Approach to Real-Time Monitoring and Protection of a Residential Power System, » 2019 IEEE 7th International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE), pp. 113-119, 2019.

[8] T. M. Fernández Caramés, «An Intelligent Power Outlet System for the Smart Home of the Internet of Things, » Hindawi Publishing Corporation, vol. 2015, nº 214805, pp. 1-11, 2015.

[9] X. X. Huo, X. D. Wang, X. H. Zhu y S. Y. Ge, «Energy Efficiency Diagnosis of Smart Grid Park,» IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD), n° 5243, pp. 358-359, 2015.

[10] R. Sharma y S. Koshy, «Promoting Open Source Technology in Education: NetBeans : The Perfect Open Source IDE,» IJCST, pp. 571-575, 2011.

Diseño y Planeación Mecatrónica

Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C. Prolongación Corregidora Norte No. 168, interior E Col. El Cerrito, C.P. 76160, Querétaro, Qro. Distribución en formato digital por internet, formato: PDF, tiraje: 1000, pp. 345, Tamaño: 21 Mb.

ISBN: 978-607-9394-25-7

