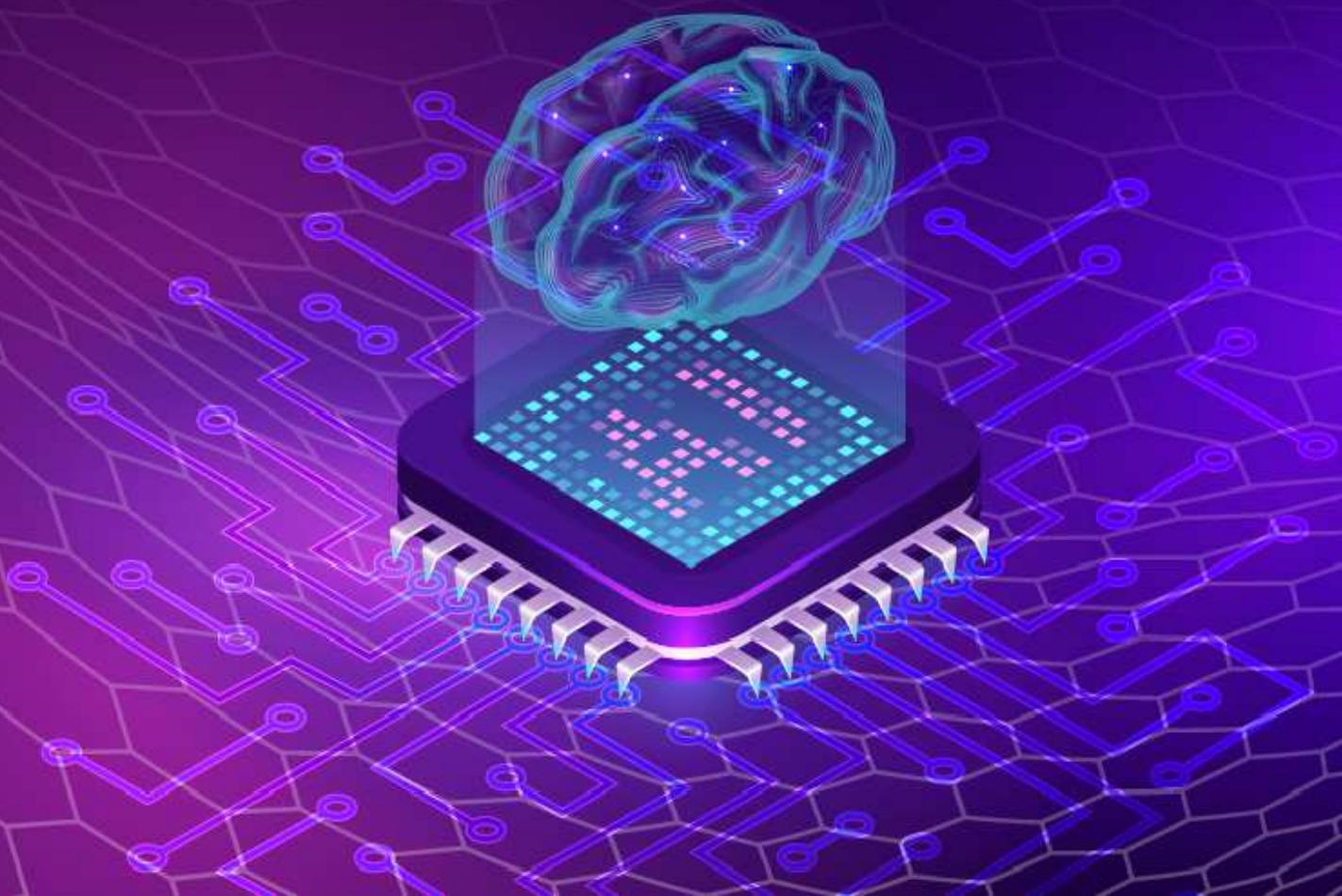


Proyectando Innovaciones en Ingeniería

Juan Manuel Ramos Arreguín
Sebastián Salazar Colores



Proyectando Innovaciones en Ingeniería

1ª Edición

**Ramos Arreguín Juan Manuel
y Salazar Colores Sebastián**

“Proyectando Innovaciones en Ingeniería”

Ramos Arreguín Juan Manuel

Salazar Colores Sebastián

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

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

1ª Edición, 31 de Diciembre, 2021.

ISBN: 978-607-9394-24-0

Derechos reservados.

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

Impreso en México – Printed in Mexico

Índice

Capítulo 1	Análisis de Trenes de Engranajes Rectos Aplicando Tecnología CAD/CAM/CAE Filiberto Candia García F., Vivaldo de la Cruz I., Ambrosio Lázaro R.C., Flores Méndez J. y Crispín D.A.	1
Capítulo 2	Diseño y Construcción de un Asistente Virtual para el Turismo del Estado de Aguascalientes con RA Bautista Cruz Anahy, Paredes Orta Carlos Alberto, Valentín Coronado Luis Manuel y Acevedo Ramírez Gustavo Adolfo.	18
Capítulo 3	Maximización de las Propiedades de Adherencia en Recubrimientos PVD/DLC Santoyo Turrubiartes Sarur, Mondragón Rodríguez Guillermo César, González Carmona Juan Manuel y Tapia Ramírez Víctor Hugo.	30
Capítulo 4	Maquina Taponadora Semiautomática de Botellas PET Alejandre Flores Marisol, Hernández Oliva Noemi, Soto Hernández Bruce y Zamacona Sánchez Daniel.	51
Capítulo 5	Integración de un Esquema de Alarma y Detección para el Desbordamiento de Canales con la Red Sigfox Galindos Granados Ma. de los Ángeles, Alcalá Rodríguez Janeth A., Charre Ibarra Saida M., Gudiño Lau Jorge y Durán Fonseca Miguel A.	65
Capítulo 6	Optimización de la Energía de un Robot Manipulador Serie-Paralelo a través de Evolución Diferencial Ricardo Mejía Rodríguez, Miguel Gabriel Villarreal Cervantes y Víctor Darío Cuervo Pinto.	80
Capítulo 7	Aspectos Importantes de la Manufactura 4.0 y los Sistemas Ciber-Físicos: Rutas para Mejorar la Carrera de Mecatrónica Jiménez López Eusebio, López Martínez Aldo Augusto, Luna Acosta Noé, Gaytán Martínez Lilia Zulema, García Velásquez Luis Andrés y Ochoa Estrella Francisco Javier.	96
Capítulo 8	Desarrollo de Hardware para el Aprendizaje del Manejo de Microcontroladores Ramos Juárez Ulises Alejandro, Ramos Arreguín Juan Manuel, Jesús Carlos Pedraza Ortega y Marco Antonio Aceves Fernández.	111
Capítulo 9	Desarrollo de un Sistema de Inducción Magnética para un Equipo de Cocción por Medio de Simulación Numérica Ibañez Olvera Mario, Balderas Gutiérrez Juan Nabor y Jaramillo Sierra Bethsabet.	125
Capítulo 10	Interfaz Gráfica de Detección de Trypanosoma Cruzi (virus de chagas) Mediante Machine Learning Meneses Flores Arturo Elfego, Austria Mariano Leidy Laura y Salazar Casanova Hermes.	137

Capítulo 11	Sistema de Control Automatizado para una Órtesis Dinámica para la Rehabilitación de los Dedos Juan Carlos Vásquez Jiménez, Felipe Ernesto Orozco Contreras, Asunción Adriana Arango Perdomo, Serafín Reyes García y María de Jesús Oregán Silva.	147
Capítulo 12	Herramientas Enfocadas en ROS para la Construcción y Programación de Robots Móviles Peza Ortíz Edebaldo, García Trinidad Enrique, García Sánchez José Rafael, Martínez Martínez Jesús y Juárez Carrillo César Felipe.	166



Análisis de Trenes de Engranajes Rectos Aplicando Tecnología CAD/CAM/CAE

Filiberto Candia García F., Vivaldo de la Cruz I., Ambrosio Lázaro R.C., Flores
Méndez J. y Crispín D.A.

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

Resumen

Mediante la tecnología integrada CAD/CAM/CAE, que se aplica mediante un software comercial para determinar mediante una simulación dinámica la relación de velocidad de un sistema de engranajes rectos. El análisis de movimiento dinámico por medio de la tecnología CAD/CAM/CAE se propone como alternativa de solución a la problemática que implica la enseñanza de la transmisión de potencia por sistemas de engranajes rectos en las Instituciones de Educación Superior. Asimismo, tiene el propósito de contribuir con un procedimiento de diseño de sistemas de engranajes rectos, con apoyo CAD/CAM/CAE. El análisis dinámico utiliza el método científico deductivo, para la recogida y análisis de datos la herramienta utilizada es la representación gráfica del comportamiento de la variable velocidad. Para estudiar la eficiencia del sistema de engranajes se toma de referencia la potencia de un motor de 14 H.P., que proporciona el valor de referencia de la velocidad de salida, con la cual se comparan las relaciones del tren de engranaje “mayor que”, “menor que” e “igual que”, que son proporcionales con las variaciones geométricas (tamaño) de los engranes motrices y conducidos. La simulación dinámica permite reportar como hallazgos la verificación de las dimensiones geométricas óptimas para transmitir la potencia de 14 H.P. de manera eficiente entre el elemento motriz y el elemento conducido. El trabajo presentado permite concluir que el software comercial CAD/CAM/CAE es una potente herramienta de apoyo en el diseño de sistemas de engranajes, debido a que disminuye el tiempo de diseño de los elementos motrices y conducidos.

Palabras clave: Simulación Dinámica, Sistemas de engranajes, CAD/CAM/CAE.

1. Introducción

Durante el diseño de maquinaria o dispositivos de producción para el sector agrícola y ganadero se ha identificado que el diseño de sistemas de engranajes representa un relevante componente de los mismos. Debido a que el diseño óptimo de la cadena cinemática es utilizada en la mayoría de las máquinas o dispositivos de transmisión de potencia para proporcionar versatilidad y suavidad en el movimiento final ya sea lineal o angular, logrando mayor rendimiento en el proceso de trabajo, debido a dependencia entre la velocidad y el torque. Se considera que la transmisión mecánica empieza desde la parte motriz (motor) hasta la parte de salida o eje principal de trabajo [1].

Entre las problemáticas asociadas al diseño no eficiente de sistemas de engranajes se pueden mencionar con base en la revisión de trabajos de otros autores: el desconocimiento del uso de reductores de velocidad en la industria [2], la falla continua en los elementos de transmisión de potencia que sufren desgaste o fractura por frenados inesperados [3], error de análisis de en los engranes [4]. Asimismo, en los trabajos de estos autores el objetivo ha sido la propuesta de mejora en el diseño y dimensionamiento de los sistemas de transmisión por engranes. Para ello, han abordado de manera recurrente la inclusión de la tecnológica CAD/CAM/CAE para la validación operativa y funcional de los diseños analíticos. Como parte de sus conclusiones reportan mejoras significativas con la incorporación de la tecnología CAD/CAM/CAE, tanto en tiempo como en la simplificación de los procedimientos de



diseño, sin pasar por alto la normativa asociada como la Asociación Estadounidense de Fabricantes de Engranajes (AGMA, por sus siglas en inglés), que es cooperación multidisciplinaria para el diseño, la fabricación, y la aplicación de los elementos de transmisión de potencia y equipos relacionados. Una ventaja competitiva de este trabajo es la atención a la necesidad y oportunidad que representa el sector eólico de pequeña escala [5].

En trabajos anteriores se ha concluido que las normas AGMA deben ser utilizadas preferentemente por un diseñador con experiencia debido a los criterios que se deben tomar en cuenta para la determinación de los factores de corrección. Asimismo, que el método del elemento finito es confiable siempre y cuando el diseñador tenga conocimientos básicos en su manejo y en el uso de un software de diseño de alto nivel [4]. Sin embargo, también se reporta que como trabajos futuros es deseable hacer uso de herramientas con mayor potencial para realizar un análisis dinámico y de fatiga que asegure la confiabilidad del diseño [5]. Este trabajo no pretende desconocer la aplicación de la normativa AGMA, sin embargo, de manera sintetizada se plantea como un referente para proponer la primera versión del diseño de un sistema de engranajes, siendo el objetivo contribuir en el área académica con un procedimiento de diseño de sistemas de engranajes rectos, con apoyo de la tecnología CAD/CAM/CAE, que posteriormente puede someterse a una validación analítica de mayor rigor por especialistas del área. Entre las ventajas de la simulación por computadora se encuentra la permisión al diseñador, para salir de una visualización y análisis empírico, pudiendo incluso, agregar elementos innovadores o creativos a los modelos que está diseñando [7].

El desarrollo de la propuesta se fundamenta en la simulación dinámica multicuerpo (MBD, por sus siglas en inglés), por medio de la solución especializada AdAms modulo que se encuentra integrado a la plataforma NX Siemens, este software ayuda a los ingenieros a entender la dinámica de las piezas de un ensamble en movimiento, permite el estudio de la distribución de cargas sobre las estructuras de soporte y entre los mismos elementos dinámicos, acciones que mejoran y optimizan los productos finales como la maquinaria agrícola. AdAms permite evaluar y controlar interacciones complejas entre distintas disciplinas como son movimiento, análisis estructural y vibraciones, para optimizar el diseño de las cadenas cinemáticas y para obtener un mejor rendimiento, seguridad y confort, sobre sus desplazamientos lineales o angulares.

Los resultados obtenidos del procedimiento para ejecutar una simulación dinámica [5] permiten reportar como hallazgos la verificación de las dimensiones geométricas óptimas de un sistema de engranajes, para transmitir una potencia de 14 H.P. de manera eficiente entre el elemento motriz y el elemento conducido.

2. Marco Metodológico-Conceptual

Diseñar un sistema de engranajes requiere de una alta destreza y conocimiento del tema de transmisión de potencia por engranes y del diseño de elementos de máquinas, temáticas que son propias de un profundo y amplio estudio en el campo de la formación de la Ingeniería Mecánica [6], [7], [8]. Una alternativa al diseño (figura 1) se adapta del modelo convencional mostrado en anexo 1 por [18], para simplificar el diseño de sistemas de engranajes es la tecnología CAD/CAM/CAE. El diseño, manufactura e ingeniería asistida por computadora. Si bien es una tecnología reciente su aceptación e incorporación en el sector industrial ha tenido un rápido escalamiento en su uso y aplicación. Como disciplina la tecnología CAD/CAM/CAE permite mejorar la calidad, disminuir los costes y acortar los tiempos de diseño y producción [10].

Este proceso se logra de manera sistemática al analizar y optimizar el diseño del producto [11], [12], [13], [14] que permite a los especialistas de cada área de la ingeniería a determinar cómo se comporta un sistema o un prototipo virtual funcional y eliminar errores de diseño conceptual sin la necesidad de gastar tiempo y dinero construyendo y evaluando prototipos reales. La formalidad de la metodología CAD/CAM/CAE se muestra en la figura 1, que ilustra la secuencia de apoyo en el diseño de un tren de engranajes rectos.

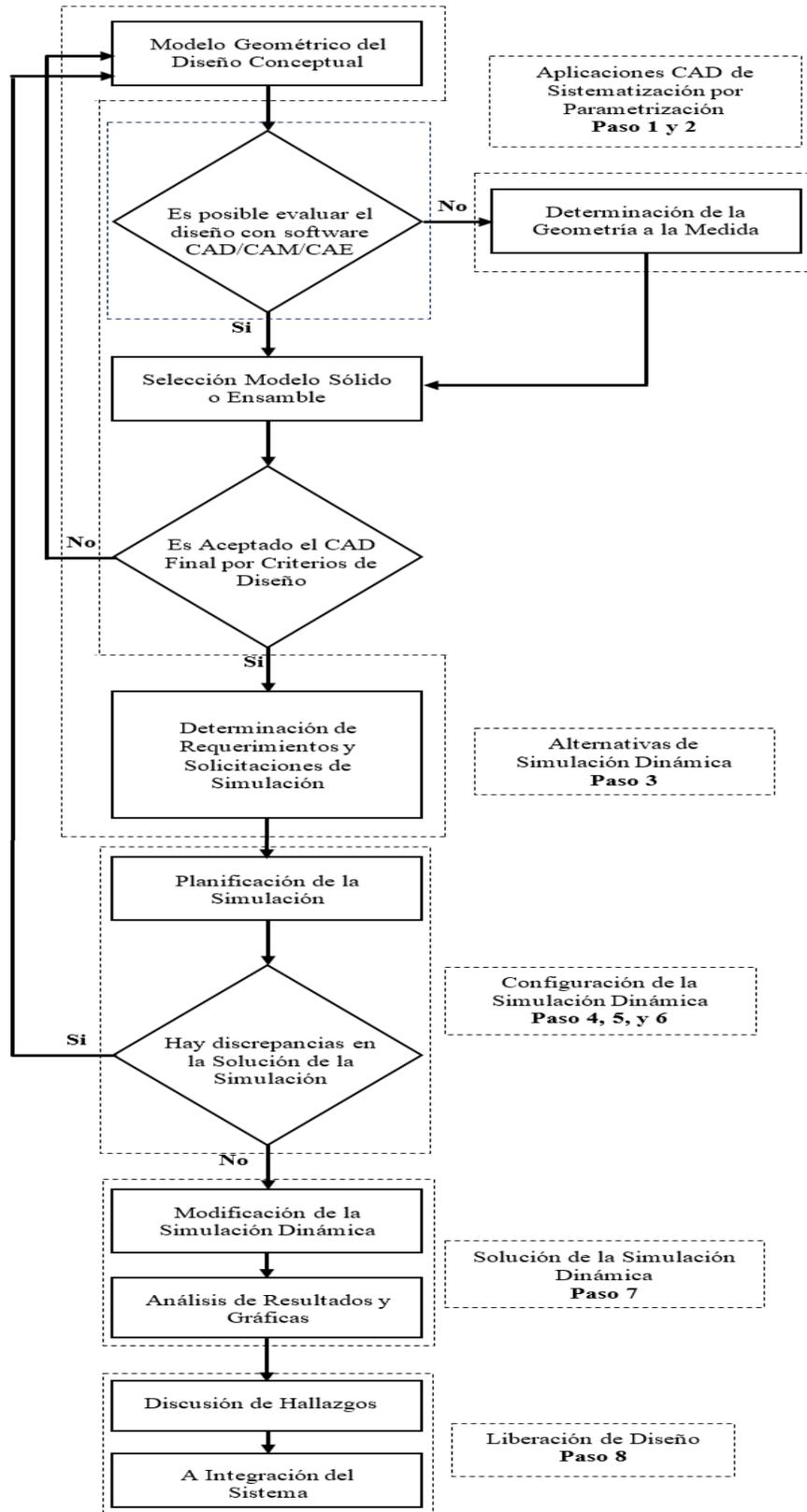


Figura 1. Metodología de diseño de trenes de engranajes CAD/CAM propuesta. Adaptada de [10].

2.1 Conceptos Generales

Se consideran engranes rectos (figura 2) a los elementos de máquinas capaces de transmitir movimiento de un eje a otro eje paralelo. Tienen dientes paralelos al eje de rotación y su configuración permite desarrollar las relaciones cinemáticas básicas de la forma de los dientes y de las relaciones de velocidad.

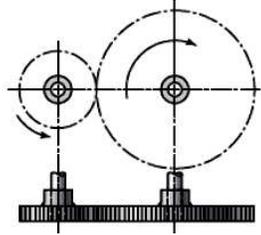


Figura 2. Representación sintética de un sistema de engranes rectos. Tomada de [15].

La geometría del diente (figura 3) depende de variables geométricas que requieren ser parametrizadas para lograr un tallado eficiente del diente.

- El paso circular (p) es la distancia, medida sobre el círculo de paso, desde un punto en un diente a un punto correspondiente en un diente adyacente.
- El módulo (m) representa la relación del diámetro de paso con el número de dientes.
- El paso diametral (P) está dado por la relación del número de dientes en el engrane respecto del diámetro de paso.
- La cabeza (addendum) (a) se determina por la distancia radial entre la cresta y el círculo de paso.
- La raíz (dedendum) (b) equivale a la distancia radial desde el fondo hasta el círculo de paso.
- La altura, o profundidad total (ht), es la suma de la cabeza (addendum) y la raíz (dedendum).
- El círculo del claro es un círculo tangente al círculo de la raíz (dedendum) del engrane acoplado.
- El claro (c) está dado por la cantidad por la que la raíz (dedendum) en un engrane dado excede la cabeza (addendum) de su engrane acoplado.
- El huelgo se determina mediante la cantidad por la cual el ancho del espacio de un diente excede el grosor o espesor del diente de acoplamiento medido en los círculos de paso.

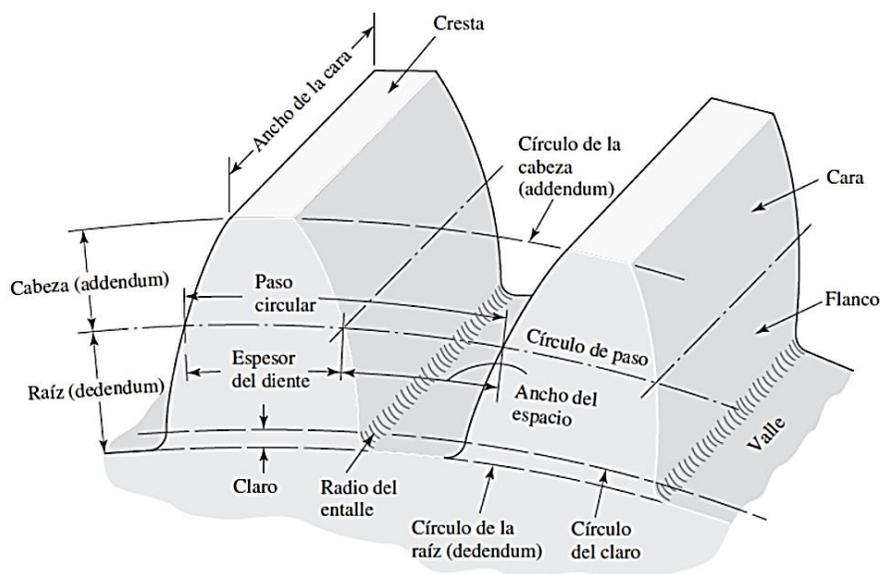


Figura 3. Detalles de la geometría de un engrane recto. Tomada de [15].



2.2 Relación de Velocidad

La relación de velocidad es la transmisión de dos engranes 1 y 2 que se encuentran unidos por contacto directo y alineados en paralelo por ejes independientes. Al considerar que el engrane 1 es la rueda conductora o de entrada, y el engrane 2 es la rueda conducida o de salida del movimiento angular. Se denomina relación de transmisión (r_t) a la correspondencia que existe entre las velocidades de rotación de los dos engranes, específicamente es el cociente entre la velocidad angular de salida y la velocidad angular de entrada ($r_t = \omega_2 / \omega_1$). De esta forma la figura 4 muestra la variación de la relación de transmisión.

- $r_t < 1$, el acoplamiento es reductor
- $r_t > 1$, el acoplamiento es multiplicador

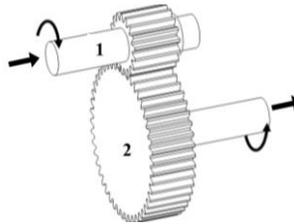


Figura 4. Transmisión de velocidad por engranes. Tomada de [16]

2.3 Torque

La expresión matemática que define la potencia que transmite un eje de transmisión en función del par de fuerzas y de su velocidad angular de giro representada por la ec. 1.

$$P = T \cdot \omega \quad (1)$$

Siendo:

- P, la potencia transmitida por el eje, en Watts
- T, el par de fuerzas que se desarrolla, en N·m
- ω , la velocidad angular a la que gira el eje, en rad/s.

Si la eficiencia de un sistema de transmisión de potencia fuera 1, se puede suponer que la potencia de entrada (P_1) y la de salida (P_2) son iguales al considerarse nulas las pérdidas que se puedan producir en la transmisión, cumpliéndose las siguientes expresiones:

$$P_1 = T_1 \cdot \omega_1 \quad (2)$$

$$P_2 = T_2 \cdot \omega_2 \quad (3)$$

Al ser ambas potencias iguales, se tiene que $P_1 = P_2$, siendo la relación de potencias la proporcionada por la ec. 4. Estableciendo las relaciones de velocidad angular y par las mostradas en la figura 5.

$$T_1 \cdot \omega_1 = T_2 \cdot \omega_2 \quad (4)$$

Cuando se emplea una transmisión reductora ($r_t = \omega_2 / \omega_1$ con $r_t < 1$), donde la velocidad angular del eje de salida es menor que la de entrada ($\omega_2 < \omega_1$), con la igualdad del producto del torque por la velocidad angular ($T_1 \cdot \omega_1 = T_2 \cdot \omega_2$), se consigue un par a la salida de la transmisión (T_2) mayor que el de



entrada ($T_2 > T_1$). De manera recíproca en una transmisión multiplicadora ($r_t = \omega_2 / \omega_1$ con $r_t > 1$), donde la velocidad angular del eje de salida es mayor que la de entrada ($\omega_2 > \omega_1$), se tiene un torque a la salida de la transmisión (T_2) menor que el torque que se desarrolla en el eje de entrada ($T_2 < T_1$). Manteniendo la potencia constante.

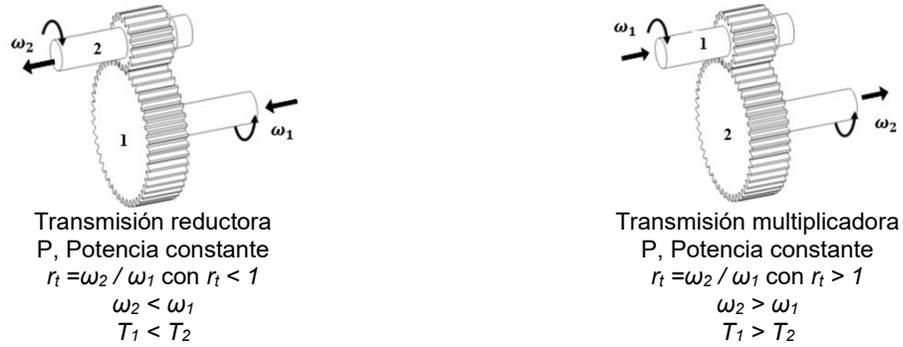


Figura 5. Transmisiones reductoras y multiplicadoras. Tomada de [16].

2.4 Sistemas de engranajes

Si para realizar la transmisión de potencia se necesita más de un par de engranes, entonces el mecanismo, se denomina tren de engranajes (figura 6). Se tiene un tren de engranajes simple cuando en cada eje existe solo un engrane. Se habla de un tren de engranajes compuesto cuando en alguno de los ejes existe más de un engrane. Siendo la relación tanto de potencia (ec. 4) $P_1 = P_2$, como de velocidad (ec. 5) $\omega_1 = \omega_2$.

$$T_1 \cdot \omega_1 = T_2 \cdot \omega_2 \tag{4}$$

$$Z_1 \cdot N_1 = Z_2 \cdot N_2 \tag{5}$$

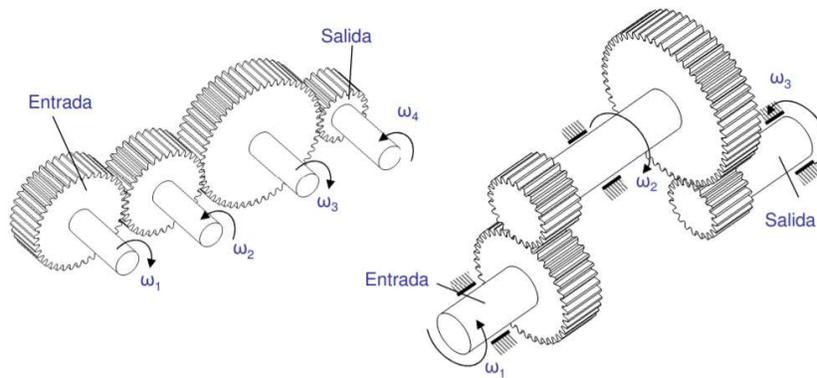


Figura 6. Tren de engranajes simple y compuesto. Tomada de [16].

Para calcular la relación de transmisión de un tren de engranajes compuesto, emplea la ec. 6:

$$R_T = (Z_1 / Z_2) \tag{6}$$

R_T , Relación de transmisión



- Z₁, Número de dientes de engrane # 1.
- Z₂, Número de dientes de engrane # 2.

Para el tren de engranajes del presente proyecto se configuro una relación incremental de 1:4 para cada paso o etapa y la relación de transmisión incremental total de 1:256.

3. Desarrollo

El desarrollo tecnológico de un dispositivo capaz de proporcionar energía mecánica para movilizar u operar maquinaria agrícola o ganadera para pequeños productores, utilizando energía eólica. Es actualmente un procedimiento que no ha sido abordado de manera formal por la comunidad académica. Si bien el desarrollo tecnológico al cual se le llamará sistema o dispositivo de generación de potencia eólica tipo isla, puede ser atendido por las diversas áreas de la ingeniería (mecánica, eléctrica, electrónica, entre otras) de manera independiente, en este trabajo se aborda desde la perspectiva de la mecatrónica atendido por la tecnología CAD/CAM/CAE.

El planteamiento integrador del Dispositivo de Generación de Potencia Eólica (DGPE) se diseña desde la perspectiva de la Mecatrónica, para con ello trabajar con un equipo multidisciplinario, cuyos trabajos individuales de diseño realizan un proceso de análisis del dispositivo DGPE (separar el sistema en sus partes) y posteriormente un proceso de ensamble sistemático, cuyos trabajos son concurrentes por las variables velocidad y potencia.

Con esta premisa el planteamiento inicial del tren de engranajes parte del concepto de la variable potencia, este valor expresado en una cantidad aceptable para trabajar con maquinaria agrícola se estima en 14 H.P. o en 10.44 kW. Por lo tanto, se debe diseñar un sistema de engranajes capaz de aportar en la salida un valor de potencia de a potencia de 10.88 H.P., considerando una pérdida del 22.28%.

Surgiendo una primera pregunta ¿cuál debería ser el tamaño (diámetro) de un engrane recto?, para producir 8.12 kW. Si, por datos de fabricante (tabla 1) se estima que la velocidad mínima a la cual debe trabajar la salida del sistema de engranajes debe ser de 2800 rpm y la velocidad de entrada por operación de una turbina eólica en 4 m/s.

Tabla 1. Ficha Técnica Motores a Gasolina Kohler. Tomado de: <https://emaresa.cl/producto/motor-multiproposito-ch440-14-hp/>

Características	Valor
Modelo	Command PRO CH440
Motor	Kohler a gasolina, 4 tiempos, flecha cuñero, OHV, mono cilíndrico, eje horizontal.
Potencia máxima @rpm hp (kw)	14 (10.5) @3600
Par de torsión máximo, libras-pie (Nm)	22.7 (30.8) @2800 rpm
Peso	33 kg.

Con apoyo de datos de los fabricantes¹, se ha identificado que en los manuales de selección (figura 8), se proporcionan valores geométricos para dimensiones de potencia requeridos (número de dientes, modulo, ángulo de presión y tamaño de la cara, entre otros) a varias velocidades de funcionamiento (rpm) para los engranajes rectos estándar. La clasificación se basa en condiciones normales de funcionamiento, es decir: correctamente montadas y lubricadas, con una carga suave

¹ <https://www.bostongear.com/products/open-gearing/stock-gears/miter-bevel-gears/miter-bevel-gears>



durante no más de 10 horas (factor de servicio = 1.0). El factor de servicio se considera como 1.0, debido a que el trabajo se realizará de tipo choque moderado: no más de 15 minutos en 2 horas y uniforme: no más de 10 horas por día.

Paso 1. Al seleccionar un engrane se toma como referencia la potencia y velocidad máximas a las cuáles puede trabajar y se anotan los datos asociados a la misma (tablas 2, 3, y 4).

Tabla 2. Valores seleccionados para el engrane motriz.

Potencia (H.P.)	Velocidad (rpm)	Paso diametral (plg)	Ángulo presión (°)	Longitud cara (plg)	Número dientes	Agujero eje (plg)	Material
14	3600	8	20	1.5	128	1.125	Cast Iron

Tabla 3. Los valores seleccionados para el engrane conducido.

Potencia (H.P.)	Velocidad (rpm)	Paso diametral (plg)	Ángulo presión (°)	Longitud cara (plg)	Número dientes	Agujero eje (plg)	Material
14	3600	8	20	1.5	32	1	Cast Iron

Tabla 4. Los valores seleccionados para el engrane conducido final.

Potencia (H.P.)	Velocidad (rpm)	Paso diametral (plg)	Ángulo presión (°)	Longitud cara (plg)	Número dientes	Agujero eje (plg)	Material
14	3600	8	20	1.5	16	1	Cast Iron

Paso 2. Se realiza el CAD parametrizado con el asistente GC Toolkits de NX Siemens (figura 7), para el diseño simplificado de engranes. El cual proporciona una significativa reducción de tiempo y empleo de profesionistas especializados con varios años de escolaridad, que son requeridos en el diseño tradicional, permitiendo un eficiente diseño sin poner en riesgo la eficiencia y calidad operativa, tanto de los engranes como elementos de máquinas, así como, de sistemas de engranajes para equipos productivos integrados.

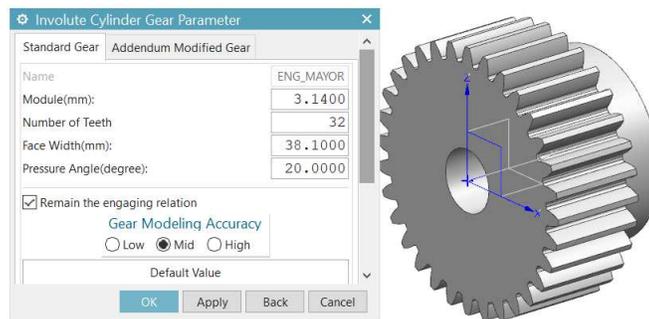


Figura 7. Parámetros de diseño engrane externo recto en GC Toolkits.

Paso 3. Realizado el ensamble de los engranes y ejes individuales en un sistema de engranajes se utiliza el módulo “motion” de NX Siemens (figura 9) y se realiza la simulación dinámica (CAE). Que, a diferencia de la simulación cinemática, la masa representa un significativo en el comportamiento las



variables que intervienen como: la velocidad y el torque. La configuración de la solución incluye la definición de:

- Los Cuerpos de movimiento, tipo cuerpo sólido y determinación elementos conducidos.
- Las Juntas, tipo articulación y determinación del elemento motriz.
- Los Acoplamientos. Tipo engrane sin contacto 3D.

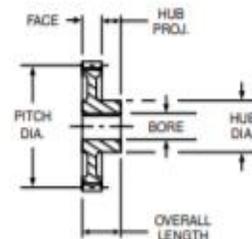
8 DIAMETRAL PITCH STEEL 20° PRESSURE ANGLE 1-1/2" FACE REFERENCE PAGE 45.

No. Teeth	25 RPM		50 RPM		100 RPM		200 RPM		300 RPM		600 RPM		900 RPM		1200 RPM		1800 RPM		3600 RPM	
	H.P.	Torque	H.P.	Torque	H.P.	Torque	H.P.	Torque	H.P.	Torque	H.P.	Torque	H.P.	Torque	H.P.	Torque	H.P.	Torque	H.P.	Torque
12	.27	678	.53	667	1.03	647	1.93	609	2.74	576	4.71	495	6.19	434	7.35	386	9.03	316	11.72	205
14	.35	890	.69	874	1.34	843	2.50	787	3.51	738	5.92	622	7.68	537	9.01	473	10.91	382	13.81	242
15	.39	996	.77	976	1.49	939	2.77	873	3.88	816	6.49	681	8.35	585	9.76	513	11.73	411	14.70	257
16	.43	1084	.84	1061	1.62	1018	2.99	943	4.18	877	6.92	727	8.85	620	10.30	541	12.30	431		
18	.50	1268	.98	1238	1.88	1183	3.44	1086	4.77	1003	7.78	817	9.84	689	11.35	596	13.40	469		
20	.58	1462	1.13	1424	2.15	1354	3.91	1233	5.39	1131	8.64	908	10.82	758	12.38	650	14.47	507		
22	.66	1651	1.27	1604	2.41	1518	4.35	1371	5.95	1250	9.41	989	11.67	817	13.27	698	15.36	538		
24	.73	1831	1.41	1775	2.65	1672	4.75	1498	6.46	1357	10.08	1059	12.39	868	14.00	735	16.08	563		
28	.88	2224	1.70	2145	3.18	2003	5.61	1768	7.54	1583	11.47	1204	13.88	972	15.51	815				
32	1.06	2664	2.03	2557	3.76	2367	6.54	2060	8.68	1824	12.92	1358	15.44	1081	17.10	898				
36	1.22	3082	2.34	2944	4.29	2703	7.37	2321	9.68	2034	14.13	1484	16.68	1168						

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

ALL DIMENSIONS IN INCHES
ORDER BY CATALOG NUMBER OR ITEM CODE

No. of Teeth	Pitch Dia.	Bore	Hub		Style See Page 323	Without Keyway or Setscrew		With Keyway and Setscrew†	
			Dia.	Proj.		Catalog Number	Item Code	Catalog Number	Item Code
8 DIAMETRAL PITCH STEEL									
						Face = 1.500" Outside Dia. = Pitch Dia. + .250" Overall Length = 1.500" + Hub Proj.			
STEEL									
12	1.500	.750	1.12	.75	A	YH12	09980	YH12-3/4	46187
14	1.750	.750	1.31	.75		YH14	09982	YH14-3/4	46188
15	1.875	.875	1.43	.75		YH15	09984	YH15-3/4	46189
						-	-	YH15-7/8	46190
16	2.000	1.000	1.56	.88		YH16	09986	YH16-7/8	46191
						-	-	YH16-1	46192
18	2.250	1.125	1.81	.88		YH18	09988	YH18-7/8	46193
						-	-	YH18-1	46194
						-	-	YH18-1-1/8	46195
20	2.500	1.250	2.06	.88		YH20	09990	YH20-7/8	46196
						-	-	YH20-1	46197
						-	-	YH20-1-1/8	46198
22	2.750	1.125	2.31	.88		YH22	09992	YH22-7/8	46199
						-	-	YH22-1	46200
						-	-	YH22-1-1/8	46201
24	3.000	1.125	2.56	.88		YH24	09994	YH24-7/8	46202
					-	-	YH24-1	46203	
					-	-	YH24-1-1/8	46204	
28	3.500	.875	3.06	.88	YH28	09996	-	-	
32	4.000	1.000	3.00	.88	YH32C	10666	-	-	
36	4.500	1.000	3.50	.88	YH36C	10668	-	-	
CAST IRON									
40	5.000				B	YH40B	10670	-	-
44	5.500					YH44B	10672	-	-
48	6.000				C	YH48B	10674	-	-
56	7.000	1.000	2.50	1.00		YH56B	10678	-	-
60	7.500				YH60	10678	-	-	
64	8.000				YH64B	10680	-	-	
72	9.000				YH72B	10682	-	-	
80	10.000				D	YH80B	10684	-	-
88	11.000					YH88B	10686	-	-
96	12.000	1.125	3.00	1.25		YH96B	10688	-	-
112	14.000					YH112B	10690	-	-
120	15.000					YH120	10692	-	-
128	16.000					YH128B	10694	-	-



STANDARD TOLERANCES

DIMENSION	TOLERANCE
BORE	All ±.0005

Figura 7. Datos de consulta en catálogo de fabricantes, para dimensionar las características geométricas.

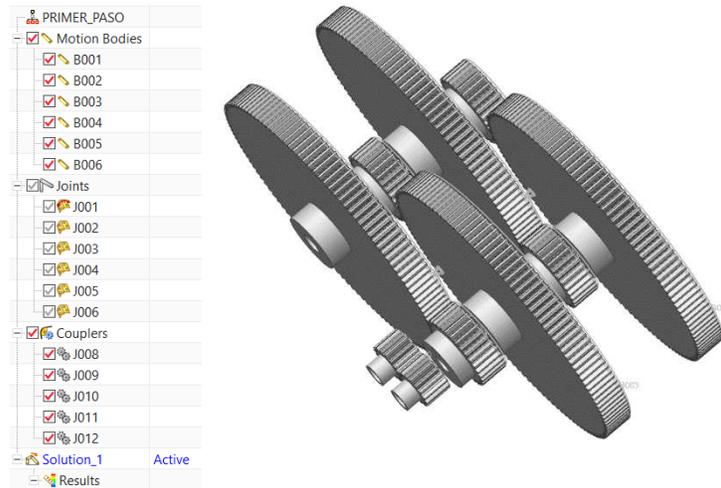


Figura 9. Configuración módulo “motion” NX Siemens.

4. Resultados

4.1 Análisis

Paso 4. La presentación de los resultados se enfoca en la representación gráfica de las variables torque y velocidad, que se trasladan a una hoja de Excel que permite determinar de manera analítica la potencia en H.P. del sistema de engranajes rectos como el que se muestra en la figura 10 y 11 y que se utilizará para proporcionar una relación de transmisión de 8 y una potencia de entrada y salida aproximada a 14 H.P.

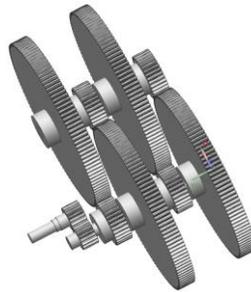


Figura 10. Vista 3D del diseño CAD del sistema de engranajes multiplicador.

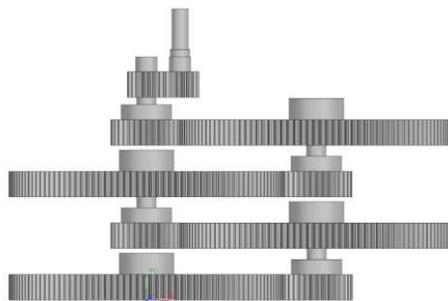


Figura 11. Vista superior del diseño CAD del sistema de engranajes multiplicador.



Paso 5. Durante la preparación de la simulación cinemática es indispensable la determinación del punto de contacto de los acoplamientos de los pares de engranes motriz y conducido, debido a que la relación de transmisión depende directamente de la configuración de la cadena cinemática (figura 12).

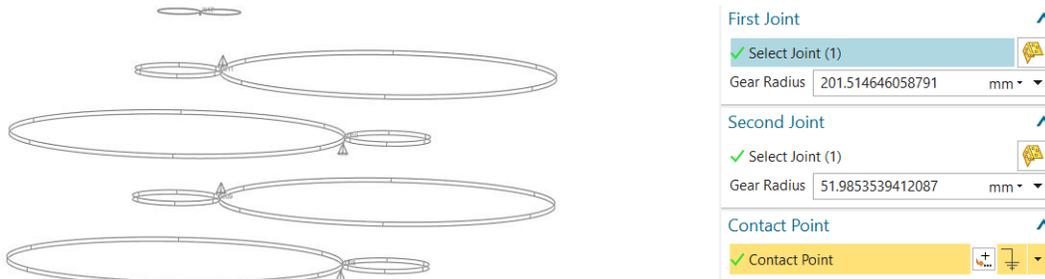


Figura 12. Vista superior y configuración del acoplamiento cinemático del sistema de engranes multiplicador.

Paso 6. Mantener la potencia de entrada y salida constantes durante un análisis dinámico requiere una entrada inicial de condiciones de desplazamiento angular (figura 13) para esta simulación se ha establecido como fuente de movimiento una aceleración de $1.6 \text{ }^\circ/\text{s}$.



Figura 13. Definición de la velocidad de entrada del sistema de engranes y tiempo de ejecución de la simulación.

Paso 7. La gráfica inicial del paso 1 (figura 14), muestra el comportamiento constante del torque (Nmm) y el incremento lineal de la velocidad angular ($^\circ/\text{s}$), ambos en función de la aceleración constante.

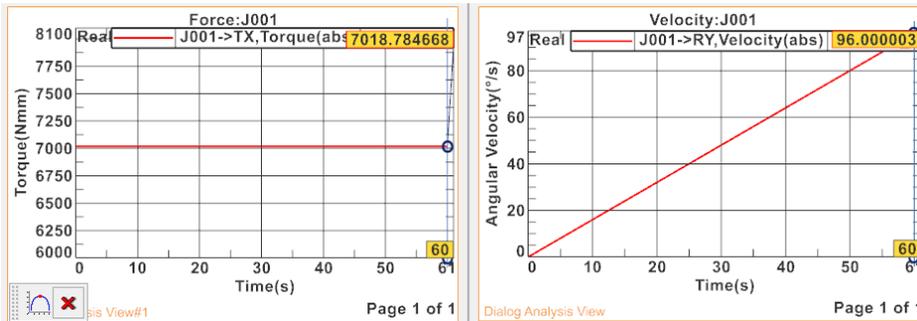


Figura 14. Gráfica del torque y velocidad inicial.



La gráfica intermedia del paso 3 (figura 15), muestra la variación del comportamiento constante del torque (Nmm) y el incremento lineal de la velocidad angular ($^{\circ}/s$), ambos en función de la aceleración constante. Que se encuentran modificados por efecto de la inercia y la masa en la simulación dinámica.

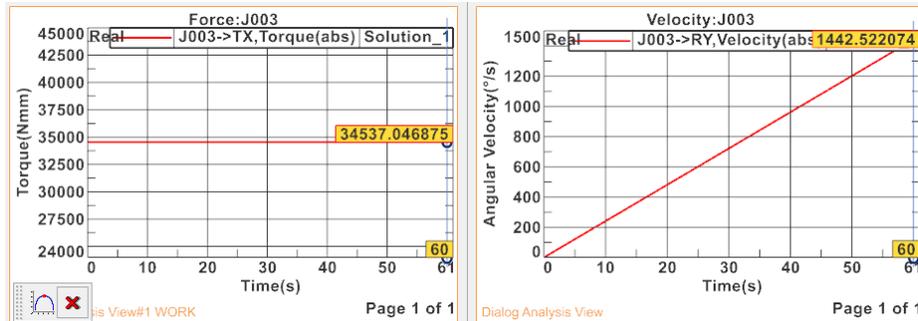


Figura 15. Gráfica del torque y velocidad paso intermedio.

La gráfica final del paso 6 (figura 16), muestra el comportamiento constante del torque para valores numéricos de hasta centésimas (Nmm) y el incremento lineal de la velocidad angular ($^{\circ}/s$), ambos en función de la aceleración NO constante (figura 17) que es influenciada por el efecto de inercia provocado por la masa y considerado en la simulación dinámica.

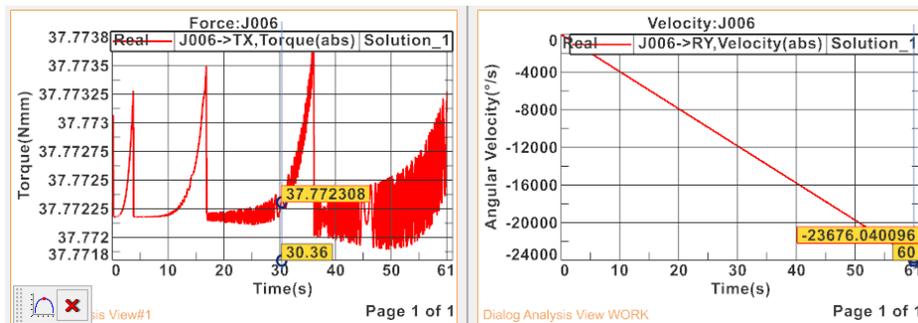


Figura 16. Gráfica del torque y velocidad final.

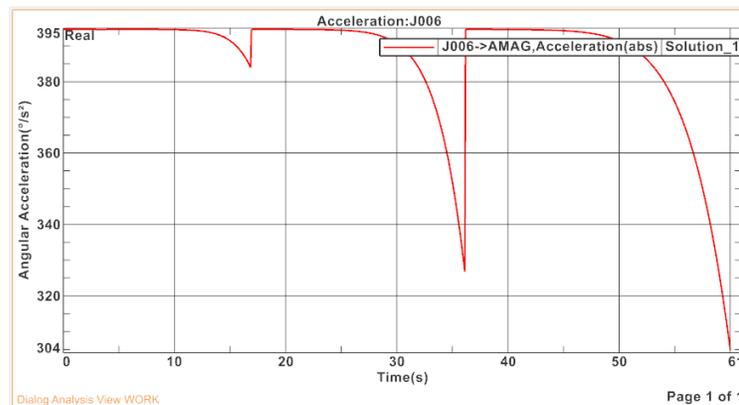


Figura 17. Comportamiento de la aceleración no constante.



Las tablas 5 y 6, son la representación numérica y la conversión de unidades del comportamiento de la relación de transmisión del sistema de engranajes configurado en seis pasos. La relación analítica a menor velocidad-mayor torque y a mayor velocidad-menor torque, para mantener la potencia constante se cumple para la etapa inicial y final. Sin embargo, es relevante un análisis posterior, para describir el comportamiento constante del torque en las etapas intermedias aún con la variación de la velocidad angular en las simulaciones dinámicas.

Tabla 5. Resultados Torque (Nmm)-Velocidad Angular (°/s).

Torque			Velocidad Angular °/s		
T1=	7018.0	Nmm	ω 1=	96.0	°/s
T2=	34537.0	Nmm	ω 2=	372.0	°/s
T3=	34537.0	Nmm	ω 3=	1431.0	°/s
T4=	34537.0	Nmm	ω 4=	5603.0	°/s
T5=	431.0	Nmm	ω 5=	21931.0	°/s
T6=	37.7	Nmm	ω 6=	23975.0	°/s

Tabla 6. Resultados Torque (Nm)-Velocidad Angular (rad/s).

Torque			Velocidad Angular rad/s		
T1=	7.018	Nm	ω 1=	1.7	rad/s
T2=	34.537	Nm	ω 2=	6.5	rad/s
T3=	34.537	Nm	ω 3=	25.0	rad/s
T4=	34.537	Nm	ω 4=	97.8	rad/s
T5=	0.431	Nm	ω 5=	382.8	rad/s
T6=	0.038	Nm	ω 6=	418.4	rad/s

Las tablas 7 y 8, son la representación numérica del comportamiento de la potencia del sistema de engranajes configurado en seis pasos. La relación analítica a menor torque-menor potencia y a mayor torque-mayor potencia, para mantener aproximadamente la potencia constante se cumple para la etapa inicial y final.

Tabla 7. Velocidad Angular (rpm)-Potencia (HP).

Velocidad Angular (rpm)			Potencia H.P.		
ω 1=	16.0	rpm	P1=	15.8	H.P.
ω 2=	62.0	rpm	P2=	300.6	H.P.
ω 3=	238.5	rpm	P3=	1156.3	H.P.
ω 4=	933.8	rpm	P4=	4527.3	H.P.
ω 5=	3655.2	rpm	P5=	221.1	H.P.
ω 6=	3995.9	rpm	P6=	21.1	H.P.



Tabla 8. Torque (Nm)-Potencia (HP).

Torque			Potencia H.P.		
T1=	7.018	Nm	P1=	15.76	H.P.
T2=	34.537	Nm	P2=	300.58	H.P.
T3=	34.537	Nm	P3=	1156.27	H.P.
T4=	34.537	Nm	P4=	4527.34	H.P.
T5=	0.431	Nm	P5=	221.14	H.P.
T6=	0.0377	Nm	P6=	21.14	H.P.

4.2 Discusión

Este trabajo es un estudio de apoyo para conocer las relaciones entre los desarrollos analíticos o matemáticos del diseño de los sistemas de engranajes y los desarrollos de sistemas de engranajes utilizando tecnología CAD/CAM/CAE. En ambos casos la búsqueda se enfoca en el logro de la enseñanza [17] para ofrecer un diseño óptimo reduciendo costos y tiempos en la fabricación de accionamientos mecánicos como los engranes [18]. Asimismo, el reconocimiento de los alcances del software utilizado en la tecnología CAD/CAM/CAE, debido a que los usuarios se limitan a la imitación y copia de las instrucciones, dejando a un lado el análisis pertinente para cada elemento mecánico de un dispositivo mecatrónico integrado, como el Dispositivo de Generación de Potencia Eólica (DGPE)

Paso 8. Es relevante en trabajos futuros realizar un análisis con mayor detalle, para describir el comportamiento no lineal de la potencia en función de la velocidad o del torque en las simulaciones dinámicas (tabla 9). Debido a que los resultados en la simulación cinemática y estudio analítico convencionales [9], los valores y comportamientos de relación de transmisión son lineales.

Tabla 9. Relación teórica Torque (Nm)-Velocidad Angular (rad/s)

Torque por Velocidad		
T1=	6.233	Nm
T2=	1.558	Nm
T3=	0.390	Nm
T4=	0.097	Nm
T5=	0.024	Nm
T6=	0.024	Nm

Tabla 10. Porcentaje de relación teórica y por simulación del torque en (Nm).

% de Aproximación Velocidad Analítica vs Velocidad de Simulación
113%
2216%
8865%
35460%
1770%
155%



Tabla 11. Porcentaje de relación teórica y por simulación de la velocidad en (rpm).

% de Aproximación Velocidad Analítica vs Velocidad de Simulación
100%
97%
93%
91%
89%
98%

Durante el desarrollo de este documento se coincide con las conclusiones de Roda (2015), que estimó que para que los resultados obtenidos utilizando métodos alternativos mediante tecnología CAD/CAM/CAE tengan un buen nivel de precisión, los procedimientos de cálculo y simulación deben considerar escenarios tan realistas como sea posible, teniendo en cuenta todos aquellos fenómenos (lineal y no lineal) que tengan influencia en el estado tensional de la transmisión. Como ha ocurrido en la identificación del comportamiento no lineal del torque con relación a la potencia (tabla 10) en contraste con la velocidad que mantiene su relación directamente proporcional (tabla 11). Asimismo, expone que este tipo de trabajos permiten al usuario una mejor apreciación e identificación de posibles fallas en diversas combinaciones de engranajes [19].

5. Conclusiones

El desarrollo de este proyecto si bien está limitado a la producción de un nuevo conocimiento científico sobre la transmisión de potencia por engranes rectos o cónicos, aporta un alto dominio de las destrezas y habilidades tecnológicas en ingeniería (CAD/CAM/CAE), para atender problemáticas relacionadas al diseño y operación de la maquinaria agrícola sin uso de motores de combustión interna, mediante Dispositivo de Generación de Potencia Eólica (DGPE).

El uso de la documentación formal de un procedimiento de diseño de sistemas de engranes rectos o cónicos, es una valiosa herramienta de apoyo didáctico en las IES para la enseñanza del diseño e innovación de máquinas o elementos de máquinas.

Asimismo, este trabajo se propone como material bibliográfico de apoyo en la enseñanza de las asignaturas como análisis o método de los elementos finitos, que se imparten a estudiantes de nivel superior y posgrado. Logrando el propósito de contribuir con un procedimiento de diseño sistemático para los sistemas de engranajes rectos, con apoyo de la tecnología CAD/CAM/CAE.

Referencias

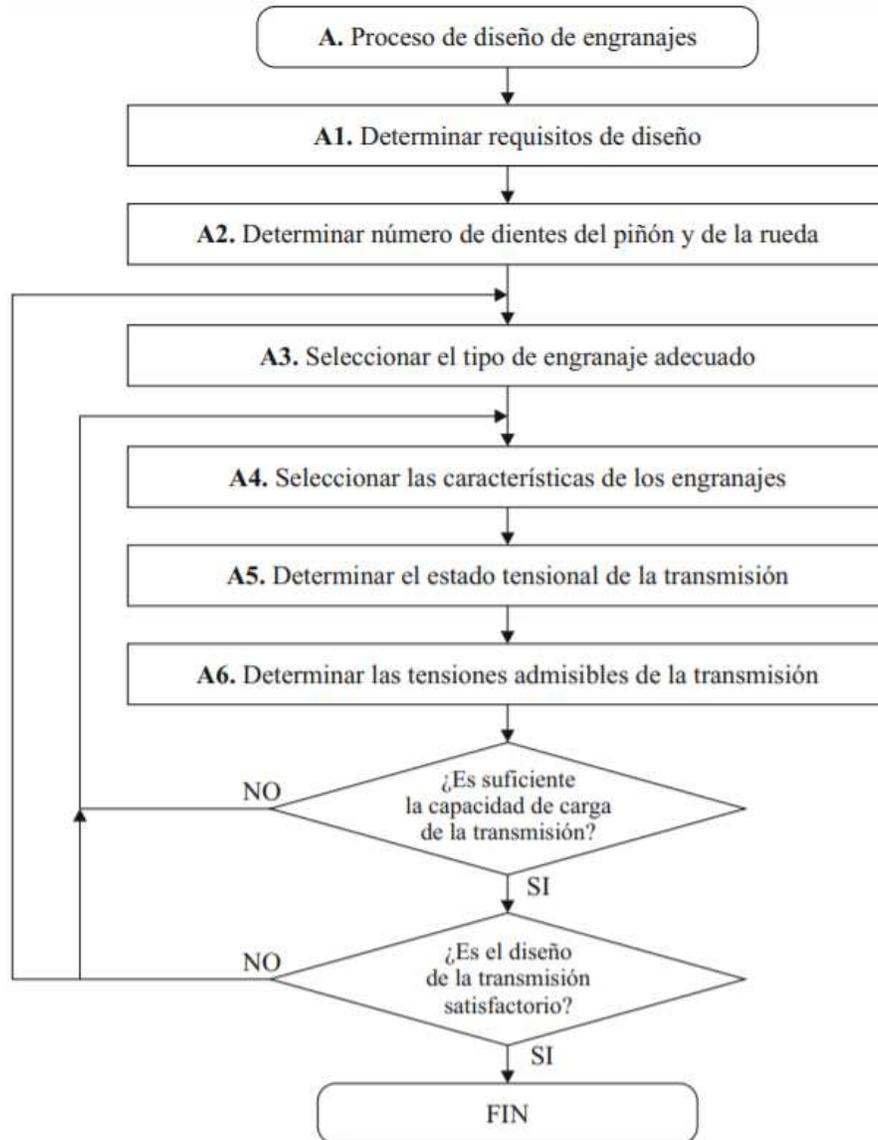
- [1] G. J. Flores, “*Sistemas de Transmisión*”, La Paz: Universidad Mayor de San Andrés, 2012.
- [2] R. P. Herrera y M. E. Martínez, “*Diseño de elementos mecánicos para una unidad de doble reducción formada por una combinación de tornillo sin fin y rueda helicoidal y engranes helicoidales*”, IPN, Ciudad de México, 2016.
- [3] S. H. Jaramillo, “*Análisis y simulación de un sistema de transmisión de potencia en una masa de molino de caña, mediante elementos finitos*”. Corporación Universitaria Autónoma de Occidente, Bogotá, 2002.
- [4] S. J. Carro y N. I. F. S. F. Flores. “*Propuesta de una Metodología para el Análisis de Engranes*”. 10º Congreso Nacional de Mecatrónica, Puerto Vallarta, Jalisco, 2011.



- [5] C. I. Torres, L. E. Moreno, A. I. Hernández y F. G. Vidal. “*Desarrollo de una caja de engranes para un aerogenerador de 30 kW de capacidad*”. SOMIM, vol. 6, nº 3, pp. 67-77, 2018.
- [6] S. G. Ledesma, G. J. Alvizo, M. J. Zúñiga, J. L. López, C. J. S. y S. L. Jiménez. “Diseño y análisis de transmisión mecánica para máquina de ensayos de tensión de”. SOMIM, 2019.
- [7] E. Eliel y V. Montijo. “*Metodología de cálculo teórico y diseño computarizado de un engrane planetario aplicado a un generador eólico por medio de programa computarizado*”. Revista de Investigación Académica sin Frontera, vol. 12, nº 29, pp. 1-25, 2019.
- [8] P. A. I. K. T. Goncharov. “*Engineering Analysis with NX Advanced Simulation: Kindle Edition Siemens*”. Kindle Edition. Siemens, 2014.
- [9] J. Gere y B. Goodno. “*Mecánica de Materiales*”. CENGAGE, 2009.
- [10] F. P. Beer, E. R. Johnston, J. T. Dewolf y D. F. Mazurek. “*Mecánica de materiales*”. Quinta ed. Mc Graw Hill, 2010.
- [11] R. C. Hibbeler. “*Mecánica de Materiales*”. PEARSON, 2011.
- [12] D. H. D. Patiño, P. L. M. López y A. E. Mosquera. “*Metodología del diseño y modelado de un accionamiento mecánico*”. Scientia Et Technica, vol. 22, nº 1, pp. 24-33, 2017.
- [13] L. G. Hurtado, J. Velasco, N. Severian, L. López y E. Sánchez. “*Diseño de una herramienta didáctica computacional para evaluar el comportamiento cinemático de un tren de engranajes cilíndricos rectos*”. Revista INGENIERÍA UC, vol. 21, nº 2, pp. 73-86, 2014.
- [14] C. V. Roda. “*Simulación del engrane y análisis del contacto en sistemas de transmisión por engranajes mediante la modelización avanzada del conjunto ejes-engranes*”. Universidad de Jaume, 2015.
- [15] P. Childs. “*Mechanical Design*”. Elsevier, 2004.
- [16] L. J. Albarrán. “*Aplicación al diseño de engranajes de ejes paralelos con CATIA v5*”. Universidad de Sevilla, 2008.
- [17] G. F. Candia, G. M. Cruz, M. I. Rodríguez y L. V. Galindo, “*Knowledge based engineering system (KBES) for mechanic design activities*”. International Journal of Current Advanced Research, pp. 984-991, 2016.
- [18] R. G. Budynas. “*Shigley's Mechanical Engineering Design*”. Mc Graw Hill, 2014.
- [19] H. R. Sancibrián y d. L. A. de Juan. “*Cinemática y Dinámica de Máquinas*”. 2010. Available: <https://ocw.unican.es/course/view.php?id=202§ion=1>. [Último acceso: 14 09 2021].



Anexo 1. Proceso convencional de selección de engranajes. Adaptado de [1] por [18].





Diseño y Construcción de un Asistente Virtual para el Turismo del Estado de Aguascalientes con RA

Bautista Cruz Anahy, Paredes Orta Carlos Alberto, Valentín Coronado Luis Manuel y
Acevedo Ramírez Gustavo Adolfo

Centro de Investigaciones en óptica
anahybc@cio.mx

Resumen

Este proyecto trata sobre un asistente virtual que combina dos de las tecnologías más relevantes de los últimos años, la inteligencia artificial y la realidad aumentada. El objetivo principal de este proyecto es apoyar al sector turístico en el estado de Aguascalientes ayudando a las personas a conocer el estado de una manera única e inmersiva. El cual consiste en desarrollar una aplicación con asistente virtual basado en realidad aumentada de bajo costo para un dispositivo portátil (celular) para recorridos turísticos en la ciudad de Aguascalientes. Este proyecto se explica a partir de dos metodologías, una de las metodologías fue para el desarrollo del proyecto en general, y la otra más particularmente en la metodología de desarrollo del asistente virtual basado en un chatbot con IA. La metodología general consta de seis etapas, que incluyen el análisis de las técnicas de realidad aumentada, el desarrollo del asistente virtual y el chatbot. En cuanto al chatbot, se han implementado componentes SpeechToText y TextToSpeech, logrando como resultado una interacción amigable entre el usuario y la aplicación, donde se realizaban preguntas al asistente virtual de acuerdo a la base de datos de sitios turísticos.

Palabras clave: Realidad Aumentada, Asistente virtual, Chatbot, Unity, NLP

1. Introducción

La realidad aumentada es una de las tecnologías más vistosas en los últimos tiempos tanto que las empresas del sector turístico les interesa explotarla. Esto es debido a la forma de realizar un recorrido turístico, los turistas, cada vez están más interconectados y demandan más información de los lugares que visitan sin renunciar a la independencia de organizar sus propias rutas, favoreciendo a la aparición de servicios novedosos que satisfacen sus necesidades.

Cuando un turista visita una ciudad, lo normal es que quiera tener información completa sobre el entorno que lo rodea: las edificaciones, su estilo arquitectónico o los acontecimientos históricos que ocurrieron en ese lugar. Ahora bien, con la realidad aumentada, la cámara del móvil y la geolocalización, es posible disponer de toda esta información en el mundo real a través de la pantalla del smartphone o tablet.

Durante años, la realidad aumentada y la inteligencia artificial se han implementado por separado en diferentes áreas como el sector de la educación, en los juegos, en el cine, así como en el sector turístico ya que está implementando diferentes estrategias para ofrecer a los turistas una mejor experiencia, en este caso se analizaron estas tecnologías en el sector turístico en 2015 Ana María Agüero García [1] escribió un artículo que se tituló: “Análisis de la aplicación de la realidad aumentada en el sector turístico: una propuesta de mejora”, que fue publicado en la revista Gran Tour: Revista de Investigaciones Turísticas, que tiene como objetivo realizar un estudio sobre nuevas tecnologías aplicadas al turismo, centrándose en el uso de una nueva herramienta de tecnología móvil con gran potencial para el sector, la realidad aumentada. Donde realizó un estudio sobre su impacto, considerando todas sus aplicaciones, en el campo del turismo. Luego de su estudio, concluyó que la



realidad aumentada cubre ciertas necesidades que pueden tener los turistas y también enriquece su experiencia en el turismo. Sin embargo, detectó una necesidad de mejorar la realidad aumentada, así como una mayor promoción por parte de los destinos turísticos, debido a que aún existe un cierto desconocimiento por parte de los destinatarios finales de estas herramientas tecnológicas.

En el año 2018, Arrunategui Salazar, e. t [2] en su trabajo de investigación titulado *"Implementación de una aplicación móvil utilizando realidad aumentada para el desarrollo del turismo en la región de Tumbes"*, mencionaron que implementaron tecnologías de la información y la comunicación (TIC) para la mejora continua de la calidad en las organizaciones del Perú. El objetivo general fue implementar una aplicación móvil con realidad aumentada para el desarrollo del turismo en la región de Tumbes. La investigación fue cuantitativa longitudinal y descriptiva, concluyendo que una aplicación móvil con realidad aumentada promoverá en gran medida la actividad turística en la región de Tumbes, y así como también negocios basados en el turismo.

En el año 2019 Nuria López [3] publicó un artículo donde menciona que la realidad aumentada ha tenido un escaso despliegue en el segmento del turismo rural, a pesar de que sus recursos suelen requerir interpretación en visitas autónomas. En donde señalan algunas líneas de actuación para la política turística y la gestión empresarial. Los resultados de sus estudios fueron: para confirmar la premisa y aparente paradoja que da origen a la obra, el despliegue de la realidad aumentada en zonas turísticas rurales generó importantes beneficios para empresas, organizaciones y turistas, contribuyendo al incremento de visitas a estos destinos.

También entre los años del 2019 al 2021 se han desarrollado chatbot con distintas técnicas como las redes neuronales, en el artículo LSTM-based Emotional 3D Avatar, que fue escrito por Yu-Ting Wan, e.t [22], explica sobre el desarrollo del chatbot utilizando la técnica de las redes neuronales, también Antonius Angga P, e.t [23], en su artículo menciona sobre el desarrollo de un avatar con expresiones a partir de la respuesta de audio que fue generado por el chatbot. Los chatbots también son utilizados al momento de impartir capacitaciones como lo menciona Iñigo Fernández del Amo, e.t [24].

Donde actualmente el sector turístico en México, presenta muchos problemas que urge corregir, el desarrollo humano, la gestión y gobernanza, la oferta de servicios turísticos, aspectos culturales y naturales, son sólo algunos de los frentes donde es posible encontrar grandes deficiencias. Algunos de los problemas que enfrenta el turismo en diferentes ciudades de México son los siguientes:

- No existe una cantidad significativa de obras de arte de calidad que sean atractivas para el turista, además de una escasa exposición de la obra de artistas reconocidos a nivel nacional e internacional.
- El valor ecológico, recreativo y paisajístico de algunos espacios naturales no es bien conocido tanto por la población como por los visitantes, y no existen nuevos productos turísticos relacionados con el patrimonio natural.
- Los turistas nacionales permanecen en promedio 2,2 noches en su destino y los turistas extranjeros 2,6, principalmente por negocios. El motivo de esta situación es que los guías turísticos no ofrecen actividades diversas para diferentes perfiles turísticos y que no se sienten motivados a permanecer más tiempo en el destino.

Debido a estos problemas existen diferentes países que están implementando la realidad aumentada en sus diferentes sectores. En el caso de México, no se ha avanzado mucho a nivel tecnológico, por lo que la implementación de tecnologías de RA se convierte en una necesidad importante a resolver, principalmente en el estado de Aguascalientes ya que está experimentando un crecimiento sostenido del sector turístico. además, al igual que otras ciudades del mundo, tiene mucho que ofrecer a miles de visitantes cada año. Este crecimiento se debe al gran interés cultural y la gran oferta de ocio de esta ciudad, pero también a la rapidez con la que avanzan los servicios. Por eso los objetivos de este proyecto son los siguientes:

- Desarrollar el asistente virtual basado en un chatbot para la integración del audio a texto, videos, imágenes y modelos 3D.



- Realizar la metodología adecuada del procesamiento de imágenes para que la aplicación funcione correctamente mediante un marcador seleccionado.
- Crear la plataforma digital en Realidad Aumentada para dispositivos móviles utilizando el software Unity.
- Desarrollar una base de datos con los requerimientos mínimos para generar un recorrido turístico.

2. Metodología

Dentro del proyecto se ocupó dos metodologías en donde la primera metodología es para el proyecto de manera general, en la figura 1, se puede ver claramente la metodología que se ocupó para el desarrollo de este proyecto, esta metodología consta de seis etapas que se explicará a continuación.

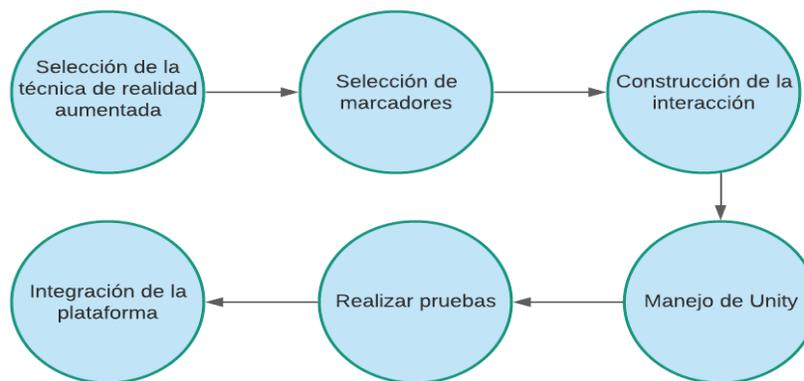


Figura 1. Etapas de la metodología.

- **Selección de la técnica de Realidad Aumentada:** En esta etapa se seleccionó la técnica de realidad aumentada para proyectar desde el asistente virtual la información que es generada en las siguientes etapas. Un ejemplo de las técnicas de realidad aumentada que se pueden utilizar en la figura 2.
- **Selección de marcadores:** En esta etapa se generan los marcadores ideales para la interacción entre el usuario y la aplicación.
- **Construcción de la interacción:** En esta etapa se realizan pruebas de interacción con el sistema, también se verá si se utilizan comandos de voz o botones para realizar los cálculos de peticiones y mandar mensajes si se llegan a identificar y mostrárselas a los usuarios, en esta etapa interviene el asistente virtual, así como el chatbot.
- **Manejo de unity:** En esta etapa se une todos los elementos para generar el sistema en Unity y con la posible migración a un dispositivo móvil como Android y así pasarlo a los lentes de realidad aumentada que se cuenta.
- **Realizar pruebas:** En esta etapa se realizarán pruebas del sistema y se verá la eficiencia que tiene el sistema.
- **Integración de la plataforma:** En esta etapa se analizarán los resultados obtenidos de las pruebas y se realizará la integración de éstas.

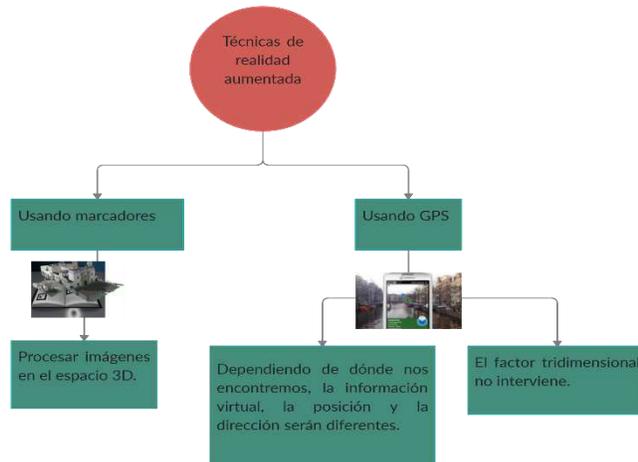


Figura 2. Técnicas de realidad aumentada

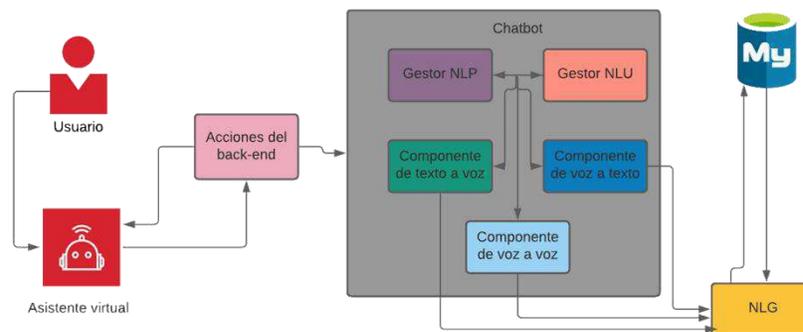


Figura 3. Metodología para el chatbot

Y la segunda metodología es para el desarrollo del chatbot que se puede ver en la figura 3 se puede ver la metodología para poder crear el asistente virtual donde cada etapa se explica a continuación:

Antes que nada, el **usuario** se refiere a la persona que va a utilizar la aplicación, en este caso los usuarios serían los turistas, el **asistente virtual** se refiere a la calaverita que va a estar interactuando con el usuario y el chatbot.

- **Asistente Virtual:** En esta etapa se implementaron las articulaciones del asistente virtual y las rutinas de animación que se llevaron a cabo para tener mayor interacción con el usuario.
- **Gestor NLP:** Se utilizó para describir la capacidad de una máquina para inferir lo que se dice, descomponerlo, comprender su significado, determinar la acción **apropiada**, y responder en un idioma que el usuario pueda entender.
- **Gestor NLU:** Es un subconjunto de NLP que trata con la faceta mucho más estrecha, pero igualmente importante, de cómo manejar mejor las entradas no estructuradas y **convertirlas** en una forma estructurada que una máquina puede entender y actuar. Mientras que los humanos son capaces de manejar sin esfuerzo las malas palabras, palabras intercambiadas, contracciones, coloquialismos y otras peculiaridades, las máquinas no son tan expertas en comprender y asimilara aquellos inputs con faltas de ortografía u otros supuestos.
- **Componente de texto a voz:** En este módulo se crea un objeto que nos **interpretará** el texto a escribir y nos regresará un audio del mismo.



- **Componente de voz a texto:** Este elemento grabará la voz del usuario y la convertirá **en** texto para poder realizar un análisis de la información obtenida.
- **Componente de voz a voz:** En esta etapa es la unión de los dos elementos anteriormente mencionados en la cual se utiliza estos componentes para que el usuario hable y el asistente virtual responda con voz, es decir para que el usuario sienta como si estuviera hablando con otra persona.
- **NLG:** Se refiere a la generación de lenguaje natural. Los procesos NLG convierten datos estructurados en texto.
- **BD:** En esta etapa se va a crear los intents, entities, actions que va a ocupar el chatbot para poder interactuar con el usuario. A continuación, se explica a qué se refiere los intents, entities y actions.
 - **Intents:** Un intent es una colección de expresiones (lo que el usuario dice) que significan lo mismo, pero que se construyen de manera diferente. Cada intento corresponde a una acción que el usuario desea realizar. Por ejemplo, un intent de “saludar” tendrá las siguientes expresiones “hola”, “hola”, “hola”, todo lo que significa lo mismo: un saludo o el iniciador de conversación.
 - **Entities:** Una entidad es una información extraída de lo que dice un usuario. Por ejemplo, cuando un robot pregunta por su nombre, la información que el robot espera de su respuesta será su nombre “Mi nombre es {{nombre-de-entidad}}”.
 - **Actions:** Una acción es una tarea que esperas que tu bot haga por ti. En la mayoría de los casos, una API externa realiza esta acción. Dado que las plataformas bot no admiten llamadas API externas, se usa un programa externo para controlar esa funcionalidad. Por ejemplo, cuando le pides a tu bot que te de la dirección de un lugar, el bot extrae toda la información (Entidades) requerida para dar la dirección (coordenadas, nombre de la calle, etc.), de esta se obtiene una respuesta respecto a si la orden es exitosa o no.

3. Desarrollo de la aplicación

3.1 Modelo del asistente virtual

En esta sección, se presenta el diseño del modelo del asistente virtual. El asistente virtual se realizó en Blender (software de gráficos por computadora en 3D). La figura 4 muestra una de las etapas de diseño.

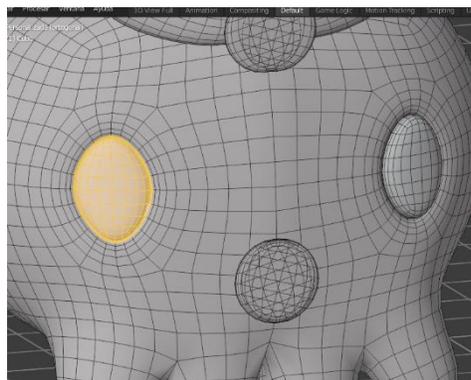


Figura 4. Modelo en Blender del asistente virtual

Este modelo es de tipo humanoide el cual consta de 26 huesos, se puede ver en la figura 5 y 6, los cuales se pueden realizar movimientos de los mismos y están interconectados para realizar acciones

(saludar, despedirse, señalar, caminar, etc.) que puedan interactuar con el usuario. En la figura 7, es el modelo final del asistente virtual.

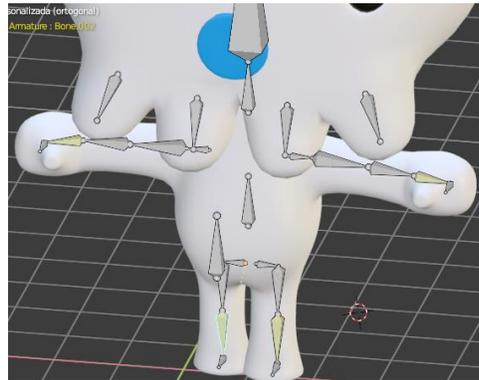


Figura 5. Implementación de huesos al asistente virtual parte 1.

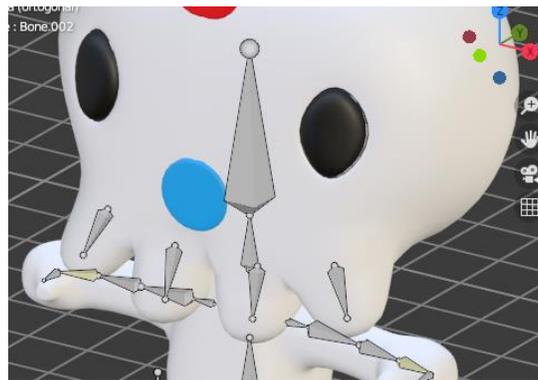


Figura 6. Implementación de huesos al asistente virtual parte 2.



Figura 7. Modelo final del asistente virtual

3.2 Selección de los marcadores



Se seleccionó que los marcadores fueran códigos QR ya que son inherentes a la rotación, escala, además de que pueden almacenar más información, la principal ventaja es que existen muchos generadores de códigos QR gratuitos y para descifrar un código QR, basta con un teléfono móvil con cámara para poder decodificarlos. Y además de que, si se tiene el 80% del código QR, se puede obtener la información de este.



Figura 8. Marcador de la aplicación

3.3 Desarrollo de la base de datos

La base de datos se desarrolló en MySQL, en la figura 9, se puede observar el modelo Entidad-Relación de la base de datos en donde:

- La tabla **marcadores**: En esta tabla es donde se van a guardar todos los marcadores que se van a utilizar en el proyecto.
- La tabla **sugerencia**: Esta tabla es la encargada de mostrar sugerencias al usuario.
- La tabla **action**: Esta tabla va a contener todas las acciones que se pueden hacer en el sistema y de acuerdo a cada acción retornará un resultado.
- La tabla **historial**: Esta tabla guardara todas las frases que vayan ingresando el usuario a la aplicación.
- La tabla **foto**: En esta tabla van a estar guardadas todas las fotos de cada lugar turístico, así como también los comercios del centro del estado de Aguascalientes.
- La tabla **intent**: En esta tabla se encontrará todos los intents que se ocupará en la aplicación, así como también su información como: nombre, dirección, coordenadas, video, descripción, horario, contacto y precios.
- La tabla **user**: En esta tabla se encontrará todos los usuarios que están ocupando la aplicación.

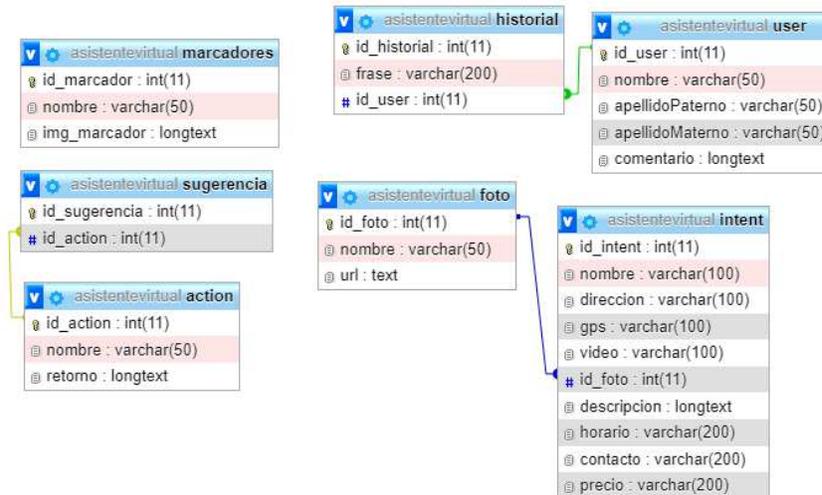


Figura 9. Modelo entidad-relación

3.4 Texto a Voz y Voz a Texto

Este componente se desarrolló en Unity, en donde su función es permitir la comunicación del asistente virtual con el usuario mediante dos formas que son las siguientes:

- Que el usuario se pueda comunicar con el asistente virtual mediante voz.
- Que el usuario se pueda comunicar con el asistente virtual mediante textos.

4. Resultados

En la figura 10 se puede ver algunos videos de los avances del proyecto, estos videos se pueden ver en el siguiente link:

<https://drive.google.com/drive/folders/190fm2FExPFGFuQfMJViuZiSEu66cvEZa?usp=sharing>

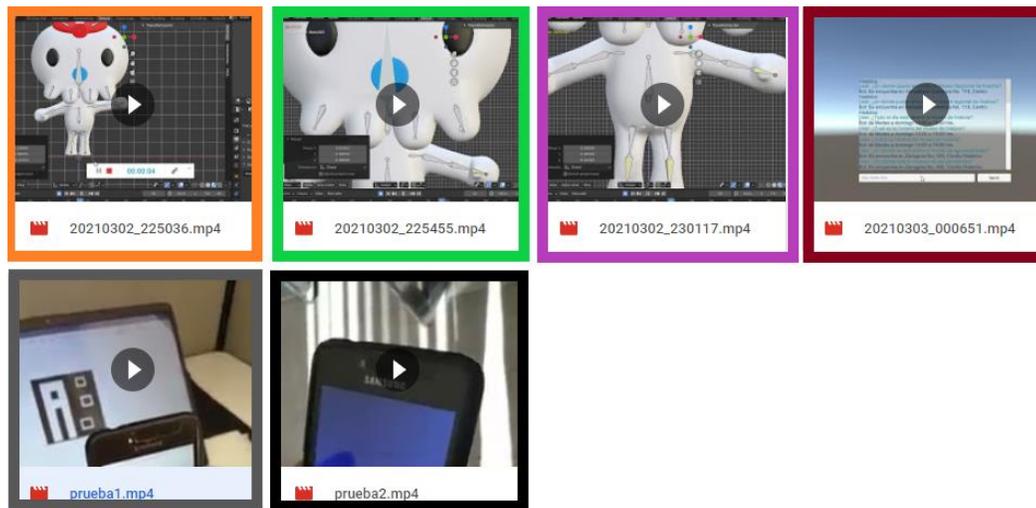


Figura 10. Resultados del proyecto



En la figura 11 se puede visualizar la pantalla principal del sistema, donde al darle clic en el botón **INICIAR**, que se encuentra en la parte inferior de la pantalla, comenzará a interactuar el usuario con el chatbot. En la figura 12, se puede visualizar la pantalla para la interacción entre el usuario y el chatbot, la función del botón en forma de micrófono, que se encuentra en la parte inferior de la pantalla, se encarga de llamar al script del chatbot, para obtener la información de la base de datos y así resolver su duda al usuario. El botón que está en la parte inferior de la pantalla es para que el usuario registre un comentario que quiera realizar.



Figura 11. Pantalla principal del sistema



Figura 12. Pantalla para la interacción entre el chatbot y el usuario

En la figura 13 se puede visualizar la pantalla para que se registre el usuario y pueda agregar su comentario, El botón **ENVIAR** que se encuentra en la parte inferior derecha, su función es guardar los datos a la base de datos y una vez registrado podrá visualizar la pantalla para escribir su comentario como en la figura 14, y el botón de la parte inferior izquierda es para que regresa a la pantalla principal.



Figura 13. Pantalla para el registro de usuarios



Figura 14. Pantalla para el registro de comentarios del usuario

De la figura 15 a la figura 17, se puede ver la interacción entre el usuario y el chatbot, donde en la figura 15, es lo que pregunta el usuario mediante voz, en la figura 16, es como lo entiende el asistente virtual mediante texto, y en la figura 17 es la respuesta que envió el chatbot al asistente virtual a partir de la información que se tiene en la base de datos.



Figura 15. Información que quiere saber el usuario

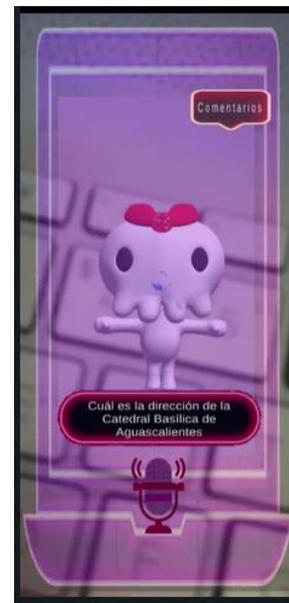


Figura 16. Información que entendió el asistente virtual



Figura 17. Respuesta del chatbot al asistente virtual

5. Conclusiones

Finalmente, con este proyecto se puede generar un asistente virtual para cada de estado México, así como en las diversas zonas turísticas de México ya que es adaptable a cualquier entorno, también se impulsa la tecnología de la realidad aumentada y la inteligencia artificial para que se implemente en otros sistemas y a nivel nacional tenga un gran impacto estas tecnologías.

Con este asistente virtual, los elementos necesarios fueron desarrollado en un chatbot único en el que proporciona suficiente información para el usuario y una interesante propuesta gráfica que resultará atractivo para el turismo.

6. Trabajo Futuro

Este proyecto también se puede implementar la tecnología de AR Foundation en vez de Vuforia, se puede agregar la función de las coordenadas del GPS así como los modelos en 3D de cada lugar.

7. Agradecimientos

Se da un extenso agradecimiento a CONACYT, y al equipo de trabajo del laboratorio de visión ubicado en Centro de Investigaciones en Óptica A.C, unidad Aguascalientes.

Referencias

- [1] García. A. “Análisis de la aplicación de la realidad aumentada en el sector turístico: una propuesta de mejora”. *Revista de Investigaciones Turísticas*. Editorial, vol. 11, no. 10, pp. 52-72, 2015.
- [2] A.S. Arrunategui et al. “Implementación de una aplicación móvil utilizando realidad aumentada para el desarrollo del turismo en la región de Tumbes”. Trabajo de investigación, Fac. Sistemas, Dpto. Sistemas Computacionales, Perú, 2018



- [3] N. López. “*Realidad aumentada en destinos turísticos rurales: oportunidades y barreras*”. CPNCYTEC, vol. 4, no. 2, pp. 25-33, 2019.
- [4] N. Nilsson. “*Principios de Inteligencia Artificial*”. Ediciones Díaz de Santos 1ª ed. pp 2-31, 1987.
- [5] J. McCarthy. “*What is Artificial Intelligence?*”. <http://www.formal.stanford.edu/jmc/whatisai/>
- [6] S. Russell. “*Inteligencia Artificial, Una Nueva Síntesis*”. http://www.acm.org/ubiquity/interviews/v4i43_russell.html
- [7] “*Discovery Latinoamérica | Inteligencia Artificial*”. IBM. 26 de sep. de 2018. [video en línea]. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=5rvZBsueMoc>
- [8] “¿Qué es Alexa, Google Home y Siri? Diferencias y comparativas”. (s.f). [Online]. Available: <https://revistaderobots.com/inteligencia-artificial/que-es-alexa-google-home-y-siri/>.
- [9] DASH. “*Deep learning*”, <https://www.investopedia.com/terms/d/deep-learning.asp>
- [10] P. Recuero. “*Artificial Intelligence, Machine Learning y Deep Learning*”. 2017. Blogthink big <https://blogthinkbig.com/artificial-intelligence-machine-learning/newline-y-deep-le>
- [11] ATRIA. “*Deep Learning y sus muchas aplicaciones*”. 2019. <https://www.atriainnovation.com/deep-learning-aplicaciones/>
- [12] SAS. “*Procesamiento del lenguaje natural*”. https://www.sas.com/es_ar/insights/analytics/what-is-natural-language-processing-nlp.html
- [13] Oracle. “¿Qué es un chatbot?”. <https://www.oracle.com/mx/solutions/newline-chatbots/what-is-a-chatbot/>
- [14] “*Procesamiento de imágenes*”. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/msp/florencia_y_an/capitulo3
- [15] NEOSENTEC. “*Realidad Aumentada*”. <https://www.neosentec.com/realidad-aumentada/>.
- [16] IBERDROLA. “*Aplicaciones de Realidad Aumentada*”. https://www.iberdrola.com/wcorp/gc/prod/es_ES/comunicacion/docs/Infografia_Realidad_Aumentada
- [17] UNITY. “*UNITY*”. <https://unity.com/>
- [18] VUFORIA. “*VUFORIA*”. <https://developer.vuforia.com/an/capitulo3>
- [19] Oracle. “*Base de datos*”. <https://www.oracle.com/mx/database/newline/what-is-database.html>
- [20] “*Dispositivos móviles*”. <https://admsaludv.wordpress.com/59-2/>
- [21] MOSAIC, “*Dispositivos Móviles y Multimedia.*”, (s,f), [Online]. Available: http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/9164/1/dispositivos_moviles/newline_y_multimedia.
- [22] Y. Wan, et al. “*LSTM-based Emotional 3D Avatar*”. IEEE 8th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), pp. 937-940, 2019.
- [23] A. Annaga, et al. “*Design of Chatbot with 3D Avatar, Voice Interface, and Facial Expression*”. International Conference on Science in Information Technology (ICSITech), pp. 326-330, 2013.
- [24] I. Fernadéz del Amo, et al. “*Augmented Reality in Maintenance: An information-centred design framework*”. 6th International Conference on Through-life Engineering Services, pp. 148-155, 2015.
- [25] J. Gimeno, et al. “*A new AR authoring tool using depth maps for industrial procedures*”, Computers in Industry, pp.1263-1271, 2013.
- [26] A. Syberfeldt1, et al. “*Visual Assembling Guidance Using Augmented Reality*”. Procedia Manufacturing, vol 1, pp. 98-109, 2015.
- [27] R. Palmarini, et al. “*A systematic review of augmented reality applications in maintenance*”. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, pp. 215-228, 2018.
- [28] J. Jetter, et al. “*Augmented reality tools for industrial applications: What are potential key performance indicators and who benefits?*”. Computers in Human Behavior, pp. 18-33, 2018.



Maximización de las Propiedades de Adherencia en Recubrimientos PVD/DLC

Santoyo Turrubiarres Sarur¹, Mondragón Rodríguez Guillermo César², González Carmona Juan Manuel² y Tapia Ramírez Víctor Hugo¹

Centro de Tecnología Avanzada A.C. (CIATEQ)¹, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI), Coordinación de Ingeniería de Superficies²

Resumen

Un tratamiento difusivo como lo es el proceso de nitración gaseosa, involucra mejora de propiedades del sustrato permitiendo que recubrimientos adicionales tengan mejor adherencia. Por lo que, un recubrimiento del tipo multicapa mejora la adherencia de la capa del recubrimiento duro. Para generar un sistema típico de multicapa, se comenzó con el endurecimiento del sustrato por medio de la difusión de átomos de nitrógeno (capa de Nitrurado) dentro de la pieza, posteriormente en una cámara de un proceso de PVD, se depositaron las capas de Cr puro en el que se dice que la dureza de esta tiene que ser similar a la de la capa del sustrato y finalmente la deposición de la capa de DLC. El recubrimiento DLC es metaestable por lo que se deben de generar una capa de enlace con bajo estrés o los inicios de la deposición de la capa de DLC con una temperatura relativamente alta para formar enlaces del tipo sp^2 (grafito) en donde el resultado principal es una mejor adhesión. Los resultados fueron analizados bajo técnicas de caracterización de imagen como el Microscopio Óptico Metalúrgico (MO) y Microscopio Electrónico de Barrido (MEB), se emplearon también las siguientes técnicas de medición: MO, Nano durómetro Vickers (NHRV), Durómetro convencional (HRC), Prueba de Rayado. Con el apoyo de las técnicas de adherencia VDI-3198 y la Prueba de Rayado, nos revela las diferencias más importantes obtenidas entre los resultados, los mejores de ellos, se obtuvieron en las pruebas 4, 5 y 6, en esta prueba 4 se determinó mediante una evaluación cualitativa la mejor adherencia entre las capas de Cr, posteriormente en la prueba 5 la capa de DLC partiendo de la deposición inicial del recubrimiento a relativamente alta temperatura se obtuvieron mejoras en la adherencia en sustratos Nitrurados y no Nitrurados y finalmente la prueba 6 destacó por obtener resultados positivos en la adherencia del recubrimiento en general.

Palabras clave: PVD, DLC, adhesión, Prueba de Rayado, norma VDI-3198.

1. Introducción

Durante las últimas décadas, la industria ha mostrado gran interés en el uso de recubrimientos de base Carbón como Diamante (DLC, inglés: Diamond Like Carbon) en muchas aplicaciones como la automotriz y la aeroespacial.

Debido a los avances automotrices, hoy en día los autos de combustión interna son cada vez más eficientes, desde la quema del combustible dentro de un motor hasta los procesos de manufactura para generar este tipo de vehículos con recubrimientos sofisticados, un ejemplo de esto último recae en las tecnologías de deposición, años atrás inclusive hoy en día, la deposición de recubrimientos duros se lleva a cabo por medios galvanoplásticos en donde el consumo principalmente de agua es excesivo, hoy en día con recubrimientos del tipo PVD los insumos utilizados y los productos de desecho son más amigables con el medio ambiente. Los avances automotrices, en específico los recubrimientos DLC que están siendo aplicados en componentes para motor, tienden a reducir el consumo de combustible, así como también una disminución de los gases nocivos para el medio ambiente. Los recubrimientos DLC son una combinación de enlaces de grafito con enlaces de diamante siendo su función principal como



lubricante sólido, pero también la presencia del diamante dentro del recubrimiento promueve a que se tengan excelentes propiedades de resistencia al desgaste y bajo coeficiente de fricción.

El proceso con el que se aplica el recubrimiento PVD por sus siglas en inglés (Physical Vapor Deposition), el cual se traduce al español como “Deposición física de Vapor”. Los recubrimientos metálicos que se pueden producir con este tipo de tecnología son: Au, Ag, Al, Cu, Cd, Ti, Cr, Pd, Be, C, Mo, Ni, por mencionar los más importantes, sin embargo, también se pueden formar compuestos cerámicos tales como: TiN, CrN, AlN, TiCN, TiO, entre otros. La deposición se puede hacer en una capa, multicapa, nano capas. Las aplicaciones son en superficies como capas decorativas, películas ópticas para transmisión y reflexión, resistentes al desgaste, resistentes a la corrosión [1].

En este trabajo nos enfocamos al estudio de la adherencia de las capas DLC. Este tipo de recubrimientos se utilizan en aplicaciones automotrices en donde se tienen espesores de capa desde las 40 μm hasta las 65 μm dependiendo de los requerimientos de desempeño de cada cliente. Este tipo de recubrimientos además de la industria automotriz y aeroespacial, se usan también en la construcción, en el campo de la medicina, en la electrónica, en la óptica, en dispositivos electrónicos, en armamento miliar, etcétera [2].

El recubrimiento DLC es un recubrimiento nanoestructurado de carbón amorfo en donde ambos enlaces σ y π debido a los orbitales híbridos sp^3 y sp^2 constituyen diamante y grafito respectivamente, por lo general su valor proporcional en porcentaje estaría de 50 % a 90 %, la relación del enlace tipo diamante - grafito se le llama a-C por sus siglas en inglés que traducido al español sería “Carbono Tetraedral Amorfo”, los alcances en la dureza que se manejan van desde los 25 hasta los 90 GPa [3].

Por estas razones, los recubrimientos DLC son atractivos para la industria ya que tienen excelentes propiedades mecánicas y tribológicas como ya lo hemos mencionado, sin embargo, este recubrimiento tiene alto estrés residual y baja tenacidad que limita el uso afectando la adherencia del recubrimiento en el sustrato [4].

Con el fin de analizar los recubrimientos se obtuvieron resultados cualitativos con el uso de la prueba de adherencia VDI-3198 [5], en donde se indica una diferencia marcada de los recubrimientos con sustrato Nitruado y sin Nitruado revelando que los recubrimientos sin sustrato Nitruado tienen mejor adherencia que aquellos con sustrato Nitruado pero este dato difiere en su totalidad de los trabajos investigados. Sin embargo, también se adoptó la “Prueba de Rayado” por su nombre en inglés Scratch Test [6] la cual se usó para obtener valores cuantitativos y cualitativos para así poder llevar a cabo una comparación entre ambas técnicas de medición con la finalidad de analizar y obtener un estudio más completo de la adherencia de los recubrimientos estudiados.

En este trabajo, capas de recubrimiento DLC y CrN fueron depositadas sobre acero inoxidable grado 304, con tratamiento superficial previo de Nitruado y sin tratamiento de Nitruado. Se presentan y se analizan los mecanismos por los cuales la capa de DLC puede tener baja adherencia.

2. Depósito y adherencia de los recubrimientos DLC mediante PVD

Los recubrimientos en las muestras fueron llevados a cabo con una secuencia lógica en el procesamiento y la validación de la adherencia del recubrimiento en muestras con sustrato Nitruado y sin Nitruado, las cuales se abreviarán como Nit y SN respectivamente. La tecnología utilizada para la deposición de las capas fue llevada a cabo en una máquina AIP (Arc Ion Plating) marca Kobelco [7] la cual consta de un sistema flexible en donde se depositaron los recubrimientos del tipo Cromo puro (Cr), nitruo de cromo (CrN) y el recubrimiento Carbón amorfo tetraedral (a-C).

En el proceso de deposición PVD se emplearon dos métodos de recubrimiento: uno de ellos lo llamaremos PVD, consta de la evaporación de targets de Cromo (Cr) y se depositan las capas de Cr y CrN. El siguiente método de recubrimiento lo llamaremos DLC que consta de la evaporación de targets de Cr y C, depositando sobre el sustrato las capas de Cr como capa de enlace y la capa compuesta de



carbón (a-C). En la tabla 1 se muestra un listado de los recubrimientos realizados. Una descripción detallada de la metodología se describe en las secciones 2.1 a 2.3.

Tabla 1. Experimentos llevados a cabo para estudio de la adhesión de recubrimientos DLC.

Prueba	Número de muestra		Método	Recubrimiento obtenido	Puntos clave
	Sustrato Nit	Sustrato SN			
Prueba 1	M:5	M:6	PVD	Cr + CrN	Método Original PVD
Prueba 2	M:21	M:22	DLC	Cr + a-C	Método original DLC, Tiempo de espera (TE) = 240 minutos
Prueba 3	M:84	M:85	DLC	Cr	Solo deposición de Cr
Prueba 4	M:92	M:91	PVD	Cr	Solo deposición de Cr
Prueba 5	M:133	M:134	DLC	Cr + a-C	Tiempo de Espera (TE) = 0 minutos
Prueba 6	M:338	M:339	PVD & DLC	(PVD: Cr) + (DLC: a-C)	Combinación prueba 2 y 4

Las muestras utilizadas para validar la adherencia del recubrimiento en el sustrato entre otros resultados fueron hechas de acero inoxidable grado 304 en forma de redondo de diámetro promedio de 31.75 mm y un espesor de 5 mm, en la cara superior donde se va a depositar el recubrimiento se hizo un chaflán para disminuir los riesgos de daño en los paños de pulido al hacer la preparación para la caracterización metalográfica, ver la figura 1.

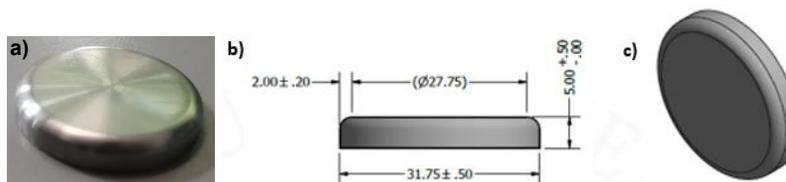


Figura 1. Muestra en forma de redondo utilizada para hacer las deposiciones requeridas de acuerdo con las pruebas, a) pieza física sin Nitrurado, b) dimensiones de la muestra, c) proyección a 3D de la muestra.

A manera de resumen, el siguiente esquema, ilustra los preparativos requeridos como lo son: 2.1 Nitrurado a gas, 2.2 Preparación previa PVD, 2.3 Proceso de recubrimiento PVD, 2.4 Caracterización y 2.5) Resultados. Ver la figura 2.

2.1 Proceso de Nitrurado a gas

El proceso de Nitrurado es un tratamiento termoquímico, se realiza a relativamente baja temperatura (< 500 °C). El mecanismo por el cual se promueve el endurecimiento superficial de las muestras de acero inoxidable se da por medio de un proceso difusivo en el que los átomos de nitrógeno se introducen en el sustrato de la muestra hacia el interior de la matriz del acero, este mecanismo no provoca cambios dimensionales en la pieza. El Nitrurado obedece principalmente a tres factores que intervienen los cuales son: tiempo, temperatura y potencial de nitrógeno (N) que se encuentra presente en la atmósfera dentro del horno.

Los gases usados son: Amoniac (NH₃), Amoniac disociado (N+3/2H₂) y Nitrógeno (N₂). Las etapas del Nitrurado corresponden a: 1) calentamiento inicial inyección de amoniac 100 %, 2) limpieza química, 3) calentamiento final, 4) difusión de átomos de nitrógeno (N) monoatómicos producto de la disociación a través del sustrato por un tiempo determinado con el fin de lograr un espesor de capa nitrurada definida y 5) la última etapa corresponde al enfriamiento por convección en un sistema con



retorta, en el que se inyecta aire del medio ambiente como medio de enfriamiento externo y dentro de la retorta del horno se inyecta gas nitrógeno para generar una atmósfera de protección a las piezas contra la oxidación.



Figura 2. Secuencia de pasos llevada a cabo en el procesamiento de las muestras hasta obtener resultados.

Para las muestras que se requieren con sustrato Nitruado, se tuvo que realizar previamente una preparación metalográfica de la superficie, que consistió en un desbaste desde la lija grano 180 hasta grano 600 ya que después de Nitruado la superficie se vuelve muy dura y es más difícil la preparación.

Las muestras antes de los Nitruados se limpiaron con un paño impregnado de alcohol isopropílico para retirar restos de grasa, aceite e impurezas que impidan la difusión uniforme de la capa de Nitruado a través de la matriz del sustrato, posteriormente, las piezas fueron colocadas en un herramental de aleación INCONEL 600. Posteriormente, las piezas se llevan al laboratorio para continuar con la preparación de la superficie previa al proceso final de PVD.

2.2 Preparación previa al PVD

Para cada prueba recubierta con el método de PVD o DLC, se utilizó un juego de 7 muestras, dos de ellas sin Nitruado y el resto con Nitruado, ver la figura 3.

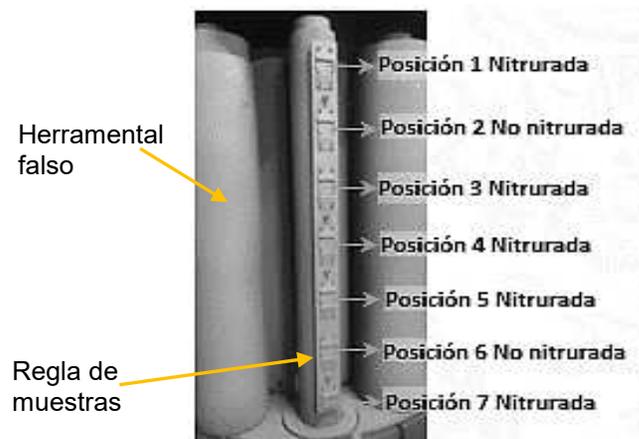


Figura 3, posiciones de las muestras nitruadas (Nit) y sin Nitruado (SN) a través de la zona de trabajo vertical de la cámara de PVD, observe que se tienen dos muestras sin tratamiento previo de Nitruado, posiciones 2 y 6.



Las muestras fueron previamente preparadas bajo un procedimiento estandarizado metalográfico comenzando con el desbaste desde la lija grano 600 hasta la lija grano 2,000. El pulido se realizó con paño afelpado marca BUEHLER y pasta de diamante de 3 μm marca 3M. Posteriormente, el lavado se hizo con agua, inmediatamente después el enjuague con alcohol isopropílico, el secado se realizó con aire comprimido a una presión menor de 1 PSI.

El proceso de PVD debe de ser lo más limpio posible a fin de evitar pérdida de adherencia por suciedad entre la capa depositada de PVD y el sustrato.

2.3 Proceso de recubrimiento PVD

La adherencia de la capa comienza controlando los factores extrínsecos a través de todo el proceso previo al recubrimiento. Una vez que se tiene el material listo para ser procesado hay que tener la certeza de que el sustrato no tenga presencia de oxidación, impurezas, pelusas, grasa, huellas dactilares, aceites pinturas, líquidos, etcétera ya sea entre zonas de la pieza y principalmente en la cara a recubrir.

Un proceso de PVD consta de los siguientes pasos: Desengrase de la pieza, debe de hacerse con agentes químicos dedicados para remover toda impureza que se pueda tener la pieza y una limpieza mecánica abrasiva, esto es con la finalidad de remover la capa superficial pasiva en el sustrato. Aunque también los factores intrínsecos deben de ser analizados para obtener un recubrimiento en las mejores condiciones de adherencia [8].

Los pasos previos requeridos a la deposición del PVD/DLC fueron: a) limpieza ultrasónica y limpieza mecánica abrasiva.

- a) La limpieza ultrasónica, fue realizada con alcohol isopropílico como agente solvente. Las muestras fueron sumergidas en el agente químico dentro de una lavadora ultrasónica marca Branson de una capacidad de 2,800 ml, el tiempo de permanencia fue de 20 minutos. Posterior a esto, las muestras se manipularon con pinzas para disección libres de impurezas y uso de guantes de látex libres de polvo e impurezas. El secado se llevó a cabo con nitrógeno con una pureza estándar del 99.95 % y a una presión de menos de 1 PSI.
- b) Una limpieza mecánica abrasiva llamada granallado fue requerida con el fin de cumplir con un proceso estandarizado y así no provocar algún tipo de variable durante la preparación de la muestra. Se hizo en una máquina marca NORBLAST [9] utilizando arena gris de Carburo de Silicio como medio abrasivo con un tamaño de grano 320, a una distancia de proyección de la granalla de 89 ± 13 mm, la presión del aire comprimido fue de 0.2 GPa, el sopleteo para retirar el exceso de arena se llevó a cabo en otra sección de la misma máquina utilizando aire comprimido y un dispositivo electrónico que remueve la estática en el herramental. Con el fin de garantizar que no se tienen partículas de polvo en las muestras, se cuenta con una segunda limpieza de sopleteo, dentro de una cabina por separado de la máquina original con el mismo mecanismo de antiestática mencionado anteriormente y para finalizar un último sopleteo utilizando nitrógeno comprimido con una pureza estándar del 99.95 %.

Las muestras son montadas en una mesa del tipo planetaria de 10 posiciones, en donde los espacios faltantes son rellenados con cargas falsas, el herramental es sostenido de la parte superior e inferior para evitar que las muestras se salgan del eje y provoque daños en el equipo ya que en el interior del proceso se tiene una rotación que va de las 3 hasta las 15 RPM dependiendo del tipo de método de deposición y etapa del proceso.

La preparación de la cámara para procesar las muestras se resume en lo siguiente: valoración de todos los insumos físicos empleados para un recubrimiento del tipo PVD, se requiere cumplir con distintos estándares de limpieza, validación de aislamiento eléctrico de todos los targets (Cr y C), en esencia se realiza una secuencia de pasos de un proceso estandarizado para la obtención de un recubrimiento libre de defectos y adherencia dentro de lo especificado.



La secuencia de pasos para llevar a cabo un proceso completo de PVD se compone de las operaciones previas y al procesamiento en la máquina para PVD, la secuencia de pasos de todo lo que conlleva la aplicación del método PVD, se resume en el siguiente diagrama de bloques de la figura 4:



Figura 4, diagrama de bloques en donde se enlista la secuencia de pasos para llevar a cabo un procesamiento del tipo PVD para obtener un recubrimiento Cr + CrN.

La secuencia de pasos para el método DLC se compone de los siguientes subprocesos los cuales se muestran en el Diagrama de bloques de la figura 5. Las capas obtenidas con el método DLC son: Cr como capa de enlace y carbón amorfo (a-C).

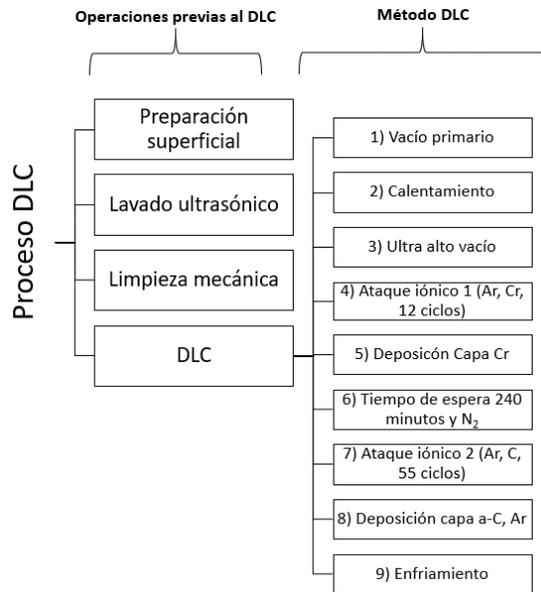


Figura 5, diagrama de bloques en donde se enlista la secuencia de pasos para un procesamiento del tipo DLC con un recubrimiento Cr + a-C.



Para evitar tener afectaciones principalmente en la adherencia del recubrimiento en el sustrato, las variables a través de todo el proceso estuvieron dentro de los parámetros establecidos ya que desajustes, por ejemplo, en las concentraciones químicas del proceso de lavado, manipulación del material sin los cuidados adecuados, limpieza mecánica abrasiva fuera de parámetros, fallas en componentes mecánicos, pueden provocar variaciones en las condiciones de la superficie de los sustratos y por ende en las capas depositadas sobre las muestras.

2.4 Caracterización

La caracterización metalográfica nos permite tener características adecuadas de superficie para determinar las propiedades de las muestras tales como: dureza de sustrato, dureza de capa de Nitruado, dureza de la capa de DLC, así como también profundidades de capa de Nitruado (Nit), capa de Cromo (Cr) y capa de DLC (Cr + a-C).

Los equipos para llevar a cabo la preparación de superficie para la caracterización metalográfica son:

- a) Cortadora marca Leco, modelo MSX-300-A1, el seccionado de la muestra se efectúa mediante dos cortes transversales. El acomodo de la pieza para ser seccionada es importante, se acomodó para que el disco de corte toque primero el recubrimiento y posteriormente el sustrato de esta manera no tenemos un corte despostillado.
- b) El encapsulado de las muestras se hizo en una montadora marca LECO, modelo: PR36, la baquelita utilizada fue resina fenólica transparente aproximadamente 10 % en volumen del total del encapsulado y el resto con resina fenólica color verde para montajes en caliente.
- c) En la probeta, debido a que no se generó un relieve superficial muy marcado entre las piezas, el desbaste se hizo en modo manual comenzando, desde la lija grano 320 hasta llegar a la lija grano 2,000. En una máquina para desbaste – pulido marca LECO, modelo: Spectrum System 1000.
- d) El pulido final se llevó a cabo en una máquina automática marca LECO, modelo PX-500, el tiempo de proceso fue de 10 minutos por 2 ciclos, el tipo de paño que se usó fue del tipo afelpado marca LECO con inyección automática de suspensión de alúmina de un tamaño de 1 μm y Glicol-agua como refrigerante, a una velocidad de giro de 180 RPM. El lavado se hizo con agua de la llave, el enjuague con alcohol isopropílico y el secado final con aire comprimido a una presión menor de 1 PSI.

Las herramientas utilizadas para llevar a cabo la caracterización de las muestras y obtener resultados cuantitativos y cualitativos se enlistan a continuación:

- A. Microscopio óptico metalúrgico marca Keyence, modelo VHX-5000. Con el uso del microscopio se llevó a cabo el dimensionamiento de las capas de Nitruado, nitruro de cromo y DLC, así como también se validó y se obtuvieron algunas micrografías de la microestructura.
- B. Durómetro digital ROCKWELL Hardness Tester, modelo: 6523-T, Serial: 97310502, Marca: WILSON Rockwell Instron. Este dispositivo se usó para obtener una huella en la superficie de la muestra como resultante de la práctica de la inspección de la dureza, en este caso el valor obtenido no es necesario de acuerdo con la técnica de adherencia VDI-3198. Cualitativamente se requiere revisar la huella obtenida por la prueba de dureza, esta se analiza bajo el microscopio óptico metalúrgico a una magnificación de 200X para determinar el grado de adherencia del recubrimiento en el sustrato que se obtuvo en cada experimento y con el fin de hacer un comparativo de huellas obtenidas de las muestras de acuerdo con los criterios establecidos por el estándar VDI-3198.
- C. Nano-durómetro: Marca FISCHERSCOPE HM2000, punta cónica de diamante, cargas utilizadas: HV0.1 para determinar la dureza de la capa de Nitruado y HV0.002 para determinar la dureza de



las capas. Con la ayuda de este dispositivo se obtuvieron las durezas del sustrato, de la capa de Nitrurado, de la capa de CrN y la capa a-C.

D. Microscopio Electrónico de Barrido: Marca JEOL, se utiliza el detector de electrones secundarios y detector de energía dispersiva EDS. La herramienta nos ayuda en obtener imágenes de las capas obtenidas en las muestras, así como también mapeos elementales de la constitución de las capas en las muestras.

E. Prueba de Rayado: Marca Anton Paar modelo RST3, indentador: punta cónica de diamante tipo Rockwell, número de serie AJ227, tamaño de radio de 200 μm , con esta prueba se determinó cuantitativa y cualitativamente la adherencia del recubrimiento en el sustrato.

Hasta aquí se tiene descrita la obtención de las muestras desde el metal común hasta la caracterización bajo las diferentes técnicas empleadas para obtener los resultados requeridos que indiquen las diferencias a través de la evaluación de las capas obtenidas y principalmente la adherencia el cual es el resultado del movimiento de las variables por cada experimento efectuado. En la siguiente sección de este trabajo, se exponen los resultados obtenidos, los cuales se analizaron y se discutieron.

3. Resultados y discusión

3.1 Limpieza previa del sustrato

El factor de la limpieza de la superficie del sustrato antes de ser recubierto juega un papel fundamental para tener las condiciones óptimas necesarias y hacer que un recubrimiento sea confiable y reproducible [19]. La limpieza superficial, es una parte integral de cualquier proceso de deposición PVD/DLC. En muchos de los casos, la condición superficial determinará las condiciones de adherencia, esto es, mientras mejor sea expuesta la superficie del material sin intervención química de algún tipo de oxidación superficial, se disminuirá en gran medida el factor de la pérdida de adherencia por cuestiones de limpieza.

Las técnicas de limpieza que se utilizaron en todas las muestras fueron:

1. Limpieza mecánica ultrasónica con alcohol isopropílico como medio solvente.
2. Limpieza abrasiva, se llevó a cabo en una máquina de Sand Blast con sistema de sopleteo iónico automático.

La baja adherencia también puede deberse a un sustrato contaminado, referidos como óxidos, presencia de aceite o inhibidores, partículas de polvo, hasta huellas de los dedos por concepto de manipulación, no solo en la superficie del sustrato se pueden tener los contaminantes sino también en el medio ambiente por lo que se recomienda tener una limpieza clase 100,000. Para el manejo de las muestras se utilizó guantes de latex limpios, libres de partículas de polvo, aceite, agua, etcétera, esto ayuda a que no se tengan contaminantes en el sustrato por manipulación.

En un trabajo escrito por Gerth [5], indica que, para tener las mejores propiedades de adherencia, llevó a cabo un tratamiento superficial de limpieza mecánica en el sustrato llámese granallado y con esto eliminar alguna posible contaminación. La dureza de la capa intermedia debería estar cerca de la dureza del sustrato. Ya dentro de la cámara de PVD es importante también tener un tratamiento de la superficie del sustrato llamado ataque iónico.

3.2 Prueba de adherencia VDI-3198

La prueba adherencia bajo el procedimiento VDI-3198 [6] se lleva a cabo haciendo una indentación sobre el recubrimiento de la superficie de la muestra, posterior a esto se lleva a cabo bajo un estereoscopio la evaluación de la huella generada.



El criterio de aceptación o rechazo indicado por el estándar, revela que las primeras 4 figuras catalogadas como HF1, HF2, HF3 y HF4 son ejemplos de una huella en donde la adherencia del recubrimiento en el sustrato es aceptable. En cambio, las últimas 2 figuras catalogadas como HF5 y HF6 son designadas como muestras con falla de adherencia para catalogar recubrimientos como falla no aceptada, es decir, adherencia no aceptable. Así que para este trabajo a todas las muestras involucradas, se les aplicó el estándar VDI-3198 siguiendo los lineamientos descritos, después de tres indentaciones por muestra, al final se compararon con cada criterio para determinar qué grado de adherencia obtenido en cada prueba. Ver la figura 6.

En la tabla 2 se clasificaron los resultados obtenidos, los mejores de ellos se consiguieron en primer lugar con las pruebas 1 y 2 alcanzando un criterio HF1 en muestras sin sustrato Nitruado y para las muestras con sustrato Nitruado se obtuvo un criterio de HF2.

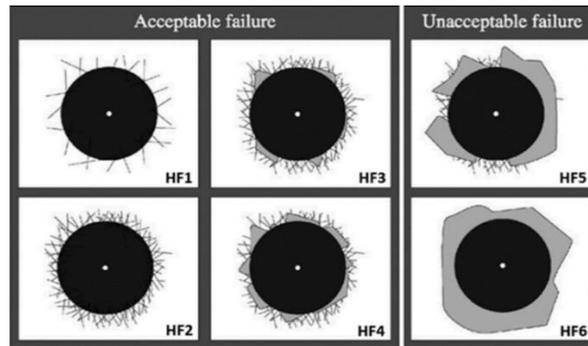


Figura 6, criterio gráfico del estándar VDI-3198, en el que se muestra la adherencia del recubrimiento después de una prueba de indentación HRC. (Vidakis, 2003).

En segundo lugar, se tienen las pruebas 4, 5 y 6 en donde el criterio de adherencia para las muestras con sustrato sin Nitruado fue de HF2. Sin embargo, para las muestras con sustrato Nitruado se obtuvo un HF3 para el caso de la prueba 4 y HF4 esto es en el límite del criterio de aceptación de adherencia y para las pruebas 5 y 6 se obtuvo un criterio de HF3. Las huellas circulares no se consideran características de baja adherencia debido a que no se tiene delaminación del recubrimiento del sustrato.

El tercer lugar se obtuvo con la prueba 3, para el caso de las muestras sin sustrato Nitruado en donde se obtuvo un criterio de adherencia HF1, sin embargo, para la muestra con sustrato Nitruado se obtuvo un criterio HF6 la cual está fuera de los límites de aceptación por lo que esto coloca a este recubrimiento como rechazado.

Para una mejor referencia consulte la tabla 2 y figura 7 en donde se tiene un resumen de los resultados obtenidos bajo el uso del estándar de adherencia VDI-3198.

Tabla 2. Resumen de los resultados obtenidos al aplicar la técnica de inspección de adherencia en las pruebas.

CRITERIO VDI-3198	Prueba 1 PVD: Cr+CrN		Prueba 2 DLC: Tiempo de espera 260 minutos		Prueba 3 DLC: Solo Cr		Prueba 4 PVD: Solo Cr		Prueba 5 DLC: Tiempo de espera 0 minutos		Prueba 6 DLC: (Cr,PVD)+(ta-C,DLC)	
	M:5Nit	M:6SN	M:21Nit	M:22SN	M:84Nit	M:85SN	M:92Nit	M:91SN	M:133Nit	M:134SN	M:338Nit	M:339SN
HF1		HF1		HF1		HF1		HF1				
HF2	HF2		HF2							HF2		HF2
HF3									HF3		HF3	
HF4							HF4					
HF5												
HF6					HF6							



Las pruebas 1 y 2 son métodos patentados en el que las variables han sido establecidas y estandarizadas dentro de una institución a estas no se les hace algún movimiento en las variables. Así que con la técnica de inspección de adherencia VDI-3198 se tiene para las muestras M5 y M21 con sustrato Nitrurado un criterio de HF2 para ambos métodos de recubrimiento PVD y DLC respectivamente. Para el caso de las muestras M6 y M22 sin sustrato Nitrurado, se tiene obtiene un criterio que representa los resultados de adherencia de HF1, vea las macrografías correspondientes de la figura 7.

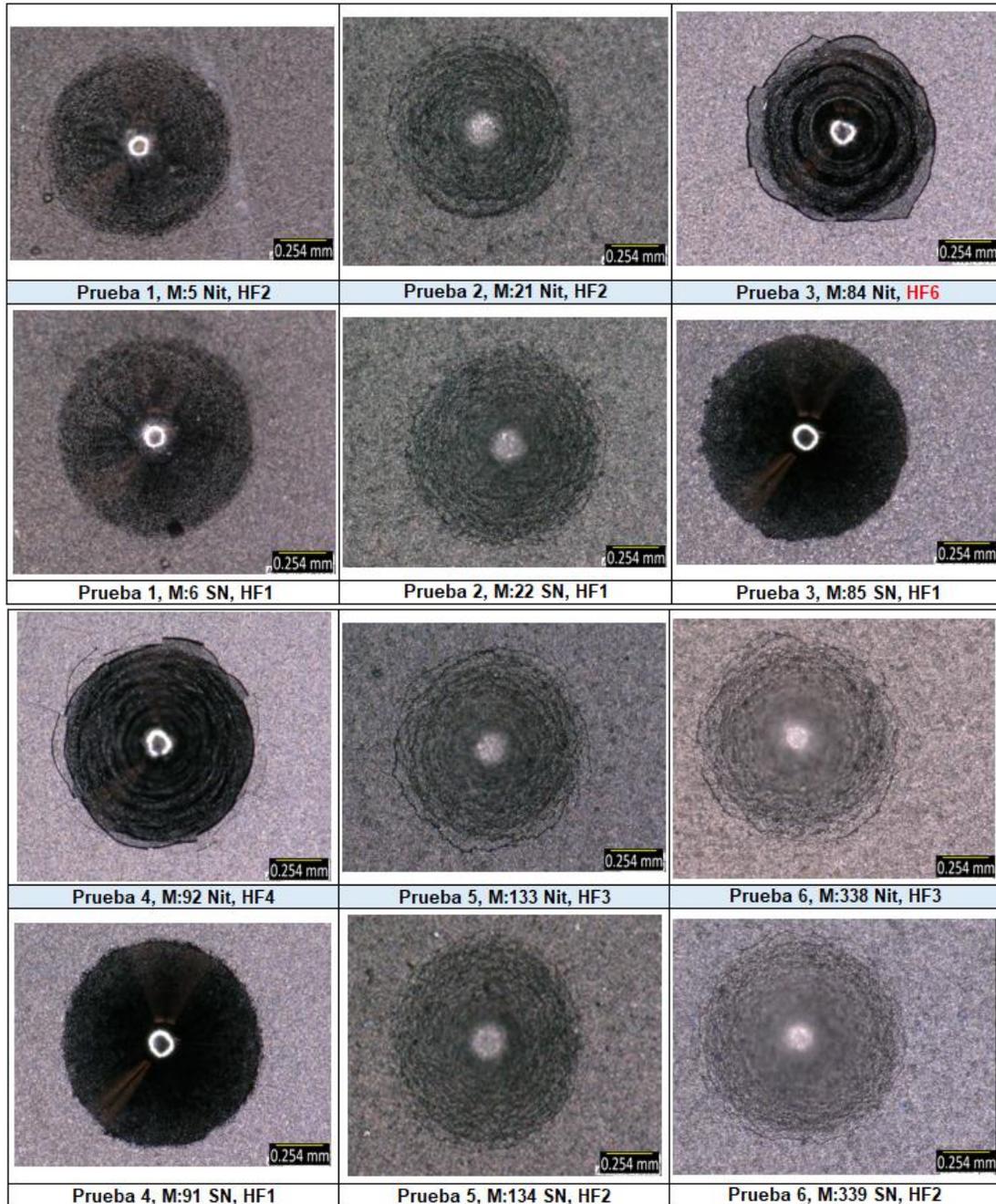


Figura 7 se muestran las huellas de las indentaciones hechas a todas las muestras.



Las pruebas 3 y 4 se trata del análisis de la adherencia en la capa de recubrimiento de Cr puro la cual sirve como enlace entre el sustrato y la capa de carbón amorfo a-C. Observe que la validación cualitativa que ofrece la técnica de inspección VDI-3198 indica que la muestra M84 con sustrato Nitrurado, perteneciente a la prueba 3, obtuvo un criterio de HF6, esto indica una adherencia baja del recubrimiento en el sustrato. La muestra M92 con sustrato Nitrurado, perteneciente a la prueba 4, obtuvo un criterio de HF4 y esto quiere decir, que la adherencia está dentro de los criterios de aceptación. Para las muestras M85 y M91 ambas sin sustrato Nitrurado, el criterio obtenido fue de HF1 por lo que no se observa algún indicio de falla. Vea las macrografías correspondientes de la figura 7.

Para la prueba 5 con la muestra M133 con sustrato Nitrurado se comparó con la muestra M21 con sustrato Nitrurado de la prueba 2. En la prueba 5, se analizó la adherencia en un cambio de variable en el método de deposición DLC, esta variable se trata de quitar el tiempo de espera (Tiempo de espera 0 minutos) de la etapa de enfriamiento del sustrato o material después de la deposición de Cr puro y ataque iónico para la deposición del a-C, un comparativo entre los resultados cualitativos de adherencia obtenidos por la prueba de adherencia VDI-3198 indican que la muestra M133 de la prueba 5 tuvo un criterio HF3 un grado por debajo de la muestra M21 de la prueba 2. Las muestras sin sustrato Nitrurado M134 de la prueba 5 obtuvo un criterio HF2, en la huella de la indentación, se generaron grietas del tipo circular, éste tipo de grietas no indican adherencia rechazada [20]. Para la M22 sin sustrato Nitrurado de la prueba 2 obtuvo un criterio de HF1. Vea las macrografías correspondientes de la figura 7.

Para el caso de la prueba 6, los resultados de la muestra M338 con sustrato Nitrurado, indica un criterio de adherencia de HF3, esto es un grado por debajo de la M21 con sustrato Nitrurado de la prueba 2. En la prueba 6, la variable que se movió fue precisamente la mejor adherencia obtenida entre las pruebas 3 y 4 de las muestras con sustrato Nitrurado. Para llevar a cabo esta prueba se seleccionó el recubrimiento de Cr del método PVD correspondiente de la prueba 4 de la muestra M92 con sustrato Nitrurado, recordemos que el criterio obtenido fue un HF4 en comparación con la muestra M84 con sustrato Nitrurado de la prueba 3 en la que se obtuvo un criterio HF6. La comparación de resultados entre la prueba 6 y 2 de acuerdo al análisis cualitativo logrado con el estándar VDI-3198 indica que las muestras M338 y M21 con sustrato Nitrurado la adherencia de la prueba 2 es un grado arriba que la prueba 6. Vea las macrografías correspondientes de la figura 7.

3.3 Prueba de Rayado

Con la finalidad de complementar los resultados obtenidos anteriormente se utilizó la técnica de inspección de adherencia llamada Scratch Test, de la traducción del inglés “Prueba de Rayado”. El método de inspección por medio del uso de un dispositivo especializado para obtener la adherencia en términos cuantitativos y cualitativos a partir del rayado desde la superficie de los recubrimientos bajo un procedimiento estandarizado llamado ASTM C-1624, revela el estado de la adherencia del recubrimiento en una distancia determinada de prueba y se puede llevar a cabo con carga constante o carga progresiva, en donde se puede determinar la carga crítica, siendo el parámetro que se debe de buscar tanto en datos graficados como en la huella lineal obtenida por la punta de diamante.

Las gráficas son obtenidas cuantitativamente por varios sensores y detectores que tiene el dispositivo de la Prueba de Rayado como son: Señal de emisión acústica (AE), Fuerza tangencial (FT), Carga normal aplicada (FN), coeficiente de fricción ($\mu=FT/FN$), Profundidad de penetración (PD) y Profundidad residual (RD) [21]. Los datos cualitativos que arroja la Prueba de Rayado se trata de una huella lineal que es la resultante de la prueba formada por la punta de indentación Rockwell a partir de la superficie del recubrimiento y en algunas ocasiones puede llegar hasta el sustrato. Con el apoyo de un microscopio óptico o un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) se analizan las fallas generadas en el recubrimiento que se presentan a lo largo de la huella y este dato cualitativo sirve de apoyo para las gráficas obtenidas de manera cuantitativa para determinar entre otras cosas, los tres puntos de falla crítica, los cuales son: Cargas Críticas 1 (Lc1) significa el agrietamiento inicial del recubrimiento, la Carga Crítica 2 (Lc2) es en donde sucede la primer delaminación, y como Carga Crítica 3 (Lc3) se tiene la delaminación total del recubrimiento en el sustrato.



Con la señal de emisión acústica se forma una gráfica en la cual se registra por medio de la acústica el momento en que ocurre alguna falla crítica en el recubrimiento y a que distancia del barrido, así mismo, con las gráficas obtenidas de la Fuerza tangencial y la Carga normal aplicada, sirven de soporte para determinar dichas Cargas Críticas.

El estándar Internacional ASTM C-1624 y algunos otros autores, Zaidi [14] menciona en su trabajo los parámetros más importantes como lo son: Tipo de indentador, carga aplicada, velocidad de desplazamiento, distancia del rallado, carga progresiva o constante, ajuste del sensor de emisión acústica y ajuste del análisis óptico, usados en su trabajo para llevar a cabo la prueba de adherencia en los recubrimientos con capas DLC.

Para el caso de la elaboración de este trabajo, se utilizó un dispositivo para la determinación de la adherencia marca: Anton Paar, modelo: RST3, indentador con punta de diamante Rockwell de 200 μm de diámetro con número de serie AJ227, distancia total de la carrera: 4 mm, velocidad: 4 mm/min, tipo de carga progresiva de 0.1 hasta 200 N.

En la siguiente figura 9, se muestra un resumen de los resultados cualitativos obtenidos de la Prueba de Rayado obtenido de las diferentes pruebas en muestras con y sin sustrato Nitruado, así mismo, en el pie de cada foto, se muestra la carga crítica obtenida de las gráficas cuantitativas, además de la distancia a la que se presentó obteniendo los valores Lc2 de cada prueba.

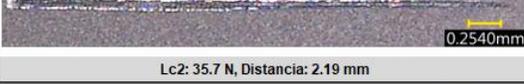
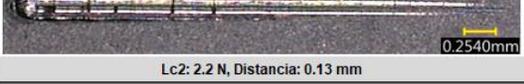
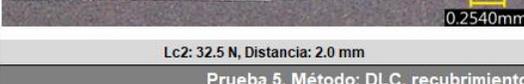
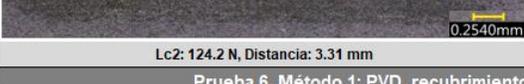
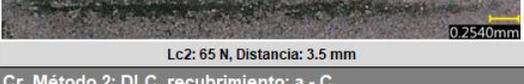
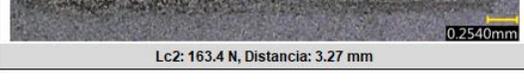
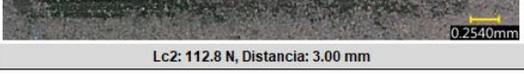
Sustrato Nitruado	Sustrato sin Nitruado
Prueba 1. Método: PVD, recubrimiento obtenido Cr + CrN	
M:5	M:6
	
Lc2: 119.5 N, Distancia: 3.9 mm	Lc2: 97.8 N, Distancia: 1.80 mm
Prueba 2. Método: DLC, recubrimiento: Cr + a-C	
M:21 CP 65N	M:22 CP 65N
	
Lc2: 135.6 N, Distancia: 3.6 mm	Lc2: 29.5 N, Distancia: 1.97 mm
Prueba 3. Método: DLC, recubrimiento: solo Cr	
M:84	M:85
	
Lc2: 35.7 N, Distancia: 2.19 mm	Lc2: 2.2 N, Distancia: 0.13 mm
Prueba 4. Método: PVD, recubrimiento: solo Cr	
M:92	M:91
	
Lc2: 32.5 N, Distancia: 2.0 mm	Lc2: 3.0 N, Distancia: 0.18 mm
Prueba 5. Método: DLC, recubrimiento Cr + a-C, Tiempo de espera: 0 minutos	
M:133	M:134
	
Lc2: 124.2 N, Distancia: 3.31 mm	Lc2: 65 N, Distancia: 3.5 mm
Prueba 6. Método 1: PVD, recubrimiento: Cr, Método 2: DLC, recubrimiento: a - C	
M:338	M:339
	
Lc2: 163.4 N, Distancia: 3.27 mm	Lc2: 112.8 N, Distancia: 3.00 mm

Figura 9. resumen de los resultados obtenidos por medio de la Prueba de Rayado.



Haciendo un análisis en términos generales de los resultados obtenidos con el uso de la técnica Prueba de Rayado aplicada para todas las pruebas, se tienen las siguientes discusiones:

En todas las pruebas inspeccionadas con la Prueba de Rayado, se obtuvieron las cargas críticas (Lc2) con sustrato nitrurado en una magnitud mayor que las muestras sin sustrato nitrurado, debido a este comportamiento se tiene que sustratos con tratamiento previo, llámese de un temple y revenido o un tratamiento de endurecimiento superficial como lo es el nitrurado, esto incrementa la dureza en un sistema de capas simples como se nota en el caso de las pruebas 3 y 4 o en un sistema de múltiples capas como es el caso de las pruebas 1, 2, 5 y 6, por lo tanto, el sustrato influencia a que se tenga alta adherencia, lo cual se manifiesta en la(s) carga(s) crítica(s), en un sustrato duro provocará a que se tenga carga crítica alta y viceversa [22], [8], éste mismo comportamiento es observado en ambos métodos de recubrimiento PVD y DLC. Véase la siguiente figura 10.

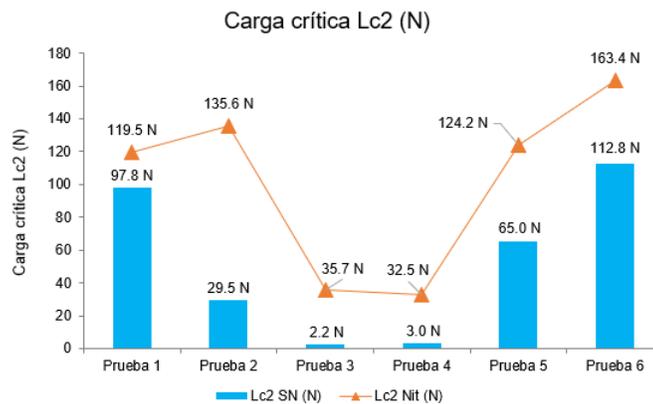


Figura 10. Resultados de la carga crítica Lc2 de las pruebas en muestras con y sin sustrato Nitrurado.

3.3.1 Método PVD y DLC

La carga crítica que se consiguió en la prueba 1 bajo el método de PVD (método original), es de 119.5 N para el caso de la muestra M5 con sustrato nitrurado y de 97.8 N para la muestra M:6 para la muestra sin sustrato Nitrurado con una diferencia de 21.7 N. El valor no es muy separado y físicamente en los laboratorios de la institución, históricamente hablando, nunca se ha obtenido un rechazo por desprendimiento de la capa de PVD del sustrato, utilizándolo en sustrato martensítico en muestras sin nitrurado de acero al carbono.

En las muestras M21 y M22 con y sin sustrato Nitrurado respectivamente de la prueba 2 (método original), el valor de carga crítica entre las muestras encontrado tiene una separación mayor en comparación con la prueba 1 este tiene un valor en Newtons de 106.1, la diferencia tan grande mostrada obedece a que los recubrimientos del tipo DLC son más frágiles y de una dureza tres veces más que un recubrimiento de CrN. El recubrimiento del tipo DLC está desarrollado para aplicaciones de acero inoxidable con sustrato nitrurado no para sustratos sin nitrurado, cumpliendo con los estándares especificados en las especificaciones internas de la institución.

3.3.2 Resultados y diferencias de proceso prueba 3 y 4

Analizando la carga crítica presente en las muestras M:84 de la prueba 3 y M:91 de la prueba 4, ambas con sustrato Nitrurado, para ésta última prueba 4 se obtuvo la carga crítica Lc2 más baja del orden de 18.9 N, en comparación con la carga crítica de la muestra M:84 de la prueba 3 en donde se obtuvo una Lc2 del del orden de 35.7 N. Las principales diferencias entre ambos procesos de deposición radica principalmente en los siguientes factores, ver la siguiente tabla 3, en donde se pueden ver las



principales diferencias en la deposición de la capa de Cr de los métodos PVD y DLC en las etapas: ataque iónico y deposición de la película de Cr, ver la tabla 3.

Tabla 3. Diferencia en parámetros de las pruebas 3 y 4.

No	Parámetro	Método DLC	Método PVD	Paso del proceso
1	Tiempo total	22 minutos	17 minutos	Ataque iónico
2	Targets	2 por puerta = 4	4 misma puerta	Ataque iónico
3	BIAS	1000 V	950 V	Ataque iónico
4	Ciclos ataque iónico	2 minutos	3 minutos	Deposición de Cr

En la tabla se muestran las principales diferencias y motivos por los que la adherencia en la muestra M:84 tiene mayor la carga crítica que la muestra M:91 de la prueba 4, ambas con sustrato Nitrurado, la cuales se van a discutir enseguida:

- 1) Tiempo total, este es el tiempo total empleado en el paso de proceso ataque iónico. Es la variable principal para incrementar la limpieza del sustrato dentro de la cámara de PVD. ver la sección 3.6.
- 2) Targets, son los targets de Cr que están activados durante el ataque iónico, para el caso del método PVD se tienen 4 targets activados en una misma puerta de la cámara de recubrimiento, en este tipo de configuración se tiene una mayor disposición de los átomos por unidad de área, en comparación con la configuración de solo 2 targets por puerta, la densidad de las partículas disminuye.
- 3) BIAS (V), prácticamente con ambos métodos, se tiene alta energía para que se lleve a cabo la función del ataque iónico dentro de la cámara de recubrimiento.

Del punto 4 se hablará a detalle en la sección 3.3.4.

3.3.3 Prueba 5 tiempo de espera cero

Se utiliza el método DLC con tiempo original de espera de 240 minutos ($TE=240$ min.) en la prueba 2, en comparativa se tiene el mismo método DLC, pero sin tiempo de espera ($TE=0$ min) esto corresponde a la prueba 5. El tiempo de espera se aplica entre las etapas de deposición de la capa de Cr y el ataque iónico para la deposición del recubrimiento a-C.

Los resultados de la prueba 2 ya los hemos analizado en la sección 3.3.1, los cuales son muy similares en las muestras M:21 y M:133 de la prueba 2 y 5 respectivamente en sustrato Nitrurado, los resultados de la Prueba de Rayado indican una diferencia en carga crítica ($Lc2$) de 11.4 N.

En el caso de las muestras sin sustrato Nitrurado la M:22 para el caso de la prueba 2 y la M:134 para el caso de la prueba 6, se obtuvo un incremento en la carga crítica de 29.5 N (prueba 2) a un promedio de 65 N para la prueba 5, la diferencia en Newtons entre ambas cargas críticas ($Lc2$) es de 35.5 N por lo que si se tuvo incremento en adherencia por lo menos en las muestras con sustrato sin Nitrurado.

Por lo que esta prueba no resultó con mayor diferencia en resultados debido a que las temperaturas manejadas para la prueba 5 son prácticamente las mismas del proceso original, solamente se cambió la temperatura de inicio de la deposición y esto posiblemente generó un gradiente de enlaces mayoritario en enlaces sp^2 pero solo al inicio del recubrimiento y posteriormente las temperaturas se estabilizaron a las condiciones originales del método.

3.3.4 Prueba 6, combinación de métodos de recubrimiento PVD y DLC

Para esta prueba, se lleva a cabo una combinación de los métodos PVD y DLC, con el método PVD se seleccionó solamente la deposición de la capa de Cr y con el método DLC, se seleccionó la



deposición del recubrimiento duro a-C sin alguna modificación en las variables, con la aplicación de una carga progresiva de 200 N, se alcanzaron cargas críticas (Lc_2) del orden de 163.4 N el cual es la carga crítica más alta obtenida de todas las pruebas y para el caso de la muestra con sustrato sin Nitruado se alcanzó una carga crítica del orden de 112.8 N por lo que si se incrementó la adherencia con la combinación de ambos métodos.

Los enlaces entre el carbón sp^3 es característico de la formación del diamante, mientras que los enlaces sp^2 son presentados en el grafito, en diferentes proporciones para dar ciertas propiedades de dureza en el recubrimiento.

Además, muchos artículos investigados indican que para un incremento de la adherencia en el recubrimiento se requiere tener un sistema multicapas.

Cabe mencionar que la cantidad de sobrecargas durante el ataque iónico también es un factor importante a considerarse, el término sobrecarga, se refiere a la desviación del plasma generado en el sustrato a chocar con alguna parte contigua dentro de la misma cámara teniendo pérdidas de energía de los iones de Cr y Ar para chocar con la superficie del sustrato.

Del punto 4 de la tabla 3, cada ciclo para el método de DLC es de 2 minutos todos ellos a 1,000 V y para el método de PVD es de 3 minutos a dos voltajes a 600 y a 950 V. Se tiene entonces que para la prueba 2 (método DLC) se tuvo que la cantidad de sobrecarga fue de 514 veces, por lo que, en los dos últimos ciclos la tasa de sobrecarga no disminuyó y se tuvieron 53 veces. En cambio para el método PVD los ciclos en el ataque iónico son de 3 minutos, en los últimos dos ciclos se tuvieron solo 5 sobrecargas de un total de 80 veces, Así que esta configuración de ciclos más largos ayuda a que se tengan mejor limpieza del sustrato durante el ataque iónico se ha observado que a medida que pasan los ciclos, la cantidad de sobrecargas disminuye.

Como ya sabemos, las capas de DLC son metaestables, por lo tanto, hay que disminuir los esfuerzos internos del recubrimiento. De acuerdo con un trabajo escrito por Almeida [15], menciona que principalmente en las capas de enlace Cr y las capas a-C, el alto estrés reduce la adherencia de los recubrimientos entre las capas. Así que la etapa del proceso previa a los recubrimientos ataque iónico es esencial para que se tenga buena limpieza en la superficie del sustrato, además de la difusión de los elementos a través de las capas, en este caso de la capa de Cr en el sustrato, ver la sección 3.5.

Autores tales como Ollendorf [11] mencionan que entre otros factores la adherencia depende directamente del tiempo empleado para la limpieza iónica de la superficie (ataque iónico), haciendo experimentos que va de un tiempo de 0.5 hasta 15 minutos, este último tiempo es recomendado por el autor. Los resultados mostrados de su trabajo indican que a medida que incrementa el tiempo de ataque iónico también se incrementa la adherencia del recubrimiento en el sustrato.

Las mediciones cuantitativas obtenidas por la Prueba de Rayado indican que se tiene prácticamente una mejor adherencia en la prueba 3 (método DLC) con un valor de carga crítica Lc_2 de 35.7 N en comparación con la prueba 4 (método PVD) en donde se obtuvo un valor de carga crítica Lc_2 de 32.5 N éste valor de adherencia es muy similar y la diferencia es de apenas 3.2 N en la muestra con sustrato Nitruado.

Conforme se observa en los datos, la mejor adherencia conforme a la Prueba de Rayado se obtuvo con el método de DLC en donde se emplea un tiempo efectivo de ataque iónico de 22 minutos y en el método PVD se tiene un tiempo de 17 minutos por lo que se cumplen las aseveraciones indicadas por el autor Ollendorf a lo que también, el autor Heinke [13] indica una limpieza iónica de 20 a 30 minutos para obtener buena adherencia en capas.

A manera de dato, una forma de reducir los esfuerzos es integrar en la red cristalina del C un elemento dopante como el nitrógeno esto causa en general un decremento en la cantidad de enlaces sp^3 incrementando la adherencia de la capa en el sustrato, para formar el tipo de grafito sp^2 en lugar del



diamante sp^3 . La grafitización también se logra con temperaturas de deposición relativamente altas, sin embargo, se sacrifican algunos puntos de dureza del recubrimiento [16].

3.4 Resultados de adherencia estándar VDI-3198 y Prueba de Rayado

Enseguida se destacan los resultados más significativos entre ambas pruebas de adherencia VDI-3198 y Prueba de Rayado y presentados en la tabla 3.

Comparativo prueba 1 y 2, en ambas muestras con sustrato Nitruado el resultado es aceptado.

En general para todas las muestras sin sustrato Nitruado el estándar VDI-3198 indica que se tienen resultados aceptables, sin embargo, la Prueba de Rayado sirve de complemento para determinar de manera cuantitativa la carga crítica de la adherencia del recubrimiento en las muestras con sustrato sin Nitruado.

Comparativo prueba 3 y 4 solo recubrimiento de Cr, para las muestras con sustrato Nitruado, se tiene apariencia de desprendimiento de capa de Cr, sin embargo, con la técnica VDI-3198, se encontró que la capa de Cr depositada con el método PVD alcanzó un criterio HF4 mientras que para la muestra procesada con el método DLC se tiene un criterio de adherencia no aceptado de HF6.

Dado que éstas muestras se están trabajando con capas delgadas del orden de 5 a 8 μm y de acuerdo con las investigaciones de los autores: Lan, Ollendorf, Duminica, Vidakis, los cuales han hecho experimentos en capas de este tipo se tenía certeza de que la prueba de adherencia VDI-3198 nos mostraría la mejor adherencia para las muestras con sustrato nitruado, y es así como se seleccionó para la prueba 6 utilizar el recubrimiento del método PVD, pero la capa de Nitruado, aunque sea capa de difusión, es una variable de alto impacto que influencia la apariencia de la huella obtenida.

En un trabajo por Vidakis, indica que la prueba destructiva de adherencia exhibe rigurosamente dos propiedades distintivas de los componentes recubiertos, la adherencia interfacial y también la fragilidad de la capa, no obstante, en las pruebas de adherencia que se llevaron a cabo se tiene que la fragilidad de las capas está tomando el papel de delaminación del recubrimiento por ejemplo la capa nitruada del sustrato.

Con el fin de validar que las muestras nitruadas están siendo la causa de que se tenga delaminación de la capa en el caso de las muestras con sustrato Nitruado, se aplicó la técnica VDI-3198 en una muestra con sustrato Nitruado, el espesor de la capa promedio generada fue de 52.7 μm y un promedio de dureza de 1050 HV. Después de las indentaciones correspondientes al haber aplicado la técnica VDI-3198, se obtuvieron macrografías de las huellas dejadas por la indentación con el uso de un MO observe en la figura 12, ésta muestra solo recibió un proceso de Nitruado a gas y se preparó bajo el procedimiento metalográfico para obtener un acabado espejo. Después del Nitruado, la muestra se atacó con Nital al 2 % para tener una superficie contrastante para revelar un mejor detalle del efecto de delaminación - fragilidad de la capa de Nitruado.

Autores como Lan [10], Ollendorf [11], Duminica [12], el mismo Vidakis entre otros, basan su experimentación en muestras con recubrimientos con capas menores a 5 μm , el espesor total de la capa de difusión obtenida en las pruebas es representado en la gráfica 1, entre ambas pruebas se tiene una diferencia de 16.3 μm , por lo que la muestra en la que se depositó el recubrimiento de Cr bajo el método DLC tiene mayor cantidad de capa nitruada de difusión en promedio 48.4 μm , la capa de difusión en la muestra donde se depositó la capa de Cr con el método de PVD se tiene en promedio 32.1 μm , la muestra solamente con sustrato Nitruado, la profundidad de capa está en el orden de 52.7 μm . ver las figuras 13 y 14.

Para el caso de las muestras con recubrimiento de Cr y una muestra nitruada sin recubrimiento de Cr, se hizo un comparativo de solo las capas de nitruado, ver la figura 15.

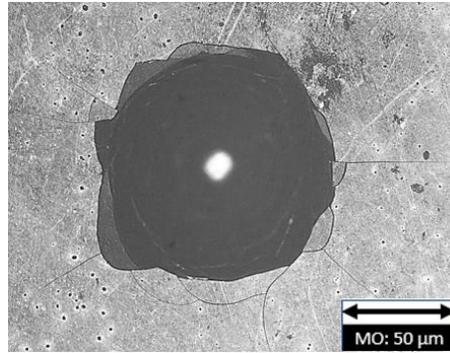
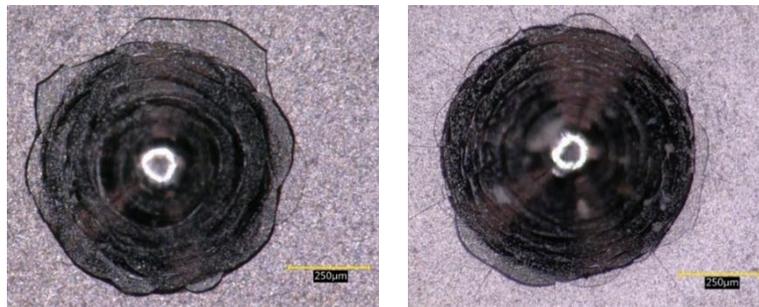


Figura 12, micrografía de una muestra solo con capa de difusión de Nitrurado, en la que se le hizo una prueba de adherencia para evaluar la fragilidad y delaminación del recubrimiento. Magnificación 200X MO.



Figuras 13 y 14 muestras M3 y M4, les corresponden los criterios de evaluación de acuerdo con el estándar VDI-3198 de HF6 y HF3 respectivamente.

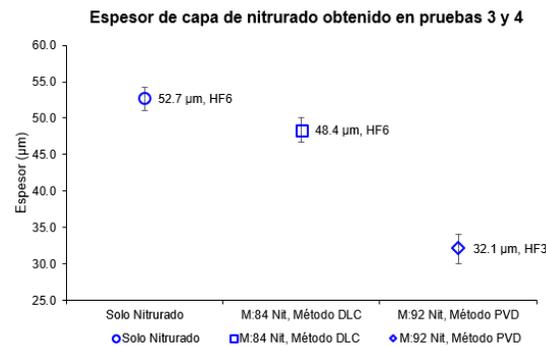


Figura 15, espesores de capa de Nitrurado en sustratos de acero inoxidable 304.

El autor Lan [10], indica también que se tiene una delaminación mayor a mayores espesores de capa, igualmente en un artículo de Heinke [13], nos explica en su trabajo un incremento de grietas y delaminaciones es observado debido al incremento del espesor del recubrimiento en muestras con espesores que van desde las 2 a las 20 μm . De esto podemos discernir que la baja adherencia que aparentemente presentan las muestras con sustrato Nitrurado se debe en gran medida a la fragilidad que exponen las altas capas del recubrimiento y principalmente la capa de Nitrurado y no precisamente porque el recubrimiento tenga baja adherencia en el sustrato.



De esto se puede concluir que la profundidad de las capas juega un papel muy importante para obtener resultados comparables dentro de la prueba de adherencia VDI-3198.

3.5 Difusión entre capas

En recubrimientos por procesos PVD se tiene difusión de elementos del orden de unos cuantos nanómetros [17], es decir, en un recubrimiento del tipo Cr + CrN, los elementos a difundirse son el cromo en el sustrato seguido de la difusión del recubrimiento CrN en la capa de enlace, un trabajo de investigación [18], menciona en su trabajo en el cual muestra la distribución de los elementos de aleación entre los límites de frontera del sustrato y la capa de enlace de Cr por ejemplo.

3.6 Propiedades mecánicas

La profundidad de capa obtenida de los recubrimientos está en la figura 11 en donde podemos observar en un comparativo que las profundidades de capa obtenidas están muy estables a través de las pruebas, se puede observar que los valores que se tienen como desviación estándar son reducidos a lo que esto indica buena estabilidad del proceso de recubrimiento.

La capa más alta obtenida es la del sustrato Nitruado de un espesor estandarizado para ciertos componentes automotrices de aproximadamente 37.25 μm , esto representa la capa de mayor espesor del total del recubrimiento, en términos de porcentaje sería un 60 % del total del recubrimiento y un 40 % es representado por la capa depositada de a-C la cual tiene un espesor promedio de 24.39 μm , el espesor total que conforman el arreglo de multicapas en un componente con sustrato Nitruado es de aproximadamente 61.63 μm .

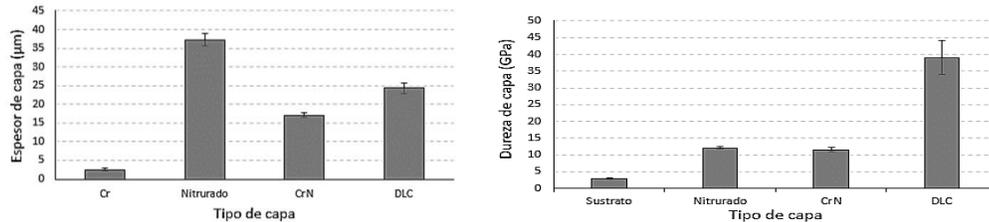


Figura 11 y 12, se muestran los valores de los espesores de capa y dureza obtenidos de los recubrimientos respectivamente.

La nano dureza fue evaluada en el sustrato, la capa de Nitruado, capa de enlace Cr (método PVD), CrN y a-C, a modo de tener un comparativo en esta propiedad, se tienen los resultados en la figura 12.

La dureza más baja la tiene el sustrato sin Nitruado con un valor de 2.87 GPa, las durezas de la capa de Nitruado y CrN son muy similares, aunque ésta última fue empleada solamente para la prueba 1, la dureza de este tipo de recubrimientos está en un promedio de 12 GPa y por último la dureza del a-C tiene una dureza promedio de 38.98 GPa.

Como ya lo hemos mencionado, el recubrimiento DLC es un compuesto metaestable, constituido por una red cristalina desordenada con una mezcla de enlaces sp^2 (grafitizante) y sp^3 (estructura del diamante), [10] la relación sp^2 y sp^3 , determina la dureza de la capa y se lleva a cabo con un estricto control de la temperatura de proceso.

3.7 Propósito de las capas en el recubrimiento

La selección de una capa protectora en contra del desgaste es un paso importante en el proceso de diseño de materiales. Un sustrato Nitruado en recubrimientos mejora las condiciones para adquirir



adherencia en las subsiguientes capas y una capa de Cr ayuda a distribuir los esfuerzos que se tienen en el recubrimiento final duro llamado DLC.

En un artículo publicado por Dumínica hizo un estudio en el que una capa de Cr entre el sustrato y el DLC, nos ayuda a incrementar la adherencia en el recubrimiento, es conocido que las capas intermetálicas o de enlace juegan un papel muy importante ya que influencia a mejorar la adherencia, de esta manera se distribuye homogéneamente el estrés de las capas DLC [12], ver la figura 13. Sin embargo, en este mismo estudio el autor colocó una capa extra de CrN entre la capa de Cr y a-C que sirviera de “amortiguador” pero no tuvo buenos resultados en el desempeño del producto. Así que las capas sugeridas por el autor son capa de Nitrurado, Cr y a-C.

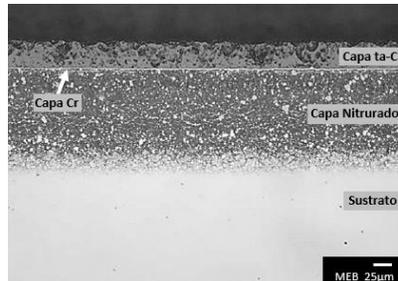


Figura 13, la micrografía se obtuvo con un Microscopio de Barrido de Electrones, se observa la capa de Nitrurado, Cr y a-C en un sustrato de acero inoxidable 304.

Autores tales como Ollendorf [11] mencionan que el ataque iónico entre otros factores la adherencia depende directamente del tiempo empleado para la limpieza iónica de la superficie (ataque iónico), haciendo experimentos que va de un tiempo de 0.5 hasta 15 minutos, este último tiempo es recomendado, los resultados mostrados de su trabajo indican que a medida que incrementa el tiempo de ataque iónico también se incrementa la adherencia del recubrimiento en el sustrato. Para el método de deposición PVD tenemos un tiempo de ataque iónico de 17 minutos, mientras que en el caso del método DLC se tiene un tiempo de 22 minutos. Heinke indica una limpieza iónica de 20 a 30 minutos [13].

4. Conclusiones

Una comparativa de adherencia entre un recubrimiento con sustrato Nitrurado y sin sustrato Nitrurado indica que se tiene mayor Carga crítica en la adherencia en muestras con tratamiento superficial previo, es decir en muestras con sustrato Nitrurado con recubrimiento del tipo PVD.

Para todas las muestras sin sustrato Nitrurado el estándar VDI-3198 indica que se tienen resultados aceptables de acuerdo con los criterios de adherencia, sin embargo, la Prueba de Rayado sirve de complemento para determinar de manera cuantitativa la carga crítica de la adherencia del recubrimiento en las muestras con sustrato sin Nitrurado.

Para la mejora de las propiedades de adherencia se utilizó un arreglo de capas gradual comenzando con el incremento en dureza del sustrato por medio de una capa de difusión de Nitrurado pasando de un valor de 2.5 a 12 GPa para posteriormente depositar la capa de enlace de Cr y finalmente DLC como recubrimiento final con una dureza de 38.98 GPa.

En la prueba de adherencia bajo el estándar VDI-3198, dada su naturaleza de resultados cualitativos, se deben de hacer comparativos bajo prácticamente las mismas dimensiones de capas ya que se pueden obtener diferentes resultados por causa de que alguna de las capas esté con dimensiones fuera de lo especificado.



Con relación a las pruebas de adherencia del comparativo prueba 3 y 4, los resultados de ambas pruebas no coinciden al hacer un comparativo entre la prueba VDI-3198 y la Prueba de Rayado ya que la capa de nitrurado de la muestra con recubrimiento por el método de PVD estaba 16.3 μm más alta que la prueba recubierta por el método DLC así que para este caso se estuvo validando la fragilidad del recubrimiento esto mismo indica el autor Vidakis [6] en donde indica que la prueba destructiva de adherencia exhibe rigurosamente dos propiedades distintivas de los componentes recubiertos, la adherencia interfacial y también la fragilidad de la capa. De esto se puede concluir que la profundidad de las capas juega un papel muy importante para obtener resultados comparables dentro de la prueba de adherencia VDI-3198.

Hablando de las pruebas 3 con el método DLC y la prueba 4 con el método de PVD, ambas pruebas para la deposición del recubrimiento de enlace de Cr en el sustrato tienen prácticamente las mismas Cargas críticas, pero haciendo una combinación de métodos: deposición de la capa de Cr por el método de PVD y la deposición de la capa a-C con el método de DLC, se tiene una mejora en la adherencia del orden de más de 163.4 N en comparación con el proceso original de la prueba 2 en el que se tiene una Carga crítica Lc2 de 135.6 N.

El ataque iónico el cual es uno de los pasos de los procesos del tipo PVD, a mayor tiempo, mejora las propiedades de adherencia del recubrimiento en el sustrato. Además, ciclos de ataque iónico de tres minutos con el método de PVD, configuración de los targets para tener una mejor densidad de átomos disponibles por unidad de área, mejora las propiedades de adherencia del recubrimiento en el sustrato.

La baja adherencia en un recubrimiento PVD/DLC depende también de las condiciones de limpieza previa con la que se trate el sustrato, cuidados en la manipulación y las condiciones del medio ambiente en la zona de trabajo.

Referencias

- [1] Donald, M. (2010). Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing. In D. M. Mattox. William Andrew.
- [2] Capote, G. (2011). Deposición De Películas Protectoras De DLC Sobre Superficies Metálicas Tratadas Térmicamente. *Revista de Colombia de Física*, 43(3).
- [3] Ohtake, N. (2021). Properties and Classification of Diamond-Like Carbon Films. *materials*, 14(2), 1 - 26. doi:10.3390/ma14020315
- [4] Andrés, D. (2018). Influencia de los parámetros de proceso en la estructura y propiedades tribológicas de los recubrimientos tipo DLC. *Facultad Regional Concepción del Uruguay*.
- [5] Vidakis, N. (2003). The VDI 3198 indentation test evaluation of a reliable qualitative control for layered compounds. *Materials Processing Technology*, 481 - 485. doi:10.1016/S0924-0136(03)00300-5
- [6] 1624-05, A. C. (2005). *Standard Test Method for Adhesion Strength and Mechanical Failure Modes of Ceramic Coatings by Quantitative Single Point Scratch Testing*. Pennsylvania, West Conshohocken, United States: ASTM International.
- [7] Kobelco. (2020, 08 03). *Kobelco Coating*. Retrieved from <https://kobelco-coating.com/en/>
- [8] Gerth, J. (2008). The influence of metallic interlayers on the adhesion of PVD TiN coatings on high-speed steel. *ELSEVIER*, 885 - 892. doi:10.1016/j.wear.2006.11.053
- [9] Norblast. (2018). *Norblast*. Retrieved from <https://norblast.it/en/>
- [10] Lan, R. (2019). Microstructural and tribological characterization of DLC coating by in-situ. *ELSEVIER*, 98(107473). doi:10.1016/j.diamond.2019.107473
- [11] Ollendorf, H. (1999). A comparative study of adhesion test methods for hard coatings. *ELSEVIER*(113), 82 - 102. doi:10.1016/S0257-8972(98)00827-5
- [12] Duminica, D. (2018). Investigation of Cr(N)/DLC multilayer coatings elaborated by PVD for high. *ELSEVIER*, 337(0257-8972), 396 - 403. doi:10.1016/j.surfcoat.2018.01.052
- [13] Heinke, W. (1995). Evaluation of PVD nitride coatings, using impact, scratch and Rockwell-C adhesion tests. *ELSEVIER*(270), 431-438. doi:10.1016/0040-6090(95)06934-8



- [14] Zaidi, H. (2006). Characterisation of DLC coating adherence by scratch testing. *ELSEVIER*(39), 124 - 128. doi:10.1016/j.triboint.2005.04.016
- [15] Almeida, L. (2020). Effect of nitrogen in the properties of diamond-like carbon (DLC) coating on Ti6Al4V substrate. *Materials Research Express*, 7(6). doi:10.1088/2053-1591/ab94fb
- [16] Ohtake, N. (2021). Properties and Classification of Diamond-Like Carbon Films. *Materials*, 14(315), 26. doi:https://doi.org/10.3390/ma14020315
- [17] Chen, C. (2005). Interfacial studies for improving the adhesion of diamond-like carbon films on steel. *ELSEVIER*(243), 296 - 303. doi:10.1016/j.apsusc.2004.09.085
- [18] Sanchez, D. (2021). Mechanical Study of a Chrome-Molybdenum Steel with Hard Coating. *Científica*, 25(1), 1-8. doi:10.46842/ipn.cien.v25n1a10
- [19] Andrew, W. (2010). *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*. Massachusetts, Burlington , USA: ELSEVIER. Retrieved from <https://books.google.com>
- [20] Dalibon, L. (2014). Comportamiento mecánico del acero AISI 316L recubierto con a:C-H-Si previamente nitrurado. *CONGRESO INTERNACIONAL DE METALURGIA Y MATERIALES SAM-CONAMET/IBEROMAT/MATERIA 2014*, 21 - 24.
- [21] Randall, X. (2019). The current state-of-the-art in scratch testing of coated systems, Surface & Coatings Technology. *Elsevier B.V.*, 380. doi:https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125092
- [22] Capote, G. (2014). Plasma Treatments for Metallic Surface. *IEEE Transactions on Plasma Science*. doi:10.1109/TPS.2014.2320854



Maquina Taponadora Semiautomática de Botellas PET

✉Alejandre Flores Marisol, Hernández Oliva Noemi, Soto Hernández Bruce y Zamacona Sánchez Daniel

Instituto Politécnico Nacional CECyT Miguel Bernard
✉alejandrefloresm@gmail.com

Resumen

En el presente artículo se plantea el diseño y construcción de una máquina taponadora semiautomática para botellas de polietileno tereftalato (PET), con el cual es posible disminuir el desgaste físico en las articulaciones de las manos de los operadores al realizar esta operación por periodos largos en el proceso de embotellado de agua natural de distribución local, para realizar esta tarea se propuso un sistema de control mediante un relevador inteligente programable Zelio Logic SR3B101BD, en conjunto con un sistema mecánico que ayudará en la regulación de la altura del tamaño de la botella. Una vez integrados ambos sistemas, se obtuvo la máquina taponadora semiautomática de botellas de PET con la cual se mejora el proceso de taponado de botellas de distribución en puntos de venta locales cuidando la integridad física del trabajador, mejorando los tiempos del proceso y la variación de altura de la botella que cuente con rosca, ya que el sistema se ajusta a su altura.

Palabras clave: Maquina taponadora semiautomática, sistema de control, relevador inteligente, Zelio Logic, sistema mecánico.

1. Introducción

El desarrollo tecnológico y la automatización de máquinas ha ido evolucionando a gran escala, actualmente ya sea por medio de una computadora, un celular o algún otro dispositivo eléctrico y/o electrónico es posible obtener un bien o servicio con tal solo ingresar una moneda, la automatización ha hecho posible facilitar la calidad debida y el bienestar de la sociedad, resolviendo problemas complejos dentro de la industria y sus procesos [1]. A lo largo de la historia de la automatización se han llevado a cabo modificaciones a diferentes sistemas dentro de la industria, los cuales ayudan a mejorar los procesos y el trabajo de las personas en las que se ven beneficiadas con menos desgaste físico provocando en procesos largos, por lo que se realizó un estudio de campo para hacer una selección de un proceso en el cual se observaran distintos problemas, desde los físicos hasta en el proceso mismo.

El proceso seleccionado fue el taponado de botellas polietileno tereftalato (PET) en establecimientos de venta de agua de sabores naturales en los cuales el proceso de embotellado de agua es de distribución local y de forma manual, en el cual se observaron problemas físicos en las personas que trabajaban en este tipo de establecimiento, dichas consecuencias físicas son desgaste en las articulaciones de las manos, rigidez, deformaciones y pérdida de la funcionalidad del movimiento de las extremidades, debido a que han realizado trabajos manuales repetitivos durante periodos prolongados. Además, dentro del proceso se observaron algunos problemas como tiempos muertos durante el proceso de taponado, debido a que la colocación de la tapa es de manera manual. Se realizó una investigación documental acerca de los sistemas de taponado desarrollados dentro de las instituciones educativas, para poder retomar algunas ideas y a partir de esos sistemas realizar el sistema de control que ayude a este tipo de establecimientos partiendo del proceso que ellos llevan y de forma económica.



Por ello se presentan a continuación el desarrollo de algunos trabajos relevantes, como es el caso de la Escuela Nacional Politécnica (ENP) que en el año 2013 creó una máquina de llenado y taponado de botellas de agua utilizando un Controlador Lógico Programable (PLC) de la marca Siemens; con el cual se realiza el control del proceso para accionar las electroválvulas que extienden los pistones que realizan el taponado de las botellas. En 2015 José Julián Muñoz Sánchez realizó la construcción de una máquina llenadora y tapadora lineal de botellas de PET semiautomática, en el que el proceso de tapado se determina por el tipo de tapón dado que en el proceso de tapado intervienen tres elementos que son: el posicionador, el dosificador de tapones, y el taponador propiamente dicho [2].

En 2016 la empresa Terrafertil S.A empezó a diseñar una taponadora específica para botellas de vinagre, para ello se instaló una cadena transportadora la cual lleva los envases desde la llenadora hacia la zona de tapado; la cadena está controlada por un variador de frecuencia, el cual ayuda a disminuir o aumentar el paso de los envases. Además, se instaló el sistema de sellado de tapas, que consta de un sistema de transmisión por cadena, para el movimiento de los rodillos de goma, este puede ser desplazado verticalmente para regular las presentaciones que se trabaja [3]. En 2017 los alumnos Giovanni Collay y Mauricio Luzuriaga de la Facultad de Mecánica Escuela de Ingeniería Industrial, reconstruyeron y automatizaron una máquina envasadora de agua en la corporación BIMARCH Cia. en la que el sistema de taponado funcionaba mediante la banda a un mecanismo encargado de posicionar la tapa, mientras la botella continúa a una sección de la máquina que culminara con el proceso, mediante movimiento giratorio y ejerciendo presión para un sellado total [4]. Por lo tanto, este tipo de sistemas de taponado y llenado controlados por medio de PLC's logran reducir el tiempo de taponado de un 36%, según Pérez [5]. Arana-Echeverría en 2010 publicó un informe donde propone un programa de ejercicios para artrosis de manos donde señala que existe una mayor prevalencia de este padecimiento en labores que exijan un intenso trabajo manual; por lo tanto, la problemática a resolver es el disminuir el desgaste físico que se genera debido a que el proceso de taponado de botellas aún se realiza de manera manual en este tipo de establecimientos [6].

Después de analizar este tipo de investigaciones se determinó diseñar y construir una máquina con la que se lleve a cabo el proceso de taponado de botellas PET, de manera semiautomática para disminuir el desgaste físico en las articulaciones de las manos de los trabajadores, implementando un sistema de control por medio de la programación de un relevador inteligente de la marca Zelio Logic SR3B101BD. Que permita reducir los tiempos en el proceso de taponado manual y generar mayores beneficios aplicando este tipo de tecnología en aplicaciones que hasta ahora continúan desarrollándose de forma manual.

El presente artículo está organizado de la siguiente forma, en la sección 2 se describe el diseño de la máquina taponadora semiautomática para botellas PET, también se presenta la propuesta de programación para el sistema de control por medio del relevador inteligente programable Zelio logic y la adaptación de un sistema mecánico para el enroscado de la tapa. En la sección 3, se presentan las pruebas realizadas con el relevador inteligente Zelio logic, además de la integración de los diferentes sistemas de la máquina. Finalmente, en la sección 4 se presentan las conclusiones del artículo y posibles opciones de mejora de la Máquina taponadora semiautomática para botellas PET.

2. Máquina taponadora semiautomática de botellas PET

2.1 Proceso de taponado

Una de las razones por las cuales al tener una máquina taponadora es debido a que el incremento de la demanda de agua embotellada en el mercado es cada vez mayor, por lo que la técnica del proceso de producción de agua debe mejorarse para reducir sus costos de producción. Mundo PMMI (2020) publicó un artículo acerca del incremento de ventas y los nuevos retos para el agua embotellada en México en el que referencia a un estudio llamado "Bottled Water in México 2019" para avalar que el volumen y el valor de las ventas de agua embotellada crecieron del 4% y 8%, alcanzando 5.1 millones de litros y 60,100 millones de pesos mexicanos. Lo cual comprueba que la industria del



agua embotellada tiene oportunidad de seguir creciendo por sus exigencias en el mercado. El proceso de taponado es una parte del proceso de embotellamiento, en el cual una vez que ya se tiene el envase lleno pasa a la etapa de taponado. En el proceso de taponado intervienen tres elementos, como se mencionó en la introducción, Para llevar a cabo el proceso de taponado, se necesita de una máquina tapadora, la cual es un conjunto de piezas ajustadas y sincronizadas para cumplir una función específica dando como resultado un trabajo que ayudará al operario a minimizar el esfuerzo físico y aumentando su productividad. El proceso de tapado vendrá determinado por el tipo de tapón; muchos factores son los que intervienen para la elección de una forma de tapado u otra. Hay tapones que se taponan a presión y hay tapones que van roscados.

2.2 Diseño de la Máquina taponadora semiautomática de botellas PET

La máquina está diseñada para realizar el proceso de taponado de forma más rápido y eficiente al proceso manual a través de un relevador inteligente programable, así se evita la interacción del hombre y evita los riesgos. El proyecto consiste en la construcción de una máquina para el proceso de taponado de botellas de PET, esta se conforma por una base donde se encuentra un tornillo sin fin de 50 cm que está controlado por un primer motor, este se encarga de ajustar la altura a través del relevador inteligente programable modelo Zelio Logic SR3B101BD. Un segundo motor de 12V se encarga de realizar el proceso de taponado, este siempre se encontrará controlado por el relevador. Y un tercer motor que está junto a la leva, la cual se encarga de retraer el cople que sujeta las tapas. La máquina está integrada por los siguientes elementos: una base de madera, en esta se quedará fijada la estructura de la máquina, un gabinete eléctrico que cuenta con un botón selector el cual controlará todo el funcionamiento de la máquina, un botón de arranque y un botón de paro. También en el gabinete se encuentran dos botones que se encargan del cambio de giro del motor para el ajuste de la altura de la botella de PET. La estructura que se encarga de la parte del taponado, un tornillo sin fin que regula la altura de las botellas y por último está el motor junto con el cople que se encarga del taponado. Finalmente están las lámparas indicadoras, las cuales sirven para indicar la etapa del proceso dependiendo del color que este encendido, rojo es el paro de la máquina, amarillo es para indicar el ajuste del tamaño y la verde indica el inicio del ciclo de taponado.

2.3 Características Técnicas de los elementos que integran a la maquina

Los elementos utilizados para la maquina taponadora semiautomática se enlistan en la Tabla 1, con las características técnicas más importantes.

Tabla 1. Elementos utilizados y sus principales características.

Nombre del Elemento	Imagen	Características Técnicas
Zelio Logic SR3B101BD		<ul style="list-style-type: none"> -Alimentación: 24 V CD -Intensidad de corriente: 100 mA (con extensión) y 100 mA (sin extensión) -Entradas digitales: 4 de 24 V CD -Entradas analógicas: 2 de 10 V CD -Salidas tipo relé: 4 de 24 V CD
Regulador de Voltaje		<ul style="list-style-type: none"> -Voltaje de entrada: 2 V CD a 35 V CD -Voltaje de salida: 2 V CD a 35 V CD -Intensidad de corriente de entrada: 1 A a 5 A -Intensidad de corriente máxima de salida: 1 A a 5 A

Continuación de Tabla 1. Elementos utilizados y sus principales características.

Nombre del Elemento	Imagen	Características Técnicas
Botón Pulsador		-Voltaje: 15-240V CA y 13-230 V CD -Intensidad de corriente: 0.4 A en CA y 0.5 en CD -Contactos normalmente abierto (NA) y normalmente cerrado (NC)
Botón Selector		-Voltaje: 15-240 V CA y 13-230 V CD -Intensidad de corriente: 0.4 A en CA y 0.5 en CD -Contactos normalmente abierto (NA) y normalmente cerrado (NC)
Lámpara Indicadora		-Voltaje: 127 V AC/DC -Intensidad de corriente máxima: mayor o igual a 20 mA
Relevador de Control 1 Polo 2 Tiros		-Voltaje: 120-250 V CA y 24 V CD -Intensidad de corriente: 7-10 A en CA y 10 A en DC
Fuente de Alimentación ABB		-Tensión de entrada: 127 V AC -Tensión de salida: 24 V DC -Intensidad de corriente de salida: 5 A
Motor reductor		-Voltaje: 24 V CD -Velocidad: 127 RPM -Ratio: 38.1 -Intensidad de Corriente: 500 mA
Motor reductor		-Voltaje: 12 V CD -Velocidad: 100 RPM -Ratio: 38.1 -Intensidad de Corriente: 500 mA



2.4 Diseño de la estructura

La estructura de la maquina taponadora está fabricada con perfil tipo tubular de acero inoxidable y el tablero de control eléctrico está dentro de un gabinete de plástico marca STECK modelo CNPJ seleccionado para que pueda soportar los cambios de temperatura y el agua con la que probablemente este en contacto. En la Figura 1 y 2 se muestran los planos diseñados con el software SolidWorks 2018 versión estudiantil, además del ensamble final de la maquina taponadora semiautomática de botellas de PET.

2.5 Diseño eléctrico de la Maquina taponadora

En la Figura 3 se muestra el diagrama pictórico de conexión en el Zelio Logic SR3B101BD hecho en el software CAde SIMU. Mientras que en la tabla 2 se muestran las entradas y salidas de los componentes utilizados para el control del relevador.

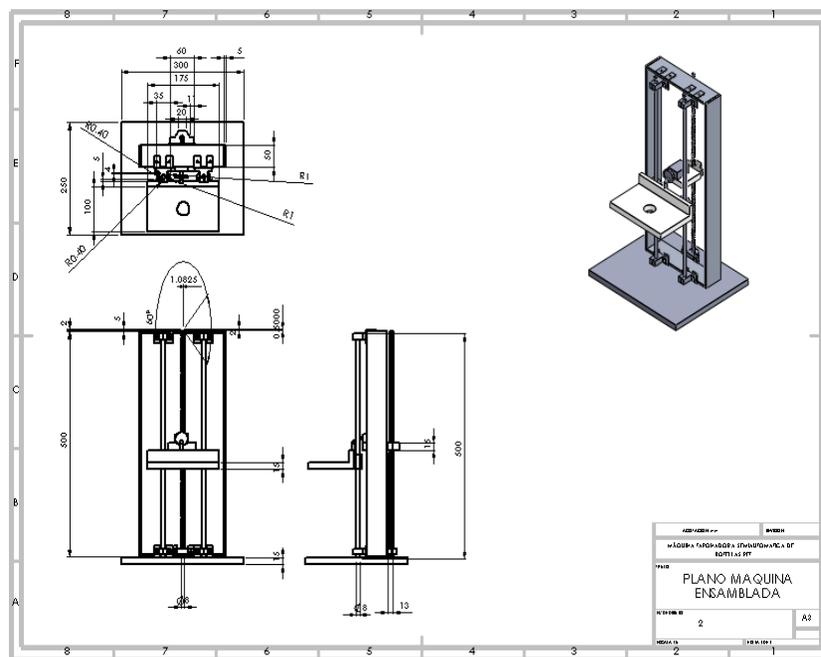


Figura 1. Planos realizados con el software Solidworks de la maquina taponadora.

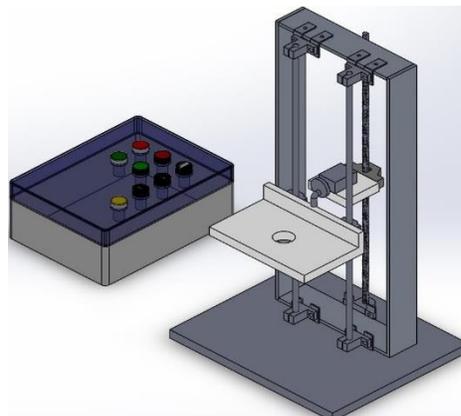


Figura 2. Ensamble de la maquina taponadora con el software Solidworks.

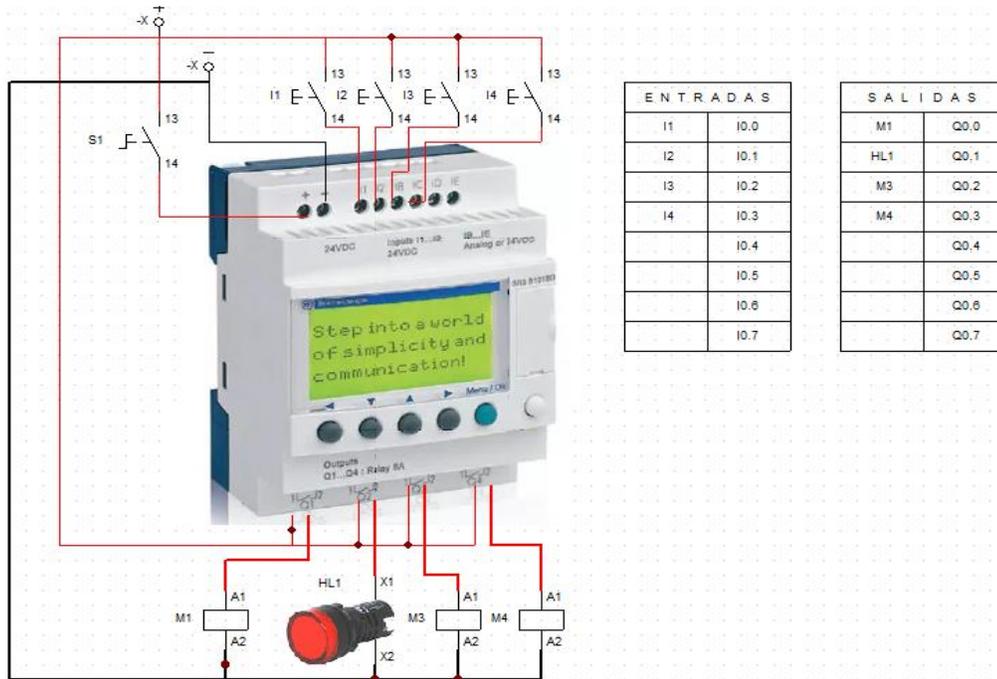


Figura 3. Diagrama pictórico de la conexión del relevador Zelio Logic SR3B101BD.

Tabla 2 Asignación de variables del relevador Zelio Logic SR3B101BD.

Etiqueta en el Zelio Logic SR3B101BD	Descripción
I1	Botón de Arranque
I2	Botón de Paro
I3	Giro 1
I4	Giro 2
M1	Relé Interno
M2	Relé Interno
M3	Relé Interno
Q1	Motor de la Leva y del Taponado
Q2	Lámpara Roja
Q3	Motor del Tornillo Giro 1
Q4	Motor del Tornillo Giro 2

El circuito eléctrico de la máquina está integrado por el relevador inteligente programable Zelio Logic SR3B101BD el cual se encarga del control del proceso, el cual funciona de la siguiente manera: el relevador de energiza después de accionar el S1 (botón selector) haciendo que HL3 (lámpara roja)



enciende lo que indicará el paro total de la máquina. Al accionar el S4 o el S5 (botón pulsador), el circuito comenzará a funcionar y dará la señal al relé interno del Zelio que permitirá que la HL2 (lámpara amarilla) encienda y al mismo tiempo enciende el motor que está unido al tornillo sin fin (Q3). Una vez que el tornillo gire y desplace la tuerca hasta la altura deseada accionan el S2 (botón de paro), se presiona S3 para que se accionen los motores que trabajarán de manera simultánea, uno que hará el roscado y el otro que hará que el motor suba y baje, todo esto para realizar el taponado (Q1). Al mismo tiempo se estará activando la HL1 (lámpara verde) como indicador del funcionamiento. Posterior a eso, se presiona S2 (botón de paro) para indicar el fin del proceso y los motores se desactivan. Si se desea modificar la altura de la botella se debe presionar S4 o S5 (botón pulsador) para el retroceso del tornillo sin fin. En la Figura 4 se aprecia la distribución donde muestran los elementos que conforman el gabinete de control para la máquina, así como su respectivo funcionamiento que debe llevar cada uno.

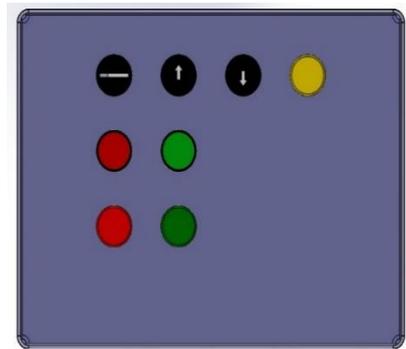


Figura 4. Distribución de accionamiento del gabinete de control.

De la Figura 4 se tiene la siguiente asignación de los dispositivos:

- S1.- Botón selector el cual tendrá el control absoluto de todo el proceso de taponado.
- S2.- Botón pulsador de paro de todo el proceso de taponado.
- S3.- Botón pulsador de arranque de la maquina
- S4.- Botón pulsador de cambio de giro (arriba)
- S5.- Botón pulsador de cambio de giro (abajo).
- HL1.- Lámpara de señalización de arranque del proceso de taponado.
- HL2.- Lámpara de señalización del retorno del tornillo sin fin.
- HL3.- Lámpara de señalización de paro de todo el proceso de taponado.

2.6 Diseño de la programación con el Zelio Logic

El control de la máquina fue programado utilizando el lenguaje de programación por medio de diagramas de escalera (Ladder en inglés), en la Figura 5 se muestra el diagrama de escalera correspondiente de la programación en el software Zelio Soft 2 el cual se encarga del control de los motores de la máquina.

2.7 Diagrama de flujo del proceso de taponado de la maquina

En la Figura 6 se puede observar el diagrama de flujo en el cual se describe el funcionamiento general del proceso de taponado realizado con la máquina diseñada, este considera una etapa de



decisión en la cual de no requerirse colocar la tapa a otra botella más este concluye con el proceso, de lo contrario se ejecutará de forma iterativa.

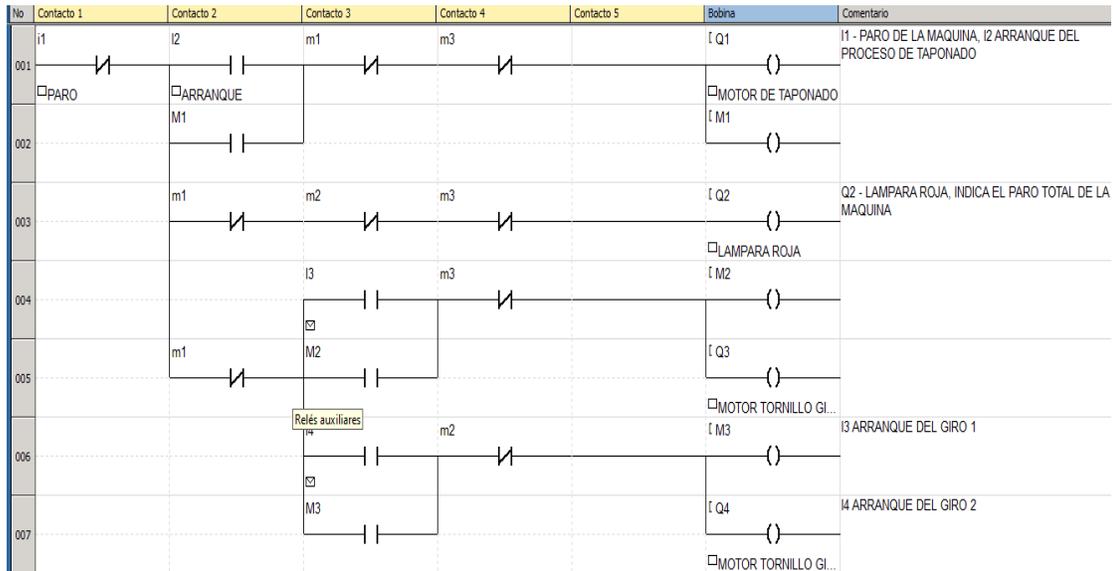


Figura 5. Programa del diagrama en escalera para los motores de la máquina de taponado.

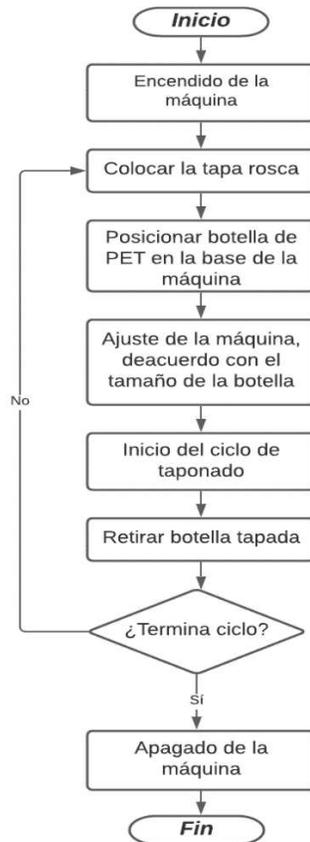


Figura 6. Diagrama de flujo para la operación de la maquina taponadora.



2.8 Ensamble de la Máquina taponadora semiautomática de botellas de PET

En la figura 7 se muestra el ensamble final de la máquina para el proceso de taponado de una botella que comprende el prototipo final desarrollado.



Figura 7. Estructura ensamblada junto al motor y el gabinete.

3. Pruebas realizadas a la Máquina taponadora semiautomática

Para validar y verificar que la máquina taponadora semiautomática de botellas de PET realizaba cada una de sus funciones de forma adecuada, se realizaron algunas pruebas a los diferentes elementos que la integran, los cuales son detallados a continuación:

3.1 Prueba de comunicación del Zelio Logic SR3B101BD a la computadora

Una de las primeras cuestiones que deben verificarse es buscar que la conexión entre el Zelio y la computadora se esté llevando a cabo de forma adecuada, es por eso que el objetivo de esta primera prueba está diseñada para la comunicación entre ambos dispositivos. Para ello se requiere del relevador Zelio Logic, una computadora, el disco de instalación de software Soft 2 y del cable de transferencia. Para su realización se conecta el Zelio a la computadora por medio del cable de transferencia, posteriormente se debe tener listo el programa a cargar realizado, después hay que situarse en las pestañas de transferencia y corroborar que el puerto al que se conectó coincida con el que aparece en pantalla y por último sin salirnos de la pestaña le damos en transferir programa del relevador a la PC. Al concluir esta se logró la conexión exitosa como se presenta en la Figura 8 como se lleva cabo la descarga de un programa de la PC al relevador.

3.2 Pruebas de funcionamiento con el Zelio Logic SR3B101BD

La siguiente prueba tiene como objetivo el comprobar el funcionamiento de las entradas y salidas del Zelio Logic SR3B101BD. Para ello se requiere de la fuente de alimentación de 24 V CD, una lámpara de señalización, un botón pulsador, cable de calibre 16 y el Zelio Logic SR3B101BD. Esta se lleva a cabo al alimentar el Zelio Logic SR3B101BD con la fuente de 24 V de corriente directa (CD), después se enciende el relevador, se va al menú y se busca el submenú de programa, se debe seleccionar en la opción “OK” con las teclas, después se corre el programa que ya estaba cargado en el Zelio. Posteriormente, se procede a alambrar la entrada I1 y la salida Q1 del Zelio, en la entrada se colocará un botón pulsador normalmente cerrado (NC) y en la salida se coloca la lámpara indicadora roja. Al



presionar el botón pulsador este se acciona y al instante la lámpara dejó de encender indicando que el paro del funcionamiento del sistema de prueba. Al concluir esta prueba se logró corroborar que las entradas y salidas del Zelio Logic SR3B101BD funcionan con un voltaje de alimentación de 24 V CD y con una intensidad de corriente de 2 Amperes. En la Figura 9 se puede apreciar la conexión física de cada uno de los dispositivos.

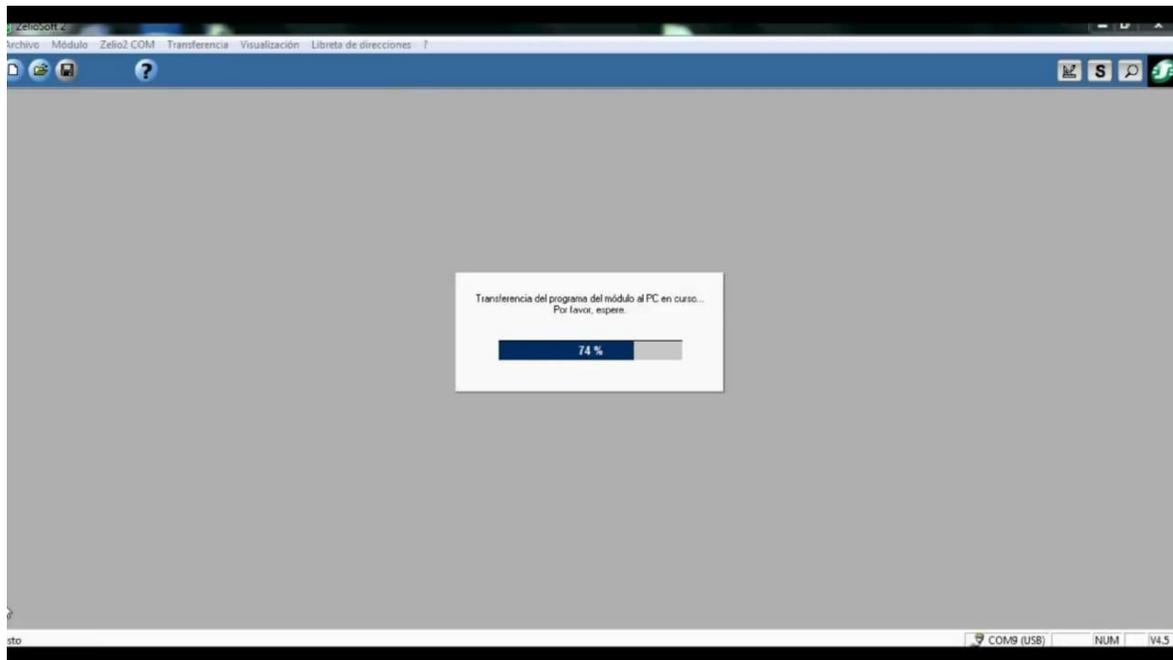


Figura 8. Comunicación entre el Zelio Logic SR3B101BD y la PC.

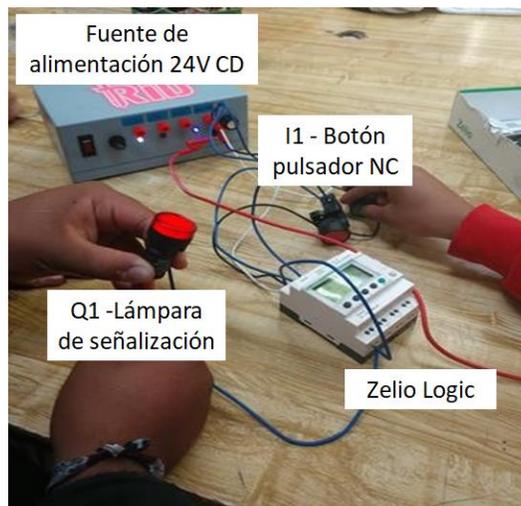


Figura 9. Conexión física del Zelio Logic SR3B101BD.

3.3 Pruebas de funcionamiento de los motores

En esta prueba se realiza la revisión del correcto funcionamiento de los motores, además de comprobar que la velocidad es regulada por medio de un potenciómetro. Para ello se utilizaron la fuente



de 24 V CD variable, el motor reductor, potenciómetro y cable calibre 14. Para su realización se conectó el potenciómetro a la fuente, del potenciómetro se manda a la bobina del motor, una vez que el motor comienza a girar es posible regular el voltaje, bajándolo y viendo cómo se reduce la velocidad. Los resultados obtenidos permitieron comprobar que al variar el voltaje de entrada de 12 V es posible regularlo una vez que este haya comenzado a funcionar, pero si no está alimentado con al menos un voltaje de alimentación de 12 V no es posible que el motor comience a funcionar. En la figura 10 se muestra la conexión física eléctrica del motor requerida para esta prueba.



Figura 10. Prueba de voltaje del motor mediante la variación del voltaje de entrada con un potenciómetro.

3.4 Prueba de funcionamiento del motor con el Zelio

Para esta prueba se requería verificar la comunicación del motor con el Zelio, además de comprobar si la intensidad de corriente es la adecuada. Para su realización se utilizaron una fuente de 24 V CD y una corriente máxima de 5A, la estructura de la máquina, el gabinete de instalación, los botones pulsadores, el Zelio Logic y cable calibre 18. Para ello se conectó primero la fuente de alimentación y se energizó el relevador inteligente Zelio que es el que tiene el control del circuito, al presionar el botón pulsador de arranque este mandará la señal al motor, una vez que el motor comience a girar junto con el tornillo este bajará una base que contiene al segundo motor, finalmente se presiona el botón de paro para que el motor deje de funcionar. Los resultados obtenidos de esta prueba permitieron verificar que el circuito funciona perfectamente con este valor máximo de corriente de 5 A sin que este valor se vea excedido en el arranque de los motores de la máquina, esto da mayor seguridad de que el circuito funcionando no requiere un valor mayor, debido que anteriormente se realizó la prueba con una fuente de menos amperaje presentando una limitante cuando la máquina se encontraba en operación por demandar una carga mayor. En la Figura 11 se muestra la conexión física requerida para esta prueba.

3.5 Prueba de cambio de giro del motor

En esta prueba se verificó que el motor pudiese invertir el sentido de giro a través de un puente H. Los elementos utilizados fueron una fuente 24 V CD, 2 relevadores de 24 V CD, cable de calibre 18, una tabla fenólica, motor de 24 V, cautín tipo lápiz, soldadura y botones pulsadores. Para esta el procedimiento a seguir se describe a continuación: se colocan los dos relevadores en la tabla fenólica, luego con el cable se soldan los comunes de ambos relevadores a la entrada y salida del motor. Después se puentean los contactos normalmente cerrados y se mandan a la parte negativa de la fuente. De igual manera se repite el mismo procedimiento con los contactos abiertos, solo que al final se mandan a la parte positiva de la fuente. Finalmente se manda la salida de cada bobina al negativo de la fuente y a la entrada está un botón pulsador que está conectado al positivo de la fuente. Una vez realizadas dichas conexiones los resultados obtenidos permitieron invertir el sentido de giro del motor mediante una configuración de puente H, con lo cual se asegura que se llevara a cabo de forma segura



y por consiguiente se evitara algún posible daño en el motor en el momento de la inversión del sentido de giro. En la Figura 12 se muestra el diseño en placa fenólica para este circuito externo de potencia y protección del motor.



Figura 11. Prueba del motor junto al relevador Zelio.

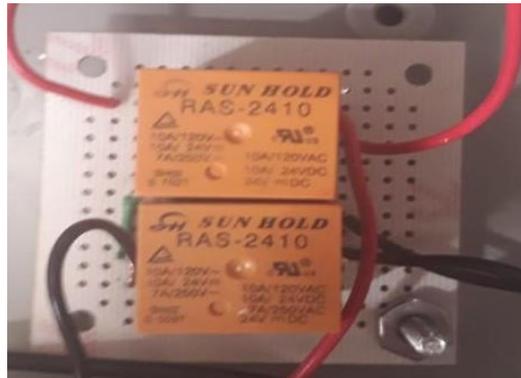


Figura 12. Placa fenólica con la conexión de Puente H para la inversión de giro del motor.

3.6 Prueba de validación

Una vez que se verificó que cada uno de los subsistemas que integran la máquina funcionaban adecuadamente, el siguiente paso era verificar el desempeño de la máquina diseñada, para lograr esto se procedió a su construcción final con el fin de que se lleve a cabo el proceso de taponado de botellas PET de manera semiautomática propuesto y así poder disminuir el desgaste físico en las articulaciones de las manos de los trabajadores. Para esta prueba se emplearon la fuente de 24 VCD, el gabinete eléctrico, el relevador Zelio Logic SR3B101BD y una botella de capacidad de un litro. El procedimiento que siguió consistió en conectar la fuente de alimentación, posteriormente se coloca la botella de un litro en el centro de la estructura, posteriormente se enciende todo el sistema con el botón selector, después se acciona un botón pulsador de arranque para iniciar la calibración de la altura de la botella seleccionada. Para detener el tornillo sin fin que se encarga de regular la altura se acciona el botón de paro general. Una vez que la altura es la indicada se proseguirá con la parte del taponado. Se accionará el botón de "start" para comenzar el proceso de taponado, mientras un motor se encarga del taponado el otro motor se encarga de subir y bajar el cople del taponado, para así poder colocar y retirar las botellas. Los resultados obtenidos se lograron cumplir con el objetivo general propuesto para este proyecto, dado que se obtuvo el diseño y construcción de una máquina que sirve para taponar una botella de PET, además que de igual forma se mostró que al implementar este tipo de prototipos es posible

reducir la interacción física en el proceso de taponado. En la figura 13 se muestra la prueba final de la máquina con una botella de 1 litro.

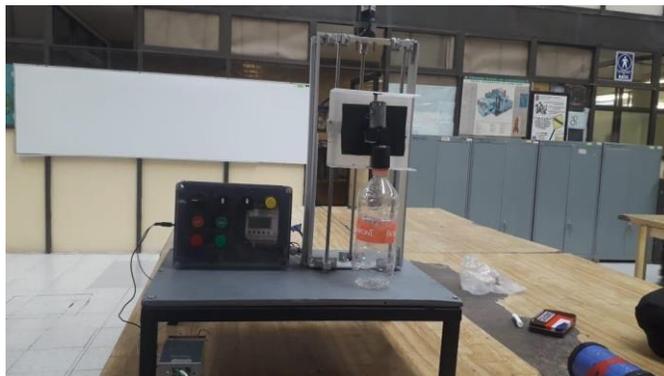


Figura 13. Prueba de validación del prototipo final.

4. Resultados

Como parte de la discusión final al concluir el desarrollo del proyecto se obtuvieron resultados importantes y de gran interés, dado que es posible realizar el diseño y construcción de una máquina taponadora semiautomática de botellas PET con un sistema de control que emplea un relevador inteligente programable Zelio Logic como controlador del sistema, el cual puede ser programado por medio de lenguaje de escalera (Ladder) y adaptarle un sistema de motores con los cuales se realizara la inversión de giro utilizando un puente H, además de la reconfiguración en el ajuste del tamaño de la botella PET a taponar, mediante la implementación de un sistema de una leva. Otro detalle de interés es que este diseño y construcción permitió facilitar el trabajo de las personas y disminuir el desgaste de las articulaciones cuando el proceso se realiza de forma manual, aportando también una reducción de tiempos muertos durante este proceso; dado que mientras que un solo operador realiza este proceso de forma manual y taponando alrededor de 45 botellas en una hora, después de cierto tiempo este número se reduce considerablemente debido al cansancio que genera el procedimiento por lo que este dato se vuelve inconsistente.

Dadas estas condiciones obtenidas a partir de encuestas aplicadas por los alumnos participantes en el proyecto, por lo que con esta máquina el proceso puede realizarse de forma continua y taponando una mayor cantidad de botellas de PET, en este caso se realizaron varias diversas pruebas arrojando un rango de 80 a 100 botellas de PET en una hora número obtenido de estos experimentos iniciales al prototipo siendo un factor clave que puede analizarse con mayor detalle más adelante la necesidad de la capacitación de los operadores de la máquina. Dado que este proyecto es derivado de una investigación en la que además de docentes se cuenta con la participación de alumnos, los cuales han permitido el desarrollo de competencias dentro del campo laboral y la solución de problemas implementando los conocimientos adquiridos durante su formación de técnicos en el Instituto Politécnico Nacional CECyT Miguel Bernard.

Sin embargo, si bien a lo largo de este proyecto se presentaron diversas dificultades, como lo presento el sistema acoplado de la leva que se desarrolló ya que tuvieron que realizarse algunas modificaciones hasta obtener la más adecuada con lo cual se logró el correcto taponado en la botella de PET, otra complicación que se tuvo se dio en la regulación del voltaje y de la corriente en el sistema mecánico ya que la corriente que proporcionaba la fuente no era la correcta ni la suficiente para la carga demandada por los elementos de trabajo y que provocó inicialmente que no funcionaran correctamente, por lo que se hizo un cálculo nuevamente de la demanda del consumo del circuito y se procedió al cambio de la fuente de alimentación por una con una capacidad de 5A de corriente directa.



5. Conclusiones

Finalmente, al concluir con el proyecto se obtuvo el diseño de una máquina taponadora semiautomática de botellas PET, la cual es posible utilizar en establecimientos de agua de sabores naturales, donde el proceso de taponado de las botellas aún se realice de manera manual. Además, con este tipo de soluciones al estar enfocadas en problemas específicos se puede modificar el proceso de forma manual a semiautomático, inclusive mejorando la salud de los operadores en sus articulaciones y reduciendo los tiempos muertos que se generan cuando es el mismo operador el que lo realiza.

Para el diseño y construcción de la máquina es posible emplear un relevador inteligente programable como lo es el de la marca Zelio Logic, ya que ofrece la ventaja de programarse como un PLC y tiene características similares, pero a un menor costo con lo cual es rentable la máquina, otra ventaja que tiene es que se programa en lenguaje de escalera haciéndolo universal y fácil de ajustar. Por otro lado, el sistema mecánico presentado para el ajuste de la altura de acuerdo con el tipo de botella, le dio una solución viable para el taponado de botellas de PET en establecimiento que no solo estén enfocadas en un solo tamaño.

Como trabajo a futuro se pretende desarrollar una mejora en la máquina taponadora con el fin de que el proceso se realice ahora de forma automática, así como un dispensador de tapas por gravedad. Además de incluir una interface hombre máquina (HMI) que permita el control de la máquina de forma visual, inclusive expandirla para el proceso de llenado de las botellas dentro de la misma célula de producción.

6. Agradecimientos

Se agradece al Instituto Politécnico Nacional a través de la Secretaría de Investigación y Posgrado por el apoyo otorgado para la realización de este trabajo mediante la aprobación del proyecto de investigación SIP-20200132, así como de los alumnos tesis Bolaños Aranda Emanuel, Cabañas Alfaro Luis David, Cancino Alcántara Armando, Flores Gil Juan Carlos y Pérez Terán Gabriel Alejandro quienes desarrollaron una parte muy importante en el proceso de construcción del prototipo.

Referencias

- [1] Setting the Standard for Automation. ISA. [Online]. <https://www.isa.org/about-isa/what-is-automation/>
- [2] Muñoz, J.J. (2015), *Construcción de máquina llenadora y tapadora lineal para botellas PET de 500cc semiautomática*. Trabajo de grado previo a la obtención del título de ingeniero en mecatrónica, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador.
- [3] Rojas, A.M. (2016), *Diseño y construcción de una tapadora semiautomática en serie para botellas de vinagre mediante discos giratorios de goma para la empresa terrafertil S.A.* Trabajo de grado previo a la obtención de título de ingeniería en mecatrónica, Universidad Técnica del Norte, Ibarra Ecuador.
- [4] Pérez, M.I. (2017), *Evaluación económica de inversión para la compra de un taponador automático en industria de bebidas*. Trabajo para la obtención del título de licenciado en economía, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas, Ciudad de México, México.
- [5] Velásquez Costa, José, & Gonzales Prado, Juber (2017). Prototipo automatizado para el llenado y tapado de botellas de plástico. *Industrial Data*, 20(1),125-130. [fecha de Consulta 24 de Enero de 2021]. ISSN: 1560-9146.
- [6] Arana-Echeverría Morales, J.L., Sánchez Cabeza, A., (2010, junio.) Bases científicas para el diseño de un programa de ejercicios para Artrosis de manos. <http://www.sernef-ejercicios.org/webprescriptor/bases/basesCientificasArtrosisMano.pdf>



Integración de un Esquema de Alarma y Detección para el Desbordamiento de Canales con la Red Sigfox

Galindos Granados Ma. de los Ángeles, Alcalá Rodríguez Janeth A., Charre Ibarra Saida M., Gudiño Lau Jorge y Durán Fonseca Miguel A.

Universidad de Colima-Facultad de Ingeniería Electromecánica
Carretera Manzanillo B-Barra de Navidad km 20
Manzanillo, Col., México
janethalcala@ucol.mx

Resumen

En este trabajo se propone la integración de un esquema de monitoreo y alerta para detectar el nivel de agua en un canal utilizando la red Sigfox. El esquema desarrollado determina el nivel de agua, el nivel de carga de la batería de alimentación y ubica la posición del sistema monitoreado a través de la geolocalización. Los datos leídos se envían a la nube utilizando la red Sigfox y se propone Microsoft Azure como la herramienta de enlace entre Sigfox y Node-RED, este último se emplea como una herramienta de programación basada en flujo para visualizar los datos monitoreados. La propuesta incluye un sistema de mensajería que crea una conexión a Twitter® como medio para enviar mensajes de alerta cuando se supera el umbral del nivel esperado. Para las pruebas experimentales se define un sistema escalado 1:100 con 20 cm de profundidad. El nivel mínimo de carga para la batería se define en 7 V. Los datos se monitorean y envían a la plataforma de visualización cada 10 segundos. Los resultados obtenidos validan la factibilidad de la propuesta abordada.

Palabras clave: Sistemas monitoreo de nivel de agua, Sigfox, Microsoft Azure, Node-RED.

1. Introducción

Las distintas condiciones hidrometeorológicas que afectan a México como lo son la temperatura, humedad, presión atmosférica, viento y precipitación, crean una vulnerabilidad que pone en peligro y riesgo a la población, por ello dentro del Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC) de México, se considera fundamental identificar peligros, disminuir los riesgos, establecer mecanismos de alerta y fortalecer la cultura de la prevención ante la presencia de desastres de origen natural o humano. Se consideran fenómenos hidrometeorológicos los eventos que son producto de la condensación o sublimación de vapor de agua atmosférica, como son los ciclones tropicales, lluvias torrenciales, inundaciones, nevadas, granizadas, mareas de tempestad e inversiones térmicas [1].

Colima mostrado en la figura 1, es uno de los estados de la república mexicana que son afectados constantemente por fenómenos hidrometeorológicos y que originan precipitaciones de lluvia, principalmente entre los meses de junio a noviembre, ocasionando que el nivel de agua en ríos y canales que atraviesan la ciudad aumenten su caudal rápidamente y provoquen inundaciones ante las lluvias que se presentan. Por lo que, debido a la presencia y aumento de estos fenómenos, las instituciones correspondientes en el estado buscan alertar a la población ante los posibles peligros con la mayor anticipación. Las acciones de monitoreo se desarrollan a través de un protocolo de verificación que se realiza evaluando de manera física los causes. Es decir, un vehículo con personal acude a verificar la capacidad en la que se encuentran los flujos de agua en ríos, arroyos, puentes y cruces; poniendo en peligro la vida del personal dedicado a esta tarea. Por lo que se busca desarrollar en el estado un esquema de monitoreo para identificar el nivel de agua principalmente en los canales que atraviesan la ciudad y



emitir una alerta a la sociedad cuando se alcanza el nivel máximo que puede ocasionar desbordamientos.

En la actualidad gracias al avance de la tecnología es posible desarrollar mecanismos de alerta temprana que permitan la detección, monitoreo y generación de alarmas ante estos fenómenos utilizando medios inalámbricos para la detección y transmitiendo la información mediante aplicaciones móviles (mensajes de texto, llamadas telefónicas, entre otros) o sistemas acústicos (sirenas y megáfonos) [5]-[6]. La alerta temprana como una medida de prevención y para el manejo del desastre contempla cuatro elementos que se pueden agrupar de la siguiente forma: 1) conocimiento del riesgo, 2) el monitoreo, 3) la comunicación o difusión de la alerta y 4) la capacidad de respuesta [6]-[9]. No obstante, a la fecha la problemática para los sistemas de monitoreo y alerta está aún abierta y en muchos casos requiere adecuar las condiciones de la propuesta a la localidad en donde sea deseado implementar [10].



Figura 1. Localización del estado de Colima.

En este mismo sentido, la masificación de las tecnologías basadas en el internet de las cosas o IoT (por sus siglas en inglés *Internet of Things*) ha incrementado las posibilidades de ofrecer soluciones que permitan resolver la monitorización y vigilancia de la calidad del agua, de los caudales, así como la distribución de agua por canales [11]. Además, en la literatura se identifica que entre las redes de comunicación más utilizadas para la ejecución de estos proyectos se encuentran: Sigfox, LoRa, NB IoT, WiFi, BLE y ZigBee [12]-[13]. De estas tecnologías, la tecnología Sigfox se proyecta como una de las de mayor crecimiento [14]-[16]. Sigfox es una tecnología de red de área amplia de baja potencia (LPWAN por sus siglas en inglés *Low Power Wide Area Network*) especialmente diseñada para IoT y que ofrece una solución de comunicaciones basada en software, en donde toda la complejidad informática y de red se gestiona en la nube, en lugar de en los dispositivos [17].

A partir de la revisión del estado del arte se identifica que los sistemas usados en la actualidad en conjunto con los estudios de las zonas geográficas pueden ayudar a prevenir de manera significativa los desastres ocasionados por los fenómenos hidrometeorológicos, salvaguardando la vida de muchas personas. Por lo que en este trabajo se propone se propone la integración de un esquema de monitoreo y alerta para detectar el nivel de agua en un canal utilizando la red Sigfox.

A continuación, en la sección 2 se describe el sistema de monitoreo y alerta se introducen algunos conceptos clave para la operatividad de la tecnología abordada y la transmisión de datos. En la sección 3 se describen los procesos de enlace y protocolos entre los diferentes dispositivos y tecnologías que se utilizan como lo son Sigfox, Node-RED, Microsoft Azure y Twitter® y se muestran los resultados de monitoreo obtenidos.

2.

3. Sistema de monitoreo y alerta

En la figura 2 se muestra el diagrama general de la propuesta desarrollada, las etapas desarrolladas se describen en las siguientes secciones haciendo referencias a los numerales 1 a 9 mostrados en la figura.



Figura 2. Diagrama del esquema propuesto para el sistema de monitoreo y alerta.

3.1 Monitoreo

El sistema de posicionamiento global conocido como GPS (por sus siglas en inglés *Global Positioning System*) es un sistema de ubicación geográfica basado en tecnología satelital. La técnica fundamental del GPS es medir la distancia entre el receptor y algunos satélites que tengan visión directa a éste. La posición de los satélites se transmite al usuario y es a través de las posiciones conocidas y medidas que la posición del receptor puede ser determinada [18]. En la propuesta presentada en este trabajo, como se muestra en la figura 2 (numerales 1 y 2) se propone utilizar un GPS para determinar la posición de la señal monitoreada, para tal propósito se selecciona el módulo GPS NEO-6M.

El módulo NEO-6M GPS utiliza la comunicación de transmisión-recepción asíncrona universal USART (por sus siglas en inglés *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*) para comunicarse con la etapa de recepción de posición (tarjeta embebida ATMEGA-328 Sigfox RCZ2, numeral 3). El receptor de posición recibe información como: latitud, longitud, altitud, hora UTC (por sus siglas en inglés *Universal Time Coordinated*), entre otros datos de interés. La frecuencia máxima medida por el módulo receptor NEO-6M GPS es de 5 Hz. La precisión de posición es de 2.5 m, con una velocidad 0.1 m/s y en orientación de 0.5 ° eléctricos. en la tabla 1 se muestra sus principales características técnicas y físicas.

Tabla 1. Datos técnicos del GPS NEO-6M de antena cerámica con memoria EEPROM.



Característica	Valor
Alimentación	+3.5 – 5.5 V en CD
Interfaz	Serial UART
Frecuencia de actualización	5 Hz
Batería de respaldo	MS621FE
Soporta SBAS	WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN
Baud rate	9600 bps

Para determinar el nivel de agua se utiliza el sensor de nivel ultrasónico HC-SR-04 (numeral 4, figura 2). Este sensor tiene un transmisor, un receptor y un circuito de control. Para el banco de pruebas se utiliza un sistema en condiciones controladas en las que se define un nivel de profundidad escalado (1:100), en el que el nivel del agua puede variar en un rango de 0 a 20 cm. El sensor se orienta hacia abajo como se muestra en la figura 3. Para que el sensor ultrasónico envíe los datos es necesario activarlo con un impulso de disparo y se debe enviar un pulso de 10 μ s en el pin *trigger* para activar la toma de lecturas, como se muestra en la figura 4. Posteriormente, el sensor envía una serie de 8 pulsos de 40 kHz y pone el pin *eco* en nivel alto. El pin *eco* permanecerá en este nivel hasta que se reciba el eco de los pulsos de 40 kHz, como se muestra en el diagrama de tiempos de la figura 4. La distancia del dato medido se calcula con la ecuación 1.

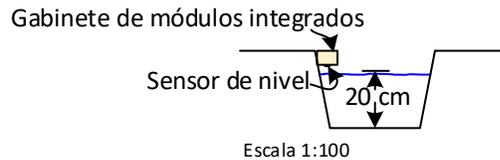


Figura 3. Ubicación propuesta para el sensor de nivel en el canal a monitorear.

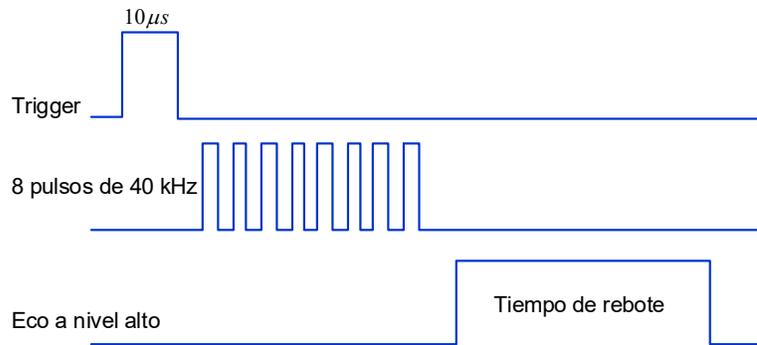


Figura 4. Diagrama de temporización del sensor ultrasónico.

$$\text{distancia}(cm) = \frac{\text{tiempo}(\mu s)(1cm)}{(2)(29.2\mu s)} = \frac{\text{tiempo}(\mu s)(1cm)}{58.4\mu s} \quad (1)$$

De acuerdo a las notas de especificación del fabricante, el sensor ultrasónico HC-SR04 puede medir en un rango que comprende de 2 cm - 400 cm con una resolución de 0.3 cm y su ángulo de



detección es de 30° eléctricos. En la tabla 2 se muestra las principales características técnicas y físicas del sensor ultrasónico y en la figura 5 se puede observar la orientación que se dio al sensor dentro del gabinete en el que se integran los elementos de los numerales 1 a 5 de la figura 2 para las pruebas controladas.

Tabla 2. Datos del módulo ultrasónico HC-SR04.

Característica	Valor
Alimentación	+4.5 – 5.5 V en CD
Frecuencia de trabajo	40 kHz
Consumo (en espera)	< 2mA
Consumo (operando)	15 mA
Ángulo efectivo	< 15°
Distancia*	2 cm a 400 cm
Rango mínimo	2 cm
Resolución	0.3 cm
Señal de disparo (<i>trigger</i>)	10 μ s en estado lógico alto
Señal de salida (eco)	Pulso en estado lógico alto, tiempo en μ s



Figura 5. Ubicación propuesta para el sensor de nivel en el gabinete de módulos integrados.

3.2 Sigfox

Sigfox (numeral 3, figura 2) con su tecnología LPWAN permite transportar datos desde donde se encuentre instalado hasta sus sistemas de TI (tecnología de información) para la visualización de datos mediante el uso de antenas instaladas en lugares estratégicos en un área determinada y recibe datos de dispositivos (sensores en parquímetros, sensores de temperatura, medidores de luz eléctrica, medidores de agua etc.). Los dispositivos utilizan frecuencias de banda ISM (bandas de frecuencia del espectro de uso libre Industrial, Científica y Médica) sin licencia; es decir, 920 MHz (Sur América) u 868 MHz (Europa). En el caso de Norte América que es a donde pertenece México maneja una frecuencia de 902 MHz, en la figura 6 se puede ver la clasificación de las configuraciones de radio o RC (*Radio Configurations*) destinadas para los países [19].

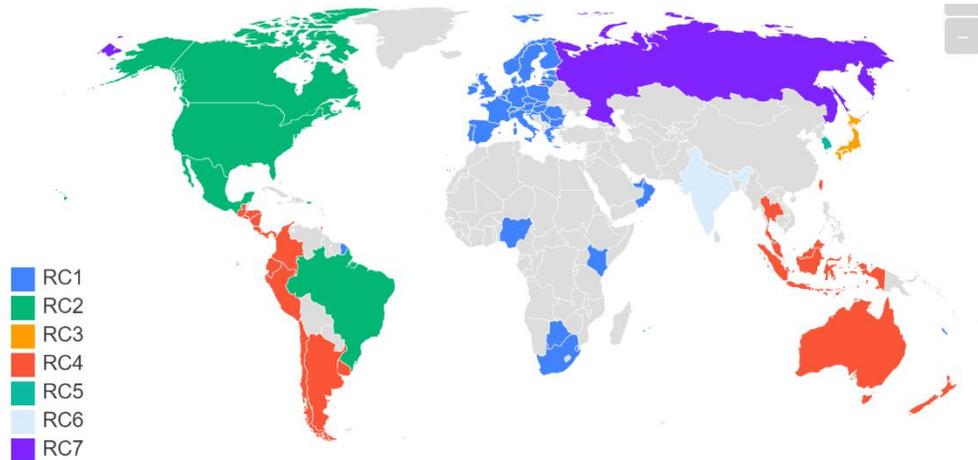


Figura 6. Regiones y radio configuraciones Sigfox [19].

Las tramas en Sigfox contienen un preámbulo de símbolos predefinidos utilizados para la sincronización en la transmisión. Los campos de sincronización de trama especifican los tipos de tramas que se transmiten. El FCS es una secuencia de verificación de trama (FCS por sus siglas en inglés *Frame Check Sequence*) utilizada para la detección de errores. Todas las puertas de enlace (antenas) envían todos los mensajes al servicio en la nube (*backend*) de Sigfox, estos mensajes son llamados *uplink*. Estos tienen su lugar en el campo llamado *payload* con un tamaño de 0 a 12 bytes hexadecimales. El *payload* contiene las variables que se monitorean. En la figura 7 se muestra la tarjeta de desarrollo ATMEGA-328 y módulo *uplink/downlink* Sigfox RCZ2 utilizado en esta propuesta. Esta tarjeta se alimenta con un voltaje nominal de 7.2 V a 12 V, tiene puerto ICSP, leds de estado y es compatible con el IDE de Arduino®. Dado que el nivel mínimo de alimentación para la operación de esta tarjeta es de 7.2 V, se toma este parámetro como referencia para determinar el nivel mínimo que debe tener la batería de alimentación y el umbral se fija en 7 V.



Figura 7. Tarjeta embebida ATMEGA-328 Sigfox RCZ2.

3.3 Node-RED



La plataforma Node-RED [20] proporciona un editor de flujo que facilita la conexión de flujos (numeral 7 y numeral 8, figura 2). Estos datos se envían a la nube y se muestra lo programado en una plataforma local, permitiendo de esta forma visualizar los datos recopilados por los flujos usando distintos nodos para lograr la conexión de las distintas variables usadas como se describe a continuación.

- *Location-Worldmap*: es posible crear instancias de múltiples nodos de mapamundi, pero cada uno debe tener una ruta única. En este nodo, se debe insertar la latitud-longitud para configurarlo.
- *Dashboard*: es el indicador de estado, gráficas.
- *Azure IOT Hub Receiver*: conecta el entorno visual de Node-RED con el servidor de Microsoft Azure.
- *Converter*: convierte el nodo *Msg.payload* en una cadena de caracteres.
- *Twitter out*: envía Tweets y mensajes directos a la plataforma Twitter@.
- *Function*: realiza funciones en código C.
- *Msg.payload*: muestra las propiedades de mensaje seleccionadas en la pestaña de la barra lateral de depuración.
- Backend de Sigfox: recibe los mensajes y los procesa para generar un resultado y en donde se pueden gestionar los dispositivos, visualizar los mensajes transmitidos por los mismos y configurar de integración de los datos. Además, el servicio da la oportunidad de poder redirigir todo el volumen de información que llega al *backend* a cualquier aplicación ejecutada en un servidor o centro de procesamiento de datos.
- API: la proporciona el *backend*, basada en HTTP REST (GET o POST, indistintamente); la cual, en función del recurso pedido, devuelve un resultado concreto.
- URL: se obtiene del *callback*.

4. Enlace Sigfox – Microsoft Azure – Node RED

A continuación, se describe el mecanismo que se utilizó para mostrar las lecturas de los datos medidos.

4.1 Enlace Sigfox – Microsoft Azure

El mecanismo de *callback de Sigfox* se realiza mediante una llamada HTTP a un cliente/servidor (propiedad del cliente) que puede ser del tipo *uplink*, es decir, únicamente recibe los datos o bidireccional, recibe los datos y responde limitándose a 12 mensajes por día. En este caso se usará el servidor Microsoft Azure [21] siguiendo los pasos de configuración que se muestran en la figura 8.

Al crear el evento, se debe encontrar el *Event-Hub* compatible con el *endpoint* del IoT Hub como lo muestra la figura 9. Una vez que se adquiere este dato (en el caso de esta prueba es la lectura del sensor de nivel) es necesario copiarlo en el nodo *Azure IOT Hub Receiver* como se muestra en la figura 10, de esta manera, Microsoft Azure funcionará como un punto de acceso entre Sigfox y Node-RED, compartiendo la información almacenada de Sigfox.



Device type 'SFX-DUINO' - Callbacks

Warning: SNR will be deprecated (see Newsletter for details). To monitor radio link quality, please use the Link Quality Indicator (LQ) which is more relevant than SNR in Sigfox network.

These callbacks transfer data received from the devices associated with this device type to your infrastructure. For more information, please refer to the "Callback documentation"

DATA callbacks (no downlink callback available)

Downlink	Enable	Channel	Subtype	Batch	Information	Edit	Errors	Delete
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	UPLINK	<input type="checkbox"/>	[POST]	https://Ultrasonic.azure-devices.net/devices/{device}/messages/events?api-version=2018-06-30			

Device type 'SFX-DUINO' - New Callback

- AWS Kinesis**
Amazon Kinesis is a platform for streaming data on AWS, offering powerful services to make it easy to load and analyze streaming data, and also providing the ability for you to build custom streaming data applications for specialized needs.
- Microsoft Azure™ Event hub**
Event Hubs is an event processing service that provides event and telemetry ingress to the cloud at massive scale, with low latency and high reliability. This service is especially useful for: application instrumentation, user experience or workflow processing, Internet of Things (IoT) scenarios.
- Microsoft Azure™ IoT hub**
Azure IoT Hub is a fully managed service that enables reliable and secure communications between millions of IoT devices and a solution back end. Azure IoT Hub enables secure communications using per-device security credentials and access control. Note that the devices are automatically created on the IoT hub if needed.
- IBM Watson™ IoT Platform**
IBM Watson™ IoT Platform provides powerful application access to IoT devices and data to help you rapidly compose analytics applications and mobile IoT apps. Note that the devices are automatically created on the IoT hub if needed.

Figura 8. Callback Sigfox.

Search (Ctrl+) Save Undo

Each IoT hub comes with built-in system endpoints to handle system and device messages.

Events

Events is the the default endpoint, and is used until custom routing rules are created.

Partitions 4

Event Hub-compatible name nodered-weu-rg

Event Hub-compatible endpoint `Endpoint=sb://iothub-ns-nodered-we-3400891-40f0b0fdce.servicebus.windows.net/SharedAccessKeyName=iothubowner;Shared...`

Retain for 1 Days

Consumer Groups

Figura 9. Punto de acceso Microsoft Azure.

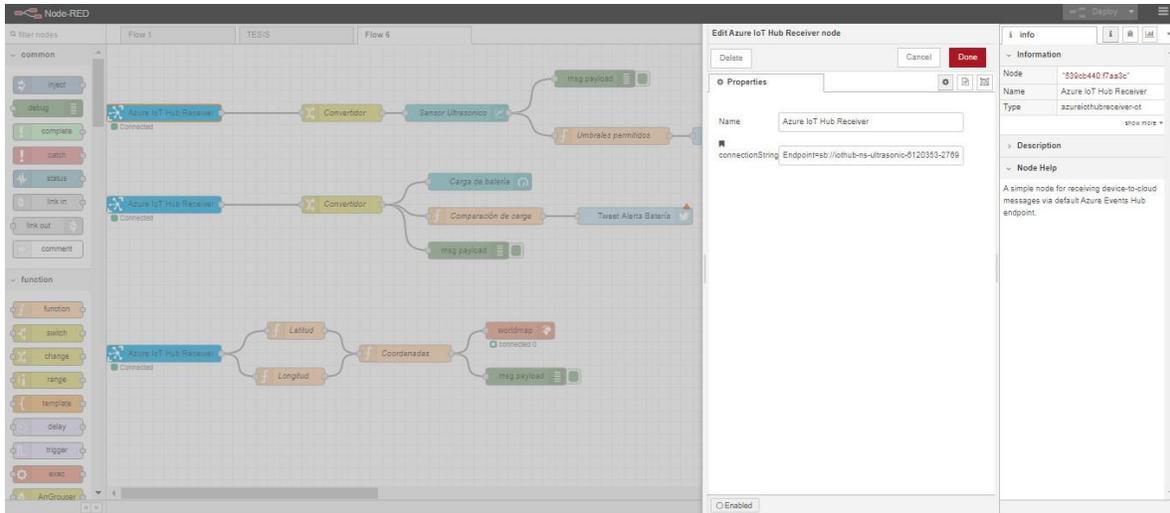


Figura 10. Configuración endpoint Node-RED.

4.2 Configuración Microsoft Azure en Node-RED

Mediante la API proporcionada por el entorno de Microsoft Azure se realizó la conexión de los nodos designados para establecer la conexión y extraer los datos del servidor de Microsoft Azure para las distintas variables requeridas (nivel de agua, nivel de carga de la batería y geolocalización). Para visualizar los datos en Node-RED (previamente publicados en Sigfox) es necesario usar el flujo que lleva como nombre *Azure IoT Hub Receiver*. Este nodo es el medio de conexión entre Microsoft Azure y Node-RED, ya que contiene la información de la tarjeta de desarrollo (SFXDUINO de Sigfox). En la primera rama de flujos se tiene el sensor de nivel de agua, la información recibida es procesada a través de un convertidor de lectura. El nivel de batería del sistema solo requiere el flujo de conexión y un medio de visualización (gráfica). Para el sensor GPS NEO-6M es necesario ejecutar dos funciones (latitud, longitud). Así se visualizarán las coordenadas en el formato requerido por la página. La programación de los flujos se muestra en la figura 11.

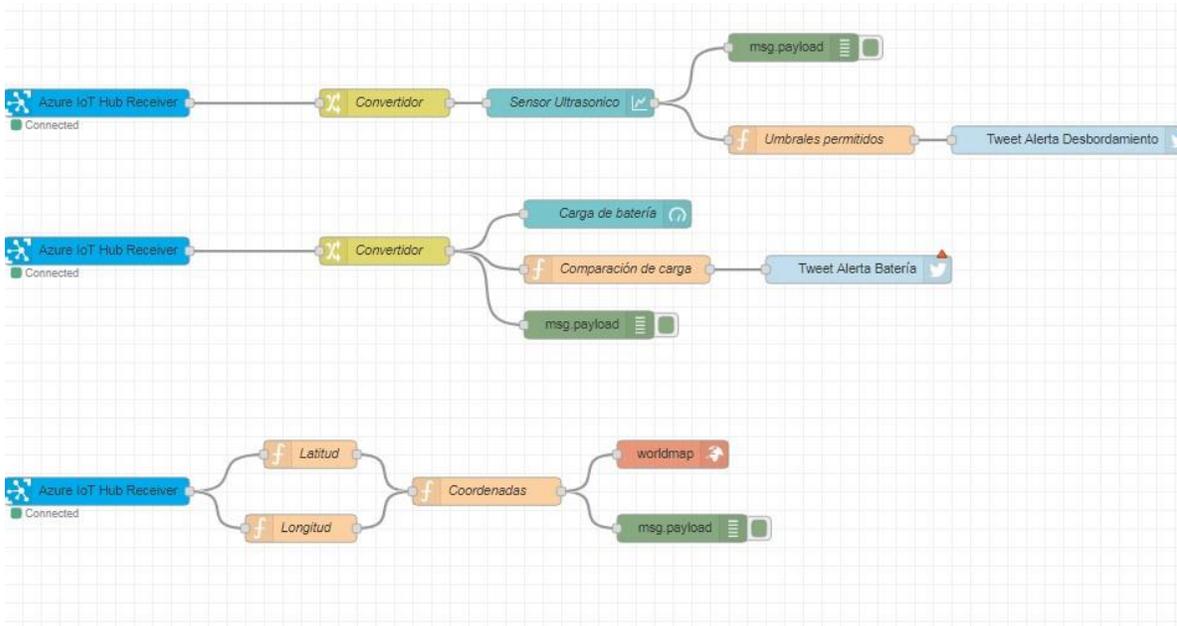


Figura 11. Configuración endpoint Node-RED.



4.3 Dashboard en Node-RED

El entorno visual de Node-RED permite observar de manera gráfica las variables monitoreadas, en la figura 12 se muestra el *dashboard* implementado para mostrar los datos medidos. Los datos se monitorean cada 10 segundos. En la parte superior izquierda se muestran las lecturas del sensor de nivel de agua. El indicador radial de la parte superior derecha muestra el estado de carga de la batería. La batería es de larga duración de Ion Litio de 12 V. Para obtener la lectura del nivel de tensión en la batería se utilizó un circuito divisor de voltaje que se acopla al módulo. En la parte inferior de la figura se muestra un mapa que muestra la ubicación del sistema monitoreado.

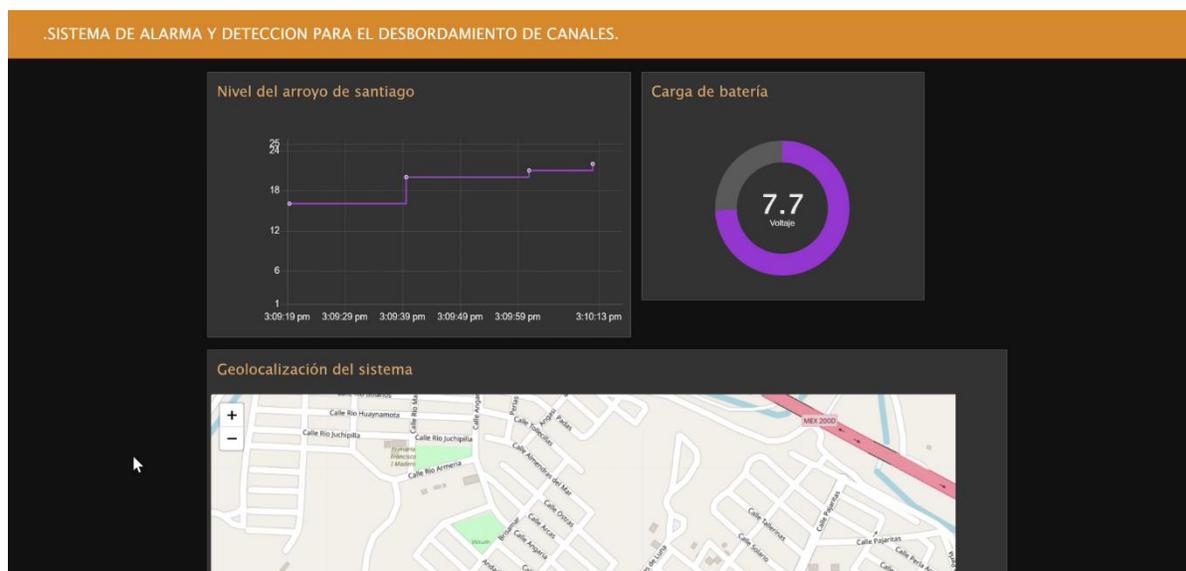


Figura 12. *Dashboard* en Node-RED para el sistema de alerta y detección.

Entre las sentencias utilizadas para la ubicación del GPS, la más usada es la \$GPRMC que sigue la siguiente estructura:

`$GPRMC,044235.000,A,4322.0289,N,00824.5210,W,0.39,65.46,020621,,,A*44`

- 044235.000 representa la hora GMT (04:42:35)
- “A” es la indicación de que el dato de posición se ha fijado y es correcto. “V” sería no válido.
- 4322.0289 representa la longitud (43° 22.0289’)
- N representa el Norte.
- 00824.5210 representa la latitud (8° 24.5210’)
- W representa el Oeste.
- 0.39 representa la velocidad en nudos.
- 65.46 representa la orientación en grados.
- 020615 representa la fecha (2 de junio del 2021)

Por lo que estos datos permiten visualizar la ubicación del sistema monitoreado gráficamente en Node-RED.

4.4 Envío de alerta Node-RED – Twitter®

La API de Twitter® [22] proporciona las herramientas que se necesitan para contribuir, interactuar y analizar la conversación que tiene lugar en Twitter® como se muestra en la figura 13. Para implementar el sistema de mensajería de alerta (numeral 9, figura 2) fue necesario crear una cuenta



como desarrollador. Node-RED requiere acceso a los *tokens* de Twitter® para identificar al usuario, por lo que fue necesario generar estos permisos como se muestra en la figura 14.

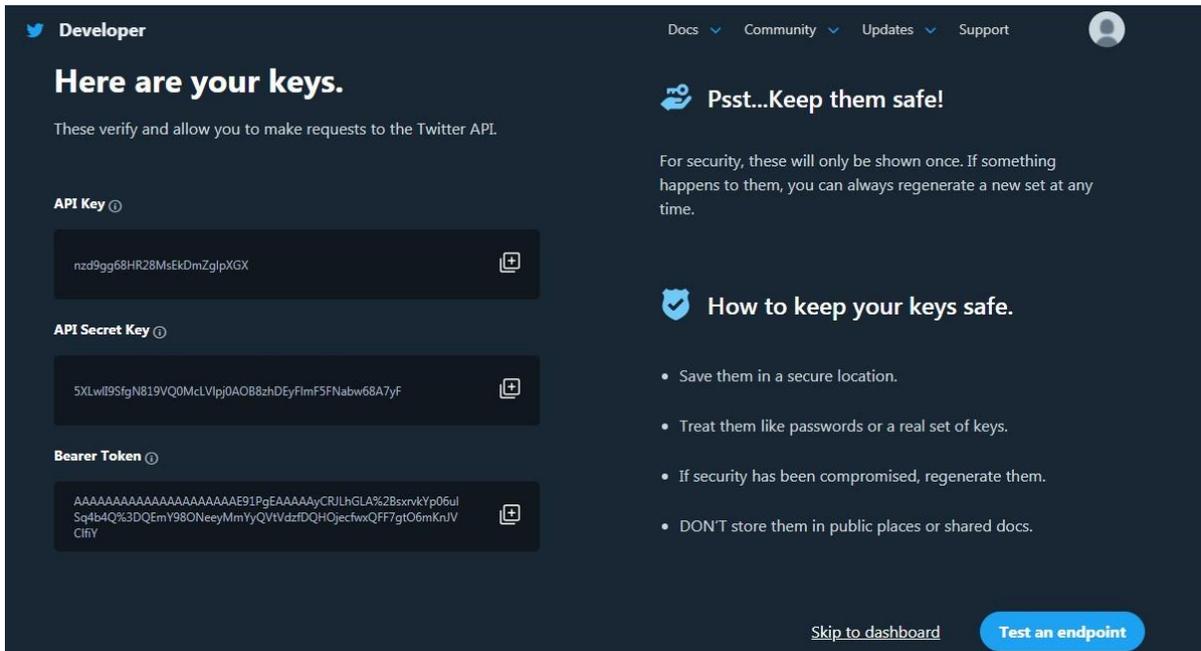


Figura 13. API-Key Twitter.

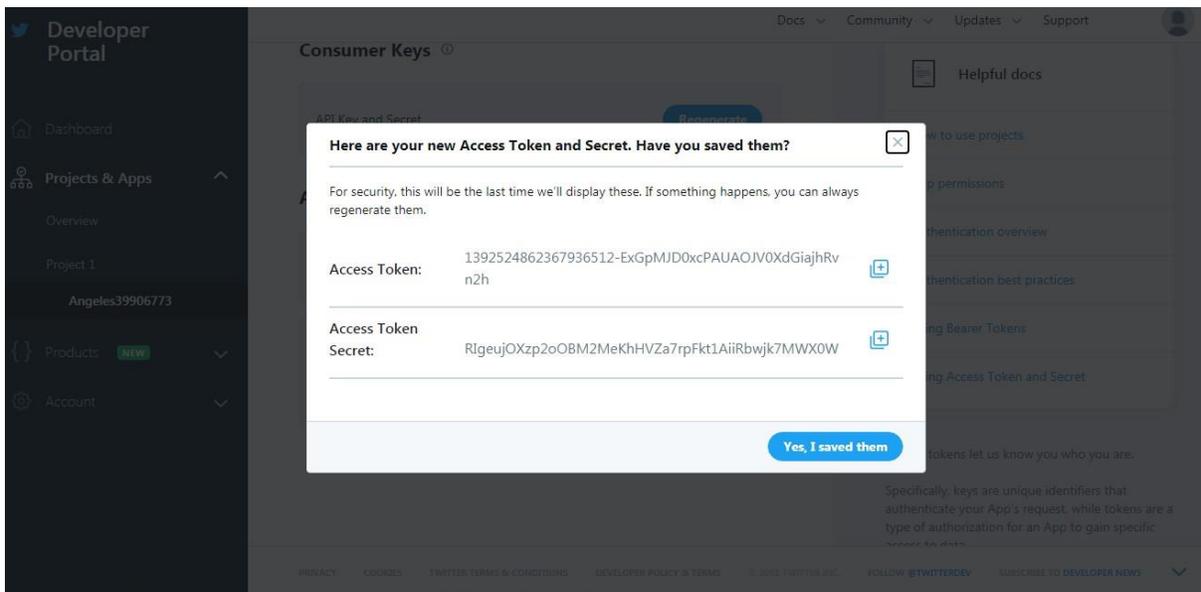


Figura 14. Token de acceso a Twitter®.

Los datos obtenidos de Twitter® se agregan al nodo *Twitter® out* en Node-RED y se configuran como se muestra en la figura 15.

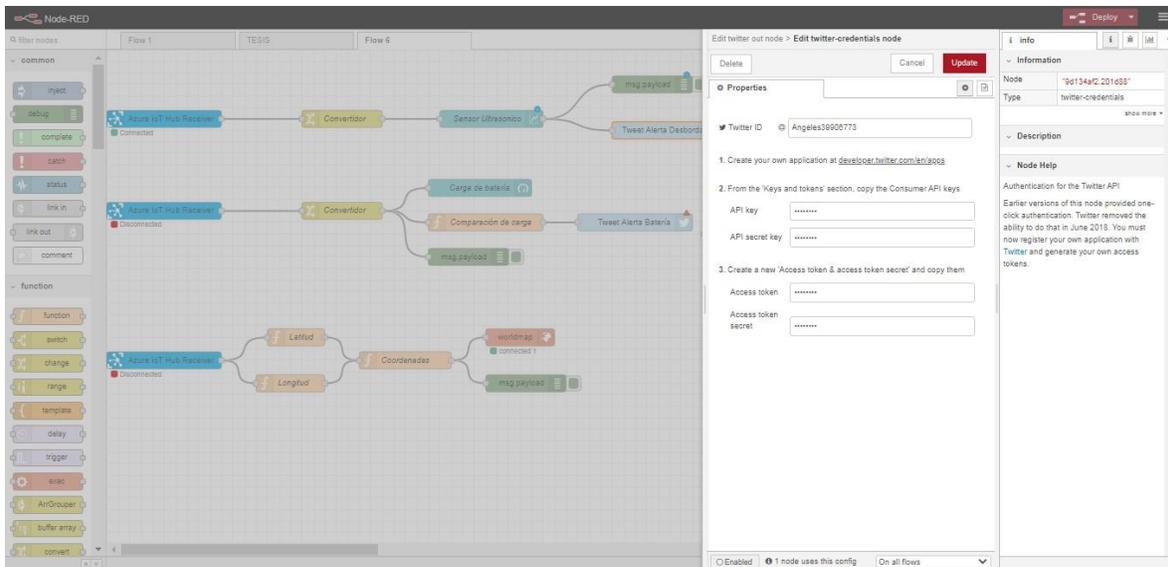


Figura 15. Configuración nodo **Twitter® out** Node-RED.

4.5 Validación de lecturas realizadas a través de Node-RED

El IDE de Arduino® es compatible con la plataforma de Sigfox y permite confirmar las lecturas de los datos mostrados en Node-RED desde la plataforma de Arduino®. En la figura 16 se muestran los datos enviados por el IDE de Arduino® a Node-RED para el nivel del agua y el nivel de la carga de la batería, estos datos son etiquetados para su identificación. Estos datos también se pueden verificar en el *backend* de Sigfox que muestra los datos recibidos como se puede observar en la figura 17.

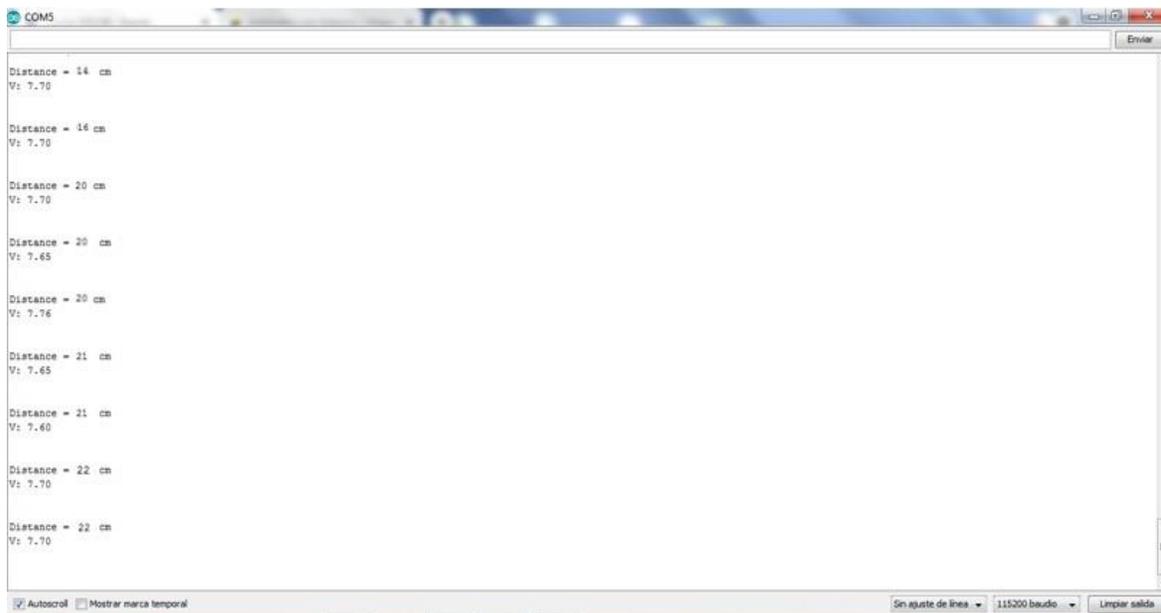


Figura 16. IDE Arduino®.



Time	Delay (s)	Seq Num	Data / Decoding	Base station reception attributes				Callbacks	Location
				Station	RSSI (dBm)	SNR (dB)	Freq (MHz)		
2021-05-09 00:44:05	<1	1007	22	7ED6	-129.00	17.00	902.1955		
2021-05-09 00:43:44	1.9	1006	21	7ED6	-127.00	11.00	902.1841		
2021-05-09 00:43:14	<1	1005	20	7ED6	-141.00	6.00	902.1811		
2021-05-09 00:39:34	<1	1004	20	7ED6	-135.00	12.00	902.1823		
2021-05-09 00:39:12	<1	1003	20	7ED6	-132.00	15.00	902.1847		
2021-05-09 00:39:04	1.2	1002	16	7ED6	-132.00	15.00	902.1876		
2021-05-09 00:35:02	1.5	1001	14	7ED6	-131.00	6.00	902.1973		

Figura 17. Base de datos generados por el backend en Sigfox.

Para evaluar la función de mensajería de alerta se sobrepaso el nivel de canal en 5%, es decir llevando el nivel de agua a 21 cm y se validó el envío del mensaje de alerta como se muestra en la figura 18, lo que permite validar en conjunto la operación global del sistema propuesto en este trabajo.

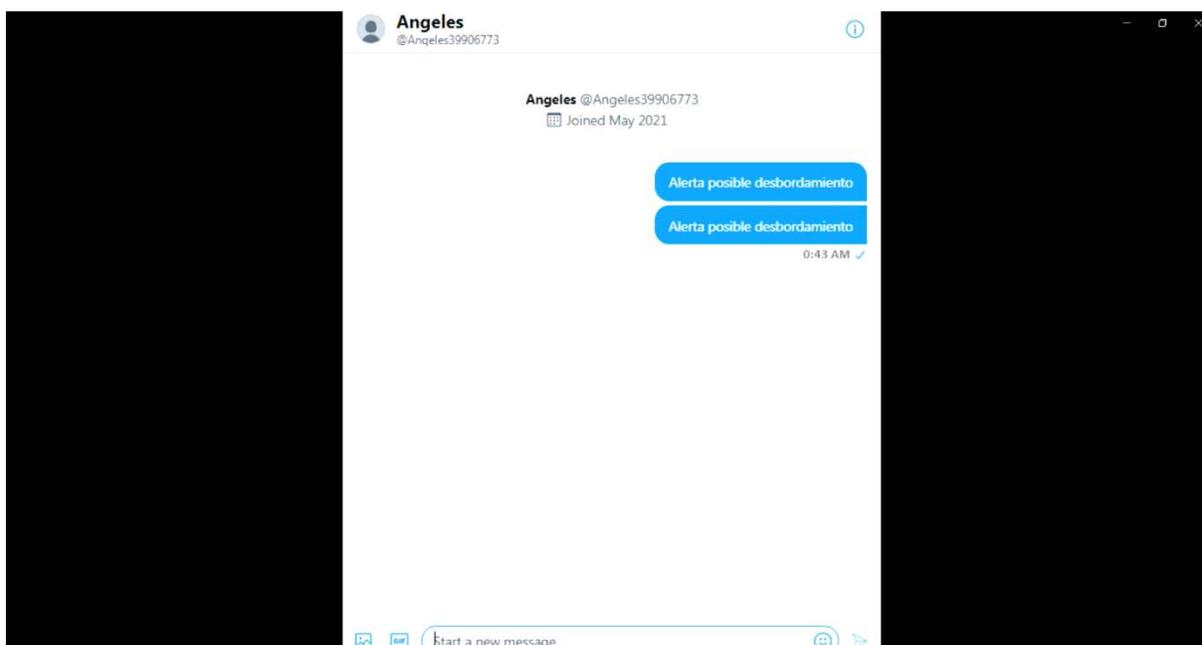


Figura 18. Envío de mensaje de alerta a través de Twitter®.



5. Conclusiones

En este trabajo se presentó un esquema integrado que permite monitorear el nivel de agua de un canal, ubicar su posición, monitorear el estado de carga de la batería de alimentación y enviar mensaje de alerta cuando se sobrepasa el nivel del umbral definido. Los resultados obtenidos muestran que la red Sigfox es una herramienta de utilidad que se puede aprovechar para desarrollar sistemas de monitoreo y alerta, no obstante, es importante considerar el radio de alcance para el envío de datos al utilizar esta red.

Referencias

- [1] Olín L., Méndez J., Adame S. *Acercamiento teórico y conceptual de la vulnerabilidad y los fenómenos hidrometeorológicos*. In: Impactos ambientales, gestión de recursos naturales y turismo en el desarrollo regional. Universidad Nacional Autónoma de México y Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional A.C, Coeditores, Ciudad de México. ISBN UNAM Volumen II: 978-607-30-2641-3 ISBN UNAM Obra completa: 978-607-30-2621-5 ISBN AMECIDER Volumen II: 978-607-8632-10-7 ISBN AMECIDER Obra completa: 978-607-8632-06-0, 309-324, 2019.
- [2] Portal interactivo gubernamental Agua. (2021, abril 26) [Online]. Available: <https://agua.org.mx/biblioteca/atlas-climatologico-de-ciclones-tropicales-en-mexico/>.
- [3] Portal interactivo gubernamental Agua. (2021, abril 17) [Online]. Available: <https://www.sct.gob.mx/planeacion/cartografia/productos-cartograficos/atlas-por-entidad-federativa/listado-de-atlas>.
- [4] Patiño-Barragán M., Meyer-Willerer A., Galicia Pérez, M., Lezama Cervantes C., Lara Chávez B. Zona de mayor afectación en el puerto de manzanillo colima México, por eventos hidrometeorológicos intensos y su periodicidad. *Boletín Técnico*, 47(1), 47-60, 2009. Recuperado en 28 de abril de 2021, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0376-723X2009000100003&lng=es&tlng=es.
- [5] Pernalet J., "Gestión de redes informáticas para el sistema de alerta temprana de inundaciones en el municipio Maracaibo", *Revista Electrónica de Estudios Telemáticos*. URBE, 16(1), 1-25, 2017.
- [6] Moreno D., Quiñones Bolaños E., Tovar L. *Los Sistemas de Alerta Temprana, SAT, una herramienta para la prevención de desastres por inundación y efectos del cambio climático*. Universidad de Cartagena, 2014.
- [7] Acosta M., Sistemas de Alerta Temprana (S.A.T) para la Reducción del Riesgo de Inundaciones Súbitas y Fenómenos Atmosféricos en el Área Metropolitana de Barranquilla. *Scientia Et Technica*, 18(2), 303-308, 2013. <https://doi.org/10.22517/23447214.8661>.
- [8] Dávila D., "Sistemas de alerta temprana ante inundaciones en América Latina", Soluciones prácticas, Perú, Primera edición, 2016. [Online]. Available: <http://repo.floodalliance.net/jspui/handle/44111/179>.
- [9] Singh M. K., Amin S. I., Imam S. A., Sachan V. K. and Choudhary A., "A Survey of Wireless Sensor Network and its types," *2018 International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICACCCN)*, 2018, pp. 326-330, doi: 10.1109/ICACCCN.2018.8748710.
- [10] Knight P., Bird C., Sinclair A., Higham J., and Plater A., "Testing an 'IoT' Tide Gauge Network for Coastal Monitoring," *IoT*, vol. 2, no. 1, pp. 17–32, Jan. 2021 [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.3390/iot2010002>.
- [11] Xu J., Yao J., Wang L., Ming Z., Wu K. and Chen L., "Narrowband Internet of Things: Evolutions, Technologies, and Open Issues," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 3, pp. 1449-1462, June 2018, doi: 10.1109/JIOT.2017.2783374.
- [12] Mekki K., Bajic E., Chaxel F. and Meyer F., "Overview of Cellular LPWAN Technologies for IoT Deployment: Sigfox, LoRaWAN, and NB-IoT," *2018 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, 2018, pp. 197-202, doi: 10.1109/PERCOMW.2018.8480255.
- [13] Mroue H., Nasser A., Hamrioui S., Parrein B., Motta-Cruz E. and Rouyer G., "MAC layer-based evaluation of IoT technologies: LoRa, SigFox and NB-IoT," *2018 IEEE Middle East and North Africa Communications Conference (MENACOMM)*, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/MENACOMM.2018.8371016.



- [14] Chaudhari B. S., Zennaro M., and Borkar S., “LPWAN Technologies: Emerging Application Characteristics, Requirements, and Design Considerations,” *Future Internet*, vol. 12, no. 3, p. 46, Mar. 2020 [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.3390/fi12030046>.
- [15] Singh R., Puluckul P., Berkvens R., and Weyn M., “Energy Consumption Analysis of LPWAN Technologies and Lifetime Estimation for IoT Application,” *Sensors*, vol. 20, no. 17, p. 4794, Aug. 2020 [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.3390/s20174794>.
- [16] Gomez C., Veras J. C., Vidal R., Casals L., and Paradells L., “A Sigfox Energy Consumption Model,” *Sensors*, vol. 19, no. 3, p. 681, Feb. 2019 [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.3390/s19030681>.
- [17] Pointl M. and Fuchs-Hanusch D., “Assessing the Potential of LPWAN Communication Technologies for Near Real-Time Leak Detection in Water Distribution Systems,” *Sensors*, vol. 21, no. 1, p. 293, Jan. 2021 [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.3390/s21010293>.
- [19] Sigfox build. Technical Topics Network services & information. “Radio configuration”, [Online]. Available: <https://build.sigfox.com/sigfox-radio-configurations-rc>.
- [20] Node-RED. “Low-code programming for event-driven applications”, [Online]. Available: <https://nodered.org/>
- [21] Microsoft Azure. “Uso del puente de dispositivos de IoT central para conectarse a otras nuves de IoT a IoT central”, [Online]. Available: <https://docs.microsoft.com/es-es/azure/iot-central/core/howto-build-iotc-device-bridge>.
- [22] Twitter Developer Platform. Twitter API. “Programmatically analyze, learn from and engage with the conversation on Twitter”, [Online]. Available: <https://developer.twitter.com/en/docs/twitter-api>.



Optimización de la Energía de un Robot Manipulador Serie-Paralelo a través de Evolución Diferencial

Ricardo Mejia Rodriguez¹, Miguel Gabriel Villarreal Cervantes¹ y Víctor Darío Cuervo Pinto²

¹Instituto Politécnico Nacional, CIDETEC, Laboratorio de Diseño Mecatrónico Óptimo, Ciudad México, 07700

²Instituto Politécnico Nacional, UPIITA, Ciudad México, 07340
e-mail: rmejia1800@alumno.ipn.mx, mvillarrealc@ipn.mx
vdcuervo@ipn.mx

Resumen

En el diseño de la mayoría de los mecanismos que forman parte de sistemas mecatrónicos se busca reducir su consumo de energía para lograr un desempeño eficiente. En este trabajo se propone minimizar la energía de un manipulador utilizando las ecuaciones de movimiento en forma cerrada con el fin de disminuir el par en sus actuadores para diversas velocidades de operación dentro del rango de operación y a diversas trayectorias dentro de su zona de trabajo. El método utilizado es a través de un problema de optimización resuelto por el algoritmo metaheurístico de evolución diferencial el cual manipula la forma de los eslabones del robot manipulador para encontrar una solución que satisfaga la minimización del par. Se encuentra que el par disminuye un 36.18% para velocidades de altas y un ahorro del 77.542% en estado estacionario en comparación con el diseño de un robot manipulador convencional.

Palabras Clave. Optimización de energía, optimización, manipulador híbrido, computación bioinspirada, Evolución Diferencial.

1. Introducción

Los robots manipuladores facilitan el trabajo que requieren esfuerzo, precisión y agilidad considerable especialmente en aquellos procesos difíciles o peligrosos para las personas. Sin embargo, el consumo energético de los sistemas electromecánicos es un punto muy importante a considerar en el momento de la elección de tales sistemas electromecánicos. La reducción de la energía por mínima que sea en las tareas desempeñadas, repetitivas, específicas o generales, reduce significativamente el consumo energético a lo largo de la vida útil del manipulador.

En la literatura se encuentran diversas técnicas para minimizar el consumo energético en los mecanismos, desarrollándolas para trayectorias específicas o controlando las velocidades de operación, como en [1], en donde se diseña un manipulador para disminuir el consumo de energía dentro de un espacio de trabajo preestablecido. También en [2] se propone reducir el consumo de energía en mecanismos que realizan tareas cíclicas. Sin embargo, ambas propuestas solo reducen la energía en condiciones específicas. En este trabajo se propone reducir la energía para diversas condiciones de operación: trayectorias y velocidades variables.

Por otra parte, la arquitectura de los manipuladores tiene un papel importante en el desempeño del mecanismo, la mayoría de los robots manipuladores en la industria tiene una arquitectura cinemática serial lo cual permite al robot tener un amplio espacio de trabajo, pero con alto error de posicionamiento y pobre rigidez, esto, si se compara contra las arquitecturas



cinemáticas paralelas. Las arquitecturas cinemáticas paralelas proveen a los robots manipuladores de alta rigidez y bajo error de posicionamiento, pero reducen su espacio de trabajo [3], [4]. Mundialmente se han combinado ambas arquitecturas cinemáticas para generar robots manipuladores con una arquitectura híbrida y son llamados robots manipuladores serie-paralelo [5]. En dicha arquitectura se incluyen los beneficios de ambas.

En [6] se promueve el concepto de diseño para el control donde se diseña el mecanismo del robot de tal manera que simplifique la complejidad del controlador, es decir, crear un sistema lo suficientemente estable para ser controlado por un controlador sencillo como el PD [7]. Se encontró que la redistribución de masas lograba dicho objetivo debido al balance encontrado entre sus eslabones. Así, se deja de lado, en esta parte de diseño, la etapa de control del manipulador y se enfoca en el diseño mecánico ya que al final beneficiará al control mismo.

En cuanto al diseño de sistemas mecatrónicos se han encontrado resultados satisfactorios mediante el planteamiento de un problema de optimización que englobe las restricciones inherentes al sistema y formulando una función objetivo que proporcione el beneficio buscado.

Los algoritmos metaheurísticos han demostrado obtener buenas soluciones en problemas de diseño donde se tiene un amplio espacio de búsqueda de las variables de diseño, así, el uso de algoritmos evolutivos ha mostrado buenos resultados en diferentes aplicaciones tales como en el diseño mecatrónico [8], [9], [10], sintonización óptima del control, [11], [12], [13], diseño de mecanismos [14], [15], entre otras. Dentro de los algoritmos evolutivos, el de Evolución Diferencial se desempeña bastante bien en el tratamiento de problemas de optimización con variables reales.

En este trabajo se propone minimizar la energía en un manipulador de arquitectura híbrida serie-paralelo, utilizando un problema de optimización que a su vez se resuelve mediante el algoritmo metaheurístico de Evolución Diferencial.

El enfoque de diseño propuesto contempla la totalidad del espacio de operación del manipulador y no se limita a utilizar trayectorias específicas a velocidades específicas como en otros enfoques de diseño. El presente enfoque de diseño aborda el tema de minimizar la energía consumida en los motores a través del tratamiento de su modelo dinámico y encontrando una redistribución de las masas de sus eslabones para generar un manipulador que reduzca el par en diversas situaciones de funcionamiento tales como diferentes posiciones a diferentes velocidades. Los resultados demuestran que el enfoque propuesto minimiza el par de los actuadores y así la energía consumida en comparación con un manipulador que no considera la redistribución de masa de sus eslabones.

2. Problema de optimización

En este trabajo se desea minimizar el consumo energético del robot manipulador mediante su dinámica en su forma cerrada, a continuación, se presentará el manipulador bajo estudio, la función objetivo y sus restricciones inherentes y, finalmente, el planteamiento formal del problema de optimización.

2.1 Manipulador serie-paralelo

El diagrama esquemático del robot manipulador serie-paralelo se muestra en la Figura 1. El sistema inercial se compone por las coordenadas $[\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}]$. El manipulador se compone de cuatro eslabones binarios Q_1, Q_2, Q_3 y Q_5 (con dos uniones articulares) ver Figura 3 y un ternario Q_4 (con tres uniones articulares) ver Figura 2. Cada eslabón $Q_i \forall i=1,2,3,4,5$ tiene su propio sistema



coordinado $[\tilde{x}_i, \tilde{y}_i]$, para describir la posición de su centro de masa. Los eslabones se describen mediante los parámetros $[l_{ci}, \gamma_i]$ que representan la distancia de la unión articular al centro de masa, y el ángulo formado del eje \tilde{x}_i del sistema coordinado del eslabón al vector de centro de masa de cada eslabón, respectivamente. Además, para cada eslabón se tiene información de su tensor de inercia I_i y su masa $m_i \forall i=1,2,3,4,5$. Se cuenta con tres motores $\hat{m}_\eta \forall \eta=1,2,3$. Por su parte el eslabón ternario Q_4 tiene parametrizada la posición de un motor \hat{m}_3 que le da movimiento al efector final y se encuentra dentro del eslabón ternario mediante las coordenadas $[x_{\hat{m}_3}, y_{\hat{m}_3}]$. Las longitudes de los eslabones son descritas por a_1, a_2, a_4 y a_5 ; y el par ejercido en las uniones articulares del manipulador se describe como $\tau_\eta \forall \eta=1,2,3$.

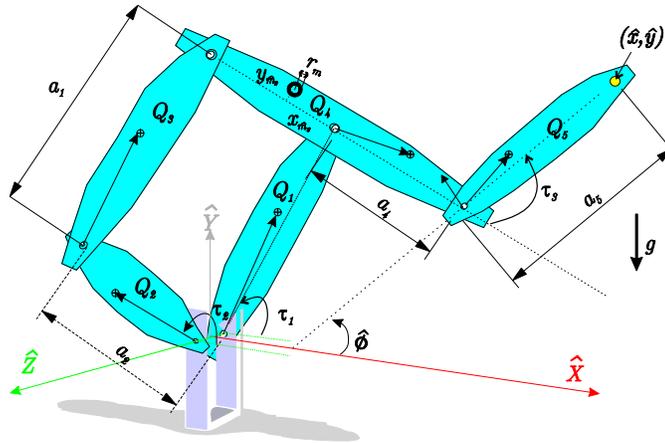


Figura 1. Diagrama esquemático del manipulador serie-paralelo con eslabones octagonales.

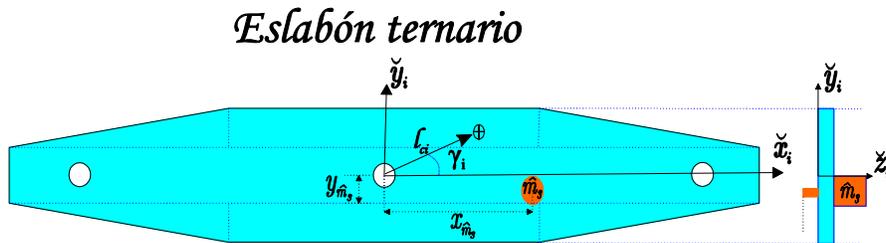


Figura 2. Eslabón ternario Q_4

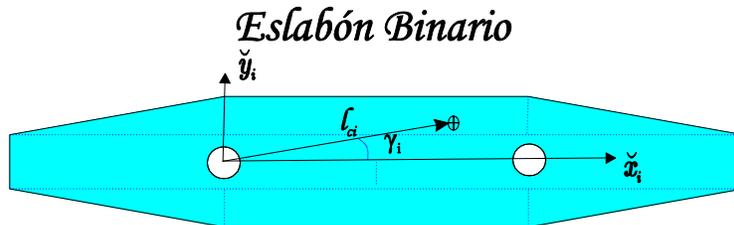


Figura 3. Eslabón binario Q_1, Q_2, Q_3 y Q_5



La dinámica del robot manipulador se obtiene a través de la ecuación de movimiento de Euler- Lagrange [16] descrita en (1), en donde L es el Lagrangiano.

$$\tau(t) = \frac{d}{dt} \frac{\partial L(q_n, \dot{q}_n)}{\partial \dot{q}_n} - \frac{\partial L(q_n, \dot{q}_n)}{\partial q_n} \quad (1)$$

El Lagrangiano L se define por la relación de la energía cinética y potencial [17] como se muestra en (2).

$$L(q_n, \dot{q}_n) = K(q_n, \dot{q}_n) - U(q_n) \quad (2)$$

Finalmente, al realizar las derivadas pertinentes en (2) y sustituir en (1) se encuentra la dinámica del manipulador compuesta por la matriz de masa $M(q_n)$, matriz de fuerza centrífuga y de Coriolis $C(q_n, \dot{q}_n)$, así como el vector de gravedad $G(q_n)$ como se muestra en (3).

$$\tau(t) = M(q_n)\ddot{q}_n + C(q_n, \dot{q}_n)q_n + G(q_n) \quad (3)$$

2.1 Función objetivo

La función objetivo es definida aquí en relación con la energía del robot manipulador. La forma de abordar la función objetivo en este trabajo es utilizando los términos independientes del tiempo de la dinámica en la ecuación (1). Las matrices $M(q_n)$ y $C(q_n, \dot{q}_n)$ así como el vector de gravedad, $G(q_n)$ se separan cada una en dos matrices auxiliares. La razón para descomponer cada matriz en dos es separar los términos independientes y dependientes del tiempo. Es así como la función objetivo se compone de las normas de Frobenius de las matrices auxiliares independientes del tiempo. Al minimizar estas matrices se minimiza el par ejercido por los motores en el robot manipulador y así, es posible encontrar los parámetros dinámicos tales como la masa, posición del centro de masa y tensor de inercia de los eslabones del robot manipulador. La separación de los términos de la dinámica en su forma cerrada de la ecuación (3) se muestra en (4).

$$\begin{aligned} M(q_n) &= M_{ind} M_{dep} \\ C(q_n, \dot{q}_n) &= C_{ind} C_{dep} \\ G(q_n) &= G_{ind} G_{dep} \end{aligned} \quad (4)$$

Así la función objetivo \check{J} contempla la norma de Frobenius como se describe en [18] de las matrices auxiliares, según se muestra en (5).

$$\check{J} = \|M_{ind}\|_F + \|C_{ind}\|_F + \|G_{ind}\|_F \quad (5)$$

2.2 Variables de diseño

El eslabón octagonal es un concepto planteado en [19], para la conformación de un eslabón en forma de polígono irregular o regular. En la Figura 4 se muestra la parametrización del eslabón binario (con dos articulaciones) y ternario (con tres articulaciones), que conforma el robot manipulador. A partir de esta parametrización el algoritmo optimizador puede buscar la configuración adecuada para reducir el par a la trayectoria y velocidad deseada.

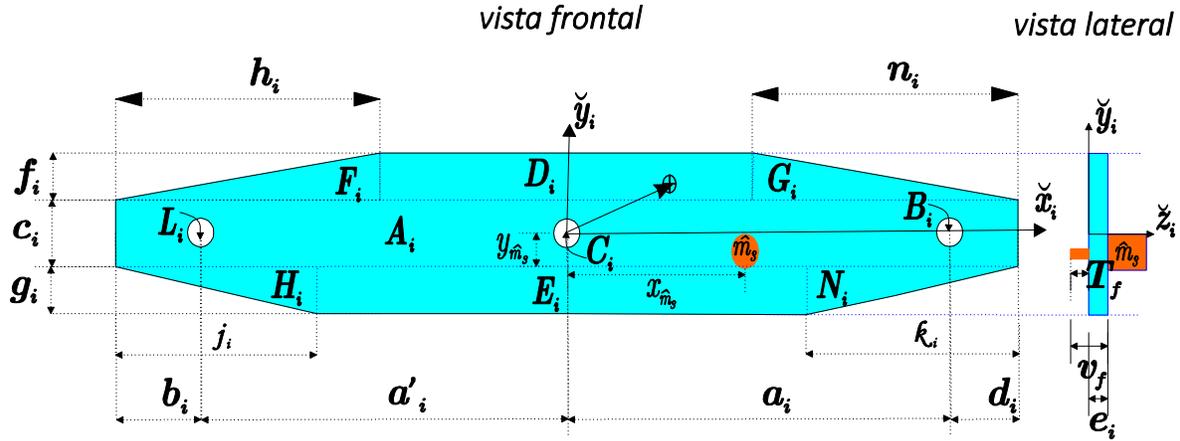


Figura 4. Parametrización del eslabón octagonal Q_i .

Los eslabones octagonales $Q_i \forall i = 1, \dots, 5$ se describen por medio de las formas geométricas de prismas rectangulares y triangulares descritas por las áreas $A_i, B_i, C_i, D_i, E_i, F_i, G_i, H_i, N_i$ y L_i , con $L_i \neq 0$ si $i = 4$. Además, para el eslabón ternario Q_4 que contiene en su área al motor \hat{m}_3 se contemplan dos variables $x_{\hat{m}_3}, y_{\hat{m}_3}$ correspondientes a las coordenadas del posicionamiento del motor \hat{m}_3 respecto al origen del sistema coordenado del eslabón ternario Q_4 .

Las variables de diseño de los cinco eslabones se agrupan para describir la configuración de cada eslabón octagonal en el vector de variables de diseño $\bar{\mathbf{p}}$, como se muestra (6).

$$\bar{\mathbf{p}} = [b_i, c_i, d_i, e_i, f_i, g_i, h_i, n_i, j_i, k_i, x_{\hat{m}_3}, y_{\hat{m}_3}] \quad (6)$$

$$\bar{\mathbf{p}} \in R^{52} \quad | \quad i = 1, \dots, 5$$

2.3 Restricciones

Las restricciones del problema de optimización se plantean en dos partes. La primera parte asegura que el eslabón tenga una forma octagonal regular o irregular cóncavo dentro de límites definidos y la segunda parte está enfocada en posicionar el motor \hat{m}_3 en un área permitida dentro del eslabón ternario.

Las primeras restricciones de los eslabones se implementan con el objetivo de generar prismas dentro de un límite de largo (w_{\max}), alto (h_{\max}) y ancho (e_{\max}). Para evitar exceder el ancho máximo propuesto $w_{\max} = 0.4$ m se crean las restricciones descritas en (7). Para el alto de los eslabones se implementan en las restricciones descritas en (8) donde el máximo propuesto es de $h_{\max} = 0.4$ m.

$$g_{1, \dots, 5}(\bar{\mathbf{p}}): a_i + b_i + d_i + a'_i - w_{\max} \leq 0 \quad (7)$$

$$g_{6, \dots, 10}(\bar{\mathbf{p}}): g_i + c_i + f_i - h_{\max} \leq 0 \quad (8)$$

Con el fin de garantizar la forma de un octágono cóncavo, es decir que se obtenga una forma sólida sin esquinas en forma de pico características de una forma convexa [20] para la base prismática de los eslabones se crean las restricciones descritas en (9) y (10).

$$g_{11,\dots,15}(\bar{\mathbf{p}}): -a_i - b_i - a'_i - d_i + h_i + n_i \leq 0 \quad (9)$$

$$g_{16,\dots,20}(\bar{\mathbf{p}}): -a_i - b_i - a'_i - d_i + j_i + k_i \leq 0 \quad (10)$$

2.3.1 Restricciones del posicionamiento del motor

El posicionamiento del motor \hat{m}_3 en un área permitida dentro del eslabón ternario se describe por medio de las coordenadas $[x_{\hat{m}_3}, y_{\hat{m}_3}]$. El eslabón ternario Q_4 y el área permitida para el posicionamiento del motor \hat{m}_3 se muestran en color verde en la Figura 5. Esto con el motivo de restringir el posicionamiento del motor en zonas donde pudiese interferir con alguna unión de eslabones y evitar que se posicione fuera del eslabón Q_4 . Como se puede observar en la figura 5, el área permitida restringe el posicionamiento hacia la articulación C_4 , el círculo del centro del eslabón, además impiden el posicionamiento horizontalmente hacia la articulación L_4 , debido a que allí existe una unión articular que impide el posicionamiento del motor.

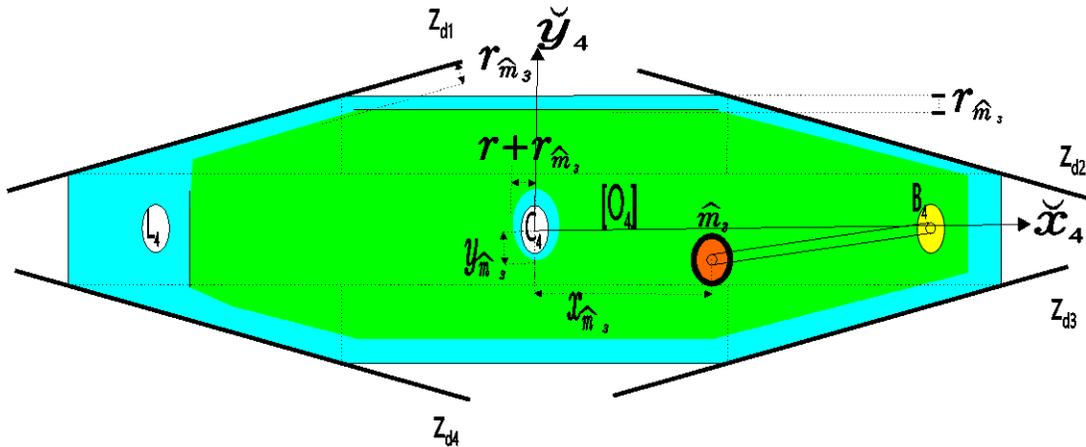


Figura 5. Zona factible en amarillo para posicionamiento del motor \hat{m}_3 en el eslabón Q_4 .

Para que el motor \hat{m}_3 no tenga una posición dentro del área circular de la articulación C_4 se describe una circunferencia de radio $r + r_{\hat{m}_3}$ en el origen coordenado $[\check{x}_4, \check{y}_4]$ del eslabón ternario Q_4 que es un área en forma de circunferencia en donde no se puede posicionar el motor \hat{m}_3 como se muestra en la Figura 3 y se describe en la restricción (11).

$$g_{21}(\bar{\mathbf{p}}): -x_{\hat{m}_3}^2 - y_{\hat{m}_3}^2 + (r + r_{\hat{m}_3})^2 \leq 0 \quad (11)$$

Para modelar los límites exteriores o el perímetro de la zona factible de posicionamiento del motor \hat{m}_3 se describen límites hacia arriba y abajo en la variable $y_{\hat{m}_3}$ como se muestra en (12) y (13) y para los límites de la izquierda y derecha se utiliza la variable $x_{\hat{m}_3}$ como se muestra en (14) y



(15) dando una tolerancia equivalente al radio del motor $r_{\hat{m}_3}$ para que el motor no sobresalga del eslabón y siempre se encuentre dentro del área descrita por el eslabón. Los límites de la zona factible para el posicionamiento del motor tienen rectas diagonales que se modelan con rectas para describir el perímetro de la zona factible para el posicionamiento del motor \hat{m}_3 dentro del eslabón ternario Q_4 se establece con base en un concepto tomado de [21] donde se utiliza la distancia de un punto (posicionamiento del motor) a una recta (límite diagonal del perímetro del área factible), así, este concepto se utiliza para las cuatro rectas diagonales del octágono que delimitan las esquinas o diagonales del perímetro del área factible en el eslabón octagonal para el posicionamiento del motor. Las rectas se representan mediante $Z_{dl} = 0 \quad \forall l = 1, 2, 3, 4$. El concepto de la distancia de un punto a una recta como se describe en [20] está dado por la forma:

$$\bar{D} = r_{\hat{m}_3} - \frac{\bar{C} + \bar{A}x_{\hat{m}_3} + \bar{B}y_{\hat{m}_3}}{\sqrt{\bar{A}^2 + \bar{B}^2}}, \text{ donde } \bar{A}, \bar{B} \text{ y } \bar{C} \text{ son los parámetros de la fórmula de la recta}$$

y el punto $[x_{\hat{m}_3}, y_{\hat{m}_3}]$ es la posición del motor que se debe apartar de la recta. Como se ha dicho en tres, las cuatro restricciones se utiliza el concepto de la distancia de un punto a una recta para evitar se posicione el motor se posicione fuera del área del eslabón en las esquinas diagonales cercas del perímetro del área factible. Esto se, indican con desigualdades de la (16) a la (19). Con lo anterior, la totalidad de la zona factible para el posicionamiento del motor en el eslabón ternario está descrita por las restricciones de la (11) a la (19), y como se muestra en Figura 5, esto da holgura a la forma de un octágono con un orificio circular en el centro, como se ve en el área verde.

$$g_{22}(\bar{\mathbf{p}}): -y_{\hat{m}_3} - (c_4 / 2 + g_4 - r_{\hat{m}_3}) \leq 0 \quad (12)$$

$$g_{23}(\bar{\mathbf{p}}): y_{\hat{m}_3} - (c_4 / 2 + f_4 - r_{\hat{m}_3}) \leq 0 \quad (13)$$

$$g_{24}(\bar{\mathbf{p}}): -x_{\hat{m}_3} - (a_2 - r_{\hat{m}_3} - r) \leq 0 \quad (14)$$

$$g_{25}(\bar{\mathbf{p}}): x_{\hat{m}_3} - (a_4 + d_4 - r_{\hat{m}_3}) \leq 0 \quad (15)$$

$$g_{26}(\bar{\mathbf{p}}): -\frac{2f_4(b_4 + a_2) + c_4h_4 + 2f_4x_{\hat{m}_3} - 2h_4y_{\hat{m}_3}}{2\sqrt{f_4^2 + h_4^2}} + r_{\hat{m}_3} \leq 0 \quad (16)$$

$$g_{27}(\bar{\mathbf{p}}): -\frac{2f_4(a_4 + d_4) + c_4n_4 - 2f_4x_{\hat{m}_3} - 2n_4y_{\hat{m}_3}}{2\sqrt{f_4^2 + n_4^2}} + r_{\hat{m}_3} \leq 0 \quad (17)$$

$$g_{28}(\bar{\mathbf{p}}): -\frac{2g_4(a_4 + d_4) + c_4k_4 - 2g_4x_{\hat{m}_3} + 2k_4y_{\hat{m}_3}}{2\sqrt{g_4^2 + k_4^2}} + r_{\hat{m}_3} \leq 0 \quad (18)$$

$$g_{29}(\bar{\mathbf{p}}): -\frac{2g_4(b_4 + a_2) + c_4j_4 + 2g_4x_{\hat{m}_3} + 2j_4y_{\hat{m}_3}}{2\sqrt{g_4^2 + j_4^2}} + r_{\hat{m}_3} \leq 0 \quad (19)$$

2.4 Límites de las variables de diseño

Finalmente, las restricciones relacionadas con los límites inferiores y superiores de las variables de diseño se pueden abordar considerando ciertos detalles de manufactura en el manipulador. Para la colocación de los barrenos en donde se colocan las uniones articulares, se considera una distancia mínima de $d_{r_{\min}} = 0.02 \text{ m}$, del centro de los barrenos hacia cualquier borde para evitar ruptura por desgarre durante su funcionamiento. Dicha distancia forma parte de



las constantes descritas en la Tabla 1. **Lista de constantes.** Es así como se aplica esta consideración en cada uno de los barrenos del robot manipulador mediante los límites descritos en (20), (21) y (22). Tanto b_i como d_i limitan la distancia del borde del eslabón al barreno derecho y al barreno izquierdo respectivamente, mientras que c_i lo delimita hacia arriba y debajo de todos los barrenos en el eslabón, es por ello que se considera dos veces la distancia mínima, uno para la parte superior u otro para la parte inferior ya que c_i es la distancia del ancho del eslabón con los barrenos en su interior.

$$d_{r_{min}} - b_i \leq 0 \quad (20)$$

$$d_{r_{min}} - d_i \leq 0 \quad (21)$$

$$2d_{r_{min}} - c_i \leq 0 \quad (22)$$

Se considera una flecha del motor \hat{m}_3 con una longitud de $v_f = 0.022$ m común en motores utilizados para desarrollar experimentos en este tipo de manipuladores planares. El motor se fija en el espacio trasero del eslabón ternario Q_4 atravesando el eslabón con la flecha del motor como se muestra en la vista lateral de la Figura 2, donde se presenta el motor y su flecha de color anaranjado, se considera la porción de la flecha sobresaliente en la cara frontal del eslabón Q_4 se considera de $T_f = 0.01$ m para la colocación de una banda dentada de transmisión. La tolerancia se representa en (23), y es propuesta por el diseñador para dejar una holgura de trabajo para la banda dentada.

$$e_4 - (v_f - T_f) \leq 0 \quad (23)$$

Tabla 1. Lista de constantes

Descripción	Símbolo	Valor	Descripción	Símbolo	Valor
Radio de las articulaciones	r	0.005 m	Distancia articular, cuarto eslabón	a_4	0.25 m
Densidad del aluminio	ρ_{Al}	2698.4 kg/m ³	Distancia articular, quinto eslabón	a_5	0.72 m
Radio del motor	$r_{\hat{m}_3}$	0.0184m	Distancia mínima borde-barreno	$d_{r_{min}}$	0.02 m
Masa del motor	$m_{\hat{m}_3}$	0.21 kg	Ancho mínimo de los eslabones	e_{min}	0.004 m
Longitud de la flecha del motor	v_f	0.022 m	Ancho máximo de los eslabones	e_{max}	0.03 m
Tolerancia para la banda en la flecha	T_f	0.01m	Alto máximo de los eslabones	h_{max}	0.4 m
Distancia articular del primer y tercer eslabón	a_1, a_3	0.2 m	Largo máximo de los eslabones	w_{max}	0.4 m
Distancia articular del segundo y del cuarto eslabón	a_2	0.05 m			

2.5 Planteamiento formal del problema de optimización



El planteamiento formal del problema de optimización se define como en (24):

$$\begin{aligned} \underset{\mathbf{p} \in R^{52}}{\text{Min}} \quad J = & \| \mathbf{M}_{ind} \| + \| \mathbf{C}_{ind} \| + \| \mathbf{G}_{ind} \| \\ \text{Sujeto a:} \quad & \\ & g_r(\mathbf{p}) \leq 0 \quad | \quad r = 1, \dots, 23 \\ & \bar{\mathbf{p}}_{j_{\min}} \leq \bar{\mathbf{p}}_j \leq \bar{\mathbf{p}}_{j_{\max}} \quad | \quad j = 1, \dots, 52 \end{aligned} \quad (24)$$

3. Técnicas de optimización

Las técnicas de optimización son los métodos por los cuales se busca dar solución a un problema de optimización mediante algoritmos que realizan una búsqueda utilizando la exploración y explotación a través del espacio de las variables de diseño, con el objetivo de mejorar las soluciones durante una serie de iteraciones [22].

En este trabajo se utilizará Evolución Diferencial debido a que es un buen algoritmo para problemas de optimización que utilizan variables de tipo real [23]. El algoritmo de Evolución Diferencial (ED) fue propuesto por Storn y Price en 1998 [24]. El algoritmo ED es de fácil implementación computacional, está diseñado para problemas que utilizan números reales, además realiza la optimización en un tiempo razonable de cómputo.

En este trabajo se utiliza la variante del ED, Rand/1/bin, el procedimiento se describe a continuación. En la etapa inicial del algoritmo ED se crean NP individuos aleatoriamente para formar una población de individuos ($\bar{\mathbf{p}}_i$) de valores reales que representan las soluciones dentro del espacio de búsqueda ($\bar{\mathbf{p}}_{j_{\min}} \leq \bar{\mathbf{p}}_j \leq \bar{\mathbf{p}}_{j_{\max}}$). Se calculan aptitud o función objetivo para cada individuo y se procede a crear una nueva generación. A continuación, ED utiliza un mecanismo diferencial (resta de variables de diseño) en la etapa de mutación (existe etapa de selección mutación cruza y reemplazo, la mutación es la parte donde se combinan la información de las variables). Después un operador de cruza o recombinación binomial (la cruza binomial se basa en el cumplimiento de un factor de cruza Cr , y un número aleatorio en donde si el número aleatorio es menor a Cr , se eligen las variables del padre o en caso contrario las variables del hijo para crear un nuevo individuo), para finalizar con un operador de selección (en donde se elige aquel con la mejor aptitud). Que para la actual implementación se utiliza el criterio de factibilidad de Deb descrita en [25].

La variante del algoritmo ED Rand/1/bin añade la diferencia proporcional de dos individuos ($\bar{\mathbf{p}}_{r_2}, \bar{\mathbf{p}}_{r_3}$) elegidos aleatoriamente de la población a un tercer individuo ($\bar{\mathbf{p}}_{r_1}$), individuo objetivo, también elegido aleatoriamente esto en la etapa de mutación. El nuevo individuo w_i se denomina individuo mutado o vector mutado. La mutación diferencial como se muestra en la ecuación (25) se genera a partir de los vectores $\bar{\mathbf{p}}_{r_1}, \bar{\mathbf{p}}_{r_2}, \bar{\mathbf{p}}_{r_3}$ mutuamente exclusivos y generan a w_i .

$$w_i = \bar{\mathbf{p}}_{r_1,j} + F_e (\bar{\mathbf{p}}_{r_2,j} - \bar{\mathbf{p}}_{r_3,j}) \quad (25)$$

El factor de escala de mutación $F_e \in (0 \ 1]$, establece la escala de la diferencia entre los individuos $\bar{\mathbf{p}}_{r_2}$ y $\bar{\mathbf{p}}_{r_3}$ con el objetivo de evitar el estancamiento o la convergencia prematura a una solución en el proceso de búsqueda. Una vez finalizada la mutación se aplica el operador de cruza



o recombinación binomial sobre cada individuo \bar{p}_i para generar un individuo intermedio \bar{u}_i . El individuo intermedio u_i es creado mezclando las componentes de w_i y \bar{p}_i según la ecuación (26), bajo una probabilidad predefinida $F_c \in [0,1]$.

$$u_i(j) = \begin{cases} w_i(j) & \text{si, Rand}([0,1]) \leq F_c \\ \bar{p}_i(j) & \text{en otro caso.} \end{cases} \quad (26)$$

Finalmente se selecciona el mejor individuo, para esta aplicación se utiliza el criterio de Deb. Si el individuo intermedio \bar{u}_i es aceptado, éste reemplaza al individuo \bar{p}_i ; o si, por el contrario, el individuo intermedio \bar{u}_i es rechazado se conserva el individuo objetivo en la siguiente generación. Por lo tanto, los parámetros de ED a sintonizar para el problema de optimización son el factor de cruce F_c y el factor de escala de mutación F_e . Se muestra su pseudocódigo en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

4. Resultados

Esta sección se divide en dos partes, los resultados del problema de optimización el cual se ejecuta un número de veces y la prueba de desempeño del manipulador obtenido.

4.1 Resultados del problema de optimización

Se resolvió el problema de optimización mediante el algoritmo de Evolución Diferencial Rand/1/bin. Las condiciones del experimento se muestran en la Tabla 2, los tres parámetros G_{max} , NP y $N_{corridas}$ describen el experimento. El número de generaciones G_{max} , una cantidad de población NP y se ejecuta el experimento un número considerable de veces $N_{corridas}$ para generar posteriormente una estadística descriptiva del experimento.

Tabla 2. Condiciones del experimento de optimización.

G_{max}	NP	$N_{corridas}$
5000	70	30

Tabla 3. Estadística descriptiva.

Algoritmo	Mejor	Peor	Promedio	Mediana	Desviación
Rand/1/bin	0.00225	0.01094	0.00388	0.00313	0.00179

Se realiza una estadística descriptiva utilizando las mejores soluciones que otorgan menor par al robot manipulador en cada corrida, como se muestra en la Tabla 3. Se puede observar un buen desempeño del algoritmo debido a que su desviación estándar es de 0.00179. También se



muestra a través del promedio y la mediana que las soluciones malas o distantes se muestran con poca frecuencia.

```

1: Inicio
2:  $G = 0$  .Contador de Generaciones
3:  $F_c = 0.3$  .Factor de cruza
4:  $F_e$  .Factor de escala
5:  $D = 52$  .Número de variables de diseño
6: Crear una población Interna inicial  $\bar{p}_i \forall_i, i = 1, \dots, NP$ 
7: Evaluar  $J(\bar{p}_i), g(\bar{p}_i) \forall_i, i = 1, \dots, NP$ 
8: Se obtiene la mejor solución  $\bar{p}_{best}$ 
9: while  $G \leq G_{max}$  do
10:    $F_e = \text{Rand} [0.3 \ 0.9]$ 
11:   for Por cada individuo  $i = 1, \dots, NP$  do
12:     Se eligen dos individuos  $r_{1,2} = \text{Rand} [1 \ NP] \neq i$ 
13:     Se genera punto de cruza binomial  $j_{\text{Rand}} = [1 \ D]$ 
14:     for Para cada variable de diseño  $j = 1, \dots, 52$  do
15:       if ( $\text{Rand}([0 \ 1]) \leq F_c$ ) ó ( $j = j_{\text{Rand}}$ ) then
16:         Aplicación de mutación  $w_{i,j} = \bar{p}_{1,j} + F_e(\bar{p}_{r2,j} - \bar{p}_{r3,j})$ 
17:         donde se elige población
18:         if  $w_{i,j} \leq \bar{p}_{jmin} || w_{i,j} \geq \bar{p}_{jmax}$  then <-Acotando límites
19:            $w_j = \bar{p}_{jmin} + \text{Rand} [0 \ 1](\bar{p}_{jmin} - \bar{p}_{jmax})$ 
20:         end if
21:          $U_{i,j} = w(i, j)$ 
22:       else
23:         Replicar variable de diseño del padre en caso contrario  $U_{i,j} = \bar{p}_{i,j}$ 
24:       end if
25:     end for
26:     Se evaluá al nuevo individuo  $J(U_i), g(U_i) \forall_i, i = 1, \dots, NP$ 
27:     if  $J(U_i)$  es mejor que  $J(\bar{p}_i)$  por el criterio de Deb then  $\bar{p}_i = U_i$ 
28:     end if
29:   end for
30:   Se busca al mejor individuo de la población  $\bar{p}_{best}$  por el criterio de Deb
31:    $G = G + 1$ 
32: end while
33: Se elige al mejor individuo
34: FIN

```

Figura 6. Seudocódigo Evolución Diferencial (variante Rand/1/bin).

4.2 Pruebas de desempeño

Una prueba de desempeño consiste en crear un barrido de la totalidad del espacio de trabajo del manipulador a velocidades máximas y se reporta el par máximo obtenido. Se dibujó en un programa asistido por computadora el modelo del manipulador a partir del vector solución con menor función objetivo. Como se muestra en la Figura 7 y en la Figura 6 se dibujó un manipulador



con eslabones rectangulares. El robot manipulador con el diseño propuesto (DP) de ahorro de energía se compara con el robot manipulador diseñado con eslabones rectangulares (DER). Debido a que los robots manipuladores en la industria manejan velocidades máximas en sus grados de libertad, como es el caso del robot manipulador IRB6700 de la empresa ABB [26] las pruebas de desempeño se realizaron considerando estas velocidades máximas para así tener una visión realista del desempeño del enfoque propuesto.

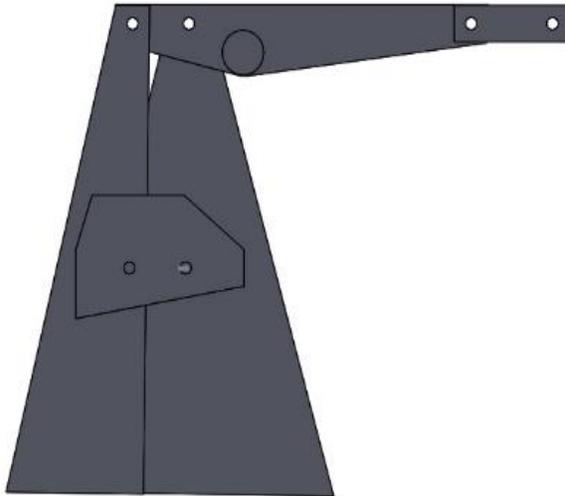


Figura 7. Diseño Propuesto (DP).



Figura 6. Diseño con Eslabones Rectangulares (DER).

En la tabla 4 se muestran la masa m_i , la longitud al centro de masa l_{ci} , el ángulo al centro de masa y el tensor de inercia I_{zi} de cada eslabón del manipulador con eslabones rectangulares, así mismo se realiza para el manipulador propuesto en la tabla 5.

Tabla 4 Parámetros dinámicos del manipulador de eslabones rectangulares.

Eslabón	m_i [kg]	l_{ci} [m]	γ_i [rad]	I_{zi} [kg / m ²]
1	0.1753	0.0100	0.00	0.000763
2	0.0982	0.0250	0.00	0.000060
3	0.0728	0.1000	0.00	.000317
4	0.1416	0.1349	0.00	0.030166
5	0.0313	0.0360	0.00	0.000029

Tabla 5 Parámetros dinámicos del manipulador propuesto

Eslabón	m_i [kg]	l_{ci} [m]	γ_i [rad]	I_{zi} [kg / m ²]
1	1.446	0.038	-2.9	0.019057
2	0.499	0.033	-0.3	0.001089
3	0.325	0.037	2.32	0.004052



4	0.363	0.069	-0.2	0.001450
5	0.0313	0.0360	0.00	0.000029

En la Tabla 6 se muestra el resultado de la evaluación de la función objetivo para los dos diseños. Se puede observar que para el manipulador propuesto se disminuyó un 59.635% la norma de Frobenius de las matrices auxiliares que conforman la dinámica en forma cerrada del robot manipulador, esto impactará en el desempeño del manipulador en diversos trabajos que realice en comparación con un manipulador con eslabones octagonales.

Tabla 6. Valores de la Función Objetivo

	Diseño Propuesto	Eslabones Rectangulares
Función Objetivo	0.002235186002	0.003748078011

Se utilizaron velocidades máximas encontradas en la literatura para robots manipuladores en la industria y las posiciones donde los senos y cosenos de la dinámica alcanzan su máxima amplitud, es decir donde están más comprometido el par en los motores, esto con el fin de determinar las mayores amplitudes y encontrar los pares máximos y mínimos que el robot manipulador alcanza en ciertas configuraciones. Se realiza tanto para el DP, como para el DER a una velocidad de 5.235 rad/s y los resultados se muestran en la

Tabla 7. **Pares e intervalos del DP y DER a 5.235 [rad/s]**. Se puede observar que para el par del motor uno \hat{m}_1 disminuye en el Diseño Propuesto en cualquier sentido de giro y un 37.79%. Su intervalo de operación es menor en comparación con el Diseño con eslabones rectangulares. De igual manera el intervalo del par del segundo motor \hat{m}_2 disminuye un 36.05% y el par del último \hat{m}_3 se mantiene con una similitud para ambos diseños.

Tabla 7. Pares e intervalos del DP y DER a 5.235 [rad/s]

	τ_1 min/máx.	τ_2 min/máx.	τ_3 min/máx.
Par DP	-0.136/0.5679	-0.17555/0.3114	-0.0319/0.0335
Intervalo	0.7344 (37.79%)	0.4869 (36.05%)	0.0654
Par DER	-0.540/0.6399	-0.1714/0.5899	-0.0319/0.0335
Intervalo	1.1805	0.7613	0.0654

En la Tabla 8 **Pares e intervalos del DP y DER a 0[rad/s]**.se muestran los pares y el intervalo de actuación máximos para los mecanismos, pero en esta ocasión con velocidad nula. Es decir, el manipulador sin movimiento y situado en puntos específicos de su zona de trabajo donde se requiere un par máximo. Para este caso el enfoque de diseño mejora aún más el ahorro en el consumo de energía del par del motor uno \hat{m}_1 para ambos sentidos de giro en comparación con la prueba de las velocidades máximas y reduce en un 63.32% en el intervalo de actuación. Por su parte el par del motor dos \hat{m}_2 del DP también mostró una reducción considerable en ambos sentidos de giro y en su intervalo de operación se redujo un 91.762% en comparación con el DER.



Tabla 8 Pares e intervalos del DP y DER a 0[rad/s].

	τ_1 min/máx.	τ_2 min/máx.	τ_3 min/máx.
Par DP	-0.157/0.157	-0.017748/0.0177	-0.0111/0.0111
Intervalo	0.3139 (63.32%)	0.0355 (91.762%)	0.0221
Par DER	-0.4279/0.4279	-0.2154/0.2154	-0.0111/0.0111
Intervalo	0.8558	0.4309	0.0221

5. Discusión

En este trabajo se realizó un enfoque de diseño orientado a la disminución del par en los actuadores de un robot serie-paralelo utilizando los términos independientes del tiempo de la dinámica en su forma cerrada. En los resultados se observó que utilizando el enfoque presentado en este trabajo se obtiene una reducción en el par de los motores y con ello la energía consumida por el manipulador. Para el par del motor uno \hat{m}_1 obtuvo un ahorro del 37.78% de energía a velocidades de 5.235 rad/s y un ahorro del 63.32% de energía a velocidad nula. Para el par del motor dos \hat{m}_2 se obtuvo un ahorro del 36.056% de energía a velocidades de 5.235 rad/s y un ahorro del 91.764% de energía a velocidad nula (posiciones sin movimiento) esto es cuando el manipulador se mantiene en una posición fija sin movimiento. Finalmente, no se obtuvo un ahorro ni aumento de energía del par del motor tres \hat{m}_3 manteniéndose dentro del intervalo de par de -0.0111 N a 0.0111 N de actuación. En general se proyecta un ahorro del 36.18% para velocidades altas y un ahorro del 77.542% para el consumo en estado estacionario, es decir, si el manipulador se mantiene quieto sin generar ninguna trayectoria en una posición fija, el ahorro es considerable debido a que el par se disminuye gracias al contrapeso proporcionado por los eslabones.

6. Conclusión

Con este trabajo se comprueba que al considerar un enfoque de diseño que minimice la energía del manipulador se puede obtener una disminución considerable de la misma. Al utilizar los términos independientes de dinámica se minimiza la energía del manipulador en diversas trayectorias dentro de su espacio de trabajo y a diversas velocidades dentro de su rango de operación, así, se obtiene un mecanismo que realiza el mismo trabajo, pero a un esfuerzo menor. El ahorro se calculó en 36.18% para velocidades altas y un ahorro del 77.542% para el consumo en estado estacionario.

El enfoque de diseño promueve la minimización del consumo de la energía en los manipuladores al diseñarlos de tal forma que sus actuadores utilicen menos energía al realizar sus actividades. A partir del diseño estructural se puede reducir el consumo de energía, al margen de los dispositivos que se integren al mecanismo. Separar los términos independientes de la dinámica del manipulador y minimizarlos promueve la reducción del par en diversas circunstancias de operación, lo cual resulta beneficioso debido a que todos los manipuladores son creados con un propósito general.

Referencias

- [1] D. D.-I.-C.-M. a. M. V.-C. a. E. Portilla-Flores, «Diseño de un manipulador móvil con energía mecánica óptima usando evolución diferencial,» *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, pp. 257 - 267, 2015.
- [2] I. a. W. E. a. C. G. a. V. R. Palomba, «{Minimization of the Energy Consumption in Industrial Robots through Regenerative Drives and Optimally Designed Compliant Elements,» *Applied Sciences*, vol. 10, nº 21, 2020.



- [3] L.-W. Tsai, «Robot Analysis and Design: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators,» *John Wiley & Sons, Inc.*, 1999.
- [4] R.-M. A. N. a. J.-F. B. a. E. V. a. D. Lefebvre, «Comparison of serial and parallel robot repeatability based on different performance criteria,» *Mechanism and Machine Theory*, vol. 61, pp. 136 - 155, 2013.
- [5] T. K. Tanev, «Kinematics of a hybrid (parallel–serial) robot manipulator,» *Mechanism and Machine Theory*, vol. 35, nº 9, pp. 1183 - 1196, 2000.
- [6] W. J. Z. a. L. C. Q. Li, «Design for Control—A Concurrent Engineering Approach for Mechatronic Systems Design,» *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*, vol. 6, nº 2, pp. 161-169, 2001.
- [7] Q. L. a. L. S. G. W. J. Zhang, «Integrated Design of Mechanical Structure and Control Algorithm for a Programmable Four-Bar Linkage,» *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*, vol. 4, nº 4, pp. 354-362, 1999.
- [8] A. {-M. a. M. G. {-C. a. E. {-M. a. M. {Aldape-Pérez}, «Adaptive Controller Tuning Method Based on Online Multiobjective Optimization: A Case Study of the Four-Bar Mechanism,» *IEEE Transactions on Cybernetic*, pp. 1-14, 2019.
- [9] G. R.-M. a. J. S. a. X. B. a. R. Z. Freire, «Evolutionary multi-objective optimisation with preferences for multivariable PI controller tuning,» *Expert Systems with Applications*, vol. 51, pp. 120 - 133, 2016.
- [10] J. N. {-C. a. M. G. {Villarreal-Cervantes}, «Frontal-Sagittal Dynamic Coupling in the Optimal Design of a Passive Bipedal Walker,» *IEEE Access*, vol. 7, pp. 427-449, 2019.
- [11] A. {-M. a. M. G. {-C. a. E. {-M. a. M. {Aldape-Pérez}, «Adaptive Controller Tuning Method Based on Online Multiobjective Optimization: A Case Study of the Four-Bar Mechanism,» *IEEE Transactions on Cybernetics*, pp. 1-14, 2019.
- [12] G. R.-M. a. J. S. a. X. B. a. R. Z. Freire, «Evolutionary multi-objective optimisation with preferences for multivariable PI controller tuning,» *Expert Systems with Applications*, vol. 51, pp. 120 - 133, 2016.
- [13] O. S.-P. a. M. G. V.-C. a. J. C. G.-R. a. A. Rodríguez-Molina, «Meta-heuristic algorithms for the control tuning of omnidirectional mobile robots,» *Engineering Optimizatio*, vol. Taylor & Francis, pp. 1-18, 2019.
- [14] S. Erkaya, «Investigation of balancing problem for a planar mechanism using genetic algorithm,» *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 27, nº 7, pp. 2153--2160, 2013.
- [15] K. C. a. H. Chaudhary, «Optimal dynamic balancing and shape synthesis of links in planar mechanisms,» *Mechanism and Machine Theory*, vol. 93, pp. 127 - 146, 2015.
- [16] S. H. a. M. V. Mark W. Spong, *Robot Modeling and Control*, JOHN WILEY & SONS, INC..
- [17] S. K. Saha, *Introducción a la Robótica*, McGRAW-HILL, 2008.
- [18] R. A. Horn, *Matrix Analysis*, Cambridge University, 2012.
- [19] C. A. C.-V. J. A.-G. E. P.-F. M. G. Villarreal-Cervantes, «Differential evolution techniques for the structure-control design of a five-bar parallel robot,» *Engineering Optimization*, vol. 42, pp. 535-565, 2020.
- [20] C. H. LEHMANN, *GEOMETRIA ANALITICA*, 2008.
- [21] M. G. V.-C. L. G. C.-R. José Saúl Muñoz-Reina, «Integrated design of a lower limb rehabilitation mechanism using differential evolution,» *Computers and Electrical Engineering*, vol. 92, nº 107103, pp. 1-18, 2021.
- [22] X.-S. Yang, «Optimization and Metaheuristic Algorithms in Engineering,» *Elsevier*, pp. 1-23, 2013.
- [23] J. F. V. B. y. A. G. Sandoval, *Matemáticas discretas*, Grupo Editorial Patria, 2021.
- [24] R. a. P. K. Storn, «Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for Global



Optimization over Continuous Spaces,» *Journal of Global Optimization*, vol. 11, pp. 341-359, 1997.

[25] K. Deb, «An efficient constraint handling method for genetic algorithms,» *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 186, n° 2, pp. 311-338, 2000.

[26] ABB, «IRB 6700 The 7th generation of large industrial robots,» *Catalogue*, p. 2, 2019.



Aspectos Importantes de la Manufactura 4.0 y los Sistemas Ciber-Físicos: Rutas para Mejorar la Carrera de Mecatrónica

Jiménez López Eusebio¹, López Martínez Aldo Augusto², Luna Acosta Noé³, Gaytán Martínez Lilia Zulema⁴, García Velásquez Luis Andrés⁵ y Ochoa Estrella Francisco Javier⁶

^{1,3} Centro de Investigación Aplicada en Automatización y Mecatrónica de la Universidad Tecnológica del Sur de Sonora-ULSA Noroeste, ejimenezl@msn.com

² Centro de Investigación en Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)

^{3,4} Universidad Tecnológica del Sur de Sonora

^{3,5} Universidad La Salle Noroeste

⁶ TecNM/Instituto Tecnológico de Cajeme

Resumen

Las tecnologías de la información, el cómputo en la nube, la digitalización y la Inteligencia Artificial han impulsado un cambio tecnológico de impacto mundial cuyos efectos han generado un concepto relativamente nuevo: la Manufactura 4.0, término acuñado por Alemania en el año 2011. Los cambios que producen estas tecnologías sobre los sistemas de producción han sido de tal magnitud que se considere hablar de una cuarta revolución industrial, cuyo eje tecnológico son los sistemas ciber-físicos. En este artículo se presentan algunas definiciones de los sistemas ciber-físicos y los nueve pilares tecnológicos sobre los cuales se basa la Manufactura 4.0, además se describen los gemelos digitales y se presenta un resumen de la Inteligencia Artificial. Se discuten en forma breve algunas rutas que deberán tomarse en cuenta en la formación del ingeniero mecatrónico.

Palabras clave: Manufactura 4.0, Sistemas ciber-físicos, Mecatrónica, Inteligencia Artificial, Educación en Ingeniería, Gemelos Digitales.

1. Introducción

En la actualidad se está presentando un evento significativo industrial a nivel mundial que tiene implicaciones para la sociedad en general, esto se debe a la generación y aplicación de nuevas tecnologías, como el Internet de las Cosas, el cómputo en la nube, la digitalización y la aplicación masiva de la Inteligencia Artificial, entre otras, en los procesos industriales. El mundo se encuentra ante la presencia activa de una revolución industrial, similar a la era de la máquina del vapor, a la introducción de la electricidad y cadenas de producción, y a la automatización global de sistemas de manufactura. A esta nueva revolución se le ha llamado Manufactura 4.0 [1, 2] o Industria 4.0 [3, 4]. El concepto de Industria 4.0 propone la digitalización de un extremo a otro de la cadena de valor, mediante la integración de activos físicos en sistemas y redes vinculados a una serie de tecnologías para crear valor [5]. La digitalización es un proceso de alto valor e interés dentro de la manufactura 4.0. Sin embargo, la tecnología central de esta nueva revolución industrial son los Sistemas Ciber-físicos (CPS, por sus siglas en inglés) [6]. Estos sistemas juegan un papel fundamental en la realización de la Industria 4.0 ya que actúan como un medio para vincular el mundo físico, como sensores, actuadores y dispositivos móviles, con el servicio de Internet y también para reflejar lo que sucede en el mundo real en un ciberespacio para procesar la pre-inspección y la gestión en tiempo real [7].



La Manufactura 4.0 o Industria 4.0 tiene asociados nueve pilares tecnológicos tales como [1, 8]: la realidad aumentada, la manufactura aditiva, la simulación, la robótica autónoma, el Internet de las cosas, los sistemas de integración horizontal y vertical, el cómputo de grandes datos (Big Data), ciberseguridad y cómputo en la nube, los cuales al interactuar entre sí generan nuevos productos, procesos y sistemas que definen los aspectos y características más importantes y relevantes de la nueva revolución industrial y pueden usarse como guías para definir las rutas o caminos que se deben seguir para la formación de los nuevos ingenieros.

Otra tecnología básica de la Industria 4.0 es la Inteligencia Artificial (AI) identificada como una ciencia cognitiva con actividades de investigación en las áreas de procesamiento de imágenes, procesamiento de lenguaje natural, robótica, aprendizaje automático, etc. [9]. La relación de la AI con la Manufactura 4.0 es esencial ya que es la base operativa de distintos sistemas y tecnologías que apoyan el diseño de los sistemas ciber-físicos. Las redes neuronales, la lógica difusa, los algoritmos genéticos, el aprendizaje automático, entre otras, son herramientas que se utilizan regularmente en los actuales sistemas de manufactura. De hecho, la Industria 4.0 se ha convertido en el escenario perfecto para impulsar la aplicación de enfoques novedosos de la Inteligencia Artificial y del aprendizaje automático para monitorización y optimización de procesos industriales [10].

Por otro lado, en México se produce el 80% de las exportaciones de alta tecnología en América Latina, por lo que es de suma importancia comprender su posición estratégica y aprovechar su potencial en beneficio de las empresas mexicanas y sus sistemas de innovación [11]. México fabrica productos tecnológicos altamente sofisticados a niveles superiores al promedio de Países de la OCDE y comparables a los de Corea y Japón; esto ha desarrollado generaciones de expertos directores de plantas de producción, operadores, ingenieros, entre otros, con las habilidades potenciales necesarias para asimilar las nuevas tecnologías y las mejores prácticas destinadas a generar alto valor agregado desde México [11]. Algunos estados como Querétaro han realizado esfuerzos para direccionar sus caminos en el sentido de la Industria 4.0. Debido a que este estado es reconocido por la OCDE como modelo de desarrollo económico, la entidad deberá transitar de una economía basada en la eficiencia a una basada en la innovación y valor agregado. Para tal propósito, en el año 2018 se creó el “Consejo Consultivo de Industria 4.0”, concebido como un órgano de análisis de la Política Pública en materia de Industria 4.0 en el que participan los actores más representativos de la industria, la academia y el gobierno. Su función es la definición de objetivos, responsables y la toma de decisiones en torno a acciones y estrategias a ejecutar para el correcto despliegue de la Industria 4.0 en México. La Figura 1 muestra un esquema de plataformas digitales para el seguimiento de la política pública en los ecosistemas de innovación y TIC en Querétaro para la Industria 4.0 [12].



Figura 1. Plataformas digitales que soportan el plan de acción en Querétaro en torno a la Industria 4.0 [12].



En este sentido, los avances tecnológicos y el desarrollo de la ciencia de las últimas dos décadas, han permitido fundar la filosofía de la Manufactura 4.0, cuyo origen del concepto apareció en el año 2011 en Alemania [13]. Dentro de los múltiples retos que demanda la cuarta revolución industrial en el Mundo y en especial en México, está el aspecto educativo. Es necesario formularse el siguiente cuestionamiento: ¿Qué competencias debe tener el nuevo ingeniero en Mecatrónica para afrontar los desafíos de la industria 4.0? Si bien la respuesta a esta interrogante no es nada sencilla, en este artículo se esbozará un camino o ruta a seguir de los posibles conocimientos y métodos didácticos que el ingeniero debe seguir para su formación actual. Para ello, es necesario indagar en algunos aspectos importantes de la manufactura 4.0 y los sistemas ciber-físicos que permitan proponer un rumbo en la educación del nuevo ingeniero.

2. La Manufactura 4.0

En una encuesta realizada a 371 empresas líderes a nivel mundial, el Foro Económico Mundial identificó las principales tecnologías que están impulsando los cambios en el trabajo actual, los empleos, las competencias y el futuro del trabajo [14]. Estos cambios tecnológicos se enumeran a continuación:

1. Internet móvil y tecnología en la nube.
2. Los avances en la potencia de cálculo y el Big Data.
3. Nuevos suministros y tecnologías energéticas.
4. El Internet de las cosas a través de sensores remotos, comunicaciones y procesamiento de energía en equipos industriales y domésticos.
5. La colaboración abierta, la economía colaborativa y las plataformas par a par.
6. Robótica avanzada y transporte autónomo.
7. Inteligencia Artificial y aprendizaje automático.
8. Fabricación avanzada e impresión 3D.
9. Materiales avanzados, biotecnología y genómica.

Los resultados de esta encuesta son interesantes y valiosos, ya que es posible interpretar que las tecnologías mencionadas anteriormente, pueden ser introducidas en una gran cantidad de procesos en las industrias con el objetivo de mejorar la eficiencia y optimizar las líneas de producción dándoles un alto valor agregado. Del mismo modo, las tecnologías mencionadas presuponen enormes retos para el trabajo y para la educación, ya que, por un lado, el nivel de automatización puede implicar la reducción de personal o discusiones acerca de cómo sería el reparto de los beneficios de las utilidades generadas y, por otro lado, la incursión de estas tecnologías provocará cambios necesarios en la formación de los técnicos e ingenieros. La introducción de estas tecnologías disruptivas no fueron todas al mismo tiempo, sino que en las dos pasadas décadas poco a poco empezaron a ser utilizadas por las empresas de todo el mundo. En el año 2011 Alemania propuso, después de analizar el cambio tecnológico que se estaba produciendo, un nuevo concepto que enmarcará la situación de las empresas, y de allí surgió “la Manufactura 4.0”, el cual es un término amplio que se utiliza en varios campos de estudio y su alcance cubre la totalidad de la manufactura industrial [15].

2.1 Las revoluciones industriales

La Manufactura 4.0 es considerada una revolución industrial. Una revolución es un sustantivo que estipula un cambio que define una transformación dramática y de gran alcance en las condiciones, actitudes u operaciones. De hecho, una revolución industrial a menudo se considera un evento único y aislado, tales revoluciones se definen típicamente por una serie de innovaciones exitosas que impulsan a las economías y las industrias en un momento determinado. Cada revolución industrial se basa en las modernizaciones de la anterior, lo que lleva a una fabricación más progresiva [16]. Es importante recordar cuales han sido las principales revoluciones industriales (ver Figura 2) que se han presentado a lo largo de la historia. Una pequeña descripción de ellas centradas en la tecnología base se presenta a continuación [17]:



- Revolución Industrial 1.0: La invención de la máquina de vapor de James Watt representa el punto de partida de la Revolución Industrial 1.0 en la historia mundial.
- Revolución Industrial 2.0: La línea de montaje de Henry Ford provocó un cambio de paradigma en la historia del proceso de fabricación.
- Revolución Industrial 3.0: Es un período completamente diferente cuando la tecnología informática se utiliza como interfaz. En este período, la importancia del poder humano disminuyó y la velocidad de producción aumentó considerablemente a través de los sistemas informáticos.
- Revolución Industrial 4.0: La tecnología central son los sistemas ciber-físicos que tratan sobre el desarrollo constante del conocimiento y el sistema de información en combinación con un aumento incontrolable de la capacidad de cómputo, transmisión y almacenamiento, que facilita la evolución de nuevas operaciones tecnológicas fuertemente interconectadas.



Figura 2. Evolución de las revoluciones industriales [18].

La importancia de describir la o las tecnologías líderes de cada revolución industrial radica en que su conocimiento puede dar un camino o enfoque hacia la educación del ingeniero. Los sistemas ciber-físicos son las tecnologías centrales de la Manufactura 4.0, por lo que sus definiciones, clasificaciones y aplicaciones pueden ser útiles para determinar una ruta a seguir para conformar los saberes de los futuros ingenieros. Por otro lado, el mundo se encuentra en una época de transición entre la Manufactura 3.0, centrada en la computadora y la automatización total caracterizada por la filosofía del CIM (Computer Integrated Manufacturing), y la Manufactura 4.0 centrada en los sistemas ciber-físicos. En otras palabras, el mundo se encuentra en un proceso disruptivo entre dos revoluciones industriales. La Industria 4.0 abarca seis principios de diseño en su marco, que se denominan descentralización, virtualización, interoperabilidad, modularidad, capacidad en tiempo real y orientación al servicio. Estos principios se denominan "principios de diseño" porque contribuyen al diseño o al proceso de transición de una industria común, o 3.0, a la Industria 4.0. [19].

Es importante estudiar los procesos de transición entre las revoluciones industriales ya que el entender estos procesos es crucial para poder analizar los conocimientos que deben ser adquiridos por los ingenieros. Es poco práctico transformar un plan de estudios tomando como referencia una nueva revolución industrial. Es importante tomar en cuenta que mucha de la tecnología educativa está asociada al CIM y a que todavía no son claros los caminos a seguir en la Manufactura 4.0. Del mismo modo, no se puede realizar un plan de estudio moderno si no se consideran aspectos fundamentales de la industria inteligente, por lo que se requiere considerar un balance de conocimientos básicos del CIM y conocimientos de la Manufactura 4.0. en la conformación de los planes de estudios actualizados.



2.2. Pilares de la Industria 4.0

La Industria 4.0 puede concebirse como una iniciativa estratégica alemana, que tiene por objetivo la creación de fábricas donde se actualizan las tecnologías de fabricación transformadas por los sistemas ciber-físicos (CPS), el Internet de las cosas (IoT) y la computación en la nube [20]. La Industria 4.0 define una metodología para generar una transformación de la fabricación dominante en la máquina a la fabricación digital. Para lograr una transformación exitosa, el estándar de la Industria 4.0 debe entenderse bien y se debe generar e implementar una hoja de ruta clara [21]. Uno de los mecanismos para poder indicar una ruta clara en el entendimiento de la Industria 4.0 es conocer las tecnologías en las que esta se basa. A continuación, se describen nueve pilares tecnológicos sobre los cuales se soporta la Industria 4.0 [1, 8, 22].

- Robots autónomos: el uso de robots en la producción está evolucionando en su utilidad, aumentando la autonomía, flexibilidad e interacción con humanos y otros robots.
- Simulación: además del uso para simular productos, materiales y procesos de producción, los modelos de simulación se pueden utilizar para mejorar las operaciones de la planta creando un modelo virtual de la fábrica que incluye todos los elementos (máquinas, productos y humanos), también llamados gemelos digitales.
- Integración de sistemas horizontal y vertical: integración de sistemas de Tecnologías de la Información en toda la cadena de suministro creando redes de integración de datos y también integración interna de funciones cruzadas.
- IoT industrial: dispositivos con informática integrada que se comunican e interactúan en tiempo real.
- Ciberseguridad: redes integradas que exigen protección para sistemas industriales críticos, líneas de fabricación y también para asegurar flujos de información y comunicación confiables.
- Nube: los servicios basados en datos y el intercambio de datos entre diferentes sitios se implementarán en la nube.
- Fabricación Aditiva (AM): La AM permitirá la producción de lotes pequeños de productos personalizados y más ligeros, lo que también reducirá los costos de logística y las existencias.
- Realidad Aumentada (RA): además de varias aplicaciones, la RA se puede utilizar para mejorar los procedimientos de trabajo y mantenimiento, y promover la formación virtual.

La Figura 3 muestra en forma esquemática los nueve pilares de la Industria 4.0.



Figura 3. Tecnologías que soportan a la Industria 4.0 [23].



Las nueve tecnologías descritas anteriormente no representan un consenso universal entre los investigadores ni tampoco un marco de referencia general. Por ejemplo, la Figura 2 muestra un marco de referencia en donde se presentan las tecnologías de la Manufactura 4.0. En el centro del marco se colocan las “tecnologías front-end” que consideran la transformación de las actividades manufactureras en base a tecnologías emergentes y en la forma en que se ofrecen los productos. Este mismo marco considera la forma en que se entregan las materias primas y el producto y las nuevas formas en que los empleados realizan sus actividades tomando en cuenta las llamadas “tecnologías emergentes” [24]. Las tecnologías frontales se refieren a las necesidades operativas y del mercado, y tienen un propósito de aplicación final para la cadena de valor de las empresas. Las tecnologías frontales se soportan en las llamadas tecnologías base (ver Figura 4), que comprenden tecnologías que proporcionan conectividad e inteligencia para las tecnologías “front-end”. Las tecnologías base son: el Internet de las cosas, la nube, grandes datos y la analítica [24].

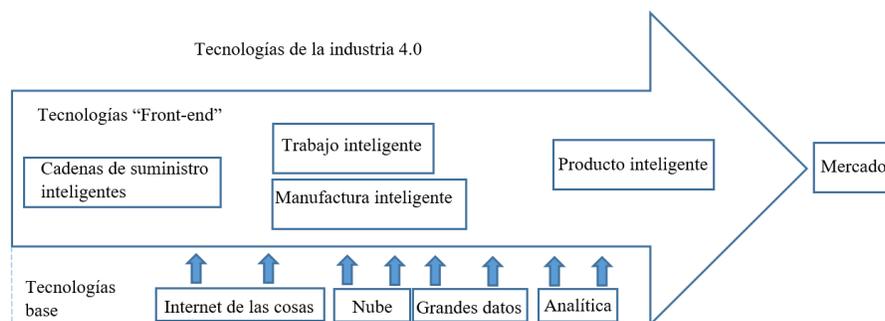


Figura 4. Marco conceptual de las tecnologías de la industria 4.0 [24].

3. Los sistemas ciber-físicos, los gemelos digitales y la Inteligencia Artificial

Los sistemas ciber-físicos son el núcleo de la Industria 4.0 [25], por lo que es necesario conocer sus generalidades para poder ubicar rutas en la educación del ingeniero mecatrónico. El término ciber-físico fue descrito y acuñado por primera vez por la National Science Foundation (NSF) en los Estados Unidos alrededor del año 2006 [26]. Las entidades ciber-físicas son descritas como cualquier entidad compuesta por elementos físicos y cibernéticos que interactúan de forma autónoma entre sí, con o sin supervisión humana [27]. Existe una gama de entidades ciber-físicas que se pueden observar en actividades industriales actualmente, por ejemplo, robots, máquinas de medición por coordenadas, celdas de manufactura, sistemas CIM, centros de maquinado, sistemas de adquisición de datos, sistemas SCADA, entre otros.

3.1 Características de los sistemas ciber-físicos

La infraestructura física de las empresas, sistemas y organizaciones pueden interactuar con elementos de señalización y, estos a su vez, pueden ser procesados por computadoras lo que permite contar con un control y monitoreo que pueden ser manejados por sistemas cibernéticos. Estos sistemas son circuitos de retroalimentación que impactan los procedimientos informáticos y viceversa, lo que resulta en una mejor adaptabilidad, resiliencia, escalabilidad y seguridad de las instalaciones físicas [28]. No existe una definición generalizada de los sistemas ciber-físicos. A continuación, se presentan tres definiciones de dicho concepto:

- Los CPS se pueden definir como las integraciones de computación, redes y procesos físicos. Las computadoras y las redes integradas monitorean y controlan los procesos físicos, con ciclos de retroalimentación donde los procesos físicos afectan los cálculos y viceversa [29].
- Los Sistemas Ciber-físicos (CPS) son sistemas de entidades computacionales colaboradoras en conexión intensiva con el mundo físico circundante y sus procesos en curso, proporcionando



y utilizando, al mismo tiempo, los servicios de acceso y procesamiento de datos disponibles en Internet [30].

- Un sistema ciber-físico (CPS) se define como un sistema con sistemas constituyentes en red integrados, que son independientes y operables. Los sistemas constituyentes están conectados en red durante un periodo de tiempo para lograr un determinado objetivo superior, más comúnmente utilizado para lograr una mayor productividad de fabricación [31].

La Figura 5 muestra un ejemplo de un sistema ciber-físico.

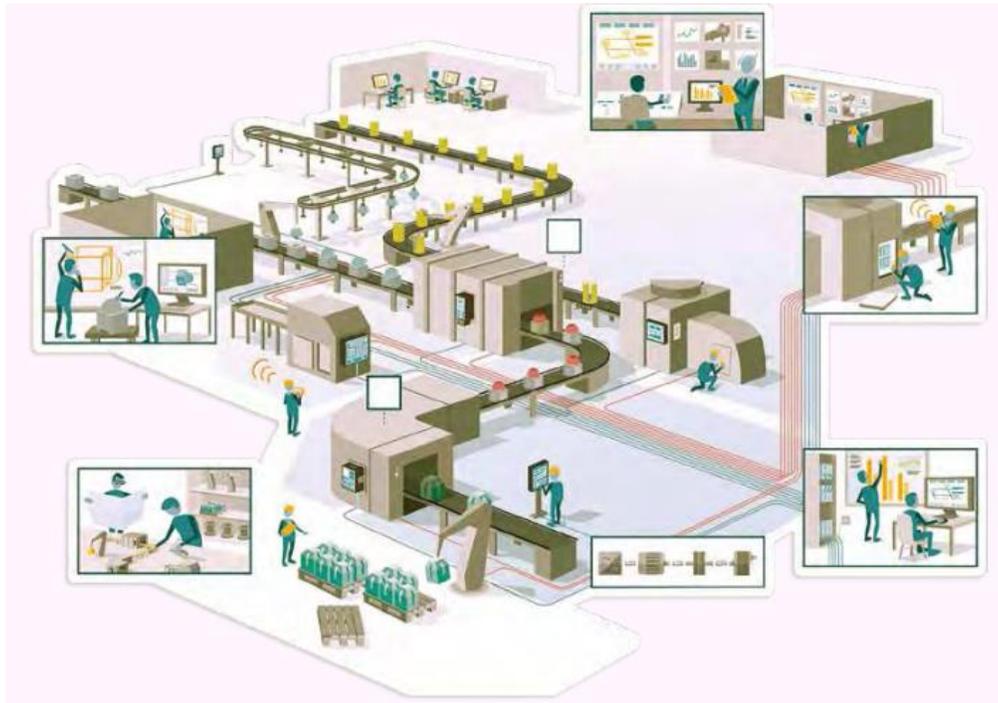


Figura 5. Ejemplo de un sistema ciber-físico [32].

La principal característica de un CPS es su capacidad para fusionar los mundos físico y virtual, en particular, a través de su software integrado. Los CPS pueden hacer lo siguiente [33]:

- Capturar datos de sensores y almacenarlos en servidores locales o en arquitecturas de nube;
- Impulsar procesos físicos mediante actuadores;
- Conectarse con otros CPS;
- Interactuar con máquinas y seres humanos;
- Proporcionar una respuesta en tiempo real a los estímulos generados tanto por el entorno circundante como por el propio CPS.

Algunas características claves de los CPS incluyen [34]:

- Sistema de sistemas: CPS consta de muchos subsistemas con interacciones complejas entre ellos;
- Nuevas interacciones entre control, comunicación y computación: se necesita un diseño integrado para lograr operaciones autónomas altamente automatizadas;
- Acoplamiento físico y cibernético impulsado por la aplicación: el elemento de la informática cibernética debe estar estrechamente acoplado con los sistemas físicos del mundo real mediante la incorporación de las características clave de los dominios de la aplicación.



Las aplicaciones de los CPS incluyen la automatización, sistemas de manufactura, dispositivos médicos, sistemas militares, vivienda asistida, control y seguridad del tráfico, control de procesos, generación y distribución de energía, la conservación de energía, HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado), aviones, la instrumentación, la gestión del agua, sistemas de trenes, seguridad física (control de acceso y vigilancia), gestión de activos y la robótica distribuida (tele presencia, telemedicina) [35]. La Figura 6 muestra un esquema simple de un sistema ciber-físico.

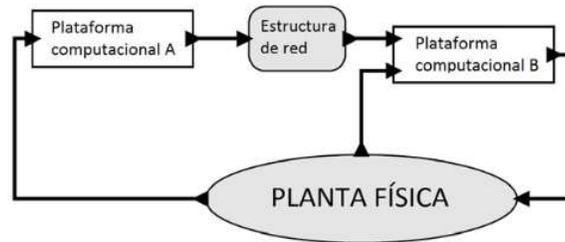


Figura 6. Estructura simple de un sistema ciber-físico [36].

Al igual que su definición, los sistemas ciber-físicos pueden ser diseñados utilizando diversas metodologías. Por ejemplo, la “metodología basada en modelos” se utiliza para tal propósito [37]. Los pasos de dicha metodología son los siguientes:

- Paso 1: Expresar el problema.
- Paso 2: Modelar los procesos físicos.
- Paso 3: Caracterizar el problema.
- Paso 4: Derivar un algoritmo de control.
- Paso 5: Seleccionar modelos de cálculo.
- Paso 6: Especificar el hardware.
- Paso 7: Simular.
- Paso 8: Construir.
- Paso 9: Sintetizar el software.
- Paso 10: Verificar, validar y probar.

La Figura 7 muestra una propuesta de “diseño iterativo”, distinta a la metodología basada en modelos, para el diseño de sistemas ciber-físicos [38, 39].

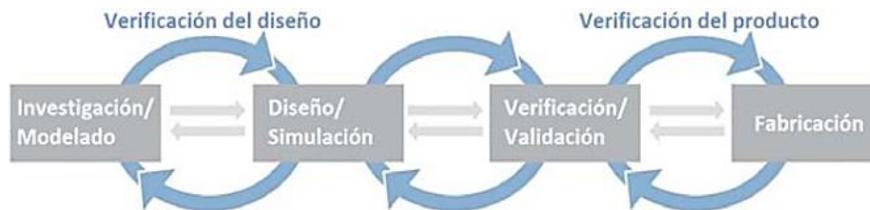


Figura 7. Metodología iterativa para el diseño de un sistema ciber-físico [38].

3.2 Gemelos digitales

Una de las tecnologías en la que se soportan los sistemas ciber-físicos es la simulación, descrita como la imitación del comportamiento de las propiedades de un sistema. Uno de los conceptos más importantes dentro de los CPS son los Gemelos Digitales (DT, por sus siglas en inglés) que usan a la



simulación como parte de sus procesos. En el curso de la última década, el despliegue de las capacidades de los DT se ha acelerado debido a una serie de factores [40]:

- 1) Simulación.
- 2) Nuevas fuentes de datos.
- 3) Interoperabilidad.
- 4) Visualización.
- 5) Instrumentación.
- 6) Plataforma.

La visión del DT en sí se refiere a un completo examen físico y a la descripción funcional de un componente, producto o sistema, que incluye más o menos toda la información que podría ser útil en la actual y las posteriores fases del ciclo de vida [41]. El DT se define como "una representación digital formal de algún activo, proceso o sistema que captura atributos y comportamientos de esa entidad adecuados para la comunicación, el almacenamiento, la interpretación o el procesamiento dentro de un contexto determinado" por el consorcio de internet industrial [42]. Entre el DT y su réplica física debe haber comunicación. Hay principalmente tres tipos de procesos de comunicación que deben diseñarse [43]:

- 1) Entre el gemelo físico y el virtual.
- 2) Entre el DT y diferentes DT del entorno circundante.
- 3) Entre el DT y los expertos del dominio, que interactúan y operan en el DT, a través de interfaces utilizables y accesibles.

Las propuestas de diseño de los gemelos digitales son muchas, una de ellas se describe a continuación [44]:

- 1) La observación y registro estadístico del proceso real, en forma ordenada y cronológica según su ocurrencia (ver Figura 8).
- 2) Realizar el análisis de todos los datos observados para conocer el comportamiento.
- 3) Solo después de haber realizado los dos pasos anteriores, se puede crear en la computadora el modelo, la simulación o el gemelo digital del proceso.
- 4) Se debe validar lo modelado contra lo real y sólo si los resultados de este son similares al real se puede aprobar.
- 5) Posteriormente a la aprobación es posible generar todos los diferentes cambios para conocer el nuevo comportamiento del proceso.

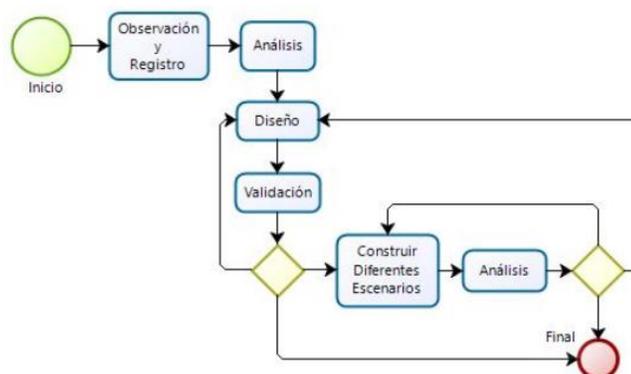


Figura 8. Pasos para el diseño de un modelado, simulación o gemelo digital [44].

Los gemelos digitales tienen diversas aplicaciones, entre las que destacan la industria del acero, la industria aeronáutica (ver Figura 9), en las empresas de la salud, en la industria textil y en la industria de la producción y la manufactura, entre otros.



Figura 9. Gemelo digital de una turbina [45].

En general los sistemas ciber-físicos se entienden desde el punto de vista de la integración que combina sistemas o procesos que se presentan en la realidad con procesos computacionales, en tanto que los gemelos digitales o copia digital se usan en procesos de mejora y optimización en tiempo real. Esto implica que el gemelo digital se relaciona con su contraparte física de dos maneras: 1) Recibe de él información generalmente de sensores y 2) La información de valor o procesada de la copia digital se le envía a la parte física para que logre objetivos concretos.

3.3 Algunas consideraciones sobre la Inteligencia Artificial en la Industria 4.0

La transformación más significativa relacionada con la forma en que se fabrican los productos es la digitalización. La cuarta revolución industrial tiene como objetivo optimizar la tercera revolución industrial computarizada (Industria 3.0). Esto requiere el desarrollo de equipos inteligentes con acceso a más datos, por lo que se vuelven más eficientes y productivos al tomar decisiones en tiempo real [46]. Para esta nueva era industrial revolucionaria, hay un concepto que se sigue repitiendo, el cual puede reducirse a la *autoconciencia de la tecnología*; un atributo que está directamente relacionado con lo que la Inteligencia Artificial (IA) pretende lograr: *la creación de sistemas que puedan percibir su entorno y, en consecuencia, puedan tomar acciones para aumentar las posibilidades de éxito* [47]. Existe una gran influencia de la Inteligencia Artificial en la Industria 4.0, desde el proceso del trabajo hasta el proceso de fabricación la Inteligencia Artificial ha adquirido un lugar especial. Son abundantes las preguntas que, tras la llegada de la Inteligencia Artificial se formularan, cómo, por ejemplo, ¿Habrán un gran impacto en el empleo? [48], entre otras posibles implicaciones negativas. La Inteligencia Artificial Industrial se distingue dentro del campo de la Inteligencia Artificial en cinco dimensiones particulares [49]:

- 1) Infraestructuras: con respecto al hardware y software, hay un gran énfasis en las capacidades de procesamiento en tiempo real, asegurando confiabilidad de grado industrial con altos requisitos de seguridad e interconectividad;
- 2) Datos: La IA industrial requiere de datos caracterizados por su gran volumen, variedad, alta velocidad, provenientes de diversas unidades, productos, regímenes, etc.
- 3) Algoritmos: Requiere de la integración de conocimientos físicos, digitales y heurísticos y de una alta complejidad derivada de la gestión, implementación y gobernanza de modelos.
- 4) Toma de decisiones: Dado el entorno industrial, la tolerancia al error es generalmente muy baja, siendo extremadamente importante el manejo de la incertidumbre. La eficiencia es de especial importancia para problemas de optimización a gran escala.
- 5) Objetivos: La IA industrial aborda principalmente la creación de valor concreto a través de una combinación de factores como la reducción de desechos, la mejora de la calidad, el rendimiento aumentado del operador o los tiempos de aceleración.

Algunas de las principales herramientas y modelos de la Inteligencia Artificial se resumen a continuación: Las Redes Neuronales, el Procesamiento del Lenguaje Natural, la Ingeniería del



Conocimiento, los Sistemas Expertos, los Algoritmos, Evolutivos, la Lógica Difusa, Deep Learning, entre otros.

4. Rutas a seguir en la futura educación en Mecatrónica.

Sin lugar a dudas la cuarta revolución industrial no solo traerá implicaciones en la producción sino también en otras áreas como la educación. La Ingeniería Mecatrónica es una carrera que, por su naturaleza interdisciplinaria y su campo de acción, deberá modificar sus planes de estudio para poder alcanzar los conocimientos y las aplicaciones necesarias que se requieran para resolver los problemas dentro del contexto de la Manufactura 4.0. Sin embargo, es preciso tomar en cuenta que, aunque ya están vigentes productos, sistemas y procesos nuevos y novedosos de la Industria 4.0, el mundo se encuentra en una transición entre una revolución y otra, por lo que no es posible un cambio tecnológico acelerado en muchos países que incluso todavía siguen atrasados en la Manufactura 3.0, ni tampoco una transición disruptiva en la educación. Actualmente se habla de Educación 4.0 la cual fomenta la utilización de tecnologías disruptivas para optimizar el aprendizaje y, en consecuencia, proporcionar soluciones innovadoras a problemas reales y complejos. Tiene como objetivo capacitar a un ser integral y multifuncional para lograr su autorrealización de manera permanente. En resumen, se intenta la construcción de conocimientos, habilidades y actitudes para la vida, el trabajo y la escuela [50]. Otros autores plantean a las competencias 4.0 como soporte en la educación 4.0 (ver Figura 10).

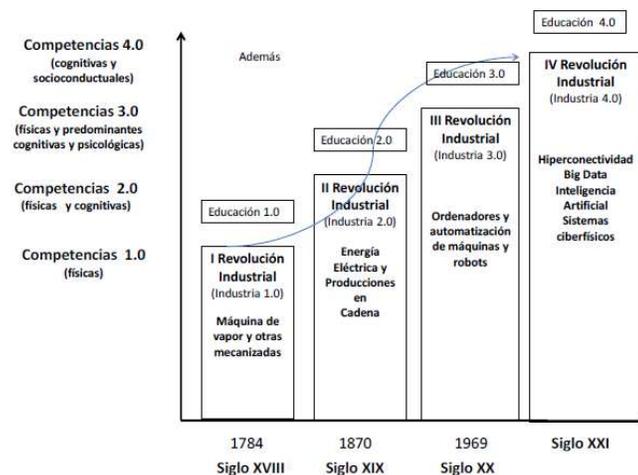


Figura 10. Evolución de la industria, educación y las competencias [51].

Sin embargo, más allá de las propuestas de modelos educativos novedosos, es necesario realizar los cambios que se requieran en la educación en ingeniería de manera gradual y considerando los aspectos tecnológicos de cada país. Los estudios realizados para ubicar a las ingenierías en el contexto de la Manufactura 4.0 son a menudo ideas o propuestas, debido a que no es posible definir rutas seguras para la transformación de los contenidos. Para el caso de la Ingeniería Mecatrónica, es posible trazar rutas a manera de guías que permitan sistematizar los planes de estudio para que contemplen temas de la Industria 4.0.

A) Rutas tecnológicas:

- 1) Promover el estudio de la Inteligencia Artificial no solo como materia base, sino como contexto y ejemplos en otras materias.
- 2) Promover las generalidades de los nueve pilares que soportan a la Manufactura 4.0 en materias específicas o en proyectos de otras materias.



- 3) Actualizar las materias de programación y motivar su estudio sistemático.
- 4) Promover el estudio de los métodos de optimización en los proyectos mecatrónicos, ya que son la base para el desarrollo de proyectos en el contexto de la Manufactura 4.0.
- 5) Promover el desarrollo de sistemas ciber-físicos y gemelos digitales en las distintas materias de la carrera, así como en los trabajos de tesis.
- 6) Promover el desarrollo de modelos matemáticos relacionados con los sistemas mecatrónicos ya que estos representan la base de la simulación.
- 7) Actualizar la infraestructura educativa en forma gradual en la carrera de Mecatrónica buscando desarrollar tecnología propia.
- 8) Afianzar los aprendizajes en los campos del conocimiento que integran a la mecatrónica buscando el uso integrado de software.

B) Rutas pedagógicas:

- 1) Promover la Educación Basada en Competencias en la educación en Mecatrónica.
- 2) Adoptar las metodologías activas en los aprendizajes, como el Aprendizaje Basado en Proyectos.
- 3) Reforzar las competencias específicas con temas de la Manufactura 4.0.
- 4) Promover las competencias digitales.

5. Conclusiones

En este artículo se han descrito algunas consideraciones importantes sobre la Manufactura 4.0, los sistemas ciber-físicos y algunas posibles rutas a seguir para mejorar los planes de estudio de los ingenieros mecatrónicos. Las principales conclusiones se resumen en los puntos siguientes:

- La Manufactura 4.0 realmente es una nueva revolución industrial que tiene implicaciones importantes en los sistemas productivos actuales y en la educación, por lo que es pertinente elaborar estudios especializados sobre sus impactos positivos y negativos en las empresas y en sus cadenas de proveeduría, de manera que la información evaluada les proporcione a los gobiernos directrices para el desarrollo de una política pública industrial actualizada. En México, es necesario que todos los estados promuevan iniciativas y políticas públicas para que le puedan hacer frente a los desafíos de la Industria 4.0. y aprovechar las ventajas que el país tiene al ser vecino de los Estados Unidos y al ser socio del T-MEC.
- A pesar de que las tecnologías que sustentan a la Manufactura 4.0 son de hecho conocidas, es necesario darles un enfoque de integración y direccionamiento que permitan considerarlas en el contexto de la nueva revolución industrial.
- El estudio de los sistemas ciber-físicos y los gemelos digitales debe ser abordado con prioridad en los planes de estudio de las universidades, puesto que estos representan el corazón tecnológico de la Industria 4.0.
- Es necesaria una contextualización general de la nueva revolución industrial para poder diseñar o rediseñar nuevos planes de estudios de las ingenierías, principalmente en Mecatrónica, cuyas unidades de competencias puedan ser las adecuadas para que los egresados puedan hacer frente a los retos que impone la Manufactura 4.0.

Referencias

- [1] Hernández G.M., Habib L., García F.A., y Montemayor F. (2019). *“Industry 4.0 and Engineering Education: An Analysis of Nine Technological Pillars Inclusion in Higher Educational Curriculum”*. In: García Alcaraz J., Rivera Cadavid L., González-Ramírez R., Leal Jamil G., Chong Chong M. (eds) *Best Practices in Manufacturing Processes*. Springer, Cham. 2019.
- [2] Trstenjak M., Opetuk T., Pavković D., Zorc D. (2020). *“Industry 4.0 in Croatia – Perspective and Industrial Familiarity with the (New) Digital Concept”*. In: Wang L., Majstorovic V., Mourtzis D.,



- Carpanzano E., Moroni G., Galantucci L. (eds) Proceedings of 5th International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 2020.
- [3] Zhong R, Xua X, Klotz E, y Newmanc, S. “*Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review*”, *Engineering*, 3, pp. 616-630. 2020.
- [4] Vaidyaa S, Ambadb A y Bhoslec S. “*Industry 4.0 – A Glimpse*”, *Procedia Manufacturing*, 20, pp. 233-238, 2018.
- [5] Görçün, O.F. “*Industry 4.0*”, pp. 1–199. Beta Publisher. 2018.
- [6] Lu Y. “*Cyber Physical System (CPS)-Based Industry 4.0: A Survey*”, *Journal of Industrial Integration and Management*, 2, (3) pp. 1750014. 2017.
- [7] Hyun S, Kyoung C, y Chang O. “*SVM-Based Dynamic Reconfiguration CPS for Manufacturing System in Industry 4.0*”, *Wireless Communications and Mobile Computing, Hindawi*. Article ID5795037, 2018 <https://doi.org/10.1155/2018/5795037>
- [8] Rüßmann M., et al. “*Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries*”. Boston Consulting Group (BCG), pp.1-14. 2015
- [9] Lee J, Davari D, Singh J, y Pandhare V. “*Industrial Artificial Intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems*”, *Manufacturing Letters*, 18, pp. 20-23. 2018.
- [10] Bonada F, Echeverria L, Domingo X y Anzaldi G. “*AI for Improving the Overall Equipment Efficiency in Manufacturing Industry*”, Chapter 5. New Trends in the Use of Artificial Intelligence for the Industry 4.0. Edited by Luis Romeral Martínez, Roque A. Osornio Rios and Miguel Delgado Prieto, Intechopen, pp. 79-97. 2020.
- [11] Ministry of Economy,” *Crafting the future: a roadmap for industry 4.0 in Mexico*”, pp. 1-94, Firts edition. 2016.
- [12] Mapa de Ruta. “*Ecosistema de Innovación iQ4.0*”, CIMAA. pp. 1-119. 2018. Recuperado el 1 de diciembre de 2021 de: <https://www.uteq.edu.mx/files/Doc.%20Final%20IQ4%20V5.pdf>
- [13] Pfeiffer S. “*The Vision of “Industrie 4.0” in the Making—a Case of Future Told, Tamed, and Traded*”, *Nanoethics*, 11, pp. 107–121. 2017.
- [14] World Economic Forum (WEF). “*The future of jobs: Employment, skills and workforce strategy for the fourth industrial revolution*” (Geneva). 2016. Available at: http://www3.weforum.org/docs/WEF_Future_of_Jobs.pdf
- [15] Strandhagen J, Alfnes E, Strandhagen J, y Vallandingham L. “*The fit of Industry 4.0 applications in manufacturing logistics: a multiple case study*”, *Adv. Manuf.* pp. 1-15. 2017.
- [16] Lambrechts W., Sinha S., Marwala T. “*The Global South and Industry 4.0: Historical Development and Future Trajectories*”. In: Monyae D., Ndzendze B. (eds) *The BRICS Order*. International Political Economy Series. Palgrave Macmillan, Cham. 2021 https://doi.org/10.1007/978-3-030-62765-2_11
- [17] Caglar T, y Teker S. “*Industrial revolutions and its effects on quality of life*”, *Global Business Research Congress*, 56, pp.304-311. 2019.
- [18] Junta de Andalucía, (s.f.). Modelo de madurez digital del sector industrial, Junta de Andalucía. https://www.andaluciaesdigital.es/documents/398962/3416868/Modelo+madurez+digital+industrial/844_bee1c-c2dd-462e-813f-ff1670fd8295
- [19] Hermann M, Pentek T, Otto B. “*Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review*”. Working Paper, No. 01-2015. Dortmund, Germany: Technical University of Dortmund. 2015.
- [20] Lee J, Bagheri B, Kao HA. “*A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems*”. *Manuf Lett*, 3, pp. 18–23. 2015.
- [21] Oztemel E y Gursev S. “*Literature review of Industry 4.0 and related technologies*”, *Journal of Intelligent Manufacturing*, pp. 1-56. 2018. <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8>
- [22] Rüßmann, M., M. Lorenz, P. Gerbert, M. Waldner, J. Justus, P. Engel, y M. Harnisch. “*Industry 4.0*”. The Boston Consulting Group. 2015.
- [23] Saturno M, Pertel M, Deschamps F., y De Freitas Rocha E. “*Proposal of an automation solutions architecture for Industry 4.0,*” *Destech Trans. Eng. Technol. Res.*, 2017. doi: 10.12783/dtetr/icpr2017/17675.
- [24] Frank A. G, Dalenogare L, Ayala, N.F. “*Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies*”, *International Journal of Production Economics*, 210, pp. 15-26. 2019.



- [25] Mladineo M, Veza I, 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.
- [26] Lee E, y Sanjit A. “Introduction to Embedded Systems: A Cyber-Physical Systems Approach”, MIT Press, 1st Edition, 2011.
- [27] DeSmit Z, Elhabashy A. E, Lee J. Wells L y Camelio J.A. “Cyber-Physical Vulnerability Assessment in Manufacturing Systems”, *Procedia Manufacturing*, 5, pp. 1060-1074. 2016.
- [28] Da X. L., & Duan L. “Big data for cyber physical systems in industry 4.0: A survey”. *Enterprise Information Systems*, 13(2), pp. 148–169. 2019.
- [29] Lee E. A. “Cyber physical systems: Design challenges Proc”. 11th IEEE Symposium on Object Oriented Real-Time Distributed Computing (Florida), pp 363-369. 2008.
- [30] Monostori L. “Cyber-physical Production Systems: Roots, Expectations and R&D Challenges”, *Procedia CIRP*, 17, pp. 9–13. 2014.
- [31] Lier B. “Can Cyber-Physical Systems Reliably Collaborate within a Blockchain?”. *Metaphilosophy*, 48, 5, pp. 698-711. 2017.
- [32] Campos D. U. “¿Qué son los sistemas ciberfísicos?”, *Mirador de la Ciencia*, Universitarios Potosinos, pp. 36-37. 2020.
- [33] Nota G, MatontiG, Marco Bisogno M y Nastasia S. “The contribution of cyber-physical production systems to activity-based costing in manufacturing. An Interventional Research Approach”, *International Journal of Engineering Business Management*, 12, pp. 1–14. 2020.
- [34] Lin W.D., Low Y.H., Chong Y.T., y Teo C.L. “Integrated Cyber Physical Simulation Modelling Environment for Manufacturing 4.0”, *Proceedings of the 2018 IEEE IEEM*, pp. 1861-1865. 2018.
- [35] Schuh G. Sm@rt logistics: Intelligent networked systems, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 55, (1), pp. 505-508. 2006.
- [36] Lee E. “The Past, Present and Future of Cyber-Physical Systems: A Focus on Models”, *Sensors*, 15 (3), 2015: pp. 4837-4869.
- [37] Jensen J, Chang D, Lee E. “A Model-Based Design Methodology for Cyber-Physical Systems”, 2011 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, IEEE. Turkey. 2011.
- [38] Kornerup J. “A vision for overcoming the challenges of building cyber-physical systems”. National Science Foundation Workshop on Critical Physical Infrastructures. 2006.
- [39] Saumeth K.J., Pinilla F, Fernández A, Muñoz D.J, y Cruz L. “Sistema Ciber-Físico de una CNC para la producción de circuitos impresos”, IV Congreso Internacional de Ingeniería Mecatrónica y Automatización - CIIMA 2015, Envigado (Colombia). pp. 155-165. 2015.
- [40] Deloitte Insights. “Digital twins – On: Tech Trends 2020”, Deloitte Insights, January 2020. <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/tech-trends/2020/digital-twin-applicationsbridging-the-physical-and-digital.html>
- [41] Boschert S., Rosen R. (2016) Digital Twin—The Simulation Aspect. In: Hehenberger P., Bradley D. (eds) *Mechatronic Futures*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_5
- [42] ian D, Tian M, Qing Z, Zhen L y Ji-Y. “Design and application of digital twin system for the blade-rotor test rig”, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01824-w>
- [43] Barricelli, B, Casiraghi E, y Daniela Fogli D. “A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications”. *IEEE Access*. pp. 1-20. 2019. DOI 10.1109/ACCESS.2019.2953499.
- [44] Troncoso A. “El modelado, la simulación de procesos y los gemelos digitales: soporte para la toma de decisiones”. *VirtualPRO*, 227, pp. 1-4. 2020.
- [45] ABB Systems. 2021 Obtenido de: <https://new.abb.com/news/detail/80770/the-digital-twin-from-hype-to-reality>.
- [46] Souza, M. L. H., C. Andre da Costa, G. de Oliveira Ramos, Rodrigo da Rosa Righi. A survey on decision-making based on system reliability in the context of Industry 4.0. *Journal of Manufacturing Systems* 56, pp. 133–156. 2020.
- [47] Dopico, M, Gómez A, De la Fuente, D, García N, Rosillo R. y Puche J. A vision of industry 4.0 from an artificial intelligence point of view. *Int'l Conf. Artificial Intelligence (ICAI'16)*. Pp. 407-413.



- [48] Janda R. *“Influence of artificial intelligence on industry 4.0”*, *International Journal of Advanced Science and Technology*, 29, (7), pp. 2120-2127. 2020.
- [49] Silva R, Jia X, Lee J, Sun K, Walter A, y Barata J. *“Industrial Artificial Intelligence in Industry 4.0 - Systematic Review, Challenges and Outlook”*, *IEEE Access*. 8, pp. 220121- 220139. 2020.
- [50] Flores D.M., Guzmán F.J., Martínez Y.M., Ibarra E, y Alvear E. *“Educación 4.0, origen para su fundamentación”*, 4th Virtual International Conference on Education, Innovation and ICT, pp. 655-659. 2019.
- [51] Cuesta A, e Igor Lopes I. *“Towards professional competences 4.0 in the Cuban company”*, *Revista Cubana de Ingeniería*, 11, (1) pp. 66-76. 2020.



Desarrollo de Hardware para el Aprendizaje del Manejo de Microcontroladores

Ramos Juárez Ulises Alejandro, Ramos Arreguín Juan Manuel✉, Jesús Carlos Pedraza Ortega y Marco Antonio Aceves Fernández

Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería
✉jsistdig@yahoo.com.mx

Resumen

Para un estudiante que se inicia en el manejo de microcontroladores, puede resultar un poco complicado el aprendizaje. Especialmente si no se tiene mucha experiencia en el manejo de componentes electrónicos o con la plantilla de prácticas. Se puede hacer uso de sistemas de desarrollo comerciales y existentes en el mercado, pero en ocasiones resultan ser costosos, están diseñados para un microcontrolador en particular, y generalmente sus terminales ya están conectadas para un propósito en particular, y difícilmente se pueden usar para otra finalidad. Una limitante adicional de usar sistemas de desarrollo es que el estudiante no realiza conexiones en la mayoría de los casos, por lo que resulta complicado que adquiera esta habilidad. En este trabajo se presenta la idea de desarrollo de una tarjeta electrónica para facilitar el aprendizaje de microcontroladores, cuidando que el estudiante adquiera la habilidad de realizar la conexiones entre componentes electrónicos. La tarjeta no usa un microcontrolador en particular, sino que el usuario puede usar cualquier microcontrolador, que cumpla con ser encapsulado tipo DIP con máximo 40 terminales. Como resultado, la tarjeta ha facilitado a los estudiantes la realización de las prácticas, así como con el desarrollo de un proyecto.

Palabras clave: Microcontrolador, sistemas de desarrollo, aprendizaje, facilidad.

1. Introducción

Actualmente, los dispositivos digitales tienen una gran importancia en el desarrollo tecnológico a nivel mundial. Algunos de estos dispositivos son: Arreglo de Compuertas Programables en Campo (FPGA, por sus siglas en inglés), Dispositivos Lógicos Complejos (CPLD, por sus siglas en inglés), microprocesadores, microcontroladores, entre otros. En el área de microcontroladores, se tienen dispositivos de 8 bits, 16 bits y 32 bits, por lo que es importante que el estudiante aprenda a trabajar con estos tipos de microcontroladores, pues son muy requeridos en la industria. En la actualidad, existe una gran variedad de fabricantes de microcontroladores, como se muestra en la tabla 1.

Las aplicaciones en la vida diaria van desde sistemas comerciales hasta nivel industrial. Las aplicaciones comerciales pueden ser refrigeradores, sistemas de entretenimiento, microondas puertas automáticas, tostadores, entre otros. Por otro lado, en la industria se usan para el desarrollo de detectores de humo, bombas de gas, teclados y ratones para computadora, domótica, entre otros. Pero también son muy importantes en la industria automotriz, donde los microcontroladores son aplicados para sistemas de frenos, control de las ventanas, control de la transmisión, control de clima, presión de los neumáticos, entre otros [1].

Por lo anterior, queda claro que en el medio educativo es muy importante que los estudiantes aprendan a manejar los microcontroladores. Manejar microcontroladores de 8 bits puede ser el inicio de este proceso, pero también es importante que aprendan a usar de 16 bits, e inclusive, de 32 bits. En



este sentido, se han desarrollado diversos trabajos, para apoyar a los estudiantes en el proceso de aprendizaje en la solución de problemas usando microcontroladores.

Tabla 1. Fabricantes de microcontroladores.

Fabricantes de microcontroladores				
AMCC	ELAN Microelectronics Corp.	Intel	Rabbit Semiconductor	Western Design Center
Altera	Energy Micro AS	Lattice Semiconductor	Renesas Technology	Ubicom
Analog Devices	EPSON Semiconductor	Microchip Technology	Silabs	Xemics
Atmel	Freescale Semiconductor	National Semiconductor	Silicon Motion	Xilinx
Charmed Labs	Fujitsu	NXP Semiconductors	STMicroelectronics	ZiLOG
Cypress MicroSystems	Holtek	NEC	Texas Instruments	
Dallas Semiconductor	Infineon	Parallax	Toshiba	

Montañez [1] muestra la importancia de establecer en el currículum de los estudiantes el manejo de los microcontroladores (MCU) y muestra una introducción al trabajo con MCU de motorola, el 68HC08 y el MC68HC908QY4.

Por otro lado, Farcas & Caltun [2], presentan un trabajo en el cual se usan sensores, actuadores y el sistema embebido basado en el microcontrolador Arduino para la solución de experimentos físicos, como son: Monitoreo de condiciones atmosféricas usando el sensor BME280, determinación de la velocidad del sonido usando un sensor ultrasónico, y un generador de formas de onda. De esta manera, los estudiantes y docentes pudieron aplicar la tecnología para estudiar diferentes efectos físicos.

Zamarreño menciona que la enseñanza de la electrónica puede ser divertida y motivante cuando se permite a los estudiantes desarrollar sus propios proyectos, con la supervisión adecuada. En su trabajo se presenta un caso de estudio donde en lugar de enseñar microcontroladores desde un punto de vista estrictamente académico, se pasa a una enseñanza de aprendizaje basado en proyectos. Como resultado, se incrementó la dedicación y motivación del estudiante en el semestre, obteniendo mejores resultados y calificaciones que en semestres previos [3].

Por todo lo anterior, se puede ver que la enseñanza de microcontroladores es importante en la preparación de los estudiantes en una carrera de ingeniería. En este trabajo que se presenta, se trata de apoyar a los estudiantes en el aprendizaje de la programación de microcontroladores.

2. Identificación de la necesidad

En la Universidad Autónoma de Querétaro, se imparte la asignatura de Programación Avanzada, dentro de la cual se enseña a los estudiantes a programar microcontroladores, en específico el PIC18F4550. Para poder trabajar con este microcontrolador, los estudiantes requieren de los siguientes elementos:

- Plantilla de prácticas, mejor conocido como protoboard.
- Programador para PIC (PICKit, PIC K150 USB, Master Prog, Volnia, entre otros).



- Microcontrolador PIC18F4550.
- Materiales diversos (resistencias, capacitores, oscilador o cristal, leds, entre otros).

Generalmente, cuando los estudiantes trabajan con una plantilla de prácticas, tienen alguno de los siguientes problemas:

- Conexiones erróneas.
- Falsos contactos.
- Uso de conexiones inadecuadas.
- Cuesta trabajo visualizar el circuito armado en la plantilla de prácticas.

Debido a lo anterior, es común que el estudiante se atrase en el trabajo varios minutos, horas o inclusive días, en lo que logran identificar y resolver el problema, con la consecuencia de un atraso en la entrega de la práctica.

Para apoyar a los estudiantes, se trabaja en una propuesta de metodología, la cual se muestra en la figura 1. El primer paso es identificar el problema que se desea resolver, y posteriormente comprender la manera de poderlo resolver. El siguiente paso, es proponer el circuito digital con las conexiones adecuadas a los componentes a usar. Ahora, se procede a diseñar el algoritmo o diagrama de flujo, para posteriormente escribir el programa, generar el archivo con el código máquina y programar el microcontrolador. Se realizan las pruebas, y se analiza si los resultados indican que se ha resuelto el problema. Si el problema se resolvió, entonces se termina el proceso y se documenta la solución.

A continuación, se muestran algunos puntos importantes que llevan a la implementación de la solución, considerando los problemas que tiene el estudiante en la implementación.

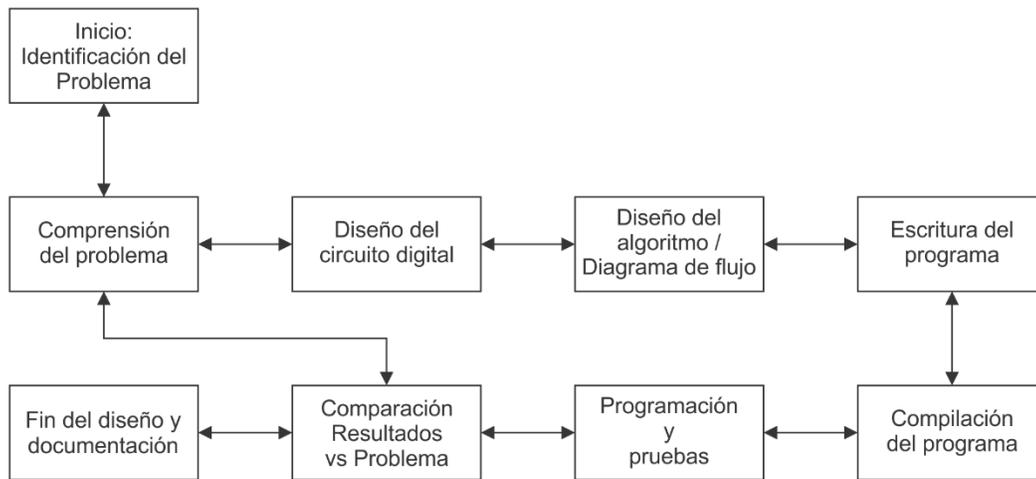


Figura 1. Propuesta de metodología para el trabajo con microcontroladores.

2.1 Solución de un problema.

El problema para resolver es la implementación de un contador en cuatro exhibidores de 7 segmentos. La propuesta del circuito se muestra en la figura 2, considerando a un microcontrolador PIC18F4550. Enseguida, el estudiante planea las conexiones en la plantilla de prácticas, y podría quedar como se muestra en la figura 3.

Sin embargo, es en este punto cuando los estudiantes tienen las mayores dificultades, pues dependen de que la plantilla de prácticas se encuentre en buenas condiciones. Es sabido que, si se usan componentes que tienen las terminales demasiado gruesas, por ejemplo, el diodo 1N4001, la lámina de conexiones de la plantilla puede dañarse, y cuando se conecte un cable o componente más



grosso, entonces podemos tener un falso contacto en ese punto. Otro de los problemas, suele ser realizar las conexiones de un nodo, en diferentes columnas de la plantilla. Todas estas situaciones llegan a ocasionar problemas a los estudiantes. Cuando las clases son presenciales, pueden tener fácilmente el apoyo del docente, pero en los tiempos actuales de la pandemia, y debido a que las clases han sido virtuales, se ha complicado en extremo el poder apoyar a los estudiantes en la solución de este tipo de problemas. Esto ha provocado un atraso en el desarrollo de las prácticas, o bien, en algunos casos, los ha desmotivado al aprendizaje.

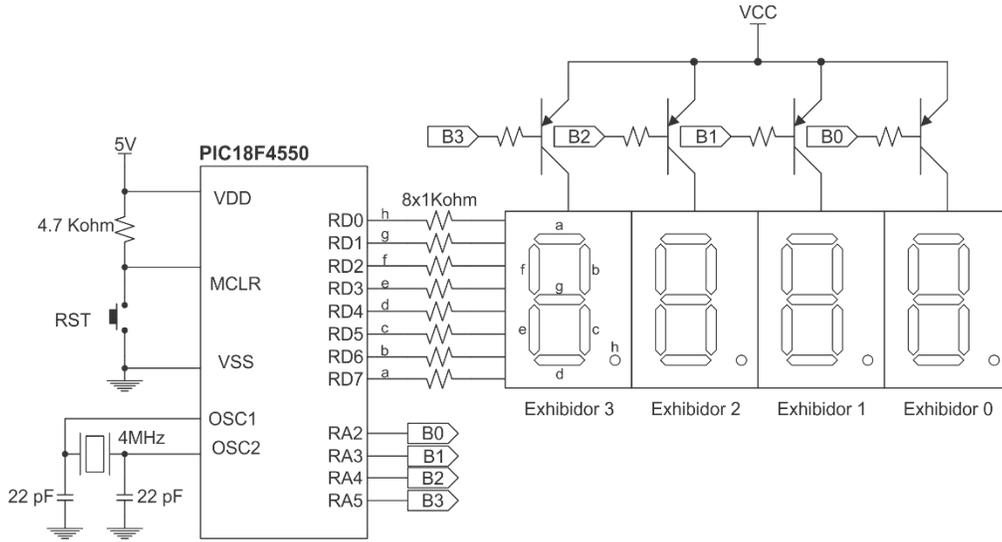


Figura 2. Propuesta de circuito para el manejo de 4 exhibidores de 7 segmentos.

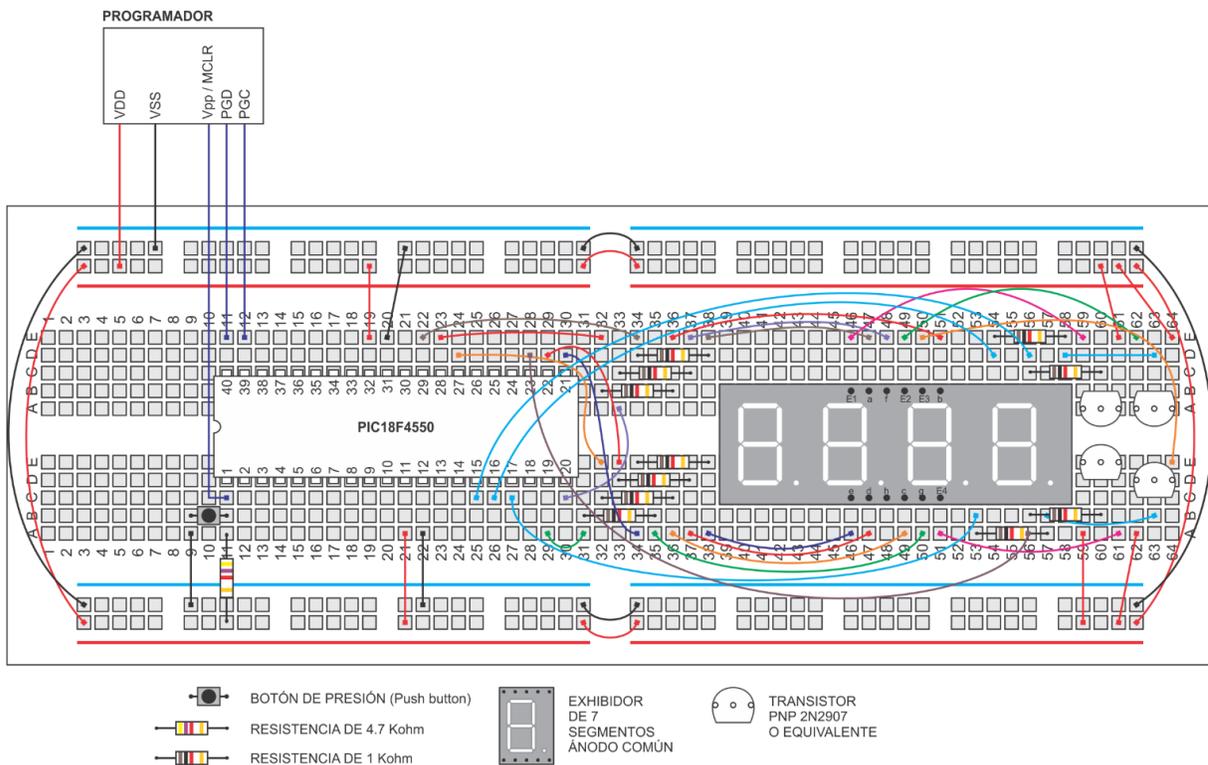




Figura 3. Propuesta de implementación del circuito para el manejo de 4 exhibidores de 7 segmentos.

Debido a lo anterior, se ha buscado alguna manera en que los estudiantes puedan desarrollar de una manera más rápida las prácticas de laboratorio, sin sacrificar el aprendizaje que el estudiante debe tener en la realización de conexiones entre dispositivos y componentes electrónicos.

2.2 Sistemas de desarrollo comerciales.

Para el desarrollo de soluciones basadas en microcontroladores, es común el uso de tarjetas de desarrollo basadas en microcontrolador. Estas tarjetas permiten probar el programa antes de pasar a producción. También se usan para realizar pruebas exhaustivas de software. Sin embargo, suelen ser caras, dependiendo de las prestaciones de cada tarjeta.

A continuación, se presentan algunos ejemplos, de la gran variedad de sistemas de desarrollo que existen actualmente.

2.2.1 Arduino UNO

Es una tarjeta de desarrollo basada en los microcontroladores Atmel AVR de 8 bits. Se pueden configurar las terminales para ser usadas como entradas analógicas, como entradas/salidas digitales, y otras aplicaciones. Su éxito es el desarrollo de la Interfaz de Desarrollo (IDE) de Arduino.

2.2.2 ESP32

Es un sistema embebido de bajo costo y bajo consumo de energía, basado en un microcontrolador Tensilica Xtensa LX6 con Wi-Fi y Bluetooth en modo dual. Incluye interruptores de antena incorporados, amplificador de recepción de bajo ruido, amplificador de potencia, filtros y módulos de administración de energía.

2.2.3 Miuva Pro

La tarjeta de desarrollo Miuva PRO cuenta con un microcontrolador PIC18F87J50 y tiene su propio programador/depurador, para que el usuario desarrolle el Firmware, mediante MPLAB, que es una herramienta de Microchip.

2.2.4 Alteri

La tarjeta de desarrollo Alteri se basa en el potente microcontrolador PIC18F4550, es usada para diseñar e implementar aplicaciones de electrónica y software. Se incorpora una alta variedad de periféricos para maximizar las funciones a implementar.

2.2.5 Comparación de los sistemas de desarrollo

En la tabla 2 se muestra una comparación de algunos sistemas embebidos.

Tabla 2. Comparación de sistemas embebidos.

Tarjeta	Fabricante	Microcontrolador	Terminales I/O	Precio	Versión	Año
Arduino Uno	Arduino	Atmega328P	16	\$426.93	Edición SHD	----
ESP32	Espressif Systems	Tensilica Xtensa LX6	24	\$323.17	32S	2016
Alteri	DIIGNAL	PIC18F4550	35	\$579.00	1.0	----
MiuvaPro	Intesc	PIC18F87J50	45	\$723.00	SKU MIUP8750	----



3. Desarrollo de la propuesta

La propuesta que se realiza es resultado de una serie de análisis, tanto de sistemas ya existentes, como de las prácticas de laboratorio que se realizan. La principal conclusión a que se llega es que los sistemas embebidos que se encuentran principalmente en el mercado son para un solo tipo de microcontrolador. También, las terminales se encuentran comprometidas para un uso muy específico, por ejemplo, manejo de leds, exhibidores de 7 segmentos, puertos de entrada/salida (I/O), líneas de programación, entre otros.

También se puede apreciar que, al estar las terminales ya conectadas para un propósito en particular, el estudiante no adquiere esa experiencia de realizar conexiones entre componentes. Por ejemplo, en planilla de prácticas, es muy común la conexión de leds sin resistencia, ocasionando problemas en el funcionamiento del hardware, debido a la cantidad de corriente que demanda el led, la cual es limitada por la resistencia. Además de arriesgar la integridad de los componentes electrónicos.

Algunos sistemas de desarrollo ya cuentan con el programador integrado en la tarjeta, además del microcontrolador, generalmente en encapsulado de montaje superficial. Esto puede ser bueno, pues ya no se debe preocupar por la adquisición del programador, pero tiene la desventaja de que en caso de daño de algún componente, especialmente del programador o microcontrolador, no es posible realizar la reparación de manera inmediata, y en el mejor de los casos, se debe recurrir al fabricante para esto, o en su defecto comprar un sistema nuevo.

Ante esto, se comenzó a trabajar en el diseño de alguna manera de poder apoyar al estudiante en el aprendizaje de los microcontroladores, independientemente del software y hardware a usar para la programación.

Al inicio se realizaron pruebas en placas perforadas, para poder apreciar mejor los componentes que el estudiante más pueda requerir, y verificar la funcionalidad. También se ha considerado la importancia de que el estudiante debe adquirir la experiencia de realizar conexiones entre componentes, y debe tener la facilidad de agregar conexiones hacia una plantilla de prácticas, en el caso de requerir componentes no considerados en la tarjeta.

Tomando como base inicial el microcontrolador PIC18F4550, se diseña la parte principal del hardware, como se muestra en la figura 4. Observe que el cristal no está directamente conectado hacia el microcontrolador U1, y lo mismo ocurre con el circuito de reinicio (reset). Esto es intencional, para que el estudiante tenga que realizar las conexiones de manera manual, usando los conectores P3 y P5 respectivamente, así como los conectores P1 y P2.

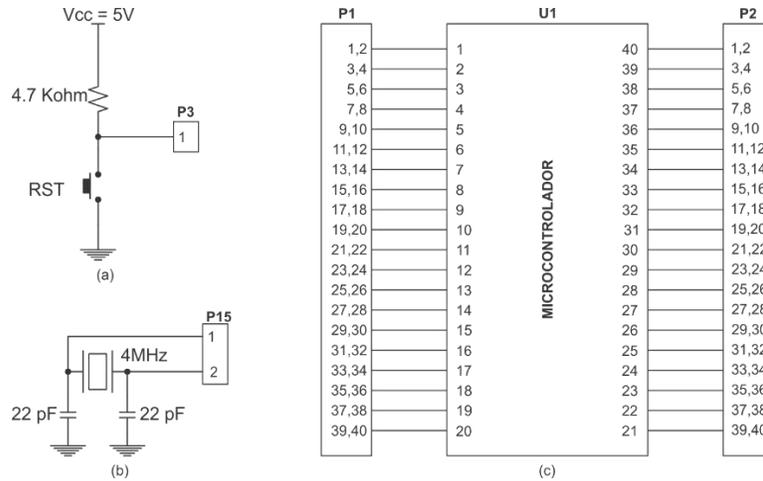


Figura 4. Parte principal del hardware. (a) Circuito de reset. (b) Cristal. (c) Microcontrolador.

Para agilizar el proceso de desarrollo de las prácticas, se considera necesario que se manejen interfaces para el usuario, de manera que el estudiante realice las conexiones necesarias. De esta manera, se tiene la libertad de elegir las terminales que se deseen conectar a cada terminal del microcontrolador. La mayoría de estas interfaces son típicas en los sistemas de desarrollo, habiendo agregado algunas que normalmente se usan en la asignatura.

Parte de estas interfaces son: interruptores y botones. Los botones entregan un 0 lógico mientras no sea presionado, y un 1 lógico cuando sea presionado. Estos se pueden ver en la figura 5.

Se agregan 10 leds en un encapsulado tipo DIP, para dar información visual al usuario. Esto se muestra en la figura 6.

Como interfaz para comunicación para el usuario, se agrega un conector para manejar una pantalla de cristal líquido (LCD, por sus siglas en inglés), un encapsulado de 4 exhibidores de 7 segmentos, así como el manejo de un teclado matricial. Esto se muestra en las figuras 7, 8 y 9 respectivamente.

Se agregaron 3 potenciómetros en arreglo de divisor de voltaje. Esto va a facilitar el realizar pruebas con los convertidores Analógico/Digital (AD) del microcontrolador (Figura 10).

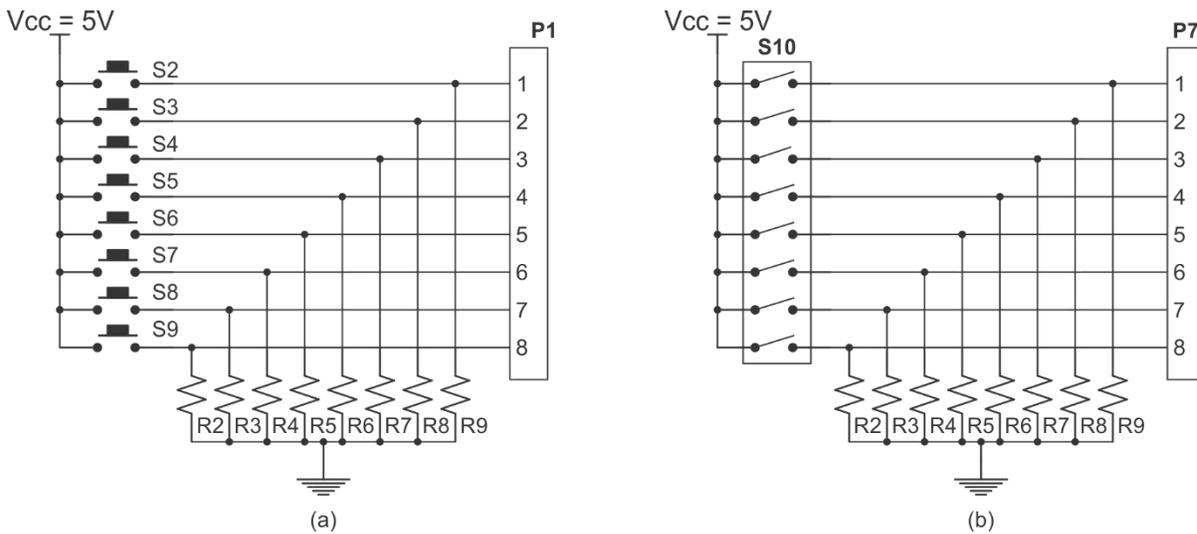




Figura 5. Interfaces con el usuario. (a) Interruptores de presión (pushbutton). (b) Interruptores de dos posiciones.

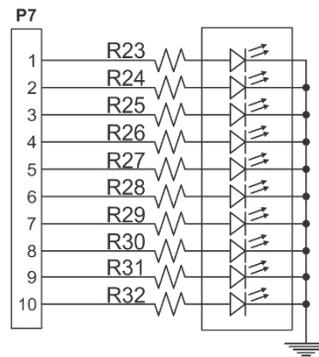


Figura 6. Uso de 10 leds como interfaz visual con el usuario.

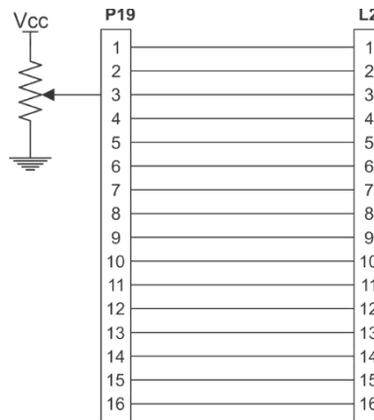


Figura 7. Conectores para manejar una pantalla LCD.

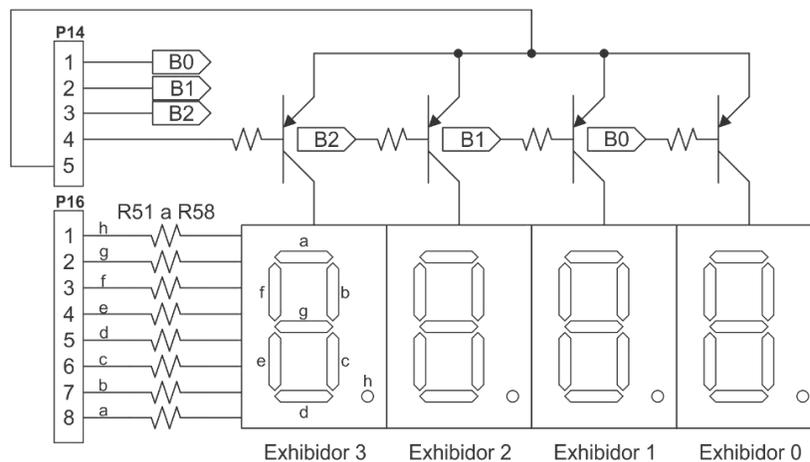


Figura 8. Uso de 4 Exhibidores de 7 segmentos en paralelo.

En la figura 8, es importante resaltar que se usa por defecto exhibidores de ánodo común, con transistores NPN 2N2907 o equivalente. Pero debido a la manera en que se plantean las conexiones, es posible que el usuario lo cambie por exhibidores de cátodo común, y los transistores sean 2N2222.

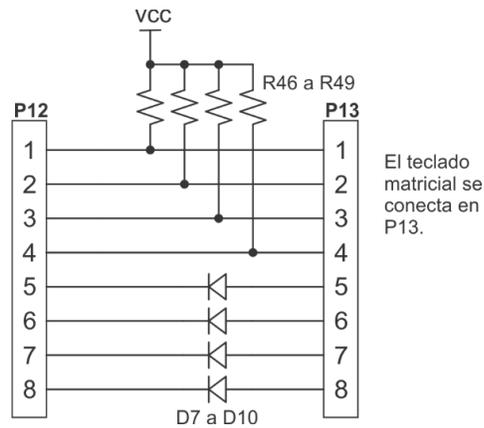


Figura 9. Conectores para manejar un teclado matricial hexadecimal.

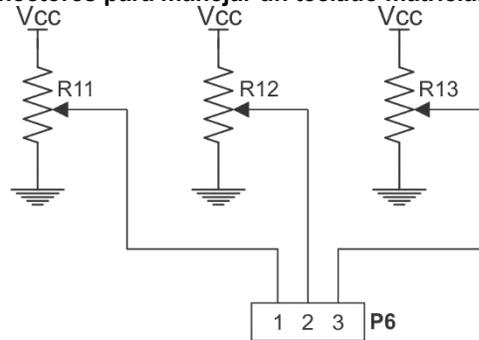


Figura 10. Potenciómetros en divisor de tensión para pruebas del convertidor A/D.

También se agregan transistores para el control de un motor a pasos, o para motores en general. Esto se puede ver en la figura 11. En la interfaz, la terminal 1 de P11 se usa para conectar el voltaje nominal del motor, y en la terminal 6 se conecta la tierra de la fuente usada.

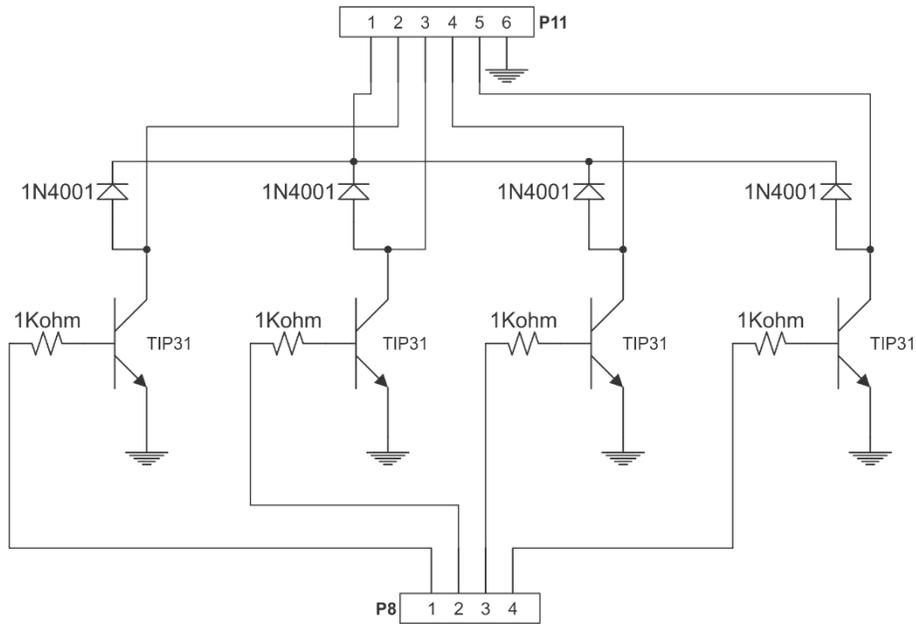


Figura 11. Interfaz para el manejo de motor a pasos.

Finalmente, se usa un conector auxiliar para el trabajo con un módulo Bluetooth, así como un conector para un puerto micro USB. Esto se muestra en la figura 11 y 12 respectivamente.

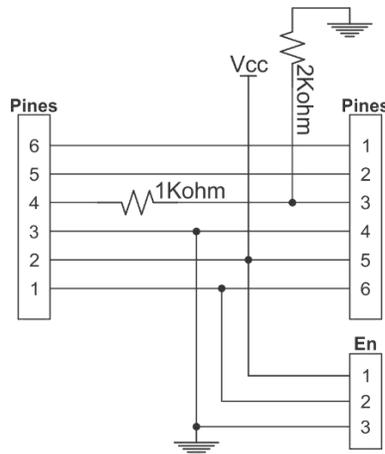


Figura 11. Conexiones para un módulo Bluetooth HC05.

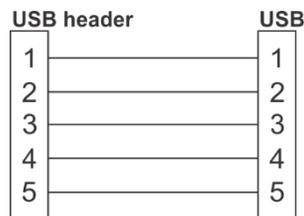


Figura 12. Conexiones para un conector micro USB.



3.1 Diseño del circuito impreso

Una vez definido las características y hardware que debe llevar la tarjeta, es necesario realizar el diseño del circuito impreso. Para esto, se usa el software Altium. Se cuida usar solamente doble cara, y ningún componente es de montaje superficial. Esto se debe a que la mayoría de los estudiantes de tercer semestre, no han aprendido a soldar anteriormente, y la actividad de soldar componentes de montaje superficial resulta más complicado que componentes normales, debido a que se tiene que controlar la cantidad de calor, el tiempo de soldado y el área de soldar. El resultado del diseño del circuito impreso se muestra en la figura 13.

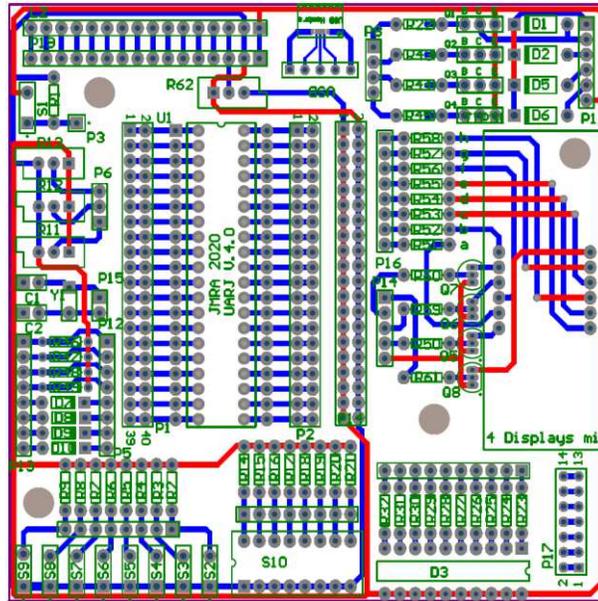


Figura 13. Circuito impreso diseñado.

El circuito tiene una medida de 10 x 10 cm. Se cuidó que tuviera estas medidas, pues resulta más económico mandar fabricar el circuito. En caso de ser más grande, el costo se disparaba de manera importante. Se ha considerado la posibilidad de que se pueda usar diversos encapsulados tipo DIP, máximo de 40 terminales. También se pueden usar componentes de 16 terminales. Esto se puede observar en la figura 14 y en la figura 15, donde se presenta una vista superior de la placa de circuito impreso fabricada, en la sección donde se coloca el microcontrolador.

La figura 16 muestra una imagen del sistema de desarrollo con los componentes soldados, así como la base para el microcontrolador. Se pueden apreciar los leds, los exhibidores de 7 segmentos, el conector para LCD, el teclado hexadecimal, entre otros componentes. Los postes en color verde representan la tierra, y los postes en color rojo se usan para conectar alimentación Vcc. Debido al espacio, no se instala un regulador de tensión, por lo que el estudiante debe tener cuidado al momento de conectar la terminal de voltaje en la tarjeta.

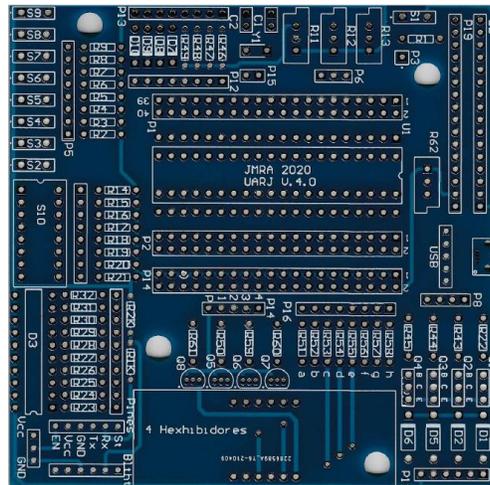


Figura 14. Circuito impreso diseñado.

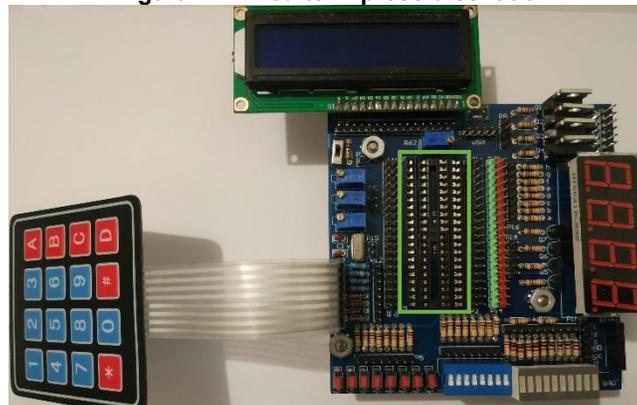


Figura 15. Sección para colocar el microcontrolador con encapsulado DIP.

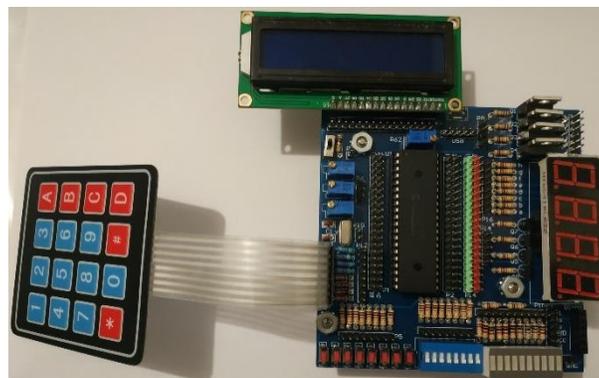


Figura 16. Tarjeta de desarrollo armada.

4. Resultados

Una vez armada la tarjeta, se comienzan a realizar pruebas, en este caso con el microcontrolador PIC18F4550, y se pudo constatar lo siguiente.

Debido a que ninguna de las terminales del sócalo del microcontrolador están pre-conectadas a otro componente, el estudiante debe realizar las conexiones, usando cables como los mostrados en la figura 17. Así mismo, los componentes como exhibidores, leds, interruptores DIP, pueden ser fácilmente cambiados en caso de daño.



Figura 17. Tipo de cable a usar en la tarjeta desarrollada.

Se realiza la prueba de comunicación entre la computadora y el microcontrolador, usando un programador PicKit 3, como se muestra en la figura 18. Si el programador es diferente, puede ser fácilmente conectado en caso de que esto sea posible.

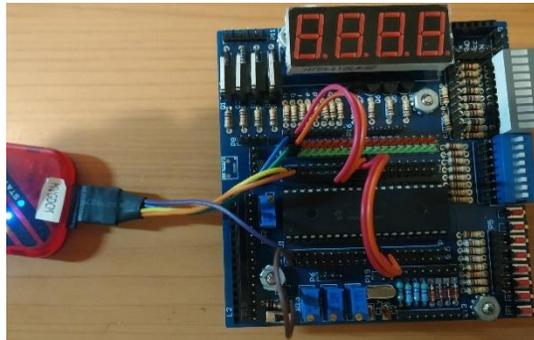


Figura 18. Tipo de cable a usar en la tarjeta desarrollada.

Si se requiere hacer uso de leds, solamente se deben realizar las conexiones respectivas, como se muestra en la figura 19.



Figura 19. Conexiones del microcontrolador hacia los leds.

En el caso del problema planteado en 2.1, la solución se muestra en la figura 20, donde se implementa la solución como se muestra en las figuras 2 y 3.

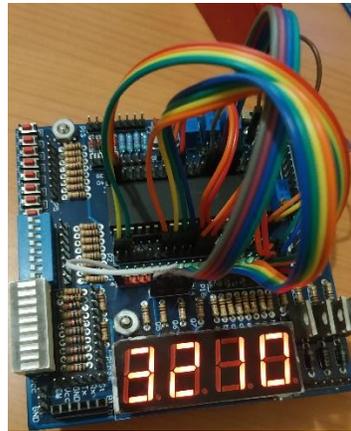


Figura 20. Implementación para el manejo de 4 exhibidores de 7 segmentos.

Aquí se pudo constatar con los estudiantes que fue más rápida la implementación del mejo de los 4 exhibidores de 7 segmentos, que el trabajo en la plantilla de prácticas y con mayor seguridad de que no se tienen falsos contactos. Las principales fuentes de error una vez armada correctamente la tarjeta, son: cables en mal estado, microcontrolador dañado o mal conectado, falla en la fuente de alimentación, o simplemente error en la programación del microcontrolador. Es importante mencionar que la tarjeta ya está siendo utilizada en el desarrollo de prácticas de la materia de Programación Avanzada, así como en Dispositivos Programables, en la Facultad de Ingeniería de la UAQ.

5. Conclusiones

La tarjeta propuesta se puede considerar como una tarjeta de desarrollo, con la diferencia de que no está limitada al uso de un solo tipo de programador o de microcontrolador, sino de cualquier programador que pueda ser colocado en la base para dispositivos con encapsulado tipo DIP.

Este desarrollo de hardware puede ser útil para estudiantes que desean aprender a trabajar con microcontroladores, con la ventaja de que el estudiante deberá realizar las conexiones necesarias. Esto le dará al estudiante el aprendizaje de realizar las conexiones entre componentes, así como la identificación de los mismos.

También es importante este desarrollo, pues permite al estudiante realizar las prácticas de laboratorio más rápido y con mayor seguridad, a diferencia del uso de una plantilla de prácticas convencional.

Referencias

- [1] Montañez, E., & Mastronardi, A. (2005, June). Microcontrollers in education: embedded control—everywhere and everyday. In 2005 Annual Conference (pp. 10-938).
- [2] Farcas, L. C., & Caltun, O. F. (2021, May). Experimental set-ups using microcontrollers and sensors realized by students to be used in Physics lessons. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1929, No. 1, p. 012075). IOP Publishing.
- [3] Zamarreño, C. R. (2021, April). Hands-on teaching with microcontrollers. In 2021 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON) (pp. 206-209). IEEE.



Desarrollo de un Sistema de Inducción Magnética para un Equipo de Cocción por Medio de Simulación Numérica

Ibañez Olvera Mario, Balderas Gutiérrez Juan Nabor y Jaramillo Sierra Bethsabet

TecNM – Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco
mario_mecatronica@test.edu.mx

Resumen

En este trabajo se muestra la simulación numérica de unas bobinas; estas bobinas se usarán en un sistema de inducción magnética para un equipo de cocción. La principal idea de simular las bobinas de inducción, es la de simular diferentes bobinas que actualmente se encuentran en el mercado, y que se adquieran fácilmente para sustituir un sistema de resistencias que actualmente se utilizan en el sistema de cocción. El sistema de cocción en el que se implementara las bobinas de inducción, pertenece a una palomera de maíz. Estos sistemas de cocción (palomeras de maíz), actualmente cuentan con tecnología de resistencias eléctricas por medio de conducción térmica. Este dato lo tenemos muy presente ya que este trabajo fue desarrollado para una empresa líder en el desarrollo de estos dispositivos de cocción. Hoy día sabemos de la existencia de estufas de inducción magnética, pero hasta la fecha no se tiene dato alguno de esta tecnología de inducción magnética aplicada a un sistema de cocción de palomitas de maíz. La importancia de la simulación numérica que se tiene en el desarrollo de la industria 4.0, es de gran importancia por el beneficio que ofrece este tipo de herramientas. En este caso, por ejemplo, se realizaron diferentes simulaciones numéricas para saber qué tipo de bobina generaba la inducción necesaria para obtener las temperaturas necesarias para la cocción del producto. Con la simulación numérica se realizó un ahorro considerable tanto en gastos de la compra de bobinas como en tiempo de pruebas físicas que se debieron realizar para obtener los resultados, y poder elegir la bobina que mejor se acople al sistema. Se simularon las pruebas eléctricas en la bobina de inducción para validar el funcionamiento correcto del sistema por medio de la multifisca entre el circuito eléctrico y la bobina previamente diseñada. Se obtienen rangos de temperaturas con la finalidad de tener la certeza de que se tiene la temperatura correcta para la elaboración del producto (palomitas de maíz), así como el cumplimiento de temperaturas superficiales. Por último, se realiza la comparativa de la eficiencia de la bobina de inducción magnética respecto al sistema de resistencia eléctrica.

Palabras clave: Simulación numérica, Inducción magnética, sistema de calentamiento, y eficiencia energética.

1. Introducción

Actualmente, en la industria se desarrollan infinidad de prototipos para los nuevos diseños de los productos. El diseño de una estufa de inducción, 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, es utilizar la simulación numérica.

La simulación numérica es parte fundamental de la industria 4.0, ya que como se mencionó anteriormente tiene muchos beneficios en la parte del desarrollo de nuevos productos. Desarrollar nuevos productos virtualmente y mejorarlos nos ayuda a disminuir los riesgos 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 hoy en día es la nueva tecnología que se está aplicando en la industria 4.0.



La inducción magnética para la generación de calor en estufas de inducción es un tema de interés en las empresas que producen sistemas de cocción. Entre las principales ventajas que presentan la generación de calor por este método son: aislamiento físico entre fuente de calor y el material, la rapidez en la generación de calor y la elevada eficiencia energética del proceso. Por estos puntos son que las empresas que fabrican dispositivos de cocción por calentamiento por resistencias, están interesadas en cambiar la tecnología de calentamiento por medio de resistencias, por el de generación de calor por medio de inducción magnética. [1]

Como es sabido por el momento no hay sistemas de generación por medio de inducción magnética en sistemas de cocción para palomitas de maíz. Para que sea funcional la implementación del sistema de inducción magnética es necesario verificar que tipo de bobina es el apropiado para el sistema. Las geometrías, dimensiones de las bobinas de inducción no tienen que tener una forma específica, pero si hay una limitante en las dimensiones en la forma del material a calentar. El diseño y construcción de bobinas de inducción depende del patrón de calentamiento requerido para una particular aplicación, frecuencia de trabajo y densidad de potencia. Por lo que se opta por usar bobinas ya diseñadas para estufas de inducción, que sean totalmente comerciales y que ya tengan su fuente de alimentación.

En el mercado existen infinidad de proveedores que ofrecen diferentes tipos de bobinas para estufas de inducción magnéticas. Por lo que es necesario seleccionar al menos tres diferentes tipos de bobinas que comúnmente se podrían conseguir con facilidad, y simular el funcionamiento para obtener el perfil de temperatura que generan con la inducción magnética, y así poder seleccionar la bobina que mejor se acople al sistema de cocción de palomitas de maíz.

Con la simulación numérica se realiza la virtualización del sistema de inducción magnética para un equipo de cocción, y así contar con un desarrollo muy cercano a la realidad, garantizando su correcto y óptimo funcionamiento, previniendo fallas, sin pasar por el uso del tiempo y el recurso económico destinado a la experimentación física previa (prototipos). El software de simulación numérica utilizado en este trabajo es Ansys, de los cuales se utilizaron los módulos de Electromagnetismo y Mecánica Estructural. La selección del software fue realizada por la experiencia con la que se cuenta para el desarrollo tecnológicos con él software.

2. Sistema de inducción magnética

2.1 Modelo geométrico

El diseño del equipo de cocción fue proporcionado por la empresa, mismo que lo desarrollaron en el software SolidWorks. El CAD tiene un formato SLDPRT que es importado al software Ansys.

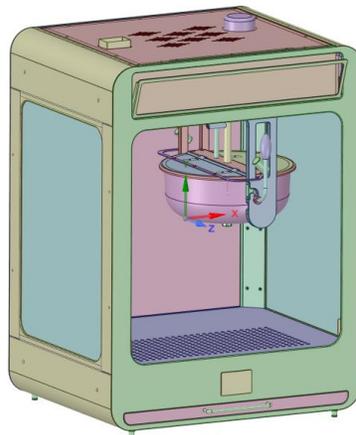


Figura 1. Modelo geométrico en 3D del equipo de cocción.



En un inicio se simularán las resistencias actuales del sistema para verificar y calibrar la simulación respecto a los valores reales de cada una de las resistencias que componen el sistema de calentamiento, y así obtener el dato de la temperatura total que se necesita generar con las bobinas de inducción magnéticas.

Para la generación del análisis térmico de las resistencias en el sistema de cocción de palomitas, se hizo uso del módulo ANSYS Mechanical Heat Transfer, donde se utilizaron herramientas del modelador directo ANSYS SpaceClaim (su enfoque principal es la generación de geometría no tan compleja). En este caso SpaceClaim se utilizó para la simplificación del CAD y así importarlo a ANSYS Mechanical Heat Transfer para poder conocer las temperaturas que genera cada una de las resistencias del sistema y así obtener la transferencia de temperatura que existe hacia la olla.

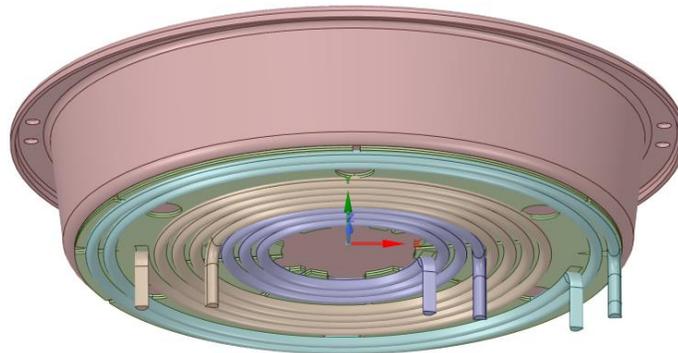


Figura 2. Modelo simplificado.

2.2 Discretización del modelo computacional

Los módulos de Ansys que se usaron en este proyecto trabajan con el método de elemento finito, por lo tanto se involucra la teoría de la discretización de la geometría (malla). La discretización del modelo computacional (malla) se creó en la plataforma de mallado ANSYS Meshing, para lo cual se definieron diferentes controladores globales y/o locales, de tal manera que permitiera capturar los efectos de la física a solucionar y cumplir con los requerimientos mínimos de calidad del elemento. Este paso es muy importante ya que de la calidad del elemento dependerá la precisión de los resultados.

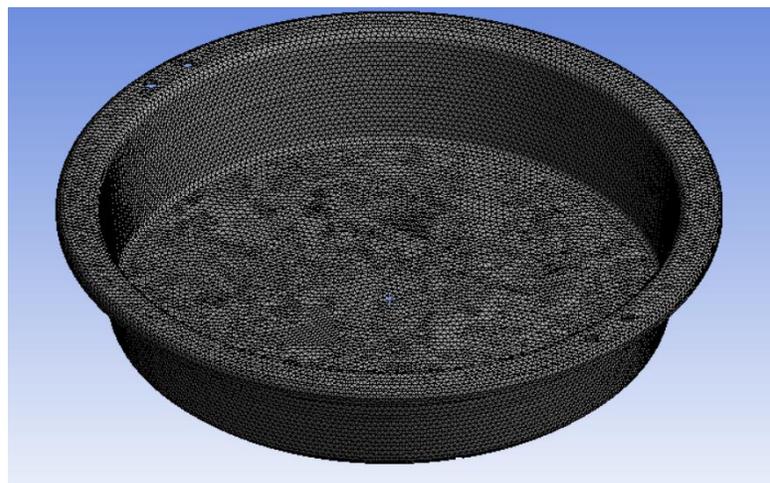


Figura 3. Modelo discretizado.



2.3 Cálculos preliminares

Para validar el sistema de calentamiento por medio de resistencias, se desarrolló un análisis térmico en estado estable mediante la herramienta ANSYS Mechanical dentro del ambiente de Workbench bajo las condiciones de transferencia de calor por conducción, convección y radiación.

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente figura.

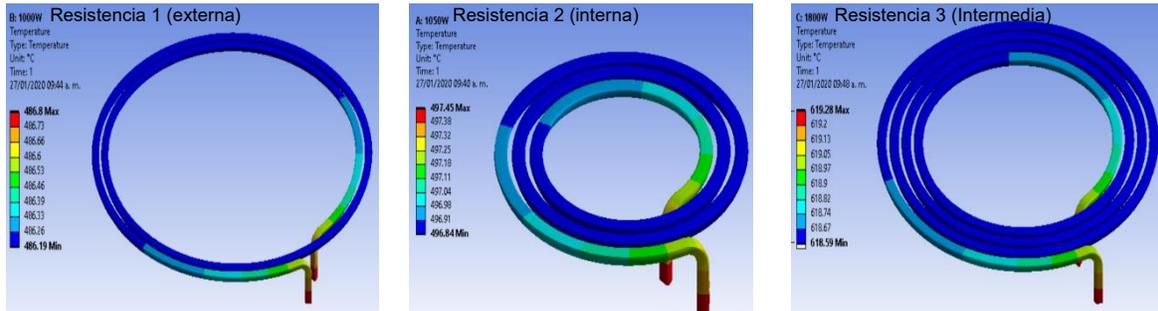
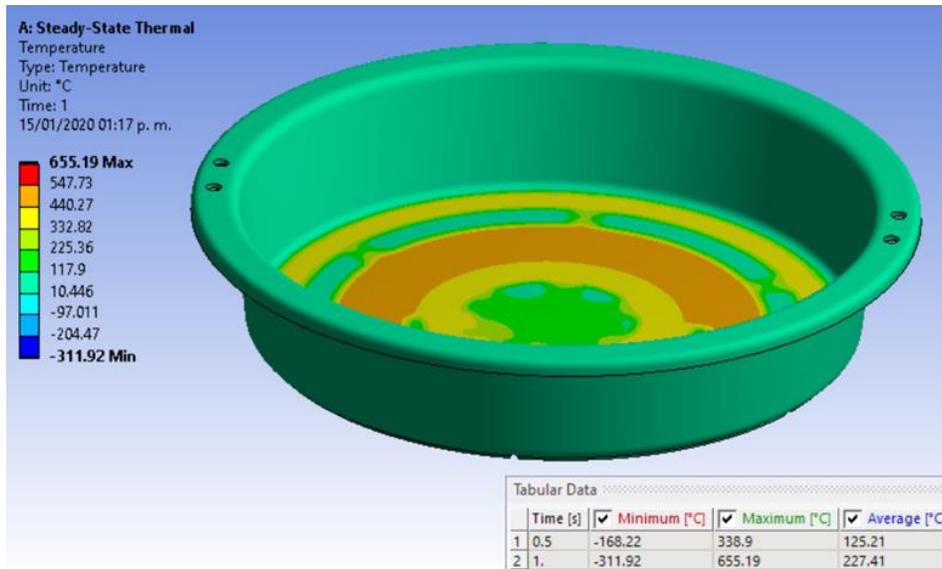


Figura 4. Resultado térmico de la simulación de las resistencias.

Se desarrolló un análisis térmico en ANSYS Mechanical Heat Transfer de cada una de las resistencias tomando en cuenta sus características eléctricas para obtener las temperaturas que son capaces de generar. Estas temperaturas se insertaron en un segundo análisis para conocer la transferencia de temperatura de las resistencias a las placas de aluminio y posterior a la olla, y de ese modo obtener un máximo y un mínimo para obtener promedio de temperaturas en la olla.

Al final del análisis en ANSYS Mechanical, se obtiene la temperatura promedio y máxima que puede alcanzar la olla con este sistema de calentamiento, se observa que la zona con mayor temperatura es donde se encuentra la resistencia de mayor potencia (intermedia) y no se logra una distribución de temperatura completamente uniforme.



Temperatura Promedio
 Temperatura Máxima

T=227.41 °C
 T=655.19 °C

Figura 5. Resultado térmico de temperatura en la olla.



2.4 Análisis de las bobinas con Ansys Maxwell y Multifísica

Con el análisis previamente realizado en ANSYS Mechanical de las temperaturas que las resistencias emiten a la olla se logró conocer las temperaturas con las que la máquina para palomitas trabaja actualmente. Con esta información se conoce que temperatura se debe alcanzar con la inducción magnética.

A diferencia de la inducción térmica que ocurre en las máquinas de palomitas actuales, donde estas se calientan a la temperatura deseada y transmiten dicha temperatura a la parte inferior de la olla, la inducción magnética transmite la energía por medio de un campo magnético el cual se transforma en energía calorífica al interactuar con la parte inferior de la olla.

En el caso de la máquina para palomitas de maíz, se utiliza una bobina plana de cobre para generar dicho campo magnético, de manera que los efectos de inducción del campo magnético sobre la parte inferior de la olla sean los más óptimos.

2.5 Análisis de bobina A y bobina B

En el mercado existe una variedad de bobinas para inducción magnética, sin mencionar que también pueden ser fabricadas a especificaciones del cliente que las solicite. Es por este motivo que se realizó un análisis comparativo entre dos bobinas con el fin de conocer que características son necesarias para la bobina de inducción sea la más óptima para la generación del calentamiento en la máquina de palomitas de maíz.

Las dos geometrías realizadas fueron espirales con las siguientes características como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Características de bobina A y bobina B.

Descripción	Bobina A	Bobina B
Diámetro de la cuerda del espiral	5mm	5mm
Vueltas del espiral	14	20
Diámetro inicial	50mm	50mm
Incremento de radio por vuelta	10mm	7.5mm

Cerca de la espiral se le agregó una placa con las dimensiones de la olla con el fin de simular que esta fuera la parte inferior de la olla. La placa es de 358mm de diámetro, 3mm de grosor y se encuentra a 2mm de separación de la espiral dado que a esta separación es la separación que comúnmente se trabaja para inducción magnética.

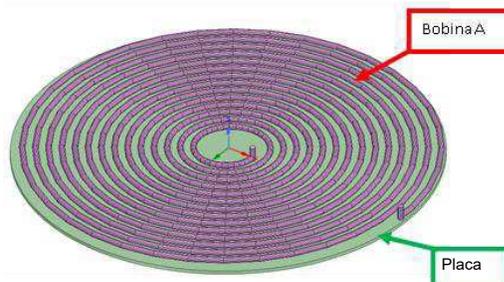


Figura 6. Geometría de la bobina A.

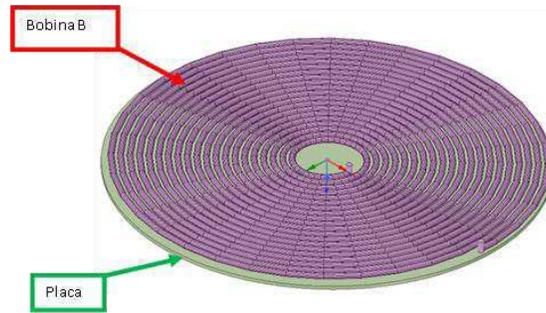


Figura 7. Geometría de la bobina B.

Teniendo en mente que las bobinas comerciales comunes no pasan de los 2500W, a estas bobinas se les introdujo una potencia máxima límite soportada por la bobina, con el fin de poder visualizar los efectos de los campos magnéticos sobre las placas de una manera extrema, con esta acción podemos llegar a conocer las diferencias de generación de calor entre las bobinas por su geometría.

Tabla 2. Potencia de bobinas.

	Bobina A	Bobina B
Potencia con la que se simuló	4216 W	5803 W

Una vez que las simulaciones concluyeron se obtuvieron las siguientes imágenes de los campos magnéticos donde se puede observar que la reducción de separación entre las vueltas de la espiral que existe entre la bobina A y la bobina B afecta de manera significativa el comportamiento del campo magnético sobre la placa.

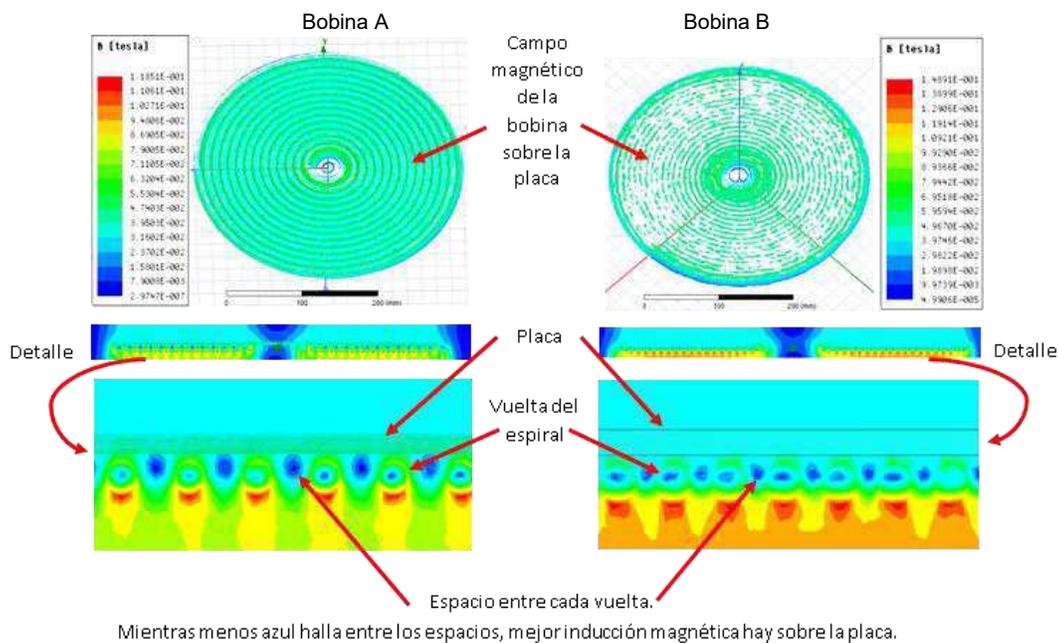


Figura 8. Campo magnético de la bobina A y B.



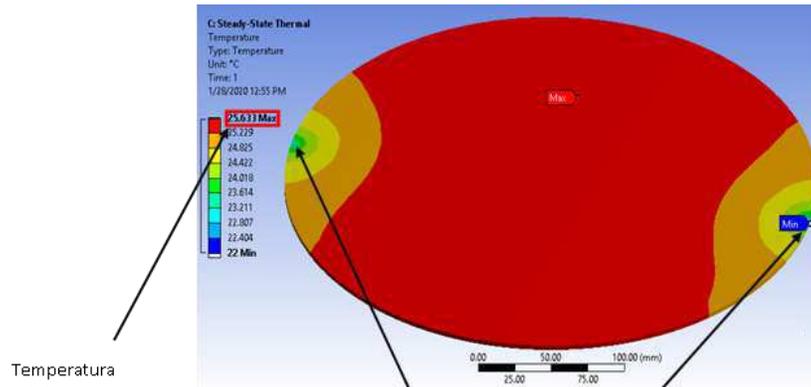
Aunque hubo una mejora en la densidad del campo magnético de la bobina A respecto a la bobina B, se puede apreciar que no se está logrando una inducción significativa sobre la placa. Para corroborar este hecho se introduce los datos obtenidos por Maxwell a Steady-State Thermal por medio de un análisis de multifísica para realizar un análisis térmico [2].

En el análisis térmico se hace referencia que la placa se encuentra a una temperatura ambiente de 22°C además de que se simula solamente la placa y la inducción térmica que esta recibe.

La temperatura en la bobina B es significativamente mayor que en la bobina A lo cual indica que la bobina B si produce una mejor inducción magnética sobre la placa en comparación con la bobina A. Esto indica que la separación entre las vueltas de la espiral si afecta la eficiencia que tiene la bobina sobre la placa. Es decir, mientras menor espacio exista entre las vueltas de la espiral, hay mejor inducción magnética sobre la placa [3].

La diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura no tienen un valor como se esperaba, considerando que la potencia de trabajo de las bobinas son de magnitudes límites máximos. Resumiendo, los resultados obtenidos de la bobina A y la bobina B, se llega a la conclusión que estas bobinas no pueden ser usadas en la máquina de palomitas por su poca eficiencia.

Bobina A



Temperatura máxima

Puntos de referencia de la temperatura ambiente

Bobina B

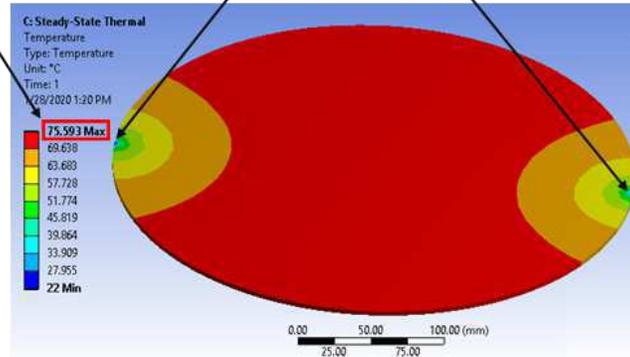


Figura 9. Temperaturas generadas por las bobinas.

2.6 Análisis de bobina C y bobina D

Con el conocimiento adquirido por las simulaciones anteriores se sabe que mientras mas pequeña la separación entre las vueltas del espiral, mejor inducción magnética existe sobre la placa. Con este dato se pudo descartar una variedad de bobinas que existen en el mercado con las características de



una separación considerable entre conductores que afecta a la inducción magnética, por lo tanto no se genera una temperatura deseada.

Para la siguiente simulación se utilizarán dos bobinas existentes en el mercado, con características de separación pequeñas entre ellas como se muestran a continuación:

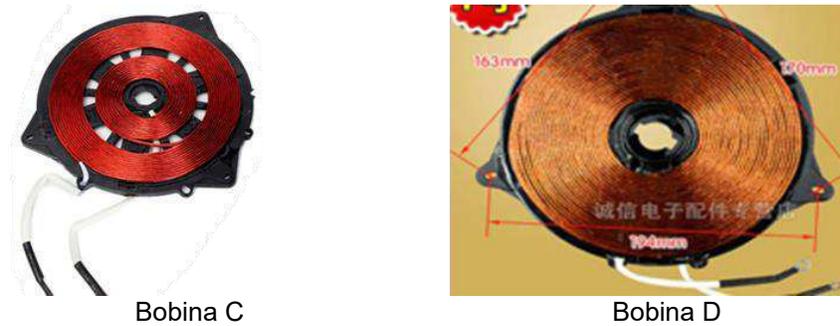


Figura 10. Bobina C y D.

Estas dos bobinas fueron replicadas en un CAD con sus medidas reales.

Tabla 3. Características físicas de las bobinas C y D.

	Bobina C	Bobina D
Diámetro de la cuerda del espiral	1.5mm	2.5mm
Vueltas del espiral	10 (1er segmento) y 13 (2do segmento)	27
Diámetro inicial	50mm	23mm
Incremento de radio por vuelta		2.9mm

Se realizó el mismo procedimiento para la simulación las bobinas cerca de la placa, como ya se mencionó con anterioridad la placa simula el fondo de la olla de 358mm de diámetro y 3mm de grosor. La separación de esta placa en referencia con la bobina fue de 2.5mm, tiene la misma separación que en análisis anterior.

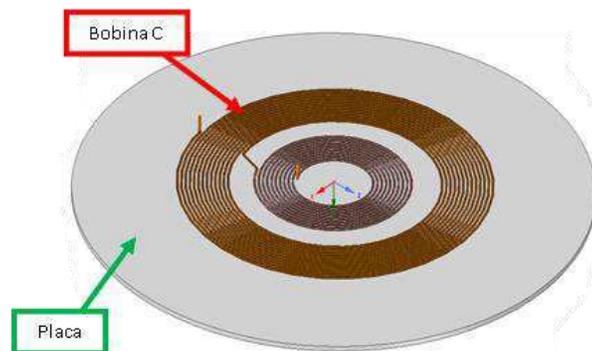


Figura 11. Bobina C.

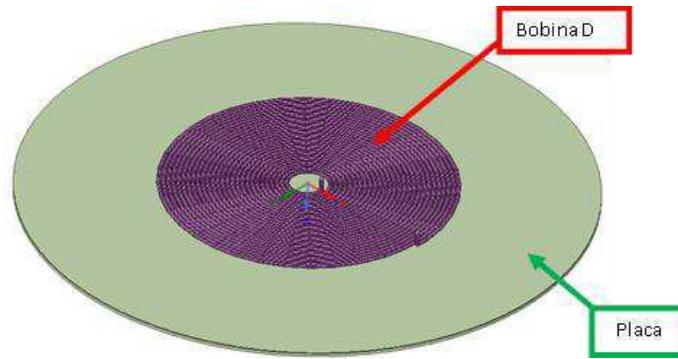


Figura 12. Bobina D

Estas bobinas trabajan en un rango de 1500W y 2500W, para la simulación se hacen trabajar las bobinas a una potencia máxima para que de esta manera se pueda simular los efectos reales que la inducción magnética tendrían estas bobinas sobre el fondo de la olla de la máquina para palomitas de maíz.

Tabla 4. Potencia de las bobinas C y D.

	Bobina C	Bobina D
Potencia con la que se simuló	2041W	2468W

Una vez que las simulaciones concluyeron se obtuvieron las siguientes imágenes de los campos magnéticos.

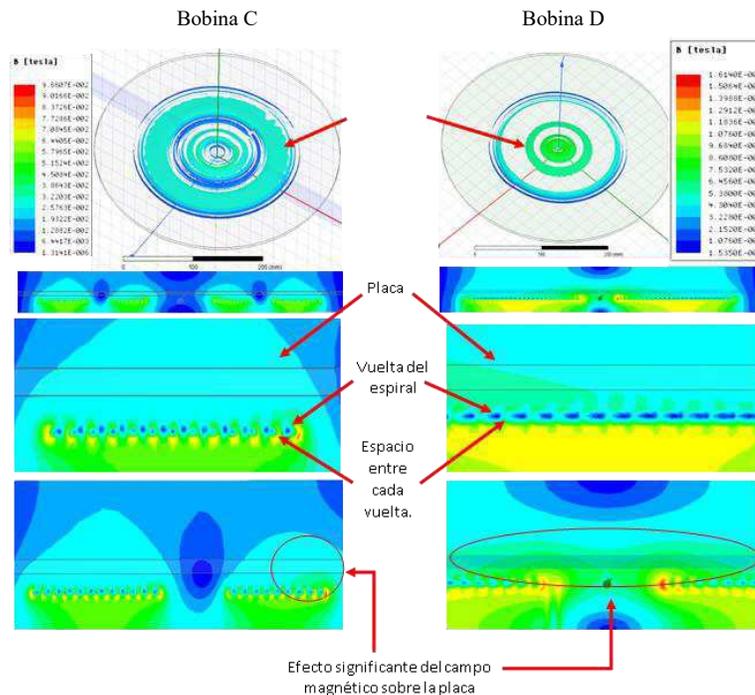


Figura 13. Campo magnético de la bobina C y D.

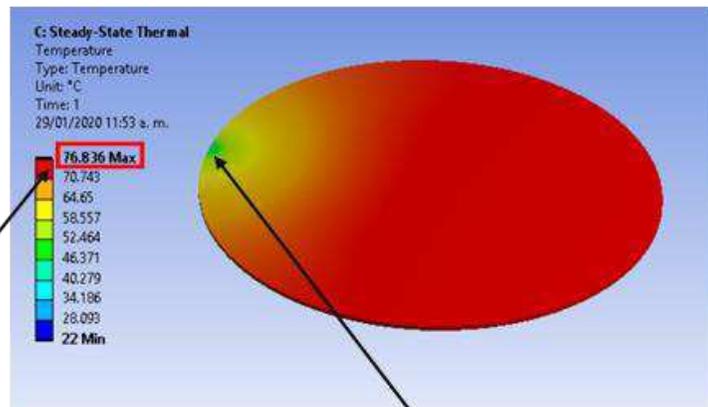


Aunque la inducción de los campos magnéticos tiene un efecto significativo sobre la placa en comparación de las anteriores, la bobina D genera efectos superiores en referencia con los efectos generados por la bobina C. Para comprobar que los efectos de inducción magnética son mejores con la bobina D en comparación de la bobina C, se hace un estudio multifísico en Steady-State Thermal para realizar un análisis térmico [4].

Como se puede observar en la figura 14, la temperatura en proporción a la potencia que se le añadió a las dos distintas bobinas aumento de manera significativa en comparación con las bobinas A y B que se simularon previamente. Sin embargo, la bobina C no alcanza a generar a la temperatura necesaria para la máquina de palomitas.

La bobina D trabaja a su máxima capacidad, esto hace que llegue a un rango de temperatura optimo generado por la inducción magnética; esta temperatura generada es la ideal para ser utilizado en la máquina de palomitas. Esta información indica que la bobina a usar en la máquina de palomitas debe ser similar o igual a la bobina D [5].

Bobina C



Temperatura máxima

Punto de referencia de la temperatura ambiente

Bobina D

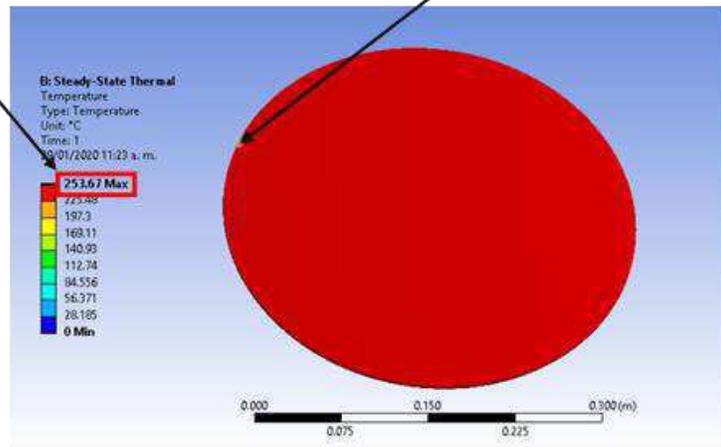


Figura 14. Temperaturas generadas por las bobinas.

3. Resultados

En la tabla 5, se muestran los valores finales más representativos obtenidos dentro del desarrollo de la simulación.



En la tabla 6 se muestran los valores de potencia utilizados en la generación del campo magnético y el valor de temperatura generada por la inducción del campo magnético.

Tabla 5. Resultados

DESCRIPCIÓN	PRODUCTO OBTENIDO
Simulación de las tres resistencias, utilizando los valores de potencia proporcionados por el fabricante.	Valores de temperatura dentro del sistema. En estado estable y a la máxima carga de temperatura de las tres resistencias. T1= 486.80 °C T2= 497.45 °C T3= 619.28 °C T _{promedio} = 227.41 °C
Simulación de la bobina tipo A	Comportamiento del campo magnético inducido, así como el efecto de temperatura que se genera por la misma inducción. T = 25.63 °C
Simulación de la bobina tipo B	Comportamiento del campo magnético inducido, así como el efecto de temperatura que se genera por la misma inducción. T = 75.93 °C
Simulación de la bobina tipo C	Comportamiento del campo magnético inducido, así como el efecto de temperatura que se genera por la misma inducción. T = 76.83 °C
Simulación de la bobina tipo D	Comportamiento del campo magnético inducido, así como el efecto de temperatura que se genera por la misma inducción. T = 253.67 °C

Tabla 6. Resultados Potencia y Temperatura

Tipo de bobina	Potencia de trabajo	Temperatura generada Por la induccion
A	P = 4216 W	T= 25.63 °C
B	P = 5803 W	T= 75.59 °C
C	P = 2041W	T= 76.83 °C
D	P = 2468 W	T= 253.67 °C

4. Conclusiones

Con los diferentes resultados obtenidos, se puede seleccionar al inductor adecuado para generar la temperatura que se requiere en el sistema de cocción.

Las simulaciones demuestran que la temperatura puede variar principalmente debido a la configuración de la bobina (número de vueltas, calibre del inductor, separación entre el inductor y la base a inducir, colocación del conductor, etc). La simulación arroja resultados muy confiables, ya que al compararlos con los experimentos no se ve variación significativa de la realidad con la simulación



numérica. Estos resultados de la comparativa antes mencionada no se pueden mostrar en el artículo ya que se firmó un convenio de confidencialidad con la empresa a la que se le trabajo este desarrollo tecnológico.

Comparando los resultados obtenidos, se puede observar que el inductor que cumple con las características para la generación de temperatura necesaria para ser utilizada en el sistema de cocción, es la bobina tipo D. Con la selección de la bobina D y los datos de la potencia de las resistencias actuales, en comparativa se considera un ahorro de energía aproximado el 36 %. No solo se hace un ahorro energético; también se hace un ahorro en costos de fabricación por la reducción de materia prima en la estructura de los componentes que actualmente se fija el sistema de resistencia (placas de aluminio, tornillería, bases para sujetar resistencias, etc).

Con el sistema de inducción magnética se puede tiene un mejor control en la temperatura dentro del sistema, esto debido al sistema de control electrónico que controla la alimentación de la bobina de inducción, a diferencia del control utilizado para las resistencias. El sistema de control para la bobina de inducción, al igual que la bobina ya se encuentran en el mercado y son fácil de adquirir, por lo que sí es muy viable aplicar este sistema de calentamiento por inducción magnética, al sistema de cocción de palomitas de maíz. El dato proporcionado por la empresa, hace alusión a que aun comprando el sistema de inducción magnética (bobina y sistema de control), hay un ahorro del 25 % del costo total en la instalación de este sistema respecto al sistema de calentamiento por resistencia. Por lo que se comprueba nuevamente que este estudio se hizo de manera rápida con la ayuda de la simulación numérica.

Referencias

- [1] M. Sadiku. Elementos de electromagnetismo. Bogotá: Oxford, 2003.
- [2] E P. Dawson, Praveen Jain, "Systems for induction heating and melting application a comparison of load commutated inverter" IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 47, pp. 282-286, Jun 1979.
- [3] P. Jain & S.E. Dewan, 'Analysis of a Clamped Series Inverter with a Transformer Coupled Load', IEEE Trans.on Industry Applications, vol. 25, no. 1, Jan/Feb 1989, pp.153-161.
- [4] P. Jain, J. Espinoza and S. Dewan, , Self-started voltage saUTee series resonant converter for high power induction heating and melting applications', IEEE Transactions on Industry Applications, vol .34, no. 3, pp.518-525, June 1998.
- [5] Warburton-Brown, D. 'Induction Heating Practice; A Handbook On The High-Frequency Induction Process For AH Concerned With Engineering Production', Odhams Press, London 1956



Interfaz Gráfica de Detección de Trypanosoma Cruzi (virus de chagas) Mediante Machine Learning

Meneses Flores Arturo Elfego, Austria Mariano Leidy Laura y Salazar Casanova
Hermes

Universidad Tecnológica de la Huasteca Hidalguense

Resumen

Una de las enfermedades menos estudiadas y con una alta probabilidad de convertirse en un problema grave de salud pública en México es el virus de chagas, puesto que dos terceras partes del país, se consideran en riesgo de transmisión vectorial, el parásito Trypanosoma cruzi que es transmitido a los animales y a los seres humanos a través de insectos, en específico la chinche besucona es la responsable de dicho problema. La identificación de esta chinche se torna compleja para la población en general, es por ello que la identificación al alcance de todos es una tarea primordial si se quiere combatir este inconveniente [1, 2, 3]. Para poder crear una herramienta automática de detección se realizó un análisis de las características físicas del insecto y así poder crear la interfaz gráfica de usuario capaz de reconocer por medio de imágenes al insecto (vector) que ocasiona dicha plaga; para ello se utilizó el software Matlab, por las distintas funciones que ofrece para el procesamiento digital de imágenes, utilizando distintas técnicas y una base de datos de 100 fotografías, se obtuvo una técnica de identificación del vector en un 90%.

Palabras clave: Chagas, Interfaz gráfica, Plaga, Matlab, Imágenes.

1. Introducción.

La presente investigación surge como una necesidad en la región de la Huasteca Hidalguense para detectar la plaga de la chinche besucona de forma automática, sin necesidad de un experto, mediante el desarrollo de una interfaz gráfica que a través del reconocimiento de imágenes previamente binarizadas, permita identificar si una chinche es o no portadora de un vector de infección.

Con esta herramienta se pretende ayudar a personas de escasos recursos con mayor riesgo que se encuentran ubicadas en zonas rurales y alejadas, para el cuidado de su salud y de los cultivos, pues estos son más vulnerables de contraer la enfermedad.

La intención es desarrollar una interfaz gráfica mediante un entorno de desarrollo integrado (IDE) en Matlab con el uso de un lenguaje M que facilite la identificación del vector de transmisor triatomino, utilizando el aprendizaje automático (machine learning) en conjunto con la binarización de imágenes en zonas ya identificadas como de riesgo para que cualquier persona pueda, a través de una fotografía de la chinche, detectar si se trata del insecto denominado “Chinche besucona”, para hacer saber al usuario mediante un mensaje, que se trata del insecto transmisor de dicha enfermedad.

2. Planteamiento del problema.

La enfermedad de Chagas es identificada en 21 países de América Latina, y se distribuye desde el sur de los Estados Unidos y México hasta Argentina. Sin embargo, no es una enfermedad que solamente se encuentre en estas regiones puesto que la migración de personas infectadas la ha llevado al otro lado del mundo, extendiendo su distribución a Europa, Asia y Australia. [1, 4]



Este padecimiento es considerado un problema de salud pública debido a que se reportan entre seis y siete millones de infectados en todo el mundo, con un promedio de 12 mil muertes al año. Además, se estima una población de 65 millones de habitantes en riesgo de infección en Latinoamérica, debido a que viven en zonas donde se encuentra la chinche portadora del parásito. [5].

El presente proyecto denominado “Interfaz gráfica de detección de Trypanosoma Cruzi (virus de chagas) mediante machine learning” surge como una respuesta a la necesidad de detectar esta plaga sin necesidad de la opinión de un biólogo experto en la materia, mediante el reconocimiento de imágenes previamente binarizadas, ayudando a personas de escasos recursos con mayor riesgo de contagio y que se ubican en zonas rurales, así como también a sus cultivos, pues estos son más vulnerables de contraer la enfermedad.

El propósito de esta investigación es identificar y reconocer a través de una base de datos creada a partir de la toma de fotografías, si se trata de la especie denominada “Chinche besucona”, para hacer saber al usuario mediante un mensaje en el command window de la herramienta gráfica, que se trata de dicho insecto.

3. Estado del arte.

En virtud de esta investigación, se realizó la indagación de interfaces de detección para plagas y también enfocados a la enfermedad de Chagas, que se presentan a continuación:

1. Detector portable para chagas y leishmaniasis.

Un equipo de investigadores del Instituto de Patología Experimental, perteneciente a la Universidad Nacional de Salta y el CONICET (IPE–UNSa/CONICET), está desarrollando una plataforma portable para el diagnóstico molecular de Chagas y leishmaniasis. El objetivo es crear una herramienta de implementación rápida y sencilla en centros de salud alejados de las grandes ciudades, donde suele haber mayor prevalencia de estas enfermedades y menos recursos para su atención.

El método más eficiente para diagnosticar Chagas es la serología, que consiste en detectar la presencia de anticuerpos en la sangre. Sin embargo, esta técnica no sirve para casos congénitos en recién nacidos, ya que los anticuerpos de la madre pasan al bebé a través de la placenta y perduran en la sangre por varios meses. La única manera de dar un diagnóstico certero es observar la presencia del parásito en el microscopio, algo difícil de lograr con una pequeña muestra de sangre. [6]

2. Diseño de una aplicación móvil para diagnosticar plagas.

El propósito de este trabajo es presentar el diseño de una aplicación móvil, la cual permitirá elegir algunas características para determinar que plaga está atacando el cultivo y con ello abatir a tiempo el daño que puedan ocasionar y disminuir o evitar grandes pérdidas en la producción. Para el desarrollo de este proyecto se implementa la metodología en cascada que consta de 5 etapas requisitos, diseño, implementación, verificación y mantenimiento.

Plagapp, es un software que a través de reconocimiento de imágenes permite que los agricultores puedan detectar las plagas que están perjudicando sus cultivos, brinda datos sobre tamaño, maneras de erradicarla, ciclo de vida y reproducción. [7]

3. Detección automática del daño causado por el minador de los cítricos, en la hoja del limón mexicano.

Muestra el diseño y desarrollo de una herramienta que implementa visión computacional para la detección de daños causados por el minador de los cítricos en la hoja de limón mexicano a través de imágenes digitales, este daño detectado varía en su forma pero es de color plateado cuando el insecto llega al árbol de limón busca las hojas más jóvenes para poder alimentarse y una vez que se está alimentado deja sus huevecillos en forma de una galería y de esa manera es detectado con este sistema.



Para comprobar los resultados de las imágenes analizadas para la detección de la plaga se tomó en cuenta lo siguiente; las fotografías fueron tomadas antes del mediodía con diferentes cámaras digitales y en un formato de tipo JPG /JPEG que fueron las que dieron mejor resultado. Se utilizó el clasificador KNN para la detección del daño, este proporciona dos clases una para las hojas sanas y otra para las que tienen daño ocasionado por el minador, estas dos clases analizan el data set de entrenamiento y de acuerdo con la vecindad toma una decisión y lo muestra al usuario.

De las imágenes analizadas se obtuvo un buen resultado ya que en la mayoría de ellas correspondía a la clase donde fueron clasificadas, hubo algunas imágenes que por la calidad de la luz arrojaron un resultado diferente, por eso es importante tomar en cuenta las recomendaciones para la toma de fotografías. Una de las técnicas que fue de gran ayuda es la de REGIONPROPS ya que se utilizó desde la segmentación hasta la clasificación proporcionando rectángulos de color en los que encierra al daño ocasionado por la plaga. [8]

4. Desarrollo de algoritmos matemáticos para detectar la presencia de bacterias, hongos y plagas, utilizando sistemas de procesamiento de imágenes.

En respuesta a esta demanda han emergido los sistemas de procesamiento de imágenes hiperespectrales para la rápida detección de agentes peligrosos en los alimentos. Por lo anterior, este proyecto de investigación se desarrolló un nuevo algoritmo que conjuntamente se utilizó con una cámara hiperespectral PIKE F-210B, un espectrógrafo ImSpector V10E y un sistema de iluminación halógeno-tungsteno sin regulador para la detección con procesamiento de imágenes hiperespectrales. [9]

4. Desarrollo.

De acuerdo a las investigaciones realizadas, se determinó que para la identificación automática se utilizaría el aprendizaje automático (machine learning), para el cual fue necesario primeramente enseñar lo que la herramienta necesita aprender. Este tipo de aprendizaje se presenta tomando como base la información que se extrae de los datos analizados por las computadoras emulando el comportamiento humano en cierta medida. [10, 11, 12]

Tomando los datos y su comportamiento estos modelos de aprendizaje se pueden crear modelos predictivos de sucesos para la toma de decisiones con un nivel de eficiencia considerablemente alto, para lo cual, la detección mediante este tipo de resultado la mejor, debido a que se entrena con imágenes tomadas desde la web, con diferentes ángulos. [12]

Para el desarrollo de esta herramienta se consideró también incluir imágenes de insectos muy parecidos a la chinche besucona, con el objetivo de que se pudiera reconocer entre la especie correcta y las incorrectas. En este caso se creó un banco con un aproximado de 100 fotografías de la chinche besucona para su análisis mediante el total de matrices y 30 imágenes de araña roja.

De igual forma se añadieron imágenes similares, para hacer más precisa la detección y pudiera detectar errores con dichas imágenes, esto permitió identificar las características físicas particulares de ambos insectos.

La característica principal de la interfaz gráfica establecida es su usabilidad, que cada uno de los botones cumpla con la función específica como cargar la imagen, procesarla y por último identificarla. La programación de la interfaz incluye la binarización de las imágenes, el cálculo que hace posible la detección del insecto, puesto que, a través de las fotografías, se obtiene un número correspondiente a las matrices para mandar un texto al command window de Matlab que indique si es o no el insecto que origina la plaga, esto mediante ensayos de prueba y error, hasta obtener el resultado esperado.

Como se puede apreciar en la figura 1, la interfaz consta de 4 botones, en la que al seleccionar el botón de agregar imagen se despliega la carpeta donde se encuentran las imágenes descargadas de



la chinche besucona, así como de la araña roja y otras especies, para después aparecer en el primer recuadro la fotografía que se seleccionó.

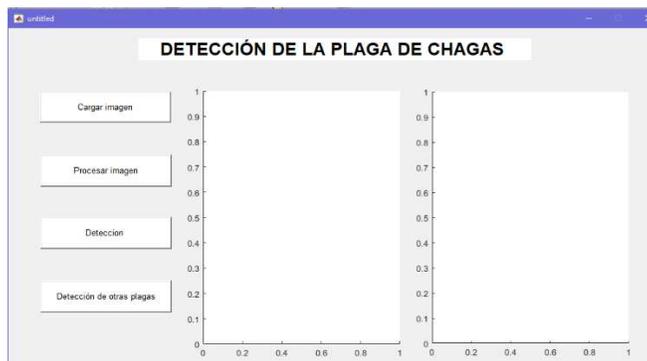


Figura 1. Diseño de interfaz gráfica.

Posteriormente, el botón correspondiente a procesar imagen realiza la función de binarizar la fotografía, en términos más simples, la convierte en dos colores, blanco y negro. Asimismo, el siguiente botón hace la detección a través de la propia imagen. [13]

Matlab trabaja con matrices y es por ello que de las imágenes obtenidas analizando cada una, el resultado promedio entre todas ellas fue de 112, por lo que se estableció la condición de si cumple o no, de igual forma se agrega un “Number of array elements” para verificar el numero resultante y hacer valida la condición.

En la figura 2, la variable global “f” empleada en el código de Matlab hace alusión a la imagen que se seleccionará dentro de una carpeta designada, para que cuando en las líneas de código se muestre esta variable, ya estará incluida la imagen que previamente se seleccionó para trabajar con la detección.

La función nombrada “numele” (Number of Array Elements) hace referencia a los elementos que contendrá la imagen, debido a que Matlab trabaja con matrices para poder procesar cualquier imagen, entonces se tiene que extraer el número de esos elementos para poder hacer su recepción.

```
108 - global f
109 - numele = max(max(f))$numero de objetos etiquetados
110
111 - if (numele==112)
112
113 -     disp('De acuerdo al valor obtenido, este insecto corresponde al causante de la plaga de chagas')
114
115 - else (numele==112)
116
117 -     disp('De acuerdo al valor obtenido, este insecto no corresponde al causante de la plaga de chagas')
118
119 - end
```

Figura 2. Código en Matlab.

En la figura 3, la función “f, path” hace alusión al tipo de formato que se utiliza; para esta herramienta todas las imágenes obtenidas de internet son en formato JPG (Joint Photographic Group).



También se despliega un cuadro de dialogo para la selección de estos archivos. Después de ello se muestra un axes (gráfica en donde se pueden representar imágenes), nombrada como “mostrar” para que de esta forma no aparezca la imagen en el lugar erróneo.

```
80 - % handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
81 - global f;
82 - [f,path]=uigetfile('*.jpg');
83 - axes(handles.mostrar)%para que se muestre en la primera tabla
84 - imshow(f);%mostrar la imagen
85 - set(handles.mostrar, 'UserData', f);
86
```

Figura 3. Parte de la programación en Matlab.

Posteriormente, en la figura 4 se puede observar que en el siguiente axes se carga la imagen y con el comando `im2bw` se convierte en una binaria, reemplazando todos los pixeles de la imagen de entrada por luminancia mayor que con el valor blanco y reemplazando los demás pixeles por el valor negro.

Este rango es relativo a los niveles de señal posibles para la clase de la imagen. Por lo tanto, un valor corresponde a una de intensidad a medio camino entre el valor mínimo y máximo de la clase. Así mismo se muestra el valor de 0.46, es el porcentaje de la binarización.

```
94 - global f;
95 - imagen = imread(f); %carga la imagen
96 - ibn=im2bw(imagen,0.46);
97 - imshow(imagen) % Muestra la imagen RGB
98 - axes(handles.binarizacion)%Para que se muestre en la segunda tabla
99 - imshow(ibn) % Muestra la imagen binarizada
```

Figura 4. Código de la interfaz.

Para llegar a ese resultado fue necesario ir ajustando este parámetro, hasta obtener el resultado deseado.

Por último, la imagen ya binarizada se muestra en el axes nombrado con “binarización” evitando que se mostrara en el lado erróneo.

Para la paso final, se muestra el valor obtenido de la imagen y con ello un `disp` (Display value of variable) para imprimir el resultado junto con una breve descripción que hace alusión al insecto causante de la plaga de chagas o a la araña roja, una plaga que se genera en las plantas de maíz, y que en dado caso de que no cumpla, aparecerá en el command window de Matlab que no corresponde a dicho insecto, tal y como se muestra en la figura 5.



```
if (numele==241)

    disp('De acuerdo a l valor obtenido corresponde a la araña roja, la cual es causante de plaga en el maiz')

else (numele==241)

    disp('De acuerdo al valor obtenido no corresponde a un insecto o plaga analizados previamente')

end
```

Figura 5. Imagen del disp.

5. Pruebas.

El propósito de este experimento es usar técnicas de procesamiento de imágenes para identificar de manera automática si es o no la especie de chinche que buscamos. Todo el material gráfico utilizado en este experimento fue obtenido en distintos espacios de información pública disponible en la red [14, 15, 16, 17, 18], esto por la dificultad de contar con imágenes propias de este espécimen. Para futuras investigaciones, se plantea el obtener fotografías propias en un medio controlado para mejores resultados.

Los pasos que se siguieron todas las pruebas para el procesamiento de la imagen son:

1. Cargar imagen.
2. Se identifica a la imagen como matriz.
3. Convierte la imagen en escala de grises en imagen binaria.
4. Se reemplazan todos los píxeles de la imagen de entrada por luminancia mayor que con el valor (blanco) y reemplazando todos los demás píxeles por el valor (negro).
5. Se identifica el número de elementos en la matriz, después de aplicado el filtro.
6. Se obtiene un promedio según el número de elementos de la matriz.
7. Se compara el número promedio obtenido con el número promedio obtenido de la base de datos de imágenes.
8. Se envía el resultado obtenido.

Se observa en la figura 6 y 7 el diseño de la interfaz gráfica de usuario.



Figura 6. Proceso de identificación automática de la chinche besucona.



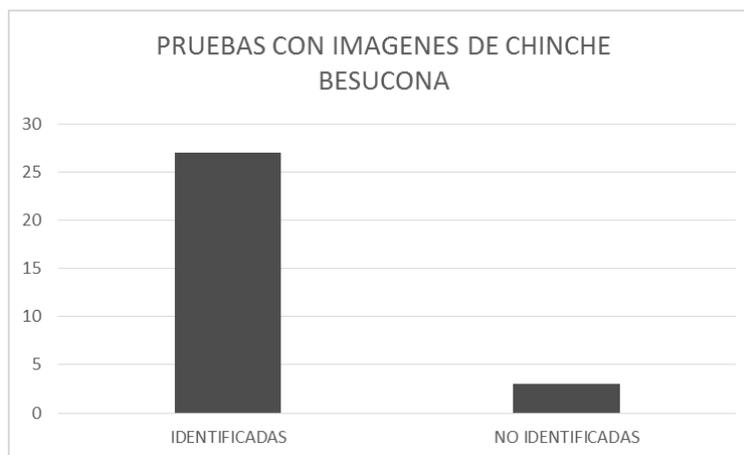
Figura 7. Proceso de identificación de la araña roja.

6. Resultados.

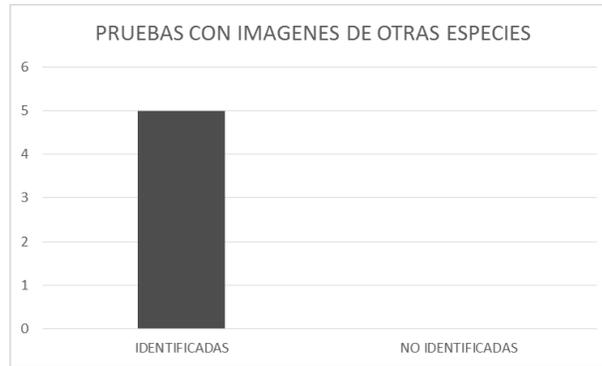
Se realizaron 35 pruebas para identificar a la chinche besucona, donde 30 imágenes eran de la chinche besucona y 5 eran de otras especies de chinches. El resultado en las 30 pruebas con imágenes de chinches besuconas fue de 27 imágenes identificadas de manera correcta dando un 90% de efectividad como se puede observar en la tabla 1 y gráfica 1, de las 5 imágenes de chinches de otra especie, en las 5 se detectó que no era la especie que se buscaba, dando un 100% de efectividad, como se puede observar en la tabla 1 y gráfica 2.

Tabla 1. Pruebas con chinches.

TIPO DE CHINCHE	IDENTIFICADAS	NO IDENTIFICADAS	PRUEBAS TOTALES	PORCENTAJE DE EFECTIVIDAD
Chinche besucona	27	3	30	90%
Otras especies	5	0	5	100%



Gráfica 1. Pruebas con imágenes de chinche besucona.



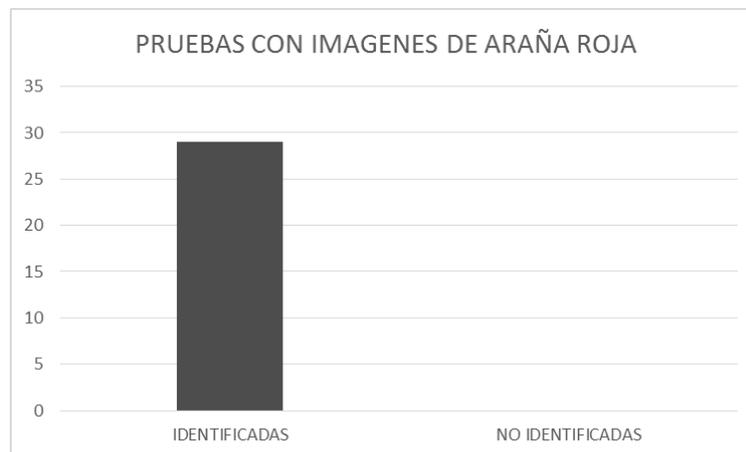
Gráfica 2. Pruebas con imágenes de otras especies de chinches.

De igual forma, para comprobar la efectividad del software desarrollado se optó por probar con una especie que fuera físicamente diferente a las chinches, se optó por la araña roja.

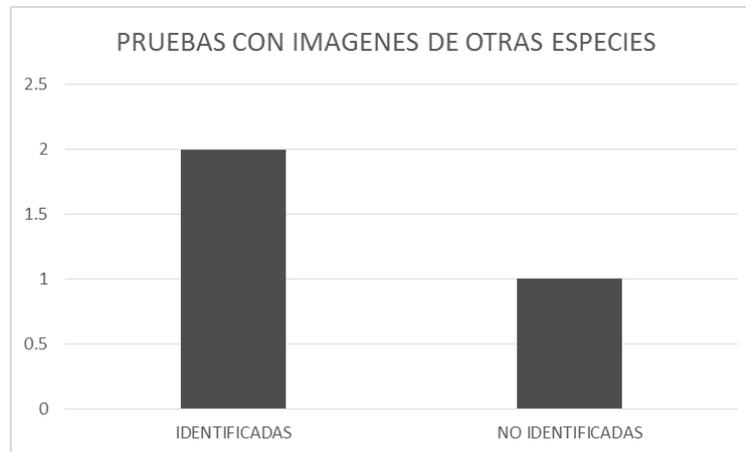
Se realizaron 32 pruebas para identificar a la araña roja, donde 29 imágenes eran de la araña roja y 3 imágenes de otro tipo de arañas, el resultado en las 29 pruebas de imágenes de araña roja fue del 100% de efectividad como se puede observar en la tabla 2 y figura 3, sin embargo en las pruebas con las otras 3 arañas de distinta especie se detectaron dos como especie diferente y una como araña roja, dándonos un 66.6% de efectividad como se puede observar en la tabla 2 y figura 4.

Tabla 2. Pruebas con arañas.

TIPO DE ARAÑA	IDENTIFICADAS	NO IDENTIFICADAS	PRUEBAS TOTALES	PORCENTAJE DE EFECTIVIDAD
Araña roja	29	0	29	100%
Otras especies	2	1	3	66.6%



Gráfica 3. Pruebas con imágenes de araña.



Gráfica 4. Pruebas con imágenes de otras especies de arañas.

7. Conclusiones.

El desarrollo de esta investigación tiene como propósito desarrollar una herramienta que permita reconocer el insecto portador del virus de chagas mediante una interfaz gráfica de usuario amigable y fácil de utilizar para las personas.

Hoy en día, es importante para la población en general, poder contar con herramientas que permitan crear una ventaja para la erradicación de la Trypanosoma Cruzi. La detección oportuna y anticipada de la especie portadora de esta enfermedad puede ayudar primeramente a alertar a las personas de la presencia del insecto para evitar el contagio y también identificar la ubicación para que pueda ser reportada a las autoridades sanitarias.

También existe la intención de presentar esta investigación al personal del departamento de investigación de la Jurisdicción Sanitaria No. 10 que brinda atención a los 8 municipios que conforman la región de la Huasteca Hidalguense para coadyuvar con los esfuerzos realizados dentro del área de investigación de esta entidad.

Es importante mencionar que a pesar de los ejercicios alentadores que se obtienen en esta investigación, los resultados reportados no son determinantes, pues se necesita una mayor cantidad imágenes y pruebas para una caracterización general; de igual forma esta investigación identificó que, crear un programa de aprendizaje automático (machine learning) para identificación de características específicas en distintas especies, es posible y se puede llegar a una cartelización general si se cuenta con más imágenes y pruebas para realizarlo.

Referencias.

- [1] Secretaria de Salud. (21 de Enero de 2020). Secretaria de Salud. Obtenido de <https://www.gob.mx/salud/acciones-y-programas/vigilancia-entomologica-de-la-enfermedad-de-chagas?state=published>
- [2] Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades. (24 de Mayo de 2016). CDC. Obtenido de <https://www.cdc.gov/parasites/chagas/es/index.html>
- [3] UNAM. (13 de Abril de 2019). Boletín UNAM. Obtenido de https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2019_256.html
- [4] Secretaria de salud de Jalisco. (24 de Mayo de 2015). SSJ Salud. Obtenido de <https://ssj.jalisco.gob.mx/prensa/noticia/6311>
- [5] Benítez Villa, G. E. (2015). Un beso mortal: La enfermedad de Chagas.



- [6] Universidad Nacional de San Martín. (21 de Febrero de 2019). TSS. Obtenido de <https://www.unsam.edu.ar/tss/detector-portable-para-chagas-y-leishmaniasis/>
- [7] Hernández Tapia, Z., Ángeles, R., & Ventura Maza, A. (Diciembre de 2019). Obtenido de https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Tecnologia_Informatica/vol3num11/Revista_de_Tecnologia%20Da_Informatica_V3_N11_3.pdf
- [8] Carranza Flores, J. L. (Diciembre de 2020). Obtenido de <https://rinacional.tecnm.mx/bitstream/TecNM/1457/1/Tesis-Final-Jos%C3%A9-Luis-Carranza.pdf>
- [9] Grajeda González, U. F. (Octubre de 2018). UANL. Obtenido de <http://eprints.uanl.mx/16664/1/1080290301.pdf>
- [10] MathWorks. (s.f.). MathWors. Obtenido de https://la.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html
- [11] Grimson, E., Huttenlocher, D. P., & Lozano Pérez, T. (2013). Object Recognition by Computer: The Role of Geometric Constraints. MIT Press.
- [12] Ready, S., & Kown, K. (2015). Practical guide to machine vision software. Singapur: Wiley-Vch.
- [13] Solé Sugrañes, L. (s.f.). Digital Image System. Obtenido de <http://www.dimages.es/Tutorial%20A.l/segmentacion/binaria.htm>
- [14] Cota, A. (22 de Junio de 2015). VICE. Obtenido de <https://www.vice.com/es/article/ex3bvww/distrito-feral-la-infame-chinche-besucona-y-el-mal-de-la-muerte-silenciosa>
- [15] FotoNostra. (s.f.). FotoNostran. Obtenido de <https://www.fotonostra.com/digital/imagendigital.htm>
- [16] Gayosso, C. (14 de Abril de 2021). Diario de Xalapa. Obtenido de <https://www.diariodexalapa.com.mx/local/la-chinche-besucona-hasta-en-las-animas-puede-matar-chagas-enfermedad-xalapa-veracruz-6595009.html>
- [17] Naturalista. (s.f.). Naturalista. Obtenido de <https://colombia.inaturalist.org/taxa/308558-Triatoma-dimidiata>
- [18] Plagas Kil. (s.f.). Plagas Kil. Obtenido de <http://plagaskil.com/blog/chinche-besucona/>



Sistema de Control Automatizado para una Órtesis Dinámica para la Rehabilitación de los Dedos

Juan Carlos Vásquez Jiménez, Felipe Ernesto Orozco Contreras, Asunción Adriana Arango Perdomo, Serafín Reyes García y María de Jesús Oregán Silva

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tehuacán / División de Estudios de Posgrado e Investigación / Departamento de Metal Mecánica
jcvazquezj@hotmail.com

Resumen

La órtesis es un mecanismo ortopédico, que se implementa en una parte del cuerpo de la persona, para contrarrestar, prevenir o corregir alguna anomalía, para posibilitar una función. El sistema de esta órtesis, estará basado en la implementación de un controlador, cuya retroalimentación se obtendrá por medio de lenguaje de programación, creando una secuencias de ejercicios programadas en el mecanismo de unos nano-servomotores que moverán los dedos de la mano, para la simulación de dicha mano, el mecanismo automatizado se determinará el grado de amplitud para articular los falanges de la mano, creando un programa que pueda interactuar con el paciente y el especialista a través de una aplicación de celular. La rehabilitación está encaminada para personas que tienen problemas de movilidad en alguna de las manos producto de alguna lesión, un accidente cerebrovascular, una infección, algún tumor, una operación quirúrgica o tal vez una enfermedad progresiva.

Palabras clave: control automatizado, órtesis, aplicación.

1. Introducción

La finalidad del presente trabajo es presentar la estructuración del control automatizado de una órtesis dinámica que se utiliza para la rehabilitación de los dedos de la mano, primeramente se realizó la estructura base del prototipo de órtesis para la rehabilitación de los dedos de la mano, en el cual se recrean los movimientos de los cinco dedos por mediante mecanismos a través de servomotores que activaran independientemente los dedos de la mano tratando lograr una movilidad adecuada de la mano con problemas.

La órtesis debe de ser capaz de emular el movimiento de los dedos de la mano. Para la obtención de estos movimientos se consideran servomotores con un controlador, donde se memorizarán ejercicios recomendados para la rehabilitación de personas con daños motrices en la mano. Se consideran las medidas de la mano contempladas dentro con la Norma DIN 33 402, con la finalidad de diseñar un exoesqueleto tipo guante el cual estará constituido por varios mecanismos de plancha para el movimiento de cada uno de los dedos independiente. Se pretende con este proyecto minimizar al máximo los costos, logrando una órtesis con economía de bajo presupuesto para accesibilidad al público, obteniendo los materiales de fácil acceso y bajo costo.

El enfoque del prototipo es ayudar y colaborar con la incapacidad motriz de los dedos de la mano. Para el tratamiento de lesiones y discapacidades, se tratan mediante terapias físicas, ocupacionales o uso de aparatos ortopédicos y en algunos casos con cirugía. De los anteriores tratamientos el que mejor se adapta a las necesidades del paciente con problemas de movimiento muscular en las manos, se recomienda las órtesis, que brindan el apoyo necesario. Se pretende atacar el problema con el prediseño de una órtesis de rehabilitación, la cual está orientada a ser una herramienta como práctica



para los fisioterapeutas, especialistas y principalmente para pacientes con la discapacidad, logrando avances en su rehabilitación.

El prototipo se diseñó teniendo en cuenta la comodidad y economía de las personas a las que éste va dirigido. Por lo que también sobresalen algunos beneficios que se mencionan a continuación.

- Fisiológicos: El prototipo de órtesis es para la rehabilitación a los dedos de la mano que tengan dificultad de movilidad.
- Accesibilidad: Por su amigable uso, diseño y costo, hacer este prototipo es ideal para su uso profesional en el área de la salud de cualquier hospital o centro de rehabilitación CRI (Centro de Rehabilitación Integral), y también para cualquier usuario independiente que lo use desde la comodidad de su hogar.
- Económicos: El prototipo de órtesis automatizada está diseñado para su adquisición esté al alcance de todas las personas, ya que todo está producido con materiales de fácil obtención reduciendo al más mínimo costo.

2.1 Antecedentes

La órtesis dinámica de mano para la flexión de muñeca con doblado reverso de nudillos para la rehabilitación de personas con problemas motrices es diseñada con el fin de fortalecer gradualmente la flexión de dedos, posteriores a cirugía de flexores, evita la deformidad en flexión de dedos. Por lo regular en la muñeca se monta una abrazadera dinámica de aleación de aluminio, resorte de torsión, almohadilla de tela de esponja y materiales de lámina de goma de arco transpirable, uso más cómodo, más conveniente. Depende del resorte de tensión en el soporte de aleación de aluminio, los dedos y las articulaciones de la muñeca ahorran dorsiflexión puede tener actividades al mismo tiempo.

Los productos que se encuentran en el mercado se muestran en la figura 1 y son los siguientes: La empresa Ortopedia Nodal presenta una combinación de férula de resorte Oppenheimer (a) para la dorsiflexión de la muñeca con doblado reverso de nudillos. Extiende las articulaciones metacarpofalángicas y balancín para extender las articulaciones interfalángicas distales. Indicada para parálisis radial. Además de una férula con barra lumbrical alta y baja, con cabestrillos y elásticos para cada uno de los dedos, de acuerdo con la prescripción médica. Elaborada sobre medidas en material termoplástico, lámina de aluminio y platina con ajuste en velcro. [1]

La empresa Central Orthomedica presenta una férula de resorte de Oppenheimer (b) para dorsiflexionar la muñeca con doblado reverso de nudillos, para extender las articulaciones metacarpofalángicas y balancín para extender las articulaciones interfalángicas distales. Indicada en la rehabilitación de una parálisis radial. [2]



Figura 1. Férula dinámica con resorte Oppenheimer. a). Ortopedia Nodal, b). Central Orthomedica.

2.2 Propuesta

Este proyecto está basado en un prototipo de diseño de exoesqueleto, que se la harán diferentes pruebas para ver qué tan eficaz es su mecanismo y su funcionamiento por medio del sistema de polea excéntrica biela-palanca. La propuesta se describe en la figura 2 de manera genérica. Con el fin de mover las falanges de la mano para abrir y cerrar. Por medio de un servo motor clocado en la mano para realizar dicha función. Es útil para personas que tienen dificultad de movimiento de mano y sensibilidad a la punta de los de dos, pero no tienen suficiente fuerza para la movilidad de la mano en su conjunto.

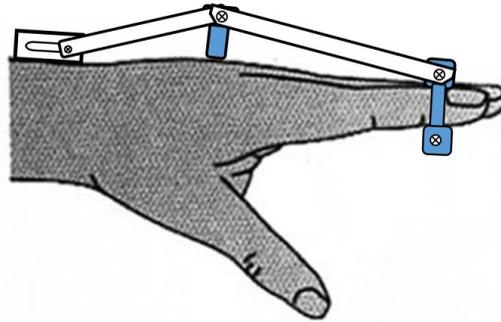


Figura 2. Propuesta de para la estructuración de la órtesis.

Imagen base tomada de: <http://introduccionalapm.blogspot.com/2011/05/articulacion-de-manos-y-dedos.html>

2.3 Diseño de las piezas

Para el diseño se llevó a cabo mediante software de diseño asistido por computadora CAD, con el que se obtuvieron las piezas de manera virtual, llevándose a cabo adicionalmente un análisis de las piezas que son sometidas a esfuerzos.

A continuación en la figura 3 se presentan las partes diseñadas (a – f) y la figura 4 representa las partes para las bases para el sistema de control y motriz (g - k) y en la figura 5 se visualizan las diferentes vistas (a – d) del ensamble virtual y en la figura 4 se presentan imágenes de la armazón física de la órtesis.

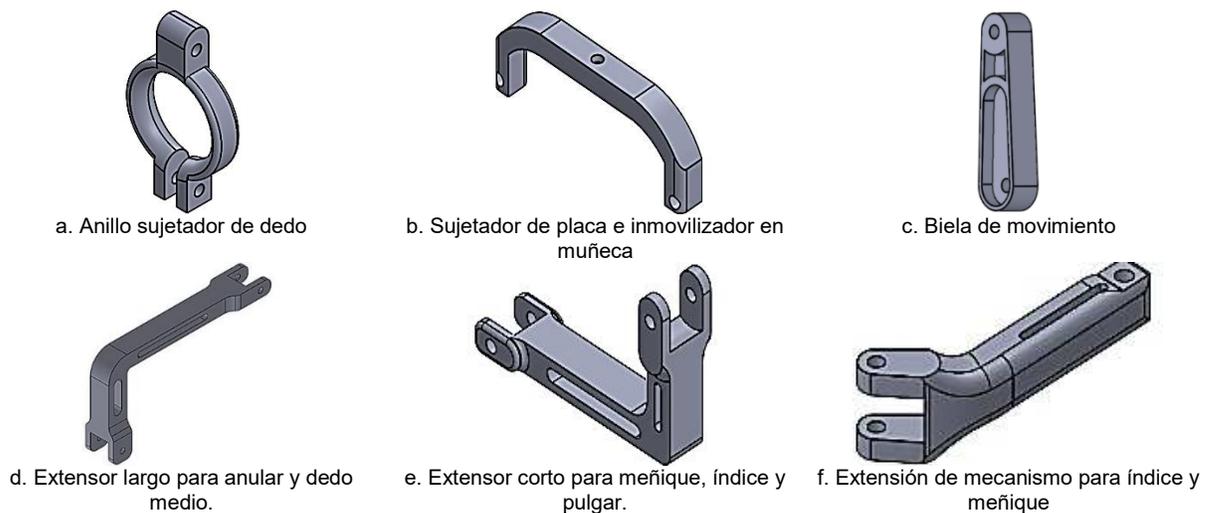


Figura 3. Piezas de la estructura de la órtesis.

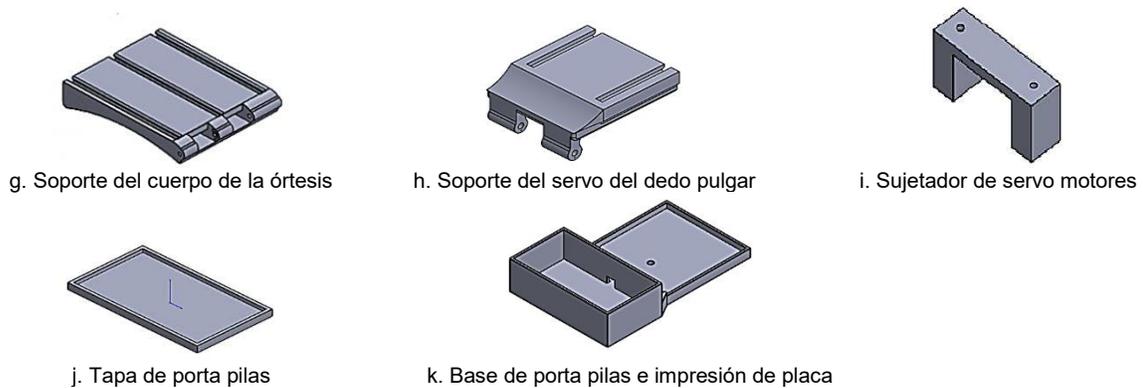


Figura 4. Piezas de la estructura del sistema motriz y control.

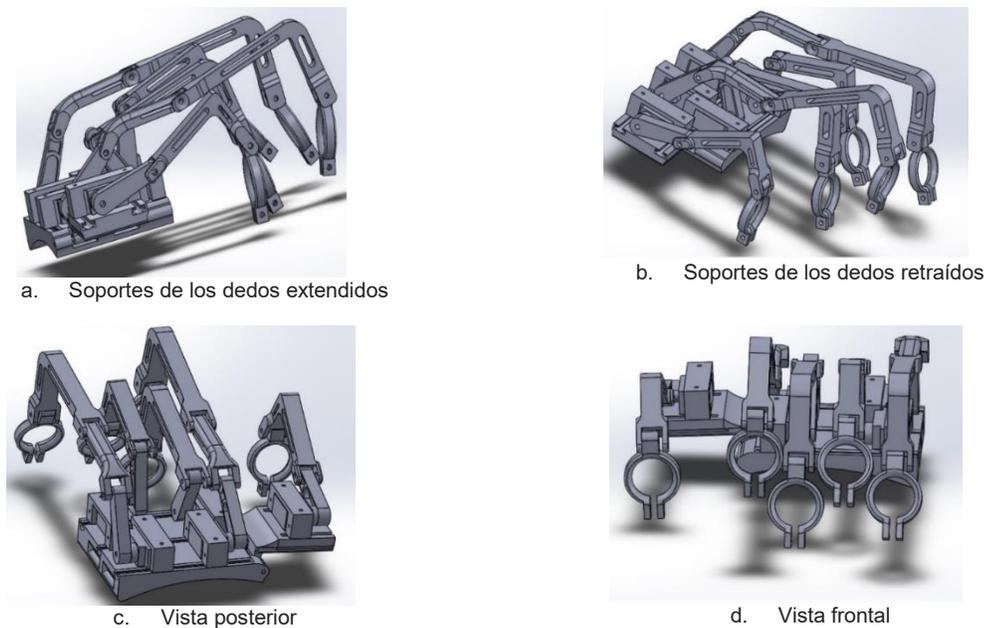


Figura 5. Vistas de la órtesis ensamblada

2.4 Método de manufactura

Para la elaboración de las partes de la órtesis se consideró la manufactura aditiva por medio del Modelado de Deposición Fundida MDF, la cual es una técnica considerada como la más sencilla, la tecnología de modelado por deposición fundida MDF (FDM por sus siglas del inglés Fused Deposition Modeling o también conocido como FFF de igual forma Fused Filament Fabrication que es Fabricación con Filamento Fundido) se basa en tres elementos principales: una placa/cama de impresión en la cual se imprime la pieza, una bobina de filamento que sirve como material de aportación para la impresión y un cabeza de extrusión también llamada extrusor. En resumen, el filamento es jalado por la impresora y fundido por el extrusor, que deposita el material de forma precisa capa por capa sobre la placa de impresión. Estas capas luego se enfrían y solidifican, lo que da como resultado una parte impresa que ofrece una alta durabilidad y resistencia al calor. La FDM requiere un material de soporte de sacrificio que se deposita a través de una segunda boquilla. La impresión 3D comienza cuando la máquina alcanza una temperatura necesaria para la fusión del material. [3]



2.5 Material utilizado

Entre los materiales de impresión 3D más populares en la deposición por fusión se encuentran el PLA (Ácido Poliláctico) y el ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno). Los filamentos PLA son recomendados por su facilidad para imprimir, compatibles con prácticamente cualquier impresora 3D. Contiene aditivos plastificantes, que, por ser más caros, suelen ser usados únicamente en filamentos de alta calidad. Estos aditivos prolongan la vida útil del producto y mejoran significativamente las impresiones. [4]

Tabla 1. Ficha técnica de filamento PLA utilizado.

Características	Datos
Diámetro	1.75 mm
Peso	1 kg
Color	Blanco
Temperatura de impresión	190 – 230° C
Temperatura de la cama	50 – 65° C
Densidad	1.24 g/cm ³
Tolerancia de diámetro	± 0.03 mm

2.6 Equipamiento utilizado

La impresora por utilizar es la ANET A8 (figura 6). Cuenta con una pantalla LCD 2004 con cinco botones para una impresión sencilla y cómoda. Eso sí, sacarle todo el partido requiere tiempo, especialmente por su calibración manual, pero una vez conseguido se obtiene una calidad alta de impresión. En la tabla 2 se describen las características técnicas de la impresora. [5]



Figura 6. Impresora 3D ANET A8

La estructura de la órtesis queda completamente ensamblada, se realizan las pruebas pertinentes de funcionamiento, se realizan los ajustes necesarios quedando la armazón lista para el montaje de los elementos del sistema motriz (servomotores) y del sistema de control (Arduino Nano el control y antena bluetooth para la comunicación). Con esto se cierra la primera parte del trabajo. La segunda etapa consiste en el diseño del sistema de control de manera remota y automatizada de la órtesis que es de lo que detalla más adelante. En la figura 7 se muestran imágenes del ensamblado físico de la estructura de la órtesis.

Tabla 2. Características de la impresora 3D ANET A8.

Características	Datos
Resolución	$\pm 0.1-0.2$ mm
Velocidad Movimiento	10~100 mm/s
Temperatura. Extrusor	250° C
Temperatura Cama	100° C
Filamento Preferencial	PLA
Volumen Impresión	220 x 220 x 240 mm
Formato Archivo	STL, OBJ, JPG
Material Cama	Aleación de aluminio
Diámetro Filamento	1.75 mm
Voltaje	110-220 V
Potencia	240 W
Tamaño Artículo	50 X 45 X 40 cm
Peso	8 Kg

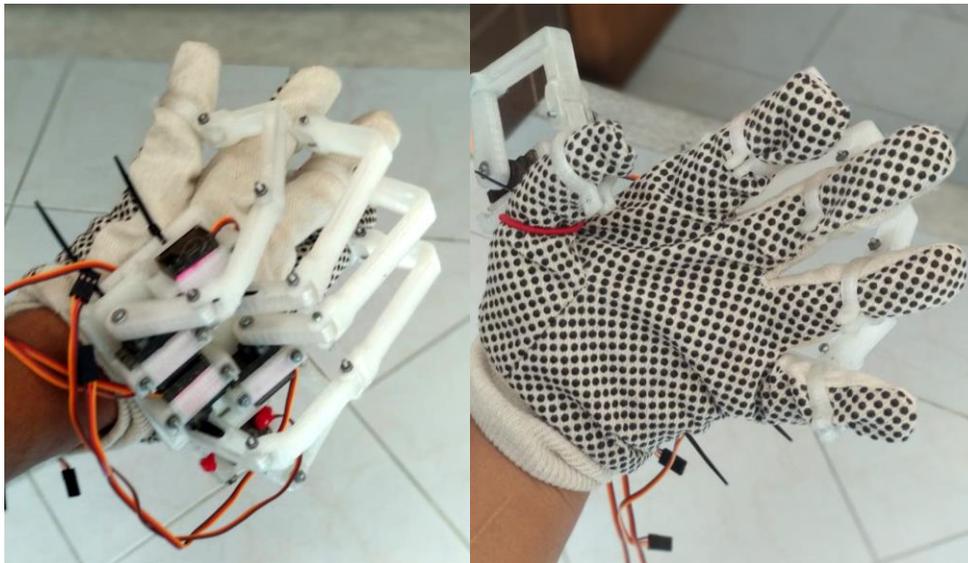


Figura 7. Exoesqueleto ensamblado y probado en una mano físicamente, para ver la funcionalidad el mecanismo de cerrado y apertura de los dedos de la mano.

3 Estructuración del sistema motriz y de control para la órtesis

Una vez verificado el ensamble físico del exoesqueleto se comprueba que el funcionamiento sea el adecuado y se checan los problemas de movilidad que se pudieran presentar, realizándose los ajustes necesarios. Revisado su accionar se procede a planear la estructuración del sistema motriz y de control para lo cual se utilizan los siguientes elementos.

3.1 Sistema motriz

Para el sistema motriz se utilizarán servomotores (también llamado servo) que son dispositivos similares a un motor de corriente continua que tiene la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de operación, y mantenerse estable en dicha posición. Un servomotor es un motor eléctrico que puede ser controlado tanto en velocidad como en posición.



Un servo, por consiguiente, tiene un consumo de energía reducido. Los servomotores hacen uso de la modulación por ancho de pulsos (PWM) para controlar la dirección o posición de los motores de corriente continua. La mayoría trabaja en la frecuencia de los 50 Hertz, así las señales PWM tendrán un periodo de veinte milisegundos. La electrónica dentro del servomotor responderá al ancho de la señal modulada. Está conformado por un motor, una caja reductora y un circuito de control. También potencia proporcional para cargas mecánicas.

Si los circuitos dentro del servomotor reciben una señal de entre 1 a 1,4 milisegundos, éste se moverá en sentido horario; entre 1,6 a 2 milisegundos moverá el servomotor en sentido antihorario; 1,5 milisegundos representan un estado neutro para los servomotores estándares. [6]

El estándar de esta señal controladora para todos los servos de este tipo, elegido para facilitar el uso en radiocontrol, es un pulso de onda cuadrada de 1,5 milisegundos que se repite a un ritmo de entre 10 a 22 ms. Mientras el pulso se mantenga en ese ancho, el servo se ubicará en la posición central de su recorrido. Si el ancho de pulso disminuye, el servo se mueve de manera proporcional hacia un lado. Si el ancho de pulso aumenta, el servo gira hacia el otro lado. Generalmente el rango de giro de un servo de éstos cubre entre 90° y 180° de la circunferencia total, o un poco más, según la marca y modelo. [7]

Se seleccionaron cinco servomotores uno para cada dedo de la mano, el cual se destaca por su gran torque, con engranajes metálicos y gran robustez, funciona con la mayoría de tarjetas electrónicas con microcontroladores y además con la mayoría de los sistemas de control de radio comerciales. En la figura 6 se muestra el tipo de motor considerado para el proyecto y en la tabla 1 se describen sus características. Es utilizado principalmente en proyectos de robótica y modelismo de tamaño mediano. Los servomotores ya montados en sus bases se presentan en la figura 9

Tabla 1. Características de servomotores.

Engranaje:	Metálico
Torque:	10 kgf/cm @ 6 Vcc
Rotación:	180°
Alimentación:	3,7 a 7,2 Vcc 20 mA máx.
Temperatura de operación:	-30 °C a 60 °C
Velocidad de operación:	<0,16 s
Conector	tipo "S" compatible con receptores Futaba y JR.
Peso:	58 g
Dimensiones:	40,5 x 20 x 45,5 mm



Figura 8. Ilustración de un servo motor y sus puntas de conexión

Fuente: Imagen tomada de <https://www.steren.com.gt/servomotor-con-torque-de-10-kgf-cm.html>



Figura 9. Órtesis con los servomotores ya montados.

3.2 Sistema de control

Para el sistema de control se utilizará una tarjeta Arduino es entonces una herramienta de procesamiento digital parecido a una computadora. Como tal, tiene elementos de entrada o salida digital a los cuales se les puede conectar: botones, pantallas LCD, teclados, teclados matriciales o sensores digitales. Para la comunicación será inalámbrica a través de Bluetooth que es un estándar de comunicación inalámbrica que permite la transmisión de datos a través de radiofrecuencia en la banda de 2,4 GHz.

3.2.1 Controlador Arduino

Arduino es una tarjeta electrónica digital y además es un lenguaje de programación basado en C++ que es “open-source” esto se traduce como de “uso-libre”. El hardware está construido por un microcontrolador de la familia AVR, que es una de las tarjetas electrónicas más usadas para crear prototipos.

Las instrucciones del lenguaje Arduino son muy fáciles de aprender y usar. Es una herramienta muy utilizada por estudiantes y profesionales de sistemas embebidos. Dentro de las tarjetas Arduino más conocidas se encuentra el Arduino Uno R3.

Arduino es entonces una herramienta de procesamiento digital parecido a una computadora. Como tal, tiene elementos de entrada o salida digital a los cuales se les puede conectar: botones, pantallas LCD, teclados, teclados matriciales o sensores digitales.

Además de las entradas digitales un Arduino tiene entradas analógicas que nos permiten medir las señales de sensores análogos. Para poder visualizar la información, se cuenta con un puerto de comunicación Serial-USB que mediante un puerto USB, de una computadora, nos permite enviar y recibir mensajes digitales mediante una USART ó también llamada UART [8]. Las principales características de un Arduino son:

- Velocidad en Mhz.
- Tamaño de memoria RAM, FLASH y EEPROM.
- Cantidad de pines de entrada/salida.
- Numero de pines analógicos.
- Cuantos puertos UART, I2C, SPI tiene.
- Tamaño de la tarjeta de evaluación.
- Bits del procesador.
- Voltaje del procesador.



Por ejemplo, el Arduino Uno funciona a 16Mhz, tiene 14 pines de entrada/salida digital y 6 canales de entrada para señales analógicas (ADC). También tiene 1 puerto UART, 1 I2C, 1 SPI y su procesador es un ATmega328P de 8 bits. La memoria FLASH es de 32KB, una RAM de 2KB y de EEPROM tiene 1KB.

3.2.2 Tipos de Arduino

Existen muchos y muy distintos tipos de Arduino, se pueden de acuerdo al procesador y cantidad de pines que tienen sus tarjetas. [9]

Tabla 2. Tipos de Arduino con sus diferentes características.

Tipo de Arduino	Procesador	#I/O	No. In ADC	MHZ	(VDC)
Arduino UNO R3	ATmega328p	14	6	32/2	5
Arduino MEGA R3	ATmega2560	54	16	256/8	5
Arduino NANO	Atmega328p	14	6	32/2	5/3.3
Arduino Leonardo	ATmega32u4	14	6	28/2.5	5
Arduino DUE	AT91SAM3X8E	54	12	512/96	3.3

3.2.3 Aplicaciones y funciones del Arduino

Las aplicaciones y funciones de un Arduino se pueden aplicar a prácticamente cualquier proceso que quiera ser automatizado. Desde controlar un invernadero, prender el foco de tu casa automáticamente por Wifi o incluso leer la computadora de tu vehículo. Se puede usar para aplicaciones caseras o incluso en ambientes industriales. La función de Arduino es la de automatizar procesos digitales. Esto es, el uso del procesador que tiene Arduino para la creación de aplicaciones que resuelvan problemas. Puedes comenzar a crear domótica, leer tags de credenciales, etc. Uno de los tutoriales más vistos de Arduino, te permite aprender a leer tags o credenciales RFID. También si prefieres dar acceso a tus puertas no mediante RFID sino con tu huella digital también te invito a visitar este tutorial, donde se usa un lector de huella digital con Arduino.

La principal función de un Arduino es poder crear un prototipo electrónico de manera rápida con el propósito de validar alguna propuesta. Su diseño permite poder aprender el lenguaje de forma muy rápida incluso para personas ajenas a la electrónica y/o programación. Si bien el código Arduino no genera un programa muy optimizado, la rapidez del desarrollo para un prototipo supera a esta desventaja. [10]

3.2.4 Funciones básicas del lenguaje Arduino

Arduino también es un lenguaje de programación. El lenguaje se basa en conocer las estructuras, clases, variables y funciones. Se presenta algunas de las funciones básicas del lenguaje Arduino. [11]

- Arduino digitalWrite.
- Arduino pinMode.
- Función millis.
- Para el uso de PWM. Arduino analogWrite.
- Comunicación con el puerto serial.
- Arduino Serial print.
- La función de Arduino Serial Read.
- Arduino timer.

El controlador seleccionado en función de las características requeridas y considerando lo accesible a los costos es el Arduino Nano 3.0, el cual es una pequeña y completa placa basada en el ATmega328, el mismo microcontrolador del Arduino UNO. El Arduino Nano ha sido especialmente



diseñado para trabajar montado en un protoboard o en un circuito impreso. Funciona con un cable USB Mini-B. El Nano es diseñado y se produce por Gravitech (USA). En la tabla 2 se describen las especificaciones técnicas principales y en la figura 10 se encuentra la imagen del Arduino adquirido para el proyecto.

Tabla 3. Especificaciones técnicas de la tarjeta Arduino Nano 3.0.

Microcontrolador:	ATmega328
Voltaje de Operación:	5V DC (nivel lógico)
Voltaje de Entrada:	7V - 12V DC
Pines I/O Digitales:	14 (6 PWM)
Pines Analógicos:	8
Corriente DC por Pin I/O:	40 mA (máx.)
Memoria FLASH:	32KB (2KB usados por el Bootloader)
Memoria SRAM:	2KB
Memoria EEPROM:	1KB
Frecuencia de Reloj:	16 MHz
Dimensiones:	18.5 mm x 43.2 mm

Sus funcionalidades principales se describen a continuación:

- RESET automático al descargar el programa
- LED azul en la base para indicar el encendido
- LED Verde (TX), Rojo (RX) y Naranja (L)
- Jumper para +5V conectado a AREF
- Regulador de tensión integrado
- Conector mini-B USB para programación y comunicación serie integrado en placa
- Conector ICSP para programación
- Pines con espaciado de 0.1" DIP para insertarlo directamente sobre una protoboard
- Botón de reset integrado
- Bootloader integrado que permite programarlo con el entorno de desarrollo Arduino sin necesidad de un programador externo. [12]

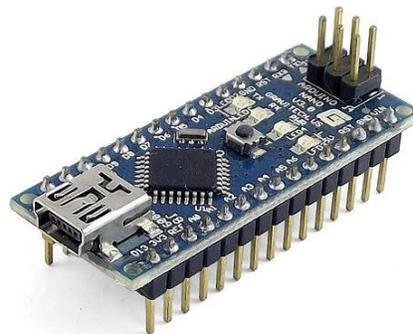


Figura 10. Arduino Nano 3.0.

Fuente: <https://www.robochip.net/product-page/arduino-nano-3-0>

3.2.5 Antena Bluetooth para Arduino

El Bluetooth es un estándar de comunicación inalámbrica que permite la transmisión de datos a través de radiofrecuencia en la banda de 2,4 GHz. Existen muchos módulos Bluetooth para usarlos en



nuestros proyectos de electrónica, pero los más utilizados son los módulos de JY-MCU, ya que son muy económicos y fáciles de encontrar en el mercado.

Son módulos pequeños y con un consumo muy bajo que nos permitirán agregar funcionalidades Bluetooth a nuestro Arduino. Estos módulos contienen el chip con una placa de desarrollo con los pins necesarios para la comunicación serie.

Existen dos modelos de módulos Bluetooth: el HC-05 que puede ser maestro/esclavo (master/slave), y el HC-06 que solo puede actuar como esclavo (slave). La diferencia entre maestro y esclavo es que en modo esclavo es el dispositivo quien se conecta al módulo, mientras que en modo maestro es el módulo quien se conecta con un dispositivo. Físicamente, los dos módulos son muy parecidos, solo varían algunas conexiones. Los pins que se encuentran son los siguientes:

VCC: Alimentación del módulo entre 3,6 V y 6 V.

GND: La masa del módulo.

TXD: Transmisión de datos.

RXD: Recepción de datos a un voltaje de 3,3V.

Key: Poner a nivel alto para entrar en modo configuración del módulo (solo el modelo HC-05)

State: Para conectar un led de salida para visualizar cuando se comuniquen datos.

Para efectos del proyecto se seleccionó el modulo Bluetooth HC-05, el cual permite conectarse con algún dispositivo de forma inalámbrica (bluetooth) estos módulos se pueden comportar como esclavo o maestro, los cuales sirven para escuchar peticiones de conexión y otros para generar peticiones de conexión. Si algún dispositivo se conecta, el modulo transmite a este todos los datos que recibe del Arduino y viceversa. El modulo tiene de 6 pines, puede actuar como maestro o como esclavo y acepta un mayor número de órdenes de configuración. Es un módulo sencillo e ideal para pequeños proyectos en los que buscas una comunicación fácil entre tu móvil y Arduino u otros microcontroladores. En el modo maestro puede conectarse con otros módulos bluetooth, mientras que en el modo esclavo queda a la escucha de peticiones de conexión.

El módulo Bluetooth HC-05 viene configurado de fábrica para trabajar como esclavo, es decir, preparado para escuchar peticiones de conexión, pero podemos configurarlo para trabajar con Maestro utilizando comandos AT. El módulo HC-05 cumple con las especificaciones del estándar Bluetooth 2.0 que es perfectamente compatible con celulares o teléfonos inteligentes Android, más no con los Iphone. En la figura 11 se muestra la antena seleccionada y en la tabla 4 se presentan sus especificaciones y características. [13]



Figura 11. Antena Bluetooth para Arduino

<https://uelectronics.com/producto/bluetooth-hc-05-maestro-esclavo-6-pines/>

Funciones:

- Reemplaza un enlace serial cableado por un enlace inalámbrico en forma transparente
- Posee el perfil bluetooth Wireless Serial Port
- Se puede configurar como Master o Slave (Maestro/Esclavo)
- Ideal para controlar algún proyecto Arduino, PIC, Atmel, etc. en forma inalámbrica con PC



Tabla 4. Especificaciones y características modulo Bluetooth HC-05 C

Voltaje de Operación:	3.6 VDC a 6 VD
Consumo Corriente:	30 mA a 50mA
Configuración:	Comandos AT
Chip:	BC417143
Versión o firmware:	3.0-20170609
Baudios por defecto:	38400
Baudios soportados:	1200, 2400, 4800, 9600, 19200, 38400, 57600, 115200.
Interface:	Serial TTL
Antena:	Integrada en el PCB
Protocolo Bluetooth:	Bluetooth Especificación v2.0+EDR
Frecuencia de banda:	ISM 2.4GHz
Modulación:	GFSK
Potencia de transmisión:	4dBm, Clase 2
Sensibilidad: -	84dBm a 0.1% BER
Velocidad asíncrona:	2.1Mbps (Max) /160 kbps
Velocidad síncrona:	1Mbps/1Mbps
Seguridad:	Autenticación y encriptación (Contraseña por defecto: 0000 o 1234)
Temperatura de trabajo (Max):	75°C
Temperatura de trabajo (Min):	-20°C
Dimensiones:	4.4 x 1.6 x 0.7 cm

3.2.6 Programador Arduino

Arduino proporciona un entorno de programación sencillo y potente para programar, pero además incluye las herramientas necesarias para compilar el programa y quemar el programa ya compilado en la memoria flash del microcontrolador. Además, el IDE nos ofrece un sistema de gestión de librerías y placas muy práctico. Como IDE es un software sencillo que carece de funciones avanzadas típicas de otros IDEs, pero suficiente para programar. [14]

El programar Arduino consiste en traducir a líneas de código las tareas automatizadas que queremos hacer leyendo de los sensores y en función de las condiciones del entorno programar la interacción con el mundo exterior mediante unos actuadores.

4 Resultados

Los resultados obtenidos a continuación se detallan, como primer paso fue el diseño y manufactura del circuito impreso en placa de cobre para el montaje del controlador Arduino y la antena bluetooth, para llevar a cabo las conexiones de los motores, la programación del controlador y llevar a cabo la aplicación móvil por medio de un teléfono celular.

4.1 Circuito impreso en placa para Arduino Nano

Para el proceso de seguimiento de este proyecto se llevó a cabo el diseño de una placa sencilla con el Arduino NANO así como la Antena Bluetooth el cual este diseño fue impreso para plasmarlo en una placa fenólica y hacer el diseño de las pistas. Primeramente se identificaron todos los pines que se conectarán en el circuito, como los pines del Arduino NANO y los de la Antena Bluetooth, como se muestra en la figura 12 mediante la imagen en la cual se identifican cada uno de ellos con su respectivo nombre y posición.

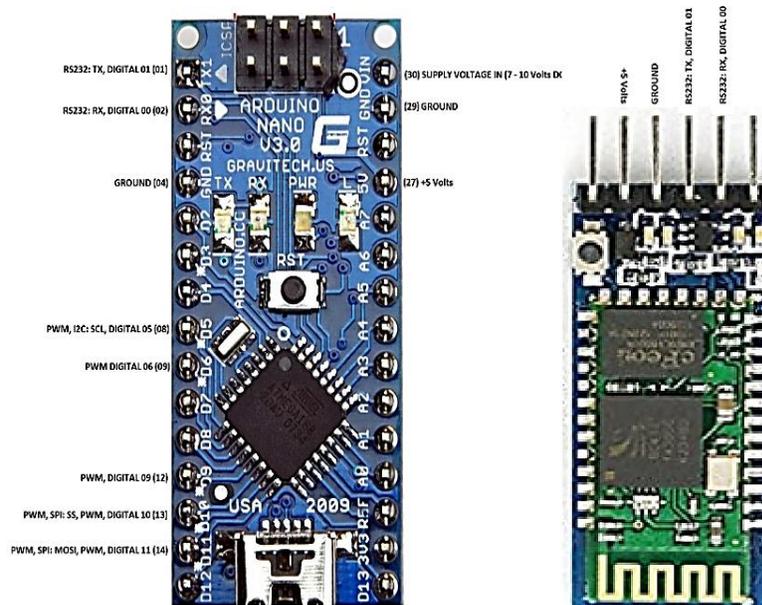


Figura 12. Los pines identificados cada elemento a conectar en el circuito de placa impresa como se observan las imágenes del Arduino Nano y la antena de Bluetooth con.

Para su configuración se utilizó el programa editor de placa de circuito impreso (PCB) que es interactivo para sistemas Windows que incluye una función de importación de esquemas listas de conexiones, comprobación de las reglas de diseño, y puede proporcionar placas ya determinadas de diferentes ámbitos, a continuación, se realizó el trabajo el siguiente trabajo con las conexiones del Arduino y la Antena de Bluetooth.

En la figura 13 se muestra el diseño del circuito donde se puede apreciar que se insertaron 5 jumpers triples donde que van conectados a las entradas PWM con su respectivo voltaje en puente hacia el Arduino. Así como un pushbutton de enclavamiento para energizar - desenergizar el circuito y dos terminales para alimentación con dos baterías de 4,2 V de 5200 mA cada una.

Después de la impresión ya con la solución barrido con el cloruro férrico, se procede a limpiar la placa con dieléctrico, para después agregar el Arduino NANO con sus demás componentes y soldarlos con al circuito. En la figura 14 se aprecian la imágenes de la placa por la parte superior con los elementos correspondiente y en la parte posterior las uniones soldadas.

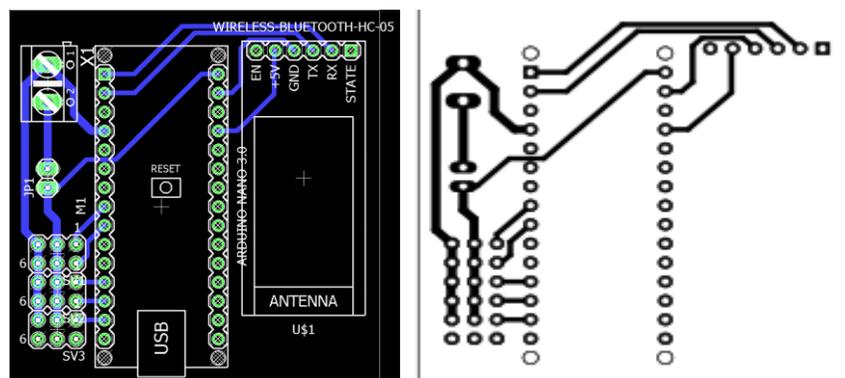


Figura 13. Diseño del Circuito por medio del Programa PCB.

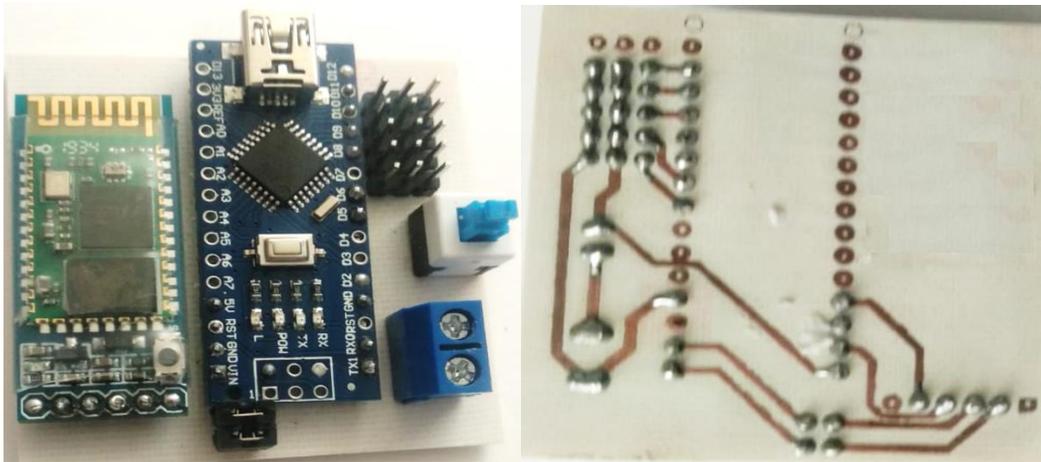


Figura 14. Parte superior e inferior de la placa con sus componentes.

En la figura 15 se muestra los componentes ya debidamente energizados mediante las baterías, en la primera imagen se presenta el dispositivo solo y en la segunda imagen se muestra ya montado sobre la mano, la siguiente etapa es la programación del enlace del controlador y la antena, considerando las secuencias de los movimientos de los servomotores y declaración de las variables de apertura de los dedos.

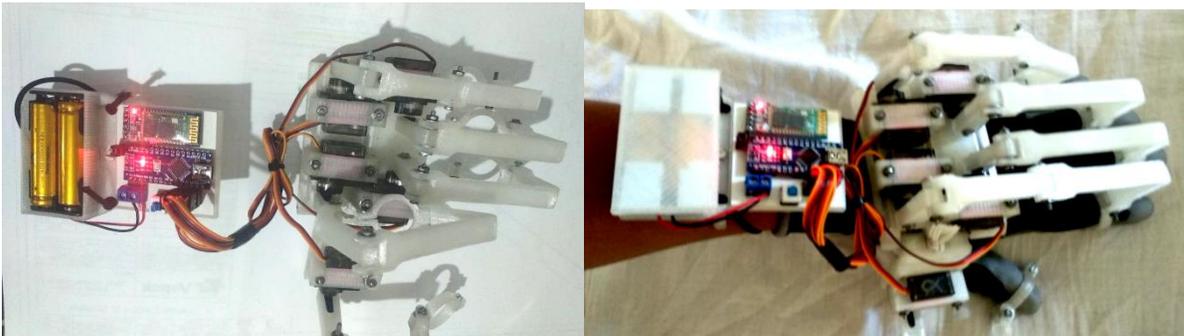


Figura 15. Componentes energizados listos para ser programados.

4.2 Código de programación de Arduino

Programación para los servomotores y secuencias

- Declaración de entidades que son nuestros servomotores.
- Declaración de conexión de pines para cada servomotor.
- Variables de transición de tiempo de barrido para servomotor.
- Variable de posición de servomotores
- Variable de selector de modo
- Variables de almacenamiento de posición para cada servo
- Variable que almacena la resolución para el paso del servo

Programación de Secuencias:

- Abre y cierra todos los dedos a la misma vez.
- Secuencia dedo por dedo (abre y cierra uno a la vez)
- Abre uno por uno, cierra uno por uno.



Función Bluetooth, cuando un carácter es enviado a través del dispositivo el programa ejecuta una secuencia o una instrucción.

Declaración de variables para apertura de dedos manual:

- Cierre de dedos manual.
- Disminuye en uno la resolución de pasos.
- Aumenta en uno la resolución de pasos

En la figura 16 se muestra un ejemplo de la programación en Código Arduino en este caso para la declaración de los servomotores en cada dedo, así como las distintas variables a ocupar en ellos.

```
#include <Servo.h>
//Declaracion de entidades como servomotores
Servo pulgar;
Servo indice;
Servo medio;
Servo anular;
Servo menique;

//Variables de transicion de tiempo de barrido
int tiempo=10;
int velocidad=10;
//Variable de Posicion de servomotores
int pos = 0;
//Variable de selector de modo
int selector=0;
// Variables de Almacenamiento de posicion para cada servo
int a,b,c,d,e;
//Variable que almacena la resolucio para el paso del servo
int resolucio=5;
void setup() {
```

Figura 16. Ejemplo de la programación en Código Arduino para la declaración de los servomotores en cada dedo, así como las distintas variables a ocupar en ellos.

4.3 Comunicación con APP de Arduino Bluetooth

Para empezar el procedimiento de prueba de Bluetooth con la vinculación del Arduino Nano, se tiene que descargar la aplicación de Arduino Bluetooth Controller (figura 18) que se encuentra ubicada en la aplicación de la Playstore, de cualquier celular Android o IOS.

En la figura 18 se muestra la siguiente etapa es que, en un celular de cualquier sistema operativo, accedamos a la configuración de bluetooth y agregamos el dispositivo que tenemos conectado al Arduino NANO con el nombre y la contraseña que se les indicó (ESCLAVO Contraseña: 1234: usuario y contraseña de fábrica).

Después de que se tiene el dispositivo Bluetooth (Esclavo) agregado en el celular e instalado la aplicación Arduino Bluetooth Controller, se inicia con la siguiente operación, abriendo el programa Arduino Bluetooth Controller, y se selecciona el dispositivo "ESCLAVO" y se va a Controller mode. Este proceso se muestra en la figura 19.



Figura 17. Se observa la aplicación de Arduino Bluetooth Controller.



Figura 18. Observación de dispositivo Bluetooth Esclavo agregado

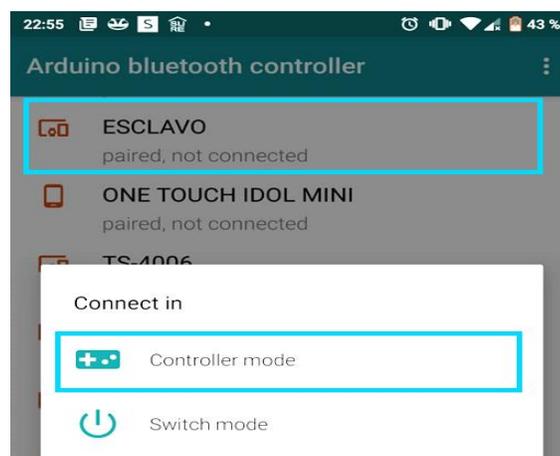


Figura 19. Se observa que se selecciona el apartado de Esclavo y después Controller Mode.



Abriendo el Controller Mode aparece un control de videojuego que se configurara con las siguientes variables que se declararon en el lenguaje de programación, para esto tenemos que seleccionar el engrane que se encuentra en la parte derecha superior de la figura 20.

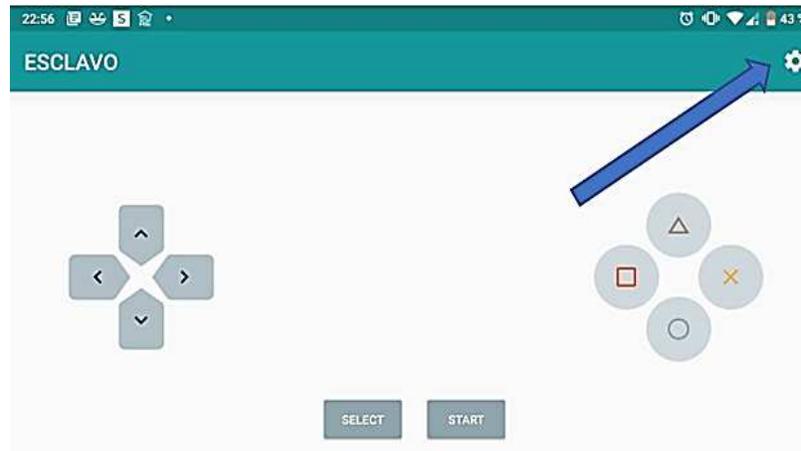


Figura 20. Observación del Controller Mode, para configuración de variables.

Una vez abierto el Controller Mode, se prosigue con la configuración de variables para las siguientes funciones:

- A. Secuencia 1 (Ejercicio 1)
- B. Secuencia 2 (Ejercicio 2)
- C. Secuencia 3 (Ejercicio 3)
- D. Detener las secuencias
- E. Control manual de servos (avance)
- F. Control manual de servos (retroceso)
- G. Aumenta los grados (resolución+1)
- H. Disminuye los grados (resolución-1), cuando la resolución es de 1 (1 grado por presión de botón) ya no disminuye más.



Figura 21. Configuración de variables en los ajustes de Controller Mode.

Funcionamiento del control manual: Determina cuantos grados se mueven los servos cuando oprime el botón (inicia de 5 en 5) con las variables configuradas anteriormente.

4.4 Pruebas de movilidad de exoesqueleto

En esta parte se observa que el mecanismo desarrollado durante todo el proceso de diseño y manufactura de este prototipo, así como la programación y ensamblado, logre la función de extensión y retracción de los dedos de la mano, con el fin de moverlos en un máximo de un 70%, ya que la movilidad será limitada por el diseño del exoesqueleto, así como la ergonomía y diseño. En las imágenes de la figura 22 se muestran las pruebas de movilidad del exoesqueleto. En el enlace siguiente se presenta el funcionamiento previo de la órtesis: https://youtu.be/qn_60IXm8QM

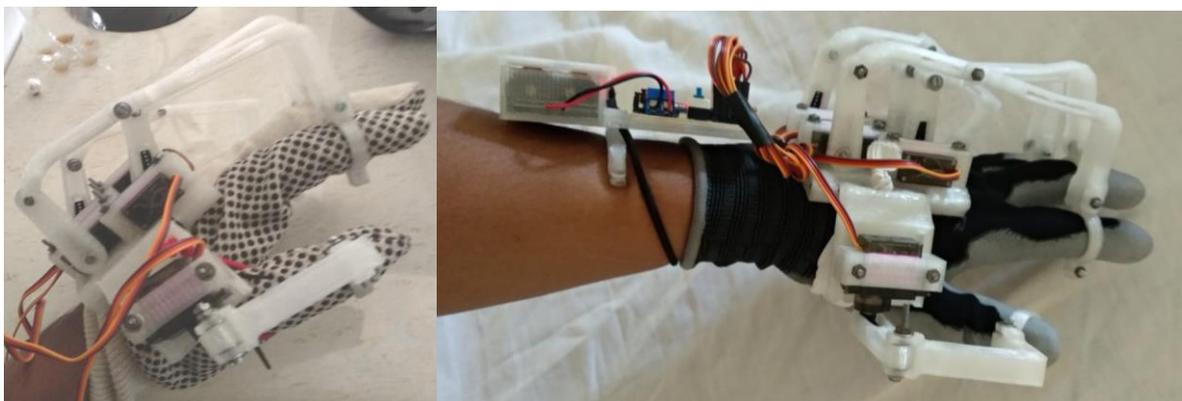


Figura 22. Pruebas y ajustes de la órtesis en físico.

5 Conclusiones

El prototipo de órtesis elaborado de material termoplástico (PLA) con circuitos y materiales de fácil acceso, pueden ser adaptadas directamente al paciente y ser fácilmente cambiadas, así como reimpresas cada una de las piezas del prototipo en caso de ruptura o desgastes, el costo de fabricación del prototipo se encuentra por debajo de promedio de todas las órtesis existentes. El prototipo se realizó considerando aspectos de la metodología de diseño para la manufactura y el ensamble.

Este prototipo se puede convertir en una parte integral del proceso de terapia cuando deseamos, la recuperación del movimiento o función en la mano en base al diagnóstico de un especialista.

El prototipo de órtesis automatizada o férula como también se le podría conocer, tiene un objetivo específico y a medida que los objetivos terapéuticos cambian, el diseño y/o el uso de este prototipo de órtesis podría evolucionar. Aun cuando muchas órtesis / férulas pueden ser utilizadas largos períodos de tiempo, muchas también son utilizadas solamente durante el período post lesión / post quirúrgico ya que esto dependerá si el paciente tiene mejoría y es estudiado a través de un fisioterapeuta, dando un diagnóstico de que tan funcional puede ser el tratamiento de cesiones con el prototipo así como si el paciente es capaz de recuperar la movilidad y el tiempo de recuperación.

Se hicieron pruebas de la órtesis en una mano con los tres diferentes tipos de sesiones de ejercicios programados, demostrado que el movimiento de las falanges puede realizarse independiente mente, logrando así la movilidad de estos en más de un 60 por ciento de extensión y flexión de los dedos, probando que es factible para un tratamiento de rehabilitación de mano que lo requiera.



5.1 Recomendaciones

La utilización de este prototipo de órtesis de PLA es de uso corto sin alimentación externa en un máximo 15 minutos, por la duración de las baterías, ya que si existe algún tipo de alimentación secundaria podría utilizarse el tiempo que sea se requiera alimentado a 4.5 volts de corriente directa.

Se dice que las órtesis son únicas e intransferibles, y solo debe usarse en un solo paciente para el que fue confeccionado, pero este prototipo de órtesis es para uso general de cualquier persona o paciente que lo requiera siempre y cuando utilice todas las medidas de sanitización e higiene correspondientes ya que la órtesis fue diseñada con el fin de ajustarse a cualquier mano que pueda ser recuperable así como su uso correcto y limpieza.

La órtesis debe usarse con algunos tipos de guantes del cualquier tipo de tela que permitan la movilidad del esqueleto de la mano. Si la órtesis se moviera mucho dentro los dedos de la mano o molesta se debe ajustar los anillos con sus tornillos y tuercas para aflojar o cerrar el anillo que entre en el dedo de la mano, recomendado el guante para mayor ajuste y comodidad.

Referencias

- [1] “Férula Dinámica para mano” (s.f.) En <http://ortopedianodal.com/producto/ferula-dinamica-para-flexion-de-muneca-y-dedos-mod-13b/>
- [2] “Férula dinámica” (s.f.). En <https://www.centralorthomedica.com/brazo.html>
- [3] Sánchez, S. (2017). FDM o modelado por deposición fundida, te explicamos todo! En <https://www.3dnatives.com/es/modelado-por-deposicion-fundida29072015>
- [4] “PLA – blanco” (s.f.). En <https://luktec.com/pla-blanco>
- [5] “Anet A8” (s.f.). En <https://anet3d.mx/products/a8-plus-printer>
- [6] Carletti, E. J. (2017). *Servos y características básicas*. En <http://robots-argentina.com.ar/didactica/servos-caracteristicas-basicas/>
- [7] Kosow, I. L. (2004). *Máquinas eléctricas y transformadores*, Segunda Edición. New York: Pearson.
- [8], [9], [10], [11], “Arduino”. (2018).. En <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/que-es-arduino/>
- [12] “Bluetooth en Arduino” (s.f.). En <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2016/11/13/bluetooth-en-arduino/>
- [13] “Arduino Nano 3.0” (s.f.). En <https://www.robochip.net/product-page/arduino-nano-3-0>
- [14] “Arduino IDE” (s.f.) En <https://www.arduino.cc/en/software>



Herramientas Enfocadas en ROS para la Construcción y Programación de Robots Móviles

Peza Ortíz Edebaldo¹, García Trinidad Enrique¹, García Sánchez José Rafael¹,
Martínez Martínez Jesús¹ y Juárez Carrillo César Felipe¹

Tecnológico de Estudios Superiores de Huixquilucan¹

enrique.g.t@huixquilucan.tecnm.mx

edepez@hotmail.com

Resumen

Los robots implican la integración de varias tecnologías, principalmente mecánica, eléctrica, electrónica y cómputo. Actualmente, podemos encontrar una amplia variedad de mecanismos y plataformas para diferentes tipos de robots. Así, del lado del software podemos encontrar diversas herramientas para el control de tareas como lo son el monitoreo de sensores, el accionamiento de actuadores, entre otras. Incluso, hay disponibles sistemas operativos para robots, tal como el Robot Operating System (ROS). Si bien ROS actúa como un software intermediario entre aplicaciones, estas no necesitan ubicarse dentro de la computadora anfitrión, sino que también pueden localizarse en otras computadoras embebidas como es el caso de los microcontroladores. El presente trabajo describe elementos de software, hardware y su función en la construcción de robots móviles tomando como marco de referencia el sistema operativo ROS. También, se integra un microcontrolador de 32 bits para la interacción entre ROS y el hardware del robot móvil.

Palabras clave: ROS, Raspberry Pi, STM32, RPLiDAR.

1. Introducción

Los robots son sistemas integrados por diversas áreas de la tecnología: mecánica, eléctrica, electrónica y cómputo. Cada movimiento y tarea que realiza un robot implica el accionamiento desde un elemento hasta cientos de ellos. Los robots típicamente tienen una terminal de control y/o una computadora con algún software de programación. La programación del robot tradicionalmente consiste en indicar puntos por los que debe pasar la articulación final y alguna serie de acciones o comandos a ejecutar. Esto implica que no se interactúa con los controladores de los sensores y actuadores, porque dichos elementos están integrados en el software. Lo anterior implica que estos robots tienen una arquitectura cerrada, por lo que, si es necesario modificar el software para incorporar algoritmos de control propios, se opta por trabajar con un robot con arquitectura abierta o realizar una ingeniería inversa, siendo la primera opción la más sencilla.

Para integrar diversas aplicaciones de software, los robots utilizan sistemas operativos que se encargan de administrar la operación en conjunto con los controladores y programas que se ejecutan en el procesador. Esta aproximación ha abierto la posibilidad de construir y desarrollar proyectos de robótica a partir de un marco de equipo preexistente; algunos ejemplos son RTMIDDLEWARE, OPROS, NAOiq, ROS, entre otros. De estos, el que cuenta con mayor soporte y uso tanto en investigación como en aplicaciones comerciales es ROS. ROS es el acrónimo de *Robot Operating System*, un software que proporciona un entorno para la ejecución de los programas dirigidos al control de robots a través de la adquisición de señales proveniente de sensores, de la activación de actuadores y su lógica de control y cuyas instrucciones son escritas en lenguaje de programación C++, Python y Java. En este trabajo se presenta un método para integrar el hardware de un robot móvil y ROS.



La estructura del manuscrito es como sigue. En la segunda sección se describe la forma en que los programas son controlados por ROS y los elementos necesarios para instalar el sistema operativo. En la tercera sección se da la descripción de un microcontrolador STM de 32-bits, mismo que se configura y programa para comunicarse con ROS. En la cuarta sección se describen los elementos que conforman al sistema mecánico del robot móvil. En la quinta sección se describe la parte electrónica del robot móvil haciendo hincapié en su diseño para tareas de navegación autónoma. En la sexta sección se describe la arquitectura de ROS y su organización dentro del espacio de trabajo del sistema operativo. El apartado 7 muestra el protocolo *rosserial*, mismo que tiene la función de conectar nodos que se ejecutan fuera de ROS, por ejemplo, programas en un microcontrolador u otra computadora con nodos que se ejecutan dentro de ROS. En el apartado 8 se describen las partes de la estructura de un robot móvil. El apartado 9 describe las herramientas necesarias para la programación de un microcontrolador de 32 bits para interacción con ROS. En el apartado 10 se muestran los resultados de la ejecución de programas que controlan un escáner RPLiDAR, una cámara digital, la comunicación con un microcontrolador mediante *rosserial* y la ejecución propia del sistema operativo Robótico.

2. Robot Operating System

ROS es un software denominado meta-sistema operativo [6] de aplicación específica para robots. A diferencia de un sistema operativo de aplicación general (Linux, Windows, OS, etc.), éste requiere de un sistema operativo anfitrión; es decir, ROS necesita instalarse dentro de alguno de los sistemas operativos de propósito general. Lo anterior implica que ROS es compatible con cualquier hardware que soporte un sistema operativo de propósito general.

Para este trabajo se eligió una tarjeta Raspberry Pi modelo 4B con 8GB de memoria RAM como hardware anfitrión, mostrada en la Figura 1, y como sistema operativo anfitrión Ubuntu 20.04. De las versiones disponibles del meta-sistema se emplea la versión ROS Noetic.



Figura 1. Raspberry Pi 4B.

Actualmente las tarjetas Raspberry Pi son la plataforma integrada de código abierto que gozan de mayor preferencia para aplicaciones robóticas de investigación [12]. Al ejecutarse ROS se crea un ambiente para que las aplicaciones que gobiernan un robot se comuniquen entre sí.

Las aplicaciones que controlan las tareas para gobernar un robot se denominan nodos. Los nodos tienen la característica de ser independientes entre sí y su ejecución es gestionada por un nodo maestro. Al ejecutarse el nodo maestro éste publica una dirección URI que permite conectarse con los distintos nodos. El maestro ejecuta los nodos y para ello solicita el nombre del nodo, el nombre del mensaje que leerá o publicará el nodo (si es que se comunica con otros nodos), el tipo de mensaje, el puerto de conexión y posteriormente le asigna una dirección URI (ver Figura 2). Con la información anterior, el maestro crea vías de comunicación que conecta directamente los nodos; por lo que los datos que se transfieren no pasan por el maestro. De esta forma, si la ejecución del nodo maestro se detiene los nodos pueden continuar comunicándose.



Figura 2. Conexión entre nodos.

La conexión entre nodos no está limitada a aplicaciones que se ejecutan dentro de ROS sino también fuera de la propia computadora anfitrión; es decir, se puede encontrar software para conexión con una amplia variedad de sensores y actuadores. Sin embargo, no hay aún soporte de ROS para todos los componentes existentes en el mercado. En este sentido, ROS ofrece un protocolo de formato serie para conexión con dispositivos externos llamado rosserial [6].

3. Tarjeta Moebius

Es una tarjeta basada en un microcontrolador STM32F103RCT6 que contiene 51 pines de propósito general con funciones especiales, 8 temporizadores de 16 bits, 2 periféricos UART, 3 periféricos USART, 3 periféricos SPI, 2 periféricos I2C, 1 periférico USB, 1 periférico CAN, 3 canales de conversión analógica-digital y 1 canal de conversión digital-analógica (ver Figura 3). Su frecuencia máxima de operación es de 72 MHz. Además, esta tarjeta integra dos circuitos de control TB6612FNG que permiten manipular el funcionamiento de cuatro motores de corriente continua. La tarjeta también cuenta con regulación de voltaje para alimentar el microcontrolador y conectores para la alimentación eléctrica. Su voltaje de alimentación es entre 9 y 12 VDC.



Figura 3. Tarjeta Moebius.

El circuito integrado TB6612FNG es un controlador de puente H diseñado para producir una modulación por ancho de pulso de 2 vías con una corriente continua de 1.5 A y un voltaje entre 6 y 15



VDC. Una función especial con la que cuentan algunos de los pines del microcontrolador, y está relacionada con los temporizadores, es el modo encoder. Este modo contabiliza los pulsos de un encoder incremental con dos canales y permite la transferencia del valor de la cuenta sin interrumpir la ejecución del programa principal del microcontrolador al utilizar los accesos directos a memoria; de esta forma, solo se configura el funcionamiento del temporizador y de los pines en este modo al inicio de la ejecución del programa antes de entrar en el bucle del programa principal.

Un circuito integrado FT232RL, que es un conversor USB2.0 a UART, montado en la tarjeta permite enlazar los nodos ejecutados en ROS con los programas ejecutados por el microcontrolador por medio del protocolo rosserial. Este protocolo permite enlazar a ROS con dispositivos y computadoras externas, así como otros microcontroladores y sensores.

4. Movilidad

La movilidad es uno de los aspectos más importantes a la hora de seleccionar la estructura y configuración del tipo de robot. Los factores por considerar son maniobrabilidad, capacidad de control, condiciones de operación y el servicio a prestar. En el caso de un robot móvil destinado a tareas en interiores como mapeo del espacio y desplazamiento de objetos una estructura con ruedas se apunta a ser la elección más eficiente, los robots articulados requieren un cierto grado de libertad lo que establece mayor complejidad mecánica para el control. La estabilidad es otro aspecto que considerar al momento de seleccionar un formato para el robot. Para este trabajo se optó por una estructura con cuatro ruedas, pues con esta configuración la estabilidad no suele ser un problema porque el centro de gravedad está ubicado entre las ruedas.

Para el desplazamiento del robot se eligieron ruedas omnidireccionales (también llamadas mecanum), ya que estas tienen una articulación rotacional y pueden también moverse como una articulación prismática. Un robot con ruedas regulares tiene únicamente una articulación rotacional. Las ruedas omnidireccionales tienen dos grados de libertad, ya que se mueven a través de una articulación prismática pero también una rotacional, pues pueden girar en una posición fija; esta característica permite mover al robot en cualquier dirección sin cambiar la orientación de la rueda [13]. En la Figura 4 se muestra este tipo de rueda y el actuador que se utiliza en el prototipo de robot móvil.

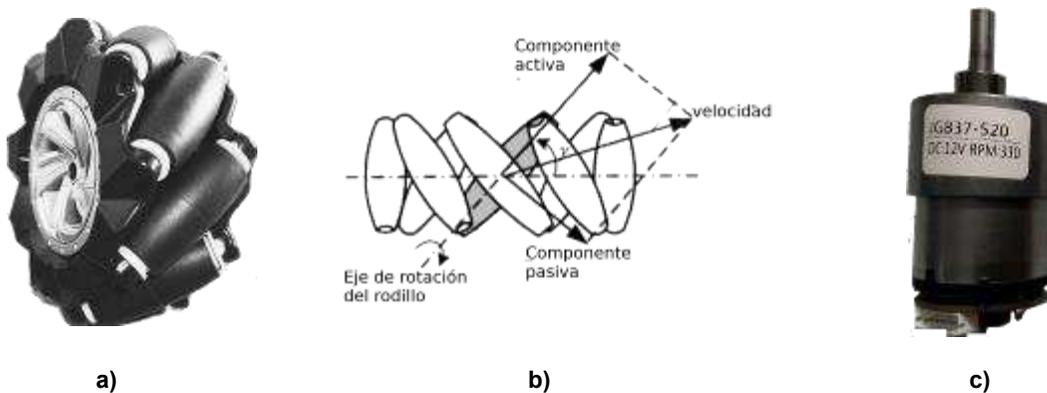


Figura 4. De izquierda a derecha: a) Rueda mecanum, b) componentes vectoriales de velocidad en la rueda mecanum y c) modelo de motor de CC utilizado.

En la Figura 4a se muestra el formato de las ruedas omnidireccionales que se utilizan en el robot. En la Figura 4b [13] se observa que las ruedas omnidireccionales poseen un conjunto de rodillos en su circunferencia que se encuentra de forma perpendicular al eje de rotación de la rueda con su eje de rotación orientado a 45° al plano de la rueda y a 45° al eje de rotación de la rueda. Con esta configuración se consigue que el robot pueda moverse hacia los lados al rotar sus ruedas de forma opuesta y con la



misma velocidad. Mientras que en la Figura 4c, se presentan los actuadores que se utilizan para proporcionar el movimiento al robot móvil. Tales actuadores son motores de CC que pueden producir una velocidad de rotación de 330 rpm y cuyo consumo es de 0.8 W por cada uno. La potencia de consumo de los motores los hace adecuados para ser controlados por el circuito integrado TN66NFG a través de la conexión de dos motores por circuito integrado. Nótese que este modelo de motor incluye un encoder en la parte posterior.

5. Elementos de percepción

Para habilitar de autonomía a un robot móvil es indispensable adquirir información de su entorno, de los objetos a su alrededor y su posición relativa. Esta información se adquiere mediante el uso de sensores y otros dispositivos capturadores de imágenes como cámaras digitales. La información de los sensores se emplea para calcular la localización y posición del robot, así como la identificación de objetos, mapeo y navegación.

Una clasificación de sensores destinados a emplearse en robots autónomos los divide en sensores propioceptivos y exteroceptivos [14]. Los primeros son destinados a medir valores internos del robot, nivel de batería, posición de las ruedas, ángulo de los eslabones, velocidad y aceleración de desplazamiento, etc. Los sensores para adquirir las señales de estas variables son los encoders, potenciómetros, unidades de medida inercial, brújulas, etc. Los sensores exteroceptivos son los destinados a obtener información del entorno donde se ubica el robot; ejemplos de estos sensores son los sensores ultrasónicos, infrarrojos, de distancia, etc. La tabla 1 muestra la clasificación de sensores propuestos en [14]. Mientras que la Figura 5 presenta los sensores utilizados en el prototipo de robot móvil bajo estudio.

Tabla 1. Clasificación de sensores [14]empel

Clasificación	Sensor	Función
Sensores táctiles	Proximidad/interruptores	Útiles para determinar la posición a corta distancia y también para calcular la fuerza con la que se interactúa con un objeto.
Encoders	Ópticos/magnéticos	Permiten conocer la velocidad de rotación de las ruedas y la distancia que ha recorrido un móvil.
Ópticos	Infrarrojos/LiDAR	Se puede conocer la distancia entre el robot y los objetos a su alrededor.
Orientación	Giroscopio	Ayuda a determinar la orientación del robot.
Imagen	Camaras (CCD/CMOS)	Proporcionan una gran cantidad de información del entorno lo que permite mayor interacción del robot con el ambiente.



a)



b)



c)

Figura 5. De izquierda a derecha: a) Sensor RPLidar A1 M8, b) Raspberry Pi Cam y c) Encoder utilizado en cada uno de los motores montados en el robot.



Un robot móvil con navegación autónoma necesita realizar localización y mapeo, también referido como *Simultaneous localization and mapping* (SLAM), es decir, debe medir su desplazamiento y el entorno a su alrededor para crear un mapa del mismo; por lo que el mínimo número de variables a registrar son las revoluciones que han efectuado sus ruedas, la velocidad a la que se mueve el robot y la orientación que tiene con respecto a un sistema de coordenadas inicial. La velocidad y distancia recorrida se pueden determinar de forma aproximada a través de la lectura de la señal de los encoders montados en sus ruedas, la orientación y aceleración se miden con una unidad de medida inercial MPU6050 que consta de un acelerómetro y un giroscopio, cada uno de tres ejes.

Para recolectar información del entorno donde navega el robot se eligió una cámara digital de 8 megapíxeles con frecuencia de muestreo de 30 FPS y un sensor RPLiDAR 1A M8 que mide la distancia que hay entre el robot y objetos colocados alrededor suyo; estos dispositivos permiten construir un mapa del entorno. Los datos de estos dispositivos también se pueden utilizar para estimar la posición y orientación del robot junto con los datos de los sensores propioceptivos.

La cámara digital y el RPLiDAR se conectan directamente con la tarjeta Raspberry Pi (y no con el microcontrolador) para acceder a la cámara y el RPLiDAR con ROS, por lo que son necesarios dos programas que dentro del entorno de ROS se denominan *packages* y estos se describen en la siguiente sección. Los *packages* para acceder a los dispositivos anteriores son *usb_cam* y *rplidar*.

6. ROS Packages

Los actuadores y sensores de un robot junto con la lógica de control se gobiernan mediante programas. Con un programa podemos recibir los datos provenientes de un sensor, procesarlos y enviar una respuesta u orden a un dispositivo relacionado con el sensor. Para un actuador la actividad es similar; esto es, procesamos un conjunto de datos y en función del resultado damos una orden para éste. Los procesos que se han de realizar se calculan mediante programas. En ROS los programas que se ejecutan son nodos y los nodos son *packages*, de esta forma para un robot en particular debemos crear un *package* para gobernar su motricidad, otro para recopilar los datos de los sensores otros para procesar dichos datos, otro para enviarlos, y varios más para que el robot navegue y/o construya un mapa.

Una ventaja que ofrece el sistema ROS es que cuenta con amplios repositorios de *packages* para diferentes actividades, por ejemplo, *roserial* es un *package* para comunicar ROS con dispositivos externos. En los repositorios podemos encontrar *packages* para control de cámaras digitales, captura de imágenes, video, audio, procesamiento de señales, navegación autónoma, mapeo y control de sensores como un RPLiDAR. La amplia cantidad de *packages* disponibles y en continuo desarrollo no garantiza que funcionen como se necesita para una actividad en particular, por lo que es común que sea necesario modificar los *packages* para el funcionamiento particular de un robot (además siempre se tiene la opción de crear un nuevo *package*).

Los repositorios de *packages* son muy útiles ya que permiten construir una plataforma de la cual partir para realizar experimentación. ROS en particular es un sistema que ha ganado bastante popularidad como herramienta de experimentación e investigación en robótica móvil, asistencial e incluso en robótica industrial.

Para efectos de operar el robot móvil se añaden los *packages*: *roserial*, *usb_cam*, *rplidar*, *std_msgs* y *cv_bridge*. Así, ***usb_cam*** permite acceder a la cámara web a través de ROS, ***rplidar*** controla y recibe los datos de un RPLiDAR A1 8M, ***std_msgs*** define los tipos de datos de los mensajes, ***cv_bridge*** convierte el formato de imagen de OpenCV al formato nativo de ROS para imágenes. La Figura 6 muestra la estructura de los *packages* en ROS.

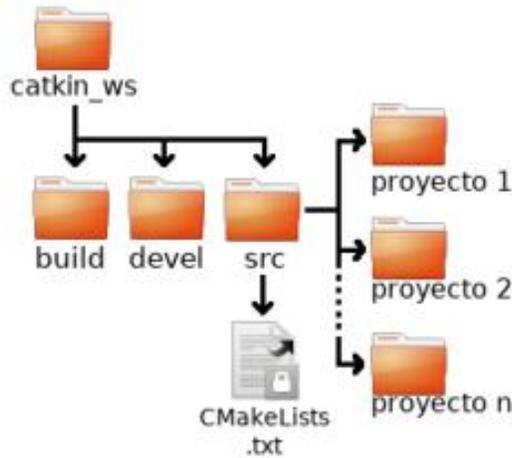


Figura 6. Estructura de los proyectos (packages) en ROS.

Los *packages* se deben agrupar en un espacio de trabajo que se actualiza al crear una carpeta y ejecutar un comando llamado `catkin_make`. En ese sentido, la Figura 6 muestra una carpeta denominada `catkin_ws`, las siglas `ws` son por `workspace`. Un espacio de trabajo consta de 3 carpetas, `build`, `devel` y `src`, dentro de la carpeta `src` es donde se crean los *packages* o se añaden *packages* de terceros. Las siglas de la carpeta `src` con la contracción de `source` es decir código fuente.

7. Rosserial

Es un *package* en el entorno de ROS. Los *packages* son aplicaciones que se ejecutan en ROS y consisten en un grupo de nodos en ejecución que realizan una tarea estandarizada o de uso frecuente. `rosserial` convierte los mensajes que se transfieren entre nodos dentro del entorno de ROS a formato serie para comunicarlos con hardware externo a ROS o a la computadora anfitrión. `rosserial` se describe en dos partes, servidor `rosserial` y cliente `rosserial`. `rosserial server` es una aplicación que se descarga de los repositorios de ROS en la web y lo ejecuta en ROS, éste pasa a formato serie los mensajes que se pretenden enviar a dispositivos externos. `rosserial cliente` convierte los mensajes que se pretenden enviar desde un dispositivo externo a ROS a nodos que se ejecutan dentro de ROS, como se muestra en la Figura 7.

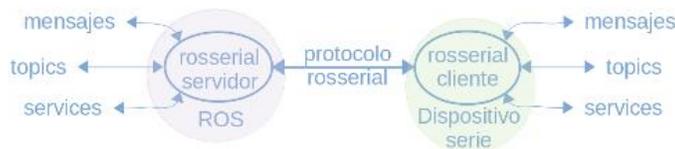


Figura 7. Interacción entre servidor `rosserial` y cliente `rosserial`.

Los *messages*, *topics* y *services* son los tipos de mensajes que se pueden enviar entre nodos, `rosserial` actúa sobre los tipos *topics* y *services* así como realizan la conversión de estos dos tipos a comunicación serie, cabe mencionar que los nodos utilizan el protocolo TCP/IP para comunicarse cuando los nodos se ejecutan dentro de ROS.

La Figura 8 ilustra la trama de bytes que genera el protocolo `rosserial` y la función de cada uno.

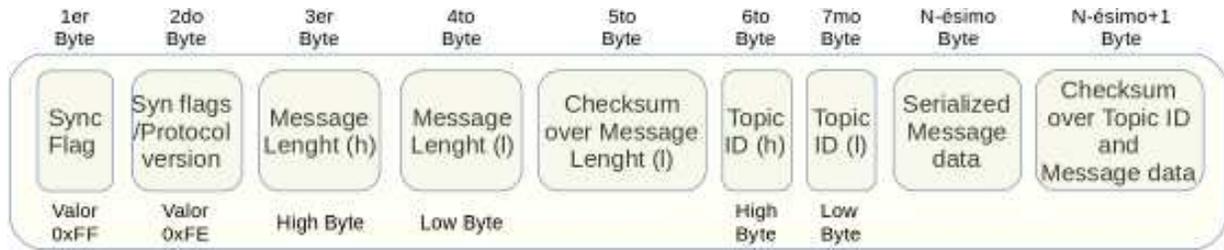


Figura 8. Formato del protocolo roserial [6].

Se puede ver que para cada dato que se pretenda transmitir por medio de roserial existen al menos 8 bytes que se emplean solo para establecer y terminar la comunicación. Únicamente el N-ésimo byte, en la Figura 7, representa los datos que un nodo en ROS procesa. La forma más eficiente para el uso de roserial es un envío y lectura constante de información de modo que el canal de comunicación no se cierre, sin embargo, esto no es práctico para el dispositivo externo, el formato más práctico para el dispositivo es recolectar una cantidad de datos, abrir el canal de comunicación, enviar y recibir los datos y posteriormente cerrar el canal de comunicación; lo anterior de forma periódica o por interrupción.

Ya que utilizar roserial implica periodos en los que el dispositivo externo debe actuar por su cuenta en función de los últimos datos intercambiados con ROS y de la tarea en ejecución, es deseable que los dispositivos externos cuenten con un grado de autonomía. Un controlador externo a ROS puede administrar una autonomía temporal de sensores y actuadores. Para el robot, se utiliza un microcontrolador STM32F103RCT6, y a través de su periférico UART2 se conecta con ROS. Para hacer funcionar la conexión se descarga y añade la biblioteca para cliente roserial en el proyecto de programación del microcontrolador.

8. Estructura

La base del móvil consiste en una placa de aluminio en la que se atornillan los motores. Las ruedas se acoplan a la flecha mediante tornillos, la parte motriz se coloca en el lado inferior de la placa de aluminio. En la parte superior se organiza la tarjeta Raspberry Pi, la tarjeta Moebius y la cámara digital. La Figura 8 ilustra una vista inferior y superior de la base del robot; en estas se observa el montaje de los motores y ruedas. La figura 9 muestra el ensamble del robot móvil.

En el ensamble del robot resta agregar el RPLiDAR y las baterías de alimentación del robot. En la Figura 9 se muestran los cables de comunicación entre el microcontrolador y la tarjeta Raspberry Pi y además se aprecia la tarjeta moebius a la que se conectan los cables para alimentación y accionamiento de los motores. En estos cables también se agrupan las señales de los encoders, a través de seis cables para las cuatro tiras, de estas seis vías dos son para accionar el motor una en sentido horario y otra en sentido antihorario, una para controla la velocidad de rotación mediante modulación de ancho de pulso, dos vías para las señales A y B del encoder una para alimentación y una más para el común.

9. Entorno de desarrollo para microcontrolador

En el robot se ha implementado un sistema de control basado en un microcontrolador STM32 con núcleo Cortex AM3, los entornos de programación más populares para este tipo de microcontroladores son ARM KEIL y STM32CubeIDE. En el caso de ARM KEIL y SMT32CubeIDE el lenguaje de programación puede ser C y/o C++. El código de este proyecto se desarrolló en lenguaje C++ ya que la biblioteca para el cliente de roserial está escrito en este lenguaje y es necesario agregar esta para enlazar el microcontrolador con ROS.



Figura 9. Vista inferior y superior de izquierda a derecha respectivamente de la base de nuestro robot móvil.



Figura 10. Ensamble del robot móvil.

Los programas desarrollados en este proyecto son para poner en funcionamiento los motores, contar los pulsos de los encoders, tomar los datos de aceleración y orientación del circuito integrado MPU6050, y la configuración de la biblioteca rosserial para microcontrolador STM32. Los cuatro programas anteriores se desarrollaron de forma independiente, la figura 11 muestra la apariencia del entorno de desarrollo con cuatro proyectos que corresponden a cada uno de los programas mencionados.

Se verificó con éxito el funcionamiento correcto de estos programas, como se menciona en el apartado de conclusiones. El paso siguiente en cuanto a la creación de programas en el microcontrolador, es formular los programas anteriores como funciones para ser llamadas dentro de un programa que englobe estas cuatro actividades.

En la figura 11 el archivo mainpp.cpp es el código del programa que ejecuta el protocolo rosserial en el microcontrolador STM32F103RCT6. La función setup inicializa el nodo, es decir el programa para abrir la comunicación con ROS. La función loop envía continuamente el dato hello. Hello es un arreglo que contiene la cadena "Hola ROS soy stm32f10x". En la línea cinco del código se observa la declaración del arreglo hello.



```
2 #include <ros.h>
3 #include <std_msgs/String.h>
4
5 ros::NodeHandle nh;
6
7 std_msgs::String str_msg;
8 ros::Publisher chatter("chatter", &str_msg);
9 char hello[] = "Hola ROS soy stm32f10x";
10
11 void HAL_UART_TxCpltCallback(UART_HandleTypeDef *huart){
12     nh.getHardware()->flush();
13 }
14
15 void HAL_UART_RxCpltCallback(UART_HandleTypeDef *huart){
16     nh.getHardware()->reset_rbuf();
17 }
18
19 void setup(void)
20 {
21     nh.initNode();
22     nh.advertise(chatter);
23 }
24
25 void loop(void)
26 {
27     HAL_GPIO_TogglePin(GPIOC, GPIO_PIN_13);
28
29     str_msg.data = hello;
30     chatter.publish(&str_msg);
31     nh.spinOnce();
32
33     HAL_Delay(1000);
34 }
35
```

Figura 11. Entorno de desarrollo STM32CubeIDE para programar microcontroladores STM32.

10. Resultados

10.1 ROS en ejecución

Como se mencionó en el apartado robot Operating System, ROS es un sistema operativo que se instala dentro de otro sistema operativo de propósito general, para este trabajo se utiliza Ubuntu Fossal 20.04 y para este sistema operativo la versión de ROS adecuada es ROS noetic.

Sin importar la versión de ROS el comando para ejecutarlo es roscore. Este comando ejecuta el nodo maestro o master node, la Figura 12 muestra la apariencia de una terminal en Linux en la que se muestra a ROS en ejecución.

El inicio de la ejecución muestra información relevante sobre ROS, como la dirección URI de ROS_MASTER así como su un número de identificación.

Con objeto de ejecutar cualquier aplicación robótica desarrollada o descargada, primero se debe ejecutar ros master y después los nodos para que operen en conjunto.



```
roscore http://aldo-VirtualBox:11311/
Archivo Editar Ver Buscar Terminal Ayuda
aldo@aldo-VirtualBox:~$ roscore
... logging to /home/aldo/.ros/log/c2512bca-c9e9-11eb-9dde-080027115580/roslaunch-aldo-VirtualBox-3626.log
Checking log directory for disk usage. This may take a while.
Press Ctrl-C to interrupt
Done checking log file disk usage. Usage is <1GB.

started roslaunch server http://aldo-VirtualBox:37939/
ros_comm version 1.15.13

SUMMARY
=====
PARAMETERS
 * /roslistro: noetic
 * /rosverison: 1.15.13

NODES
auto-starting new master
process[master]: started with pid [3636]
ROS_MASTER_URI=http://aldo-VirtualBox:11311/

setting /run_id to c2512bca-c9e9-11eb-9dde-080027115580
process[rosout-1]: started with pid [3649]
started core service [/rosout]
```

Figura 12. Nodo maestro de ROS en ejecución.

10.2 RPLiDAR en funcionamiento

El escaner laser bidimensional A18M, calcula la distancia entre el sensor y los objetos circundantes. La mejor ubicación del sensor es en la parte central del robot, así, para uno de tipo móvil es común encontrarlo en la parte central y superior de la estructura. Un *package* para manejar el sensor en ROS es *rplidar*. Dentro de este *package* se encuentran los nodos *rplidar* y *view_rplidar*. El primero captura las distancias y el segunda muestra en una ventana las distancias medidas en una gráfica polar, representando las distancias como puntos en color rojo. En la Figura 13 se observa esto último. Nótese que la Figura 13a muestra un arreglo que se emplea para verificar la correcta configuración y funcionamiento del escaner. Como ejemplo, en la parte central se coloca el sensor y se rodea de una tira de papel lo suficientemente alta como para que el haz del láser choque con esta. Adicionalmente se colocan algunos objetos dentro de ese espacio, como son una cinta adhesiva, un trozo de tabla de 5cm de ancho por 8cm de alto, una pequeña libreta de papel amarillo y una caja de cartón vacía. La Figura 13b muestra el resultado del nodo *view_rplidar*, en la parte central del plano encerrado por las curvas de color rojo se ubica el sensor. El sensor sólo puede detectar objetos en un plano por lo que los objetos que se localizan frente a otro desde la perspectiva del sensor bloquean el haz de luz y hace imposible conocer que hay detrás de los objetos.

Por otro lado, la Figura 14 muestra la relación entre el espacio donde se coloca el sensor y los datos que recolecta de dicho espacio.

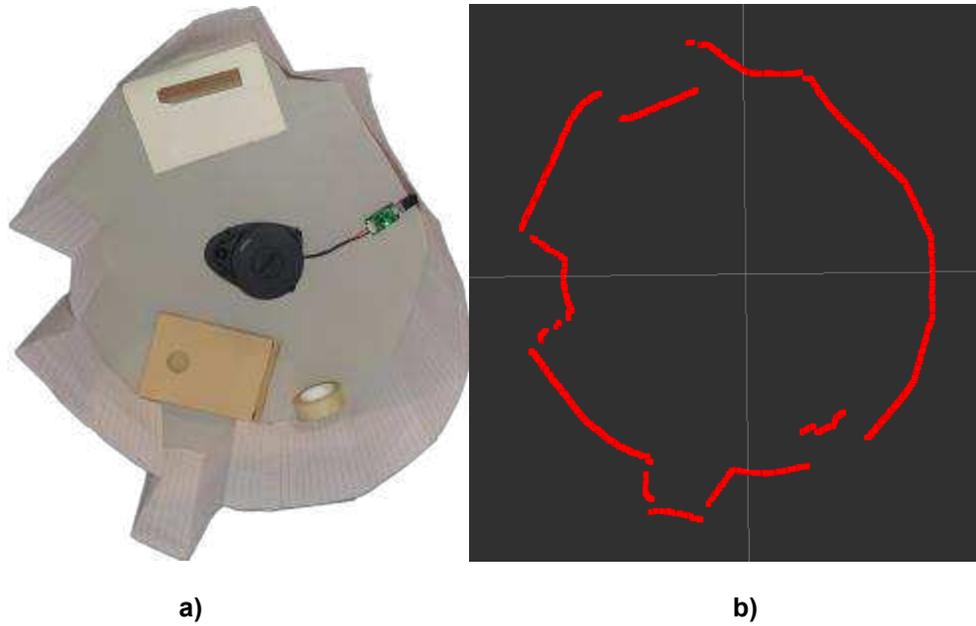


Figura 13. De izquierda a derecha: a) RPLiDAR dentro de un entorno cerrado y b) objetos detectados alrededor del sensor, vista superior.

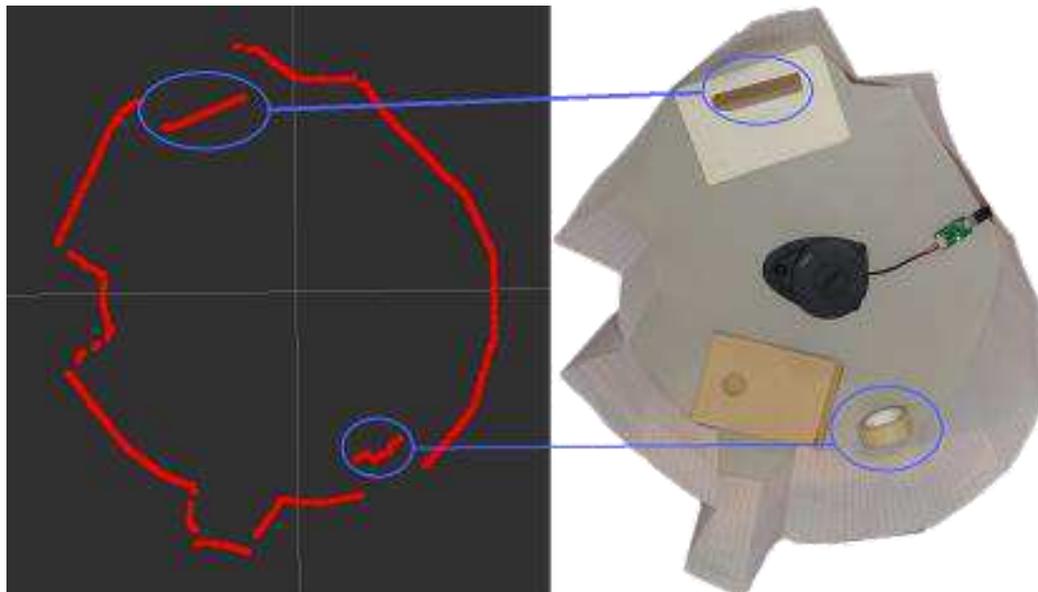


Figura 14. Objetos detectados por el sensor dentro de un espacio cerrado, vista superior.

Se puede identificar como la cinta adhesiva y el trozo de madera impiden conocer si el espacio es realmente cerrado o no.

10.3 Captura de imagen y video en ROS

ROS no trata directamente con la imagen o video que proviene de una cámara digital, en cambio, utiliza una biblioteca para procesamiento de imágenes. La biblioteca estándar para esta tarea es



OpenCV, la cual tiene soporte tanto en lenguaje C++ como en Python. A efectos de adquirir y procesar imágenes es indispensable programar nodos en alguno de estos lenguajes para dicha tarea.

La Figura 15 muestra una imagen en la que se observa una ventana que muestra una captura de video. Usando la biblioteca OpenCV, un nodo para mostrar el video consta de un par de líneas de código. OpenCV no es una biblioteca que contenga ROS en sus paquetes de instalación, pero ROS si contiene un intérprete de Python.



Figura 15. Ejecución de un nodo que muestra el video que la cámara digital toma.

La Figura 16 muestra un cuadro del video tomado por la cámara conectada al robot.

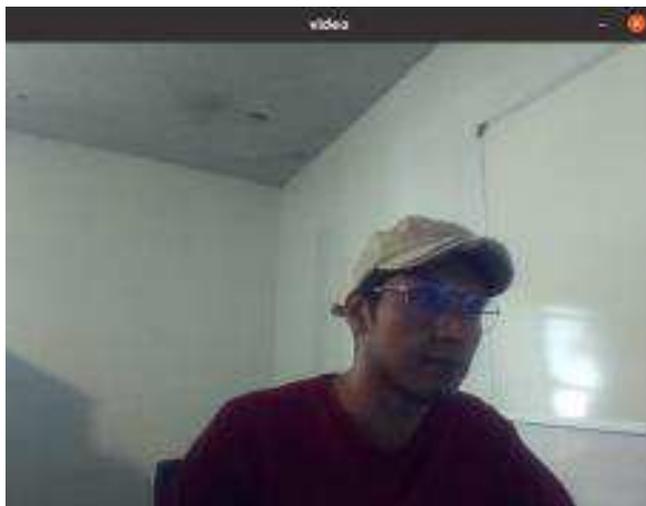


Figura 16. Resultado de la ejecución de un nodo para capturar y mostrar imagen en una pantalla conectada al PC anfitrión.

10.4 Comunicación con el microcontrolador

En la figura 17 se muestra el código de una función para ejecutar el cliente roserial en el microcontrolador STM32F103RCT6. Para enlazarlo con un nodo en ROS se debe conectar al puerto



utilizado para la comunicación, en este caso se emplea un cable USB a uno de los puertos USB 2.0 de la tarjeta Raspberry Pi, y ejecutar el nodo maestro con roscore.

```
aldo@aldo-VirtualBox: -
Archivo Editar Ver Buscar Terminal Ayuda
aldo@aldo-VirtualBox:~$ roslaunch rosserial_python serial_node.py /dev/ttyUSB0 _baud:=9600
[INFO] [1634047079.576441]: ROS Serial Python Node
[INFO] [1634047079.580989]: Connecting to /dev/ttyUSB0 at 9600 baud
[INFO] [1634047081.705807]: Requesting topics...
[INFO] [1634047083.226703]: Note: publish buffer size is 512 bytes
[INFO] [1634047083.228113]: Setup publisher on chatter [std_msgs/String]
```

Figura 17. Serial_node en ejecución.

El formato para ejecutar un nodo con ROS es usar el comando roslaunch cuando solo se necesita ejecutar un nodo, en caso de la ejecución de más de un nodo el comando necesario es roslaunch, después de estos comandos lo siguiente es el package seguido del nodo. La Figura 14 muestra la ejecución de la línea:

```
roslaunch rosserial_python serial_node.py
```

Aquí, rosserial_python es el *package* que contiene al nodo serial_node.py, los nodos de este *package* realizan la tarea de servidor para el protocolo rosserial. /dev/ttyUSB0 y _baud:=9600 especifican el dispositivo con el que se enlazará el servidor rosserial y la tasa de transferencia de datos. Linux detecta al microcontrolador como un dispositivo USB. En el caso de la tasa de transferencia esta debe coincidir con la establecida en el programa del microcontrolador. El mensaje publish buffer size is 512 bytes es la máxima cantidad de bytes que se pueden enviar de forma ininterrumpida. El tamaño de buffer se puede modificar tanto para rosserial server como para rosserial client y está limitado por la capacidad del dispositivo externo, en este caso la memoria SRAM del microcontrolador. El tamaño del buffer debe ser el mismo en el rosserial server y en el rosserial client.

11. Conclusiones

ROS ofrece un abanico amplio de posibilidades, ya sea al crear o implementar *packages* que se ejecuten dentro de ROS o añadiendo dispositivos de control como microcontroladores. Esto permite que se distribuyan las tareas de gobierno del robot y que se libere de carga de cálculo a la computadora principal. Sin embargo, no se tiene que olvidar que la cantidad de datos que procesa el microcontrolador debe ser vigilada, pues fácilmente puede alcanzar sus límites de memoria. Al indagar sobre los *packages* disponibles y las herramientas de hardware que se pueden integrar con ROS se han identificado los elementos necesarios para ensamblar un robot móvil basado en este sistema operativo. El hardware y software libre ha sido integrado para construir un robot que soporte la implementación de navegación autónoma.

Referencias

- [1] Francisco M. Lopez R., Cuesta F. An Android and Arduino Based Low-Cost educational robot with applied intelligent control and machine learning. Appl. Sci. 2021, 11, 48.
- [2] Cañas JM, Perdices E., García L., Fernández J. A ROS-Based open tool for intelligent robotics education. Appl. Sci. 2020, 10, 7419.



- [3] Mary B. Alatise, Gerhard P. Hancke. A Review on Challenges of Autonomous Mobile Robot and Sensor Fusion Methods. IEEE Access Vol. 8 Pages 39830-39846, 2020.
- [4] Ngo T., Nguyen C., Pham D., Tran M., "An approach to design system for omnidirectional mobile robot based on ROS". International journal of mechanical engineering and robotics research, Vol. 9 Number 11 2020.
- [5] Rottman N., Studt N., Ernst F., Rueckert E.. ROS-Mobile: An Android application for the robot operating system. arXiv:2011.02781v1 [cs. RO] 5 Nov 2020.
- [6] Pvo Y., Cho H., Jung L., Lim D. ROS Robot Programming A Handbook is written by TurtleBot3 Developers, Robotis, USA, Dec 22, 2017.
- [7] Araujo A., Portugal D., Couceiro M.S. et al. Integrating Arduino-based Educational Mobile Robots in ROS. J Intell Robot Syst 77, 281-298 (2015).
- [8] Duchon F., Babinec A., Kajan M., Beno P., Florek M., Fico T., Jurisica L.. Path Planing with modified A star algorithm for a mobile robot. Procedia Engineering 96. p. 59-69. 2014.
- [9] Durrant H., Bailey T., "Simultaneous localization and mapping: part I," in IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 13, no. 2, pp. 99-110, June 2006.
- [10] Bailey T., Durrant H., "Simultaneous localization and mapping (SLAM): part II," in IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 13, no. 3, pp. 108-117, Sept. 2006.
- [11] Song, J.-B., Byun, K.-S. (2004). Design and Control of a Four-Wheeled Omnidirectional Mobile Robot with Steerable Omnidirectional Wheels. Journal of Robotic Systems, 21(4), 193–208.
- [12] S.-Y. Jeong et al., "A Study on ROS Vulnerabilities and Countermeasure," Proceedings of the Companion of the 2017 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction. ACM, 2017, pp. 147–148.
- [13] Song, Jae-Bok & Byun, Kyung-Seok. (2004). "Design and Control of a Four-Wheeled Omnidirectional Mobile Robot with Steerable Omnidirectional Wheels". J. Field Robotics. 21. 193-208. 10.1002.
- [14] M. Gilmartin, "Introduction to autonomous mobile robots", *Robotica*, vol. 23, pp. 271-272, Mar. 2005.

Proyectando Innovaciones en Ingeniería

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. 180, Tamaño: 12 Mb.

ISBN: 978-607-9394-24-0

ISBN: 978-607-9394-24-0



9 786079 394240



Querétaro, Querétaro.
06. Mayo. 2022.

FE DE ERRATAS

Con el propósito de corregir la edición del libro:

"Proyectando Innovaciones en Ingeniería", con ISBN: 978-607-9394-24-0, editado en el año 2021. A continuación se enuncia la única corrección la cual corresponde al capítulo 3, pág. 30, referente a la adscripción de uno de los autores:

Santoyo Turrubiartes Sarur¹

Estudiante de Posgrado CIATEQ¹

Atentamente,

Dr. José Emilio Vargas Soto
Editor honorario