



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE LERDO
CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO

REVISTA DIGITAL UNIVERSITARIA . ISSN: 2448-623X. PUBLICACIÓN ANUAL

Volumen: 1. Número: 9. Año: 2023

ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN

FÓRMATE
de una manera *diferente*

revistacid@itslerdo.edu.mx
www.lerdo.tecnm.mx



GOBIERNO DE
MÉXICO



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Título de la revista:

CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO



Editor:

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE LERDO

Año: 9. Septiembre 2023

Volúmen: 1. Número: 9

Revista Ciencia, Ingeniería y Desarrollo Tec Lerdo, Septiembre 2023, Volumen 1, Número 9. Publicación electrónica universitaria nacional anual editada por el Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Av. Tecnológico No. 1555 Sur. Periférico Gómez-Lerdo, Km. 14.5. C.P. 35150. Ciudad Lerdo, Durango. México. Teléfono: (+52) 871 725 23 71, ext. 134. Correo electrónico: revistacid@itslerdo.edu.mx, página web: "<http://revistacid.itslerdo.edu.mx>". Editor responsable: Carlos Uriel Flores Prince. No. de reserva de derechos al uso exclusivo: 04-2022-011210434500-203, ISSN: 2448-623X, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derechos de Autor. Imagen de portada: Possessed Photography. Responsable de la última actualización de este número: Comité Editorial del Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. La opinión expresada en los artículos firmados es responsabilidad del autor. Se autoriza la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes, siempre y cuando se cite la fuente, y que no sea con fines de lucro. No nos hacemos responsables por textos no solicitados. Fecha de última actualización: 13 de Septiembre de 2023.

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE LERDO

REVISTA “CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO”



CONSEJO EDITORIAL

PRESIDENTE:

DR. JOSÉ DIMAS LÓPEZ MARTÍNEZ

SECRETARIO GENERAL:

MC. JOSÉ ÁNGEL MÉNDEZ ORTEGA

SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y DESARROLLO:

MDGPT. JESÚS ALEJANDRO VALDÉS NIEBLAS

EDITOR RESPONSABLE:

MC. CARLOS URIEL FLORES PRINCE

<http://revistacid.itslerdo.edu.mx>

<https://www.lerdo.tecnm.mx>



EDITOR RESPONSABLE:
CARLOS URIEL FLORES PRINCE

COMITÉ EDITORIAL:

SUPERVISIÓN EDITORIAL:

KARLA VERÓNICA RODRÍGUEZ LOZANO

PÁGINA WEB:

MARÍA GUADALUPE FLORES LUÉVANOS

SUPERVISIÓN TÉCNICA:

JUAN MARTÍN ARZOLA MONREAL

ARTE GRÁFICO, DISEÑO DE PORTADA

Y SECCIONES:

JUAN MARTÍN ARZOLA MONREAL

SUPERVISIÓN DE REDACCIÓN:

ELDA MORENO NÚÑEZ

SILVIA ADRIANA JÁQUEZ CERVANTES

SILVIA ADRIANA VIDAÑA MARTÍNEZ

TANIA ELIZABETH VELÁSQUEZ CHÁVEZ

WEB MASTER:

MARCOS MORALES ESPARZA

SUPERVISIÓN DE REDACCIÓN EN

IDIOMA INGLÉS:

JESSICA URBINA PEDROZA



COMITÉ REVISOR:

ABEL RODRÍGUEZ FRANCO, ANTONIO MENDOZA RUELAS, ARACELI SÁNCHEZ PRADO, ARTURO SERRANO HERNÁNDEZ, CARLOS URIEL FLORES PRINCE, CECILIA INÉS CALDERÓN IBARRA, CÉSAR OCTAVIO MÁRQUEZ AGUIRRE, CRISTIAN CESAR DÁVILA RODRÍGUEZ, CRISTOBAL FABÍAN NAJERA MARTÍNEZ, DIEGO ALBERTO ROMÁN LANDEROS, EFRAÍN VAQUERA GONZÁLEZ, ELDA MORENO NÚÑEZ, ELENA TZETZANGARY AGUIRRE MEJÍA, ERIKA ALEJANDRA MERAZ SALAZAR, FELIPA DE JESÚS RODRÍGUEZ FLORES, HESNER COTO FUENTES, JESSICA YAZMÍN MARTÍNEZ MORALES, JESÚS ALBERTO RAMÍREZ NUÑEZ, JOAQUÍN SAUCEDO BARAJAS, JORGE ALBERTO ORRANTE SAKANASSI, JOSÉ ÁNGEL CANDELAS SAUCEDO, JUAN MANUEL MARTÍNEZ BURROLA, JUAN MARTÍN ARZOLA MONREAL, KARLA VERÓNICA RODRÍGUEZ LOZANO, LÁZARO LÓPEZ PUENTE, MARÍA DEL ROCÍO HERRERA MORALES, MARIA GUADALUPE FLORES LUÉVANOS, NANCY GABRIELA MARÍN CASTAÑEDA, NANCY VICTORIA TORRES RAMOS, NOÉ ALVARADO TOVAR, SILVIA ADRIANA JÁQUEZ CERVANTES, SILVIA ADRIANA VIDAÑA MARTÍNEZ, TANIA ELIZABETH VELÁSQUEZ CHÁVEZ, VICTOR EDI MANQUEROS AVILES.

CORREO DE LA REVISTA:

revistacid@itslerdo.edu.mx



CARTA DEL EDITOR:

En estos tiempos emocionantes y desafiantes que vivimos, es un honor dirigirme a ustedes como Presidente del grupo editorial de esta prestigiosa revista “CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TECNOLÓGICO”. En un mundo cada vez más interconectado y en evolución, es vital mantenerse relevante y comprometido con la investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación (I+D+i) para el avance de nuestra sociedad.

En los últimos años, hemos sido testigos de rápidos desarrollos en varios campos de la ingeniería, la ciencia y la tecnología. Los límites que alguna vez pensamos que eran imposibles se superan constantemente, y los resultados son fascinantes. Desde la inteligencia artificial y el aprendizaje automático hasta la realidad virtual y la computación cuántica, los avances tecnológicos están cambiando fundamentalmente la forma en que vivimos, trabajamos e interactuamos.

La reciente pandemia mundial que nos afecta ha acelerado aún más la necesidad de soluciones innovadoras y creativas. La ciencia y la ingeniería han jugado un papel vital en el desarrollo de vacunas, diagnósticos y sistemas de vigilancia, demostrando la importancia de la colaboración entre disciplinas y la capacidad de adaptación a situaciones adversas.

En esta revista, nos enorgullece presentarles los últimos avances tecnológicos que están dando forma a nuestro mundo. Nuestro objetivo es brindarle la información más reciente, análisis en profundidad y puntos de vista de expertos sobre varios temas que van desde la energía renovable y la sustentabilidad, hasta la robótica. Además, proporcionaremos estudios de casos exitosos desarrollados por investigadores líderes en sus áreas de trabajo.



También queremos fomentar la colaboración y el intercambio de conocimientos entre los lectores. Invitamos a investigadores, científicos, ingenieros y empresarios a enviar sus contribuciones y artículos originales para su futura consideración. Valoramos la diversidad de ideas y enfoques y creemos que la innovación prospera cuando se desata el pensamiento creativo.

Como expertos en investigación, desarrollo tecnológico e innovación, reconocemos que nuestro trabajo no es solo crear nuevos conocimientos, sino también asegurar que estos avances estén disponibles y sean aplicables a la sociedad en su conjunto. Por lo tanto, nuestro objetivo es presentar los desarrollos más relevantes y atractivos de manera clara y concisa, con el objetivo de inspirar a nuestros lectores a explorar nuevas posibilidades y contribuir a un futuro mejor. En la revista “CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO” continuamos con nuestro compromiso de ser su fuente confiable de información actualizada y relevante. Esperamos que disfruten de los contenidos presentados y que encuentren inspiración para llevar a cabo su propia investigación, desarrollo tecnológico e innovación.

DR. JOSÉ DIMAS LÓPEZ MARTÍNEZ
DIRECTOR GENERAL
DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE LERDO
Y PRESIDENTE DEL GRUPO EDITORIAL DE LA REVISTA
“CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO”

ÍNDICE DE ARTÍCULOS



01. Identificación de compuestos con actividad antimicrobiana presentes en líquenes del estado de Guanajuato.	01
❖ Mariana Arteaga-Chávez, César Álvarez-Mejía, Varinia López-Ramírez.	
02. Diseño y simulación de un prototipo artromecánico para la aplicación de cinesiterapia en lesiones de rodilla y tobillo.	07
❖ Andrea Fernanda Padilla-Silva, Luis Amado González-Vargas, Noe Alvarado-Tovar, Eduardo Machado-Díaz, Francisco Huerta-Valenzuela.	
03. Diseño de interfaz en MatLab para la activación y monitoreo de señales de control de encendido electrónico computarizado en motores de combustión interna.	14
❖ Gerardo Alfonso-Torres Astorga, Luis Amado Gonzalez-Vargas, Noe Alvarado-Tovar, Francisco Huerta-Valenzuela, Eduardo Machado-Díaz.	
04. Implementación de la arquitectura Modelo Vista Controlador con el framework Razor .Net Core en el sistema web de actividades complementarias.	22
❖ Maria Guadalupe Flores-Luévanos, Elda Moreno-Núñez, Karla Verónica Rodríguez-Lozano.	
05. Prototipo de aplicación móvil para la detección oportuna de estudiantes en riesgo de abandono o deserción escolar.	29
❖ Elena Tzetzángary Aguirre-Mejía, Lilia Parada-Morado, Erika Alejandra Meraz-Salazar, Francisco Eduardo Rodríguez-Campos, Víctor Hugo Carreón-Pulido, Alberto Ramírez-Zárate.	
06. Diseño y componentes para el prototipo de prótesis para antebrazo con retroalimentación de agarre-paciente.	36
❖ Jesús Adolfo Valenzuela-Romero, Hesner Coto-Fuentes, Marijo Cisneros-Romero.	
07. Acondicionamiento de variables en corriente alterna y monitoreo de consumos eléctricos a través de un servidor web utilizando ESP32.	42
❖ José Cruz Olvera-Avila, Hesner Coto-Fuentes.	
08. Aumento en la efectividad de ventilación en interior mina mediante comparación de estándares.	50
❖ Juan Carlos Núñez-Cabral, Manuel de Jesús Carrera-Barraza, José Manuel Valdez-Díaz, Edgar Guadalupe Pinales-Valdez, Brenda Carrera-Barraza.	
09. Desarrollo del proceso de aprobación de piezas de producción como ventaja competitiva en una empresa de manufactura.	56
❖ Iris Antonia Rojas-López, Brenda Carrera-Barraza, Luvianka Ivonett Cháirez-Acosta, Esmeralda Daniela Chiw-Gramillo, Jesús Francisco Magallanes-Armendáriz.	
10. Operación óptima de turbina eólica con DFIG con funciones de tensión en rotor que sustituye a convertidor electrónico de potencia.	62
❖ Marissa Ivett López-Carrasco, Rodrigo Loera-Palomo, Francisco Sergio Sellschopp-Sánchez, Carlos Álvarez-Macías.	
11. Disminución del porcentaje de defectos en línea de producción de una empresa automotriz mediante el uso de Lean Manufacturing.	69
❖ Zaira Keren Remigio-Lopez, Edgar Guadalupe Pinales-Valdez, Jose Manuel Valdez-Diaz, Manuel Carrera-Barraza, Brenda Carrera-Barraza.	

ÍNDICE DE ARTÍCULOS



12. Comportamiento de la fase librada por disparo monopolar de línea de transmisión con falla monofásica.	75
❖ <i>Emilio González-Dominguez, Francisco Sergio Sellschopp-Sánchez, Víctor Manuel Cabrera-Morelos, Rodrigo Loera-Palomo, Hector Ramírez-Castro.</i>	
13. Desarrollo y aplicación de prototipo para el estudio de acabados en materiales utilizando módulo láser controlado mediante PWM.	84
❖ <i>Yasmin Lizeth Rodríguez-Luévanos, Ernesto II Castro-Juárez, Eduardo Machado-Díaz.</i>	
14. Disminución del tiempo de respuesta vía telefónica a clientes y distribuidores de empresa desarrolladora de software para equipos de medición aplicando la metodología Seis Sigma.	91
❖ <i>Yisvi Saray Ochoa-Corona, Idalia Ruiz-Arroyo, Ulises Martínez-Rodríguez, Oscar Fabián Ramos-Ochoa.</i>	
15. Diseño, fabricación e implementación de tarjeta didáctica de entrenamiento para plataforma ESP32 aplicada en cursos de programación.	97
❖ <i>Eduardo Machado-Díaz, Carlos Uriel Flores-Prince, Hesner Coto-Fuentes.</i>	
16. Diseño de protocolo comando-parámetro mediante comunicación serie asincrónica universal aplicado al control de servomotores.	105
❖ <i>Eduardo Machado-Díaz, Hesner Coto-Fuentes, Noe Alvarado-Tovar.</i>	
17. Diseño y fabricación de cronómetro digital aplicado a carreras de vehículos impulsados por CO2 utilizando comunicación inalámbrica.	112
❖ <i>Eduardo Machado-Díaz, Arturo Serrano-Hernández, Efraín Vaquera-González, Diego Alberto Román-Landeros.</i>	
18. Programación de un sistema de medición de temperatura utilizando sensor resistivo (RTD) y microcontrolador PSoC aplicado a un calorímetro didáctico.	120
❖ <i>Eduardo Machado-Díaz, José Carlos Martínez-Muñoz, Ernesto II Castro-Juárez.</i>	
19. Control no lineal basado en lógica difusa de un convertidor multinivel de capacitor flotante para aplicaciones de energía solar fotovoltaica.	128
❖ <i>Karol Gabriel Vidaña-Aldaba, Jorge Lara-Cardoso, Marco Antonio Arjona-López, Concepción Hernández-Flores.</i>	
20. Estudio comparativo de las plataformas SimPowerSystems de Matlab y Twin Builder de ANSYS para el modelado y control de un convertidor trifásico Back-to-Back NPC de 3 niveles.	136
❖ <i>Diana Guadalupe Triana-González, Jorge Lara-Cardoso, Concepción Hernández-Flores, Marco Antonio Arjona-López.</i>	

REVISTA

“CIENCIA, INGENIERÍA Y DESARROLLO TEC LERDO”



ARTÍCULOS

Identificación de compuestos con actividad antimicrobiana presentes en líquenes del estado de Guanajuato.

Arteaga-Chávez, M.¹; Álvarez-Mejía, C.²; López-Ramírez, V.^{1*}

Datos de Adscripción:

¹ Tecnológico Nacional de México/ITS de Irapuato. Coordinación de Ing. Bioquímica. Carretera Irapuato-Silao km 12.5, C. P. 36821., Col. El Copal, Irapuato, Guanajuato, México.

*Correspondencia: varinia.lr@irapuato.tecnm.mx.

² Tecnológico Nacional de México/ITS de Abasolo, Coordinación de Ingeniería Ambiental, Blvd. Cuitzeo de los Naranjos 401, C. P. 36976, Col. Cuitzeo de los Naranjos, Abasolo, Guanajuato, México.

Resumen - Los líquenes son organismos conformados por la asociación simbiótica entre un micobionte y un fotobionte. Los fotobiontes son responsables de la síntesis de azúcares simples, mientras que los micobiontes sintetizan compuestos con diversas actividades biológicas entre ellos algunos con actividad antimicrobiana. En el presente trabajo se realizó el análisis de los líquenes, *Usnea filipendula*, *Usnea strigosa*, *Cladonia rangiferina*, *Phycia semipinnata*, *Flavoparmelia caperata* y tres especies de *Flavoparmelia spp.*, para determinar si sus extractos orgánicos presentaba actividad antibacteriana frente a cepas patógenas (*Escherichia coli* 72U, *Staphylococcus aureus* 82F, *Klebsiella pneumoniae* 112F, *S. aureus* 23F y *S. aureus* 34F). Los ensayos de inhibición se realizaron en agar infusión cerebro corazón y se determinaron los halos de inhibición. Los resultados obtenidos mostraron que los extractos con acetona de las especies del género *Usnea*, *Cladonia rangiferina* y *Phycia semipinnata* presentan una mayor actividad antimicrobiana. Los compuestos liquénicos más representativos en los extractos fueron el ácido úsnico y el ácido fumarprotocetrárico. El aprovechamiento de los diversos metabolitos sintetizados por líquenes permitirá el empleo de nuevos compuestos con actividad antimicrobiana que puedan ser empleados en el control de patógenos.

Palabras Clave – *Actividad antimicrobiana, Inhibición microbiana, Líquenes, Metabolitos secundarios.*

Abstract - Lichens are organisms formed by the symbiotic association between a mycobiont and a photobiont. Photobionts are responsible for the synthesis of small sugars, while mycobionts synthesize compounds with different biological activities, including some with antimicrobial activity. In this work, the analysis of lichens, *Usnea filipendula*, *Usnea strigosa*, *Cladonia rangiferina*, *Phycia semipinnata*, *Flavoparmelia caperata* and three species of *Flavoparmelia spp.*, was carried out to determine if their organic extracts had antimicrobial activity against pathogenic strains (*Escherichia coli* 72U, *Staphylococcus aureus* 82F, *Klebsiella pneumoniae* 112F, *S. aureus* 23F and *S. aureus* 34F). Inhibition assays were performed on brain-heart infusion agar and inhibition halos were determined.

The results obtained showed that the acetone extracts of the species of the genus *Usnea*, *Cladonia* and *Phycia* have a higher antimicrobial activity. The most representative lichen compounds present in the extracts were usnic acid and fumarprotocetraric acid. The use of the diverse metabolites synthesized by lichens would allow us their use and to take advantage of their antimicrobial activity to control of pathogens.

Keywords - *Antimicrobial activity, Lichens, Microbial inhibition, Secondary metabolites*

I. INTRODUCCIÓN

Los líquenes son organismos producto de una asociación simbiótica entre fotobiontes (algas o cianobacterias) y micobiontes (hongos liquenizados). El micobionte provee metabolitos secundarios, agua y sales minerales, mientras que el fotobionte otorga a la simbiosis, productos fotosintéticos, como azúcares de bajo peso molecular y en algunos casos puede determinar la aptitud del micobionte a soportar las condiciones ambientales (Almer et al., 2023). Los líquenes presentan morfotipos distintivos (costrosos, fruticosos y foliosos) y por no depender del sustrato al que se asocian, su distribución es cosmopolita (Álvarez-Mejía et al., 2022), se pueden desarrollar sobre rocas, cortezas, hojas de árboles, suelos, muros, etc. Además, pueden tolerar la radiación UV debido a la producción de metabolitos secundarios que son sustancias capaces de actuar como antioxidantes, que son sintetizados en bajas concentraciones (Bonny et al., 2009).

Se aplica el término “compuestos liquénicos” o “sustancias liquénicas” a todos los metabolitos sintetizados exclusivamente por líquenes. Los tipos de compuestos liquénicos según su estructura son: antraquinonas, xantonas, derivados de terpenos, dépsidos, depsidonas, depsonas, ácidos orgánicos, dibenzofuranos, entre otros. La mayoría de ellos son sintetizados a partir de las vías de acetil malonato, mevalonato y shikimato (Ren et al., 2023), y se depositan en la medula del cuerpo del liquen (Nash III, 2008). Hasta ahora se han reportado más de mil compuestos liquénicos, aunque de pocos se ha logrado identificar los genes involucrados en su síntesis (Singh, 2023).

Los líquenes son indicadores de contaminación ambiental, y presentan propiedades farmacológicas, médicas, capacidad quelante, participan en reacciones fotoquímicas ligadas a cationes y capacidad pigmentante (Castro, 2010; Elkhateeb et al., 2019; Molnár y Farkas, 2010); así como compuestos con

actividad antimicrobiana frente a bacterias y hongos patógenos (Oh et al., 2018; Furmanek et al., 2022), actividad anticancerígena (Dar et al., 2022), antiviral (Fazio et al., 2007) entre otras.

La búsqueda de compuestos con actividad antimicrobiana es estratégica dada la multiresistencia que muchas especies bacterianas están presentando actualmente. En este trabajo, determinamos la actividad antimicrobiana de metabolitos secundarios provenientes de líquenes presentes en el estado de Guanajuato.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

2.1 Cepas bacterianas

Las cepas bacterianas fueron proporcionadas por el M. en C. Carlos Lozano García de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del IPN, las cuales fueron identificadas como: *Escherichia coli* 0:157 72U, *Staphylococcus aureus* 34F, *Staphylococcus aureus* 23F, *Klebsiella pneumoniae* 112F y *Staphylococcus aureus* 82F, cultivadas por medio estandar y condiciones reportadas para cada una de ellas, su manejo se realizó a través de agar BHI.

2.2 Muestras de líquenes analizadas

Los líquenes empleados en este trabajo fueron colectados en la Sierra de Santa Rosa, Guanajuato (Latitud 21.1322; Longitud -101.202). Las muestras colectadas se colocaron en sobres de papel manila para su resguardo y traslado. Los líquenes forman parte de la colección del Laboratorio de Diversidad e Interacción Microbiana del Instituto Tecnológico Superior de Irapuato manteniéndose en sobres manila a temperatura ambiente alejados del sol.

2.3. Obtención de extractos orgánicos

Los extractos orgánicos se obtuvieron pesando 0.01 g de una muestra de líquen y adicionando 100 μ L de solvente reportado anteriormente para su análisis por cromatografía (Hale, 1969) utilizando acetona, éter de petróleo o acetato de etilo, según sea el caso, macerando la muestra y posteriormente incubando durante 24 h a 4°C para su posterior uso.

2.4 Preparación de pre-inóculos

Se realizaron preinóculos de las cepas bacterianas en tubos de ensaye con 5 mL de caldo infusión cerebro corazón (BHI). Las cepas se incubaron a 37° C durante 24 h para su uso en los ensayos de inhibición. Para que el inóculo fuera apto para emplearse en los ensayos se verificó que la densidad óptica fuera de 0.5 de absorbancia a una longitud de onda de 600 nm, utilizando caldo BHI como blanco.

2.5 Evaluación de la actividad antimicrobiana de los extractos.

Para los ensayos de inhibición se realizó en cajas Petri donde fueron inoculadas las cepas bacterianas en medio agar infusión-cerebro, corazón como a continuación se describe. Se inocularon 100 μ L de los preinóculos de 0.5 de absorbancia a 600 nm en tres cajas, los cuales serán utilizadas para la inhibición de los extractos por cada solvente, (acetona, éter de petróleo o acetato de etilo). El inóculo bacteriano se espatuló con un asa de vidrio

previamente desinfectada con etanol al 96% (v/v) y flameada. Posteriormente se agregaron sobre el medio discos de papel filtro estériles (0.5 cm, de diámetro) previamente tratados con el extracto liquénico como a continuación se menciona. Los discos fueron colocados en un portaobjetos estéril y se les adicionaron 2 μ L de extracto liquénico hasta alcanzar 10 μ L totales, para posteriormente colocarse en el interior de las cajas Petri. Las cajas se incubaron a 37° C durante 24 h o hasta la aparición de halos de inhibición para su posterior medición.

2.6 Determinación de metabolitos por cromatografía en capa fina.

La identificación de metabolitos secundarios que presentaron actividad antimicrobiana se realizó por medio de cromatografía en capa fina (TLC), en placas de silica gel de 5 x 10 cm (Fluka analytical™ SIGMA-ALDRICH®) a las muestras de líquenes de *Usnea filipendula*, *Usnea strigosa*, *Flavoparmelia spp*, *Physcia semipinnata* y *Flavoparmelia caperata*, que presentaron dicha actividad. La extracción de los compuestos liquénicos fue realizada como anteriormente se describió.

Se empleó una solución de tolueno:ácido acético 170:30, como fase móvil y como agente revelador se utilizó yodo metálico. El factor de retención (Rf) de los compuestos se calculo como se indica en la ecuación 1.

$$R_f = \frac{\text{Distancia que recorre la muestra en la placa de TLC}}{\text{Distancia total de la placa}} \quad (1)$$

Los Rf de los compuestos revelados fueron cotejados en la guía propuesta por Huneck y Yoshimura (1996) para una aproximación de su identidad química.

2.6 Microcristalización de compuestos liquénicos.

La microcristalización de compuestos liquénicos se realizó siguiendo la metodología propuesta por Hale (1969). Se disecta un fragmento de líquen sobre un portaobjetos, posteriormente se adiciona acetona en la muestra y se deja evaporar. Esta acción se realiza hasta la formación de un halo de color blanco en el portaobjetos. Posteriormente, se retira la muestra de líquen y se agrega una gota de G.A (Glicerina-ácido acético, 3:1) o G.E.A (Glicerina-Etanol-Agua, 1:1:1) y se fija con ayuda de un mechero de alcohol suavemente hasta observar pequeñas burbujas. La muestra se deja reposar por 24 h para permitir la formación de cristales los cuales son observados a través del microscopio óptico con el objetivo de 40X. La forma de los cristales se comparó en guías de identificación (Huneck y Yoshimura, 1996) para una identificación probable del compuesto químico.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Los extractos orgánicos de líquenes inhiben de forma diferencial a las bacterias analizadas.

En este trabajo se emplearon extractos orgánicos de especies de líquenes colectados en el estado de Guanajuato. En la Figura 1, se pueden observar la morfología de las especies evaluadas, destacan los morfotipos folioso y fruticoso.

Para evaluar la capacidad inhibitoria de los extractos orgánicos frente a diferentes géneros bacterianos, los ensayos

de inhibición bacteriana se realizaron por triplicado. En la Figura 2, se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos en los ensayos de inhibición.

Figura 1

Especies de líquenes analizadas en este trabajo. **A.** *Usnea strigosa* (Us); **B.** *Usnea filipendula* (Uf); **C.** *Flavoparmelia* spp. (Fs2); **D.** *Flavoparmelia* spp. (Fs3); **E.** *Physcia semipinnata* (Ps); **F.** *Flavoparmelia* spp. (Fs1); **G.** *Cladonia rangiferina* (Cr); **H.** *Favoparmelia caperata* (Fc).

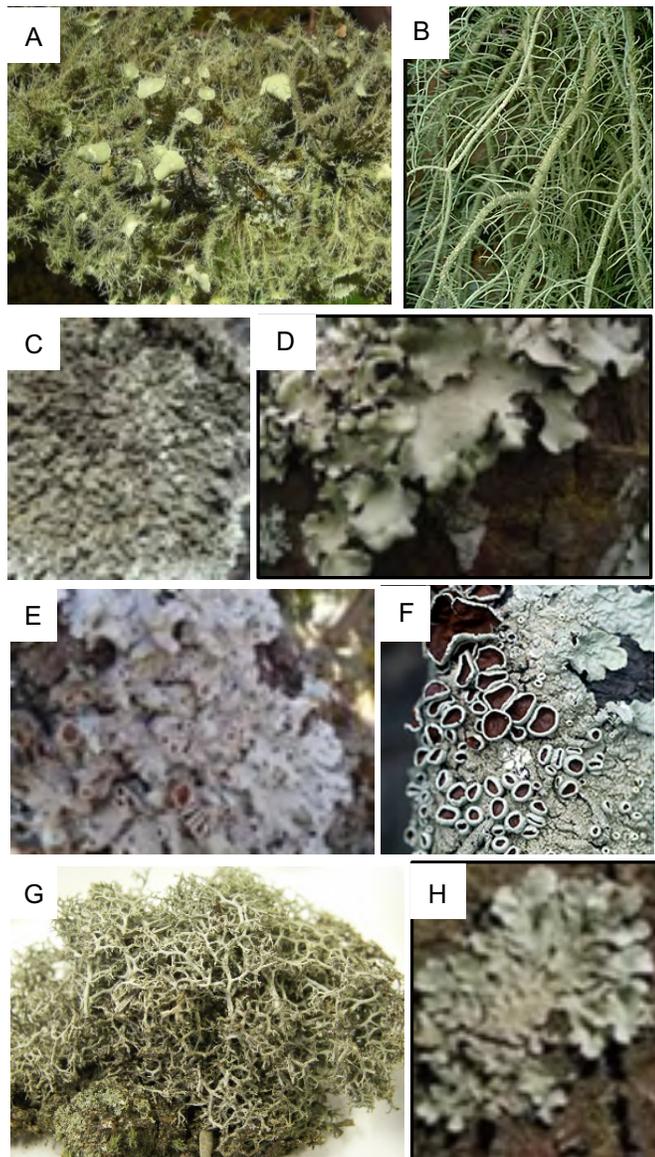
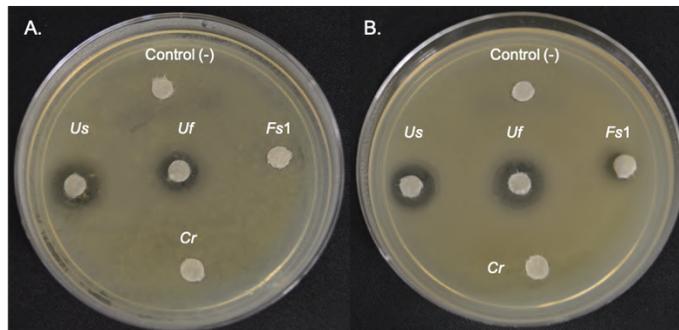


Figura 2

Ensayos de inhibición de especies bacterianas con extractos orgánicos de líquenes. **A.** Inhibición de *S. aureus* 82F con extractos de acetona de *Usnea filipendula* (Uf), *Usnea strigosa* (Us), *Flavoparmelia* spp. (Fs1) y *Cladonia rangiferina* (Cr). **B.** Inhibición de *Escherichia coli* O:157 H772U con extractos de éter de petróleo de *Usnea filipendula* (Uf), *Usnea strigosa* (Us), *Flavoparmelia* spp. (Fs1) y *Cladonia rangiferina* (Cr). El control negativo corresponde al solvente empleado en cada ensayo.



Los resultados de los ensayos de inhibición del crecimiento bacteriano con los diferentes extractos orgánicos de líquenes se reportan como valores promedio de los halos de inhibición (cm) en las Figuras 3-7.

Los extractos orgánicos de las especies de *Usnea filipendula*, seguido de *Usnea strigosa*; fueron los que presentaron una mayor actividad antimicrobiana en las bacterias Gram negativas *Escherichia coli* O:157H7 72U y *Klebsiella pneumoniae* 112F, en comparación con las cepas de *Staphylococcus aureus* 82F. Esta diferenciación en la capacidad inhibitoria de los compuestos líquénicos es similar a lo reportado por Micheletti et al., (2021).

Figura 3

Inhibición del crecimiento de *Escherichia coli* O:157 H7 72U con los extractos orgánicos de especies líquénicas. Se distingue un efecto mayor con la especie *Usnea filipendula* con el extracto de éter de petróleo.

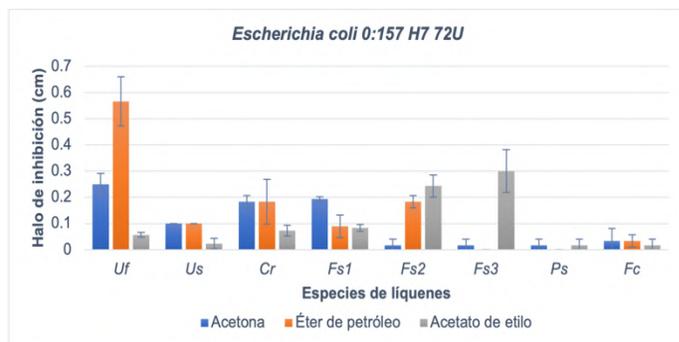


Figura 4

Inhibición del crecimiento de *Klebsiella pneumoniae* 112F con extractos orgánicos líquénicos. Se observa un efecto inhibitorio en los tres extractos, destacándose el extracto con acetato de etilo, en las especies *Usnea*, *Cladonia rangiferina* y *Flavoparmelia* spp. (Fs1).

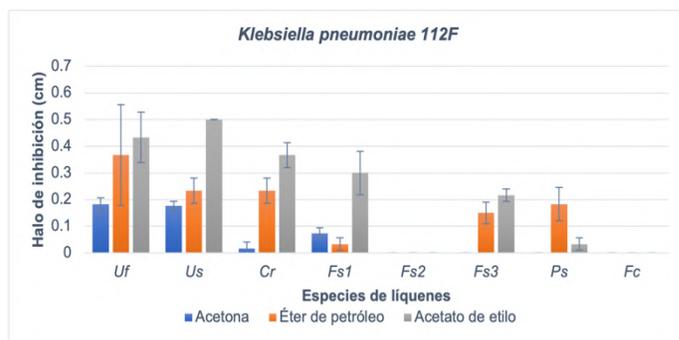


Figura 5
Efecto de inhibición con extractos orgánicos de líquenes en *Staphylococcus aureus* 23F. Se observa que el extracto de acetona de las especies del género *Usnea* muestra el mayor efecto inhibitorio.

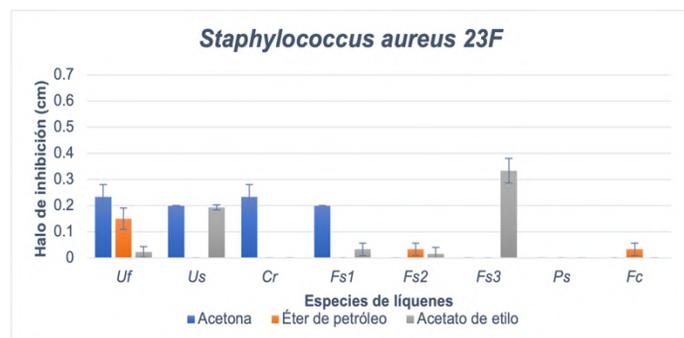


Figura 6
Inhibición del crecimiento de *Staphylococcus aureus* 34F. Se observa una mayor inhibición con los extractos de acetato de etilo, seguidos por los de acetona

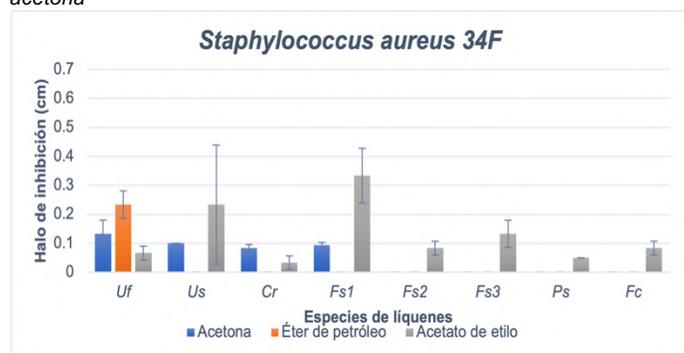
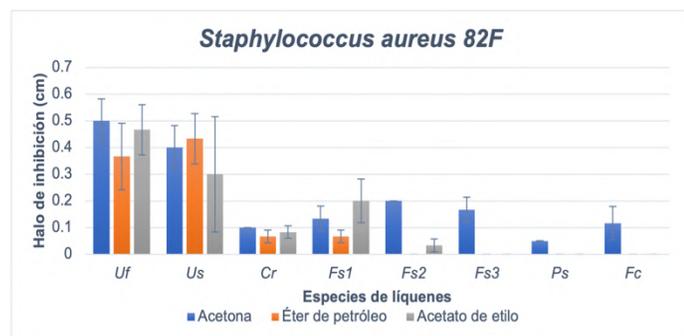


Figura 7
Inhibición del crecimiento en *Staphylococcus aureus* 82F con extractos líquénicos. Para esta cepa, los tres extractos empleados se observó una inhibición, siendo mayoritaria en acetona, seguida por acetato de etilo y finalmente con éter de petróleo, las especies con mayor actividad inhibitoria fueron las especies del género *Usnea*.



Los ensayos de inhibición bacteriana mostraron que los extractos orgánicos de las especies *Usnea filipendula* y *Usnea strigosa*, fueron los que poseen mayor capacidad antimicrobiana seguido de las especies *Flavoparmelia spp.* y *Flavoparmelia caperata*. Las cepas Gram negativo fueron inhibidas en los ensayos teniendo mayor efecto con los extractos orgánicos de acetato de etilo y acetona.

Lo anterior coincide con lo reportado por Robles et al., (1992), donde señala que los compuestos polares son los que poseen mayor actividad antimicrobiana, como es el caso de los extractos orgánicos empleados en este trabajo con acetona, donde se identificaron el mayor número de compuestos líquénicos en los análisis de cromatografía de capa fina en comparación de acetato de etilo en orden de polaridad. Se han reportado que los extractos orgánicos presentan mayor eficiencia en la inhibición bacteriana y de levaduras que los extractos acuosos (Chauhan y Abraham, 2013).

La cepa de *Staphylococcus aureus* 82F es inhibida por parte de los tres extractos orgánicos, principalmente con el solvente de acetona, en comparación con las otras cepas de *Staphylococcus aureus*, que mostraron mayor resistencia ante los compuestos líquénicos. Se ha observado que las cepas patógenas de *S. aureus* pueden ser inhibidas por sustancias líquénicas en rangos de 0.78 a 25 µg/mL (Oh et al., 2018).

3.2 Los compuestos líquénicos presentes en los extractos orgánicos identificados corresponden en su mayoría a ácidos orgánicos.

Aquellos extractos orgánicos en los que se observó una mayor inhibición de las cepas bacterianas se separaron mediante TLC, para conocer su composición. Los Rf de los compuestos identificados se cotejaron en la guía de identificación propuesta por Huneck y Yoshimura (1996).

Los compuestos identificados se muestran en las Tablas 1-3.

Tabla 1. Compuestos líquénicos obtenidos por cromatografía en capa fina de extractos con acetona de los líquenes ensayados.

Liquen	Rf	Metabolito secundario identificado
<i>Usnea filipendula</i>	0.56	Loxodina
	0.59	Ácido úsnico
	0.64	Ácido hipostítico
<i>Usnea strigosa</i>	0.70	Ácido hipoprotocetrárico
<i>Flavoparmelia spp. 1</i>	0.40	Ác. fumarprotocetrárico
	0.70	Ác. hipoprotocetrárico
	0.74	Ácido stítico
<i>Flavoparmelia spp. 2</i>	0.04	Ácido constítico
	0.32	Ácido salazínico
	0.42	Ác. fumarprotocetrárico
<i>Flavoparmelia spp. 3</i>	0.42	Ác. fumarprotocetrárico

Tabla 2. Compuestos líquénicos caracterizados por cromatografía en capa fina de extractos con acetato de etilo de los líquenes evaluados.

Liquen	Rf	Metabolito secundario identificado
<i>Usnea filipendula</i>	0.18	Ácido hipoconstítico
	0.33	Ácido salazínico
	0.36	Ácido pannárico
	0.40	Ác. fumarprotocetrárico
	0.45	Ácido barbatólico
<i>Usnea strigosa</i>	0.28	Ácido caperático
	0.40	Ác. Fumarprotocetrárico
	0.46	Ác. norstítico
<i>Flavoparmelia spp. 1</i>	0.40	Ác. fumarprotocetrárico
	0.46	Ácido norstítico
<i>Flavoparmelia spp. 2</i>	0.18	Ácido hipoconstítico
	0.22	Eritrina
	0.39	Ác.succininprotocetrárico

<i>Flavoparmelia</i> spp. 3	0.50	Ácido lecanórico
	0.40	Ác. fumarprotocetrárico
	0.46	Ácido norstictico

Tabla 3. Compuestos liquénicos identificados por cromatografía en capa fina a partir de extractos con acetona (a) y acetato de etilo (ae) de las especies liquénicas analizadas.

Liquen	Rf	Metabolito secundario identificado
<i>Physcia semipinnata</i> (a)	0.21	Eritrina
	0.29	Ácido salazínico
	0.40	Ác. fumarprotocetrárico
	0.49	4-O-ác. dimetilbarbatico
	0.53	Norlobaridona
	0.59	Ácido úsnico
<i>Physcia semipinnata</i> (ae)	0.69	Ácido hipoprotocetrárico
	0.39	Ác succiniprotocetrárico
	0.45	Ácido barbatólico
	0.52	Ácido barbítico
	0.57	Ácido úsnico
<i>Flavoparmelia caperata</i> (a)	0.69	Ác. hipoprotocetrárico
	0.43	Ác. fumarprotocetrárico
	0.52	Ácido barbítico
	0.56	Loxodina
	0.57	Ácido úsnico
<i>Flavoparmelia caperata</i> (ae)	0.66	Norlobaridona
	0.15	Ácido hipocostictico
	0.28	Ácido caperático
	0.36	Ácido pannárico
	0.53	Norlobaridona

Los compuestos liquénicos identificados por TLC mostraron que los solventes empleados extraen preferentemente ácidos orgánicos, siendo el ácido fumarprotocetrárico y ácido úsnico, los que se identificaron en la mayoría de las muestras. De acuerdo a Kosanić et al., (2014), en su evaluación de la inhibición del crecimiento de cepas de *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *Bacillus subtilis* y *Staphylococcus aureus* con extractos orgánicos de *Cladonia rangiferina*, determinaron que el ácido fumarprotocetrárico presente en esta especie liquénica posee junto con el ácido úsnico, actividad antimicrobiana en las cepas evaluadas; dicho efecto se corrobora en este trabajo de investigación.

Otra estrategia de identificación de compuestos liquénicos es la microcristalización. En las muestras de líquenes analizadas se logro cristalizar compuestos asociados en su mayoría a ácidos orgánicos como se observa en la Tabla 4 y la Figura 8.

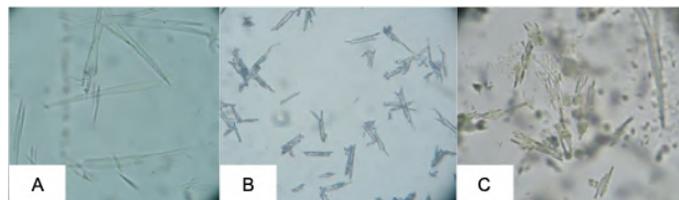
Tabla 4. Compuestos liquénicos cristalizados empleando G.A (Glicerina-ácido acético, 3:1) o G.E.A (Glicerina-Etanol-agua, 1:1:1).

Liquen	Reactivo	Descripción	Metabolito
<i>Usnea filipendula</i>	G.A	Agujas rectas	Ácido úsnico
	G.E.A	amarillas	
<i>Usnea strigosa</i>	G.A	Láminas amarillas	Ácido norstictico
	G.E.A	Agujas finas	Ácido confluentínico
<i>Cladonia rangiferina</i>	G.A	Placas rectangulares	Ácido girofórico
	G.E.A	Agujas cortas	Ácido fumarprotocetrárico
<i>Flavoparmelia</i> spp. 1	G.A	Agujas ramificadas	Ácido perlatórico

<i>Flavoparmelia</i> spp. 2	G.E.A	Agujas rectas amarillas	Ácido úsnico
	G.A	Agujas ramificadas	Ácido perlatórico
<i>Flavoparmelia</i> spp. 3	G.E.A	Agujas delgadas	Ácido imbricárico
	G.A	Prismas rómbicos	Cloroantranorina
<i>Physcia semipinnata</i>	G.E.A	Agujas cortas	Ác. Fumarprotocetrarico
	G.A	Agujas rómbicas	Antranorina
<i>Flavoparmelia caperata</i>	G.A	Cristales translúcidos	Ác. Divaricatico
	G.E.A	Agujas cortas	Ác. Fumarprotocetrarico
<i>Flavoparmelia caperata</i>	G.A	Agujas rectas	Ácido úsnico
	G.E.A	Agujas cortas	Ác. fumarprotocetrarico

A partir de las estrategias implementadas se pudo identificar compuestos liquénicos con actividad antimicrobiana (Arachchige Ishara Shiromi et al., 2021), como es el caso del ácido úsnico, el ácido caperático, el ácido norstictico, la antranorina, entre otros. Incluso algunos de estos compuestos reportan actividad antimicrobiana a concentraciones por debajo de antibióticos tradicionales como la vancomicina (Oh et al., 2018).

Figura 8 Visualización microscópica (40X) de algunos compuestos liquénicos cristalizados con Glicerina:ácido acético 3:1 y Glicerina: alcohol:agua 1:1:1. A) Ácido fumarprotocetrárico; B) Antranorina; C) Ácido úsnico.



IV. CONCLUSIONES

La multiresistencia que presentan actualmente diversas cepas bacterianas hace que sea determinante la identificación y caracterización de nuevos compuestos con actividad antimicrobiana. Los líquenes representan por lo tanto, una oportunidad para ser empleados en tratamiento y control de bacterias patógenas. El estado de Guanajuato posee una diversidad de especies de líquenes, aún por determinar, por lo que es necesario aumentar los estudios de identificación de líquenes en la región, así como la caracterización de los compuestos liquénicos que sistetizan. Este estudio es una aproximación a la descripción metabólica y taxonómica de líquenes presentes en el estado de Guanajuato.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Tecnológico Nacional de México/Instituto

Tecnológico Superior de Irapuato y al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Abasolo, por todas las facilidades prestadas para la realización de este trabajo.

VI. REFERENCIAS

- Almer, J., Resl, P., Gudmundsson, H., Warshan, D., Andrésón, O. S., Werth, S. (2023). Symbiont-specific responses to environmental cues in a threesome lichen symbiosis. *Molecular Ecology*, 32, 1045-1061. <https://doi.org/10.1111/mec.16814>.
- Álvarez-Mejía, C., Morales-Vargas, A., López-Ramírez, V. (2022). Potencial biotecnológico de los líquenes: una ventana metabólica. *Revista Electrónica de Ingeniería y Aplicación, REIA*, 6(4), 28-39.
- Arachchige Ishara Shiromi P. S., Punvakanthi Hewawasam, R., Udeni Jayalal R. G., Rathnayake, H., Mudiyansele, W., Bandara Wijayaratne, D. G., Wanniarachchi, D. (2021). Chemical Composition and Antimicrobial activity of Two Sri Lankan Lichens, *Parmotrema rampoddense*, and *Parmotrema tinctorum* against Methicillin-Sensitive and Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus*. *Hindawi. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*. <https://doi.org/10.1155/2021/9985325>
- Bonny, S., Hitti, E., Boustie, J., Bernard, A., Tomasi, S. (2009). Optimization of a microwave-assisted extraction of secondary metabolites from crustose lichens with quantitative spectrophotodensitometry analysis. *Journal of Chromatography*, 1216(45), 7651–7656. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2009.09.009>
- Castro, O. (2011). Contribución al estudio fitoquímico de la *Psiloparmelia distincta* (Nyl.) Hale. *Rev Soc Quím Perú*, 77(1), 56-65. <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v77n1/a06v77n1.pdf>
- Chauhan, R., Abraham, J. (2013). *In vitro* antimicrobial potential of the lichen *Parmotrema* sp. extracts against various pathogens. *Iranian Journal of Basic Medical Sciences*, 16(7), 882–885.
- Dar, T. U. H., Dar, S. A., Islam, S. U., Mangral, Z. A., Dar, R., Singh, B. P., Verma, P., Haque, S. (2022). Lichens as a repository of bioactive compounds: an open window for green therapy against diverse cancers. *Seminars in cancer biology*, 86(Pt2), 1120–1137. <https://doi.org/10.1016/j.semcancer.2021.05.028>
- Elkhateeb, W. A., Daba, G. M. (2019). Lichens, an alternative drugs for modern diseases. *Int. J. Res. Pharm. Biosci.* 6(10), 5–9.
- Fazio, A., Adler, M., Bertoni, M., Sepúlveda, C., Damonte, E., Maier, M. (2007). Lichen Secondary Metabolites from the Cultured Lichen Mycobionts of *Teloschistes chrysophthalmus* and *Ramalina celastri* and their Antiviral Activities. *Zeitschrift für Naturforschung C*, 62(7-8), 543-549. <https://doi.org/10.1515/znc-2007-7-813>
- Furmanek, L., Czarnota, P., Seaward, M. R. D. (2022). The effect of lichen secondary metabolites on *Aspergillus* fungi. *Archives of Microbiology*. 204:100. <https://doi.org/10.1007/s00203-021-02649-0>.
- Hale, M. (1969). How to know the Liches. United States of America: Wm. C Brown Company Publishers.
- Huneck, S., Yoshimura, I. (1996). Identification of lichen substances. Springer.
- Kosanić, M., Ranković, B., Stanojković, T., Rančić, A., Manojlović, N. (2014). *Cladonia* lichens and their major metabolites as possible natural antioxidant, antimicrobial and anticancer agents. *LWT-Food Science and Technology*. 59(1), 518-525. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.04.047>
- Micheletti, A. C., Honda, N. K., Ravaglia, L. M., Matayoshi, T., Spielman, A. A. (2021). Antibacterial potential of 12 lichen species. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, 93(4):e20191194 DOI 10.1590/0001-3765202120191194.
- Molnár, K., Farkas, E. (2010). Current results on biological activities of lichen secondary metabolites: a Review. *Zeitschrift für Naturforschung C*, 65(3-4), 157-173. <https://doi.org/10.1515/znc-2010-3-401>
- Nash III, T. H. (2008). *Lichen Biology*. 2nd ed.; C. U. Press, Ed. New York, USA, 4.
- Oh, Min J., Jeong Kim, Y., Gang, H-S., Han, J., Ha, H-H., Kim, H. (2018). Antimicrobial Activity of Divaricatic Acid Isolated from Lichen *Evernia mesomorpha* against Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus*. *Molecules*, 23, 3068. doi:10.3390/molecules23123068
- Ren, M., Jiang, S., Wang, Y., Pan, X., Pan, F., Wei, X. (2023). Discovery and excavation of lichen bioactive natural products. *Front. Microbiol.* 14:1177123. doi: 10.3389/fmicb.2023.1177123
- Robles, C., J.; Pastor, A.; Morales, P. (1992). Líquenes y sustancias líquénicas, *Revista Química – PUCP*, 6, 65-76.
- Singh, G. (2023). Linking Lichen Metabolites to Genes: Emerging Concepts and Lessons from Molecular Biology and Metagenomics. *J. Fungi*. 9, 160. <https://doi.org/10.3390/jof9020160>.

Diseño y simulación de un prototipo artromecánico para la aplicación de cinesiterapia en lesiones de rodilla y tobillo

Padilla-Silva, A. F.¹; González-Vargas, L. A.¹; Alvarado-Tovar, N.¹; Machado-Díaz, E.¹; Huerta-Valenzuela F.¹

Datos de Adscripción:

¹ TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, División de Posgrado, Av. Tecnológico No. 1555 Sur Periférico Gómez-Lerdo Km. 14.5, Ciudad Lerdo, Estado de Durango C.P. 35150.
mm2210965@itslerdo.edu.mx

Resumen – El enfoque del presente artículo radica en el diseño y simulación de un dispositivo artromotor, el cual tenga como función rehabilitar las lesiones causadas por la actividad física o deportes en las articulaciones de la rodilla y el tobillo específicamente, a través de la aplicación de la cinesiterapia.

Los objetivos principales del prototipo artromecánico son, recuperar o rehabilitar parcial o totalmente una lesión en las articulaciones de la rodilla y el tobillo a través del movimiento, así como también, reducir la carga física que realiza un fisioterapeuta al ofrecer una sesión de terapia.

Este dispositivo se diseñó a partir de la toma de medidas de la longitud del fémur, tibia, peroné y pie de una población de 69 personas (hombres y mujeres), las cuales están en un rango desde los 20 hasta los 40 años de edad. Todos los datos estadísticos, se realizaron en Microsoft Excel, donde se obtuvieron datos como el promedio, varianza, desviación estándar y las gráficas de la distribución normal. Lo anteriormente mencionado ayudó a que se le asignaran las medidas al dispositivo en donde se ubica el fémur y la tibia, principalmente.

Tanto el diseño mecánico como la simulación de movimiento se realizaron en el software de diseño NX, el cual nos ofreció resultados de rango de movimiento del prototipo, así como también el análisis estructural del mismo.

Palabras Clave – Artromotor, Cinesiterapia, Diseño Mecánico, Siemens NX.

Abstract - The focus of this article lies in the design and simulation of an arthromotor device, whose function is to rehabilitate injuries caused by physical activity or sports in the knee and ankle joints, specifically, through the application of the kinesitherapy.

The main objectives of the arthromechanical prototype are to partially or totally recover or rehabilitate an injury to the knee and ankle joints through movement, as well as to reduce the physical load that a physiotherapist performs when offering a therapy session.

This device was designed from taking measurements to a population of 69 people (men and women), who are in a range

from 20 to 40 years of age. All the statistical data were carried out in Microsoft Excel, where data such as the average, variance, standard deviation and graphs of the normal distribution were obtained. The aforementioned helped to assign the measurements to the device where the femur and tibia are located, mainly.

Both the mechanical design and the movement simulation were carried out in the NX design software, which offered us results of the range of movement of the prototype, as well as its structural analysis.

Keywords – Arthromotor, Kinesitherapy, Mechanical Design, Siemens NX.

I. INTRODUCCIÓN

La rehabilitación de lesiones de rodilla y el tobillo representa un desafío significativo para los profesionales de la salud y los pacientes. La cinesiterapia, que implica el uso de movimientos terapéuticos controlados, se ha convertido en una herramienta fundamental en el proceso de recuperación y fortalecimiento de las articulaciones afectadas. (Fernández de las Peñas & Melián Ortiz, 2019) En este contexto, el diseño y la simulación de prototipos artromotores han surgido como una prometedora solución para facilitar la aplicación precisa y personalizada de la cinesiterapia en estas áreas.

El presente artículo se centra en el desarrollo de un prototipo artromotor diseñado específicamente para la aplicación de cinesiterapia en lesiones de rodilla y tobillo. A través de un enfoque multidisciplinario que combina la ingeniería biomédica, la biomecánica y la fisioterapia, se busca proporcionar a los profesionales de la salud y a los pacientes una herramienta efectiva y segura para la rehabilitación de estas articulaciones. Las lesiones de rodilla y tobillo son comunes en deportistas, personas mayores y aquellos que han sufrido accidentes traumáticos. Estas lesiones pueden variar desde esguinces y distensiones hasta fracturas y desgarros de ligamentos (Walker, 2017).

En la actualidad, la cinesiterapia conlleva una serie de pasos para ofrecerle al paciente la rehabilitación más adecuada para su lesión. Primero, se hace una evaluación inicial, en la que se recaba el historial médico, lesiones anteriores, síntomas actuales y objetivos de tratamiento. Después, procede al diseño del plan de tratamiento, esto es personalizado, en el cual define la frecuencia y duración de las sesiones de cinesiterapia. Luego, siguen las sesiones de tratamiento, en las cuales se sigue el plan de tratamiento para que posteriormente, el terapeuta supervise y

corrija los movimientos realizados por el paciente para que los lleve a cabo de manera segura, también puede realizar ajustes y correcciones al plan de tratamiento. Finalmente, a medida que avanza el tratamiento, el terapeuta realiza un seguimiento regular del progreso del paciente y ajusta el plan de tratamiento según sea necesario. Esto puede implicar aumentar la intensidad de los ejercicios, agregas nuevas técnicas o modificar los objetivos en función de los cambios en la condición del paciente.

La rehabilitación adecuada es crucial para restaurar la función y la movilidad de la articulación afectada, reducir el dolor y prevenir complicaciones a largo plazo (Hüter-Becker, Schewe, & Heipertz, 2005), es por eso, que esta área ha resultado de gran interés para muchos investigadores, por lo cual aquí se mencionan algunos de los trabajos relacionados:

Un primer trabajo corresponde a Suleidy Quesada (Cuéllar & Obregón Sánchez, 2021), quien realizó la: "Propuesta de rediseño ergonómico del modelo de utilidad: Órtesis de rodilla para personas con discapacidad motriz". En este trabajo se propone un rediseño de órtesis para obtener como producto un dispositivo funcional, seguro, eficiente, estético y confortable, tomando en cuenta las dimensiones antropomórficas para dar soporte a la articulación durante el ciclo de la marcha en pacientes con lesiones de rodilla o ausencia de control muscular. Este dispositivo tiene una segunda función, que es la de servir como equipo de diagnóstico de patologías del sistema muscular. Uno de sus principales aportes fue definir que un dispositivo que tiene como propósito ayudar a mejorar el movimiento de un ser humano, tiene que ser diseñado basándose en el usuario, esto para garantizar que tenga las dimensiones y el peso adecuados, que se adapte ergonómicamente a la extremidad y que se utilicen los materiales correctos para el fin de este dispositivo.

Este trabajo se relaciona con la investigación en curso, ya que propone un diseño basado en el usuario, en el que se estén realizando pruebas experimentales directamente con un paciente piloto para llevar a cabo las mejoras al dispositivo de una manera más rápida y eficiente.

Un segundo trabajo corresponde a R. Gutiérrez (Gutiérrez, Venegas, Duque, & Avilés, 2017) quien realizó el estudio: "Diseño y control de un exoesqueleto para rehabilitación motora en miembro superior".

Primeramente, expone la necesidad de la creación de un dispositivo mecatrónico como soporte para los fisioterapeutas ya que, al realizar las terapias de forma manual, provocan en el profesional cansancio físico y potenciales lesiones en el sistema musculoesquelético.

Este trabajo se relaciona con la investigación en curso, ya que también toma en cuenta la biomecánica del cuerpo y conceptos como flexión, extensión y rotación de las articulaciones, que, aunque R. Gutiérrez trabajó con las articulaciones de los miembros superiores, los conceptos igualmente se aplican a las articulaciones de los miembros inferiores, como en esta investigación, la rodilla y el tobillo. También se relaciona, ya que incluyó un método de control para los ciclos de terapia, así como una base de datos para generar un historial del paciente y su rehabilitación.

El último trabajo corresponde a Gustavo Castellón (Castillón Ramírez, 2021) quien realizó la tesis titulada "Diseño y desarrollo de un dispositivo de asistencia para la rehabilitación motriz de extremidades inferiores de pacientes con secuela de accidente

cerebrovascular".

Lo anterior se basa principalmente en una técnica llamada "terapia espejo", la cual es ampliamente utilizada en la fisioterapia, ya que se caracteriza por la creación de una imagen virtual de una parte del cuerpo, en este caso, de la pierna.

Su trabajo se relaciona con el presente proyecto, ya que se pretende crear una estructura mecánica muy parecida a la propuesta por Castellón, así como también integrarle un método de control y una interfaz gráfica para que haya interacción fisioterapeuta-dispositivo y dispositivo-usuario.

En resumen, este trabajo pretende ofrecer una solución innovadora y accesible para la rehabilitación de lesiones de rodilla y tobillo a través del diseño y simulación de un prototipo artromotor. Se espera que este prototipo pueda contribuir significativamente a la mejora de los resultados terapéuticos y la calidad de vida de los pacientes con estas lesiones.

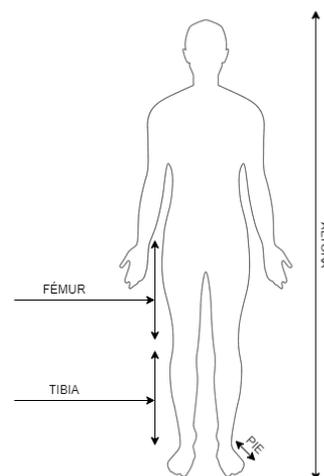
II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

2.1 Definición de medidas para el prototipo mediante el muestreo estadístico.

Una de las primeras actividades a llevar a cabo, fue la toma de medidas a una población, en el presente trabajo los sujetos de estudio están compuestos por un total de 69 personas, hombres y mujeres, de entre 20 a 40 años de edad. Se tomaron cuatro medidas principales, las cuales fueron: la altura, longitud del fémur, longitud de la tibia y el peroné y la medida del pie, como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 1.

Medidas tomadas en una persona.



Todo lo anterior para definir las medidas que deberá tener el prototipo artromotor, el cual de la misma forma deberá ser ajustable a diferentes medidas para que sea adaptable a toda la población que se eligió.

Una vez que se tomaron las medidas, se procedió a realizar los análisis estadísticos para obtener los resultados buscados. La obtención de los datos estadísticos y gráficos se trabajaron a

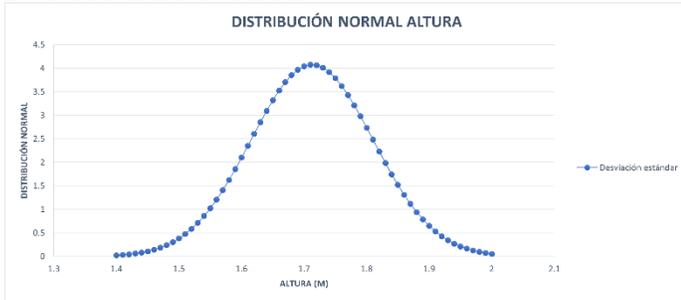
través del uso de Excel. Los datos de mayor importancia son: el máximo y el mínimo de cada una de las medidas tomadas, el promedio de éstas, así como también la desviación estándar y la distribución normal, ésta última sirve para indicar cuánto se alejan los valores de un conjunto de datos de su media, lo cual permite comprender mejor la forma en que se distribuyen los datos. Ver tabla 1.

Tabla 1.
Datos estadísticos obtenidos.

	ALTURA (M)	LONGITUD FÉMUR (CM)	LONGITUD TIBIA (CM)	MEDIDA PIE (CM)
PROMEDIO	1.7126087	48.3115942	39.51449275	26.572464
MÁXIMO	1.97	61	50	30
MÍNIMO	1.42	38	33	22
NÚMERO DE DATOS	69	69	69	69
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0.0978993	3.836839088	3.285407816	1.8889683
VARIANZA	0.0095843	14.72133419	10.79390452	3.5682012
COEF. DE VARIACIÓN	0.0571638	0.079418598	0.083144375	0.0710874
LÍMITE MÁXIMO	1.810508	52.14843329	42.79990057	28.461432
LÍMITE MÍNIMO	1.6147094	44.47475512	36.22908494	24.683495

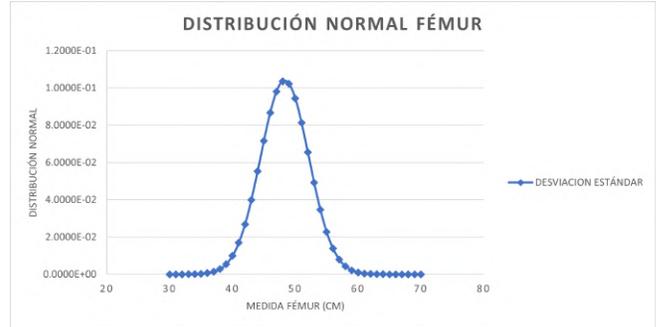
El primer dato obtenido fue la media de la altura, la cual según la muestra que se tomó, es de aproximadamente 1.70 m, como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 2.
Distribución normal de la altura.



En el caso de la medida del fémur, la media es de 50 cm aproximadamente, sin embargo, como se mencionó anteriormente, las medidas del fémur como de la tibia y peroné tienen que ser ajustables para que se adapten a las medidas de cada una de las personas de la población muestreada, por lo cual, a partir de su mínimo y su máximo, se definió que la medida de esta parte del prototipo sería ajustable desde los 35 centímetros hasta los 65 centímetros. Los resultados se pueden observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 3.
Distribución normal de fémur.



La definición de la medida de la pieza que soporta a la tibia y el peroné se hizo de la misma forma que con el fémur, por lo cual la medida de esta parte quedó ajustable desde los 30 centímetros hasta los 50 centímetros. Los resultados se pueden observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 4.
Distribución normal de tibia.



Finalmente, la medida de la pieza que soportará al pie, quedó en aproximadamente 30 centímetros. Es importante mencionar que esta pieza en particular no será ajustable, ya que el hecho de que no sea así, no afecta el funcionamiento del prototipo ni resulta molesto para el usuario. Los resultados se pueden observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 5.
Distribución normal de pie.



2.2 Creación de modelo 3D en software de diseño NX a partir de las referencias de medidas recabadas en el muestreo.

Como segundo paso, se realizaron las piezas necesarias para hacer una primera propuesta de prototipo en el software especializado NX, el cual otorga soluciones efectivas en diseño, simulación y fabricación, para que la persona encargada del proyecto no duplique esfuerzos (SIEMENS, 2023). El diseño del prototipo artromotor de la presente investigación se realizó a través de la aplicación de ingeniería inversa sobre distintos dispositivos existentes en el mercado, para así realizarle mejoras y proponer alguna innovación al mismo, por lo cual el resultado se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 6.
Vista isométrica del ensamble de propuesta.

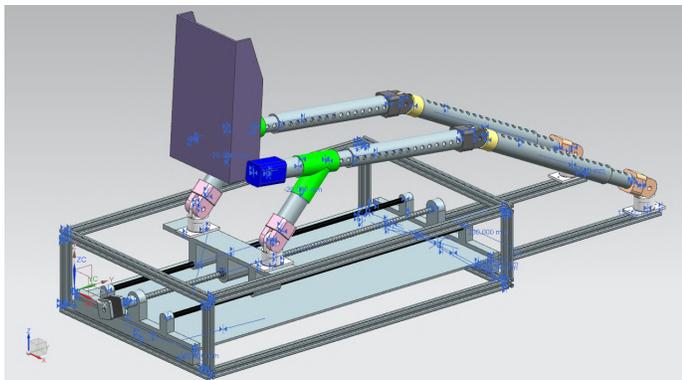
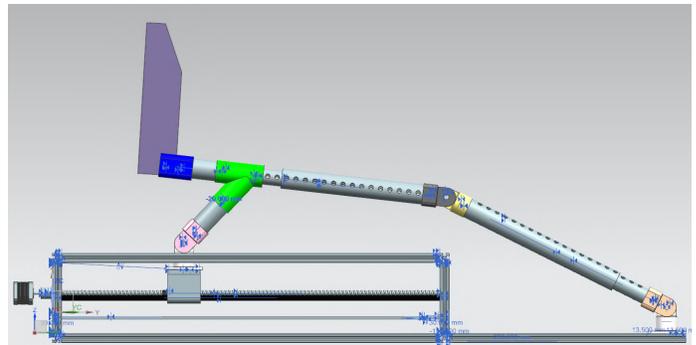


Figura 7.
Vista lateral derecha del ensamble.



En general, se realizó una base con perfiles de aluminio estructural 20x20 mm, la cual soportará a la pierna, la cual contiene tubos redondos de aluminio 6061 de 1 y 1 ¼ de pulgada, que tienen las medidas que se mencionaron en la definición de medidas para el prototipo mediante el muestreo estadístico, y que también cuenta con perforaciones a lo largo de todo el tubo, lo cual hace que pueda ser ajustable a diferentes medidas. El prototipo también cuenta con piezas fabricadas de PETG, ya que es un material que resulta práctico sin perder calidad, es reciclable, soporta altas presiones sin agrietarse y es resistente a entornos hostiles.

Por otro lado, en la parte del mecanismo, el prototipo cuenta con un husillo de 1000 mm de longitud y un grosor de 12 mm, el cual hace que la estructura que soporta a la pierna se mueva a través de él. También cuenta con dos varillas lisas que cumplen la función de soportar el peso y servir como guía lineal. Finalmente, el prototipo cuenta con piezas complementarias como: coples, escuadras para perfil de aluminio, soportes para varillas y husillo, entre otras.

2.3 Simulación y análisis estructural.

La simulación es una técnica que se utiliza para imitar o modelar el comportamiento de un sistema real mediante la construcción de un modelo matemático o físico. En ingeniería, la simulación se utiliza para analizar y diseñar sistemas mecánicos, eléctricos, electrónicos, hidráulicos, térmicos, entre otros.

El análisis estructural es una técnica que se utiliza para analizar el comportamiento de una estructura. El análisis estructural se basa en la mecánica de materiales y la teoría de las estructuras para determinar cómo se comportará una estructura bajo diferentes cargas y condiciones (Hibbeler, 2006).

La simulación y análisis estructural se complementan mutuamente, ya que la simulación se puede utilizar para modelar una estructura y simular su comportamiento ante diferentes cargas y condiciones, mientras que el análisis estructural se utiliza para analizar la respuesta de una estructura a diferentes carga y condiciones. En general, la simulación y el análisis estructural son herramientas importantes en la ingeniería y otras áreas para comprender y predecir el comportamiento de los sistemas complejos.

Primeramente, es importante mencionar que en este caso se optó por analizar solamente algunas piezas individualmente, las cuales fueron en su mayoría las piezas fabricadas con PETG, ya que son las únicas piezas con la que no se contaba la certeza de que soportaría el peso de la pierna de una persona.

Por otro lado, la forma en la cual se determinó el peso de una pierna en un individuo, es que, según la información obtenida, el

peso de una sola pierna en un ser humano conforma el 10% del total de su peso, de forma que, si se determina un peso máximo de 150 kilogramos, la estructura soportará 15 kilogramos aproximadamente.

Figura 8.
Análisis de deformación de pieza base-articulación.

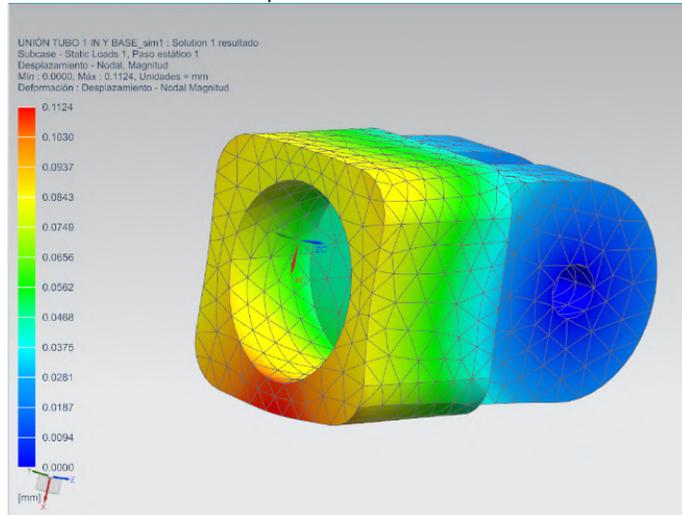


Figura 9.
Análisis de deformación de articulación tibia-rodilla.

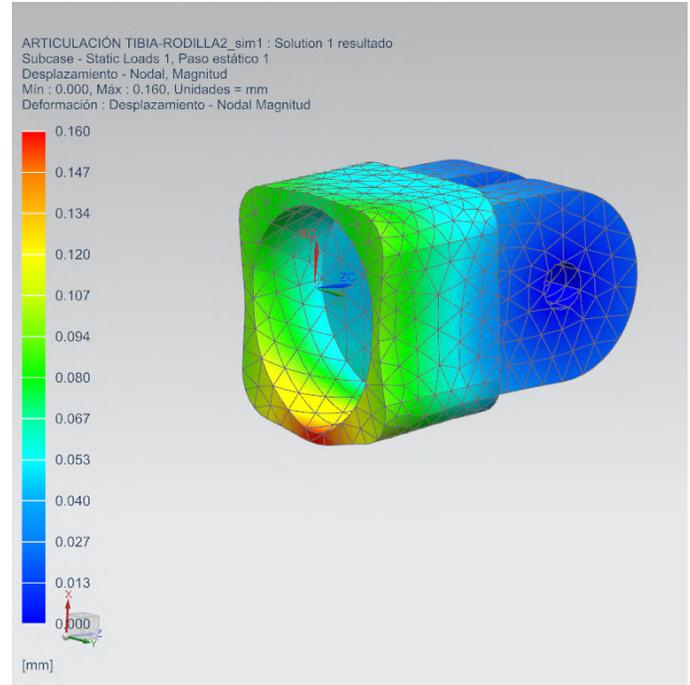
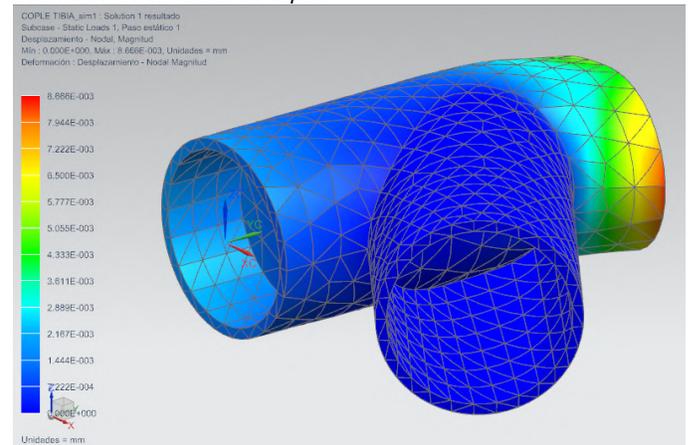


Figura 10.
Análisis de deformación de cople.



Como se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** la deformación que causan las fuerzas aplicadas en las piezas es mínima, por lo tanto, se puede concluir que la selección del material es correcta y que soportará el peso aplicado a la hora de poner en marcha el dispositivo. En algunas piezas se observa más deformación debido a que su diámetro es menor comparada con las otras piezas.

En las figuras mencionadas anteriormente se muestra un texto en la parte superior izquierda, el cual contiene datos generales sobre la pieza analizada, como el nombre de la misma, el tipo de análisis estructural que se aplicó y el mínimo y máximo en unidades de mega pascales (MPa).

2.4 Análisis de modelo cinemático por método geométrico.

El análisis de un modelo cinemático por método geométrico es de suma importancia para el desarrollo y optimización de un prototipo artromotor. Este enfoque permite comprender y predecir el comportamiento del sistema mecánico involucrado, lo que resulta fundamental para garantizar su eficacia y seguridad. (Barrientos, 2007).

El análisis del modelo cinemático se realizó en la aplicación de Geogebra, en la cual se implementó el método geométrico.

Las ecuaciones utilizadas fueron las siguientes:

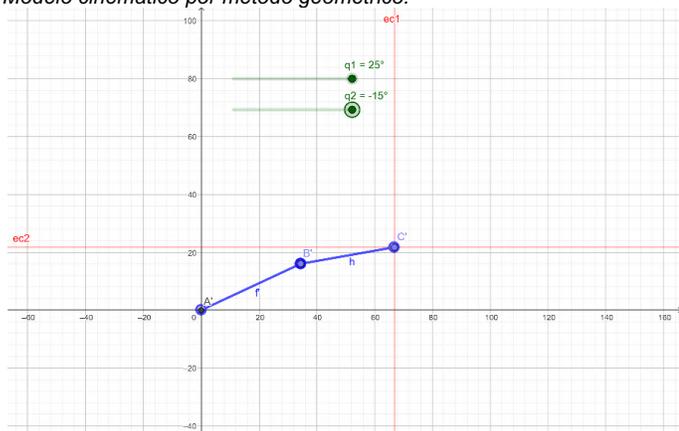
$$x = l_1 \cdot \cos(q1) + l_2 \cdot \cos(q1 + q2) \quad (1)$$

$$y = l_1 \cdot \sin(q1) + l_2 \cdot \sin(q1 + q2) \quad (2)$$

En esta ocasión se optó por realizar un modelo cinemático de 2 g.d.l. (excluyendo únicamente a la articulación del tobillo) para analizarlo mediante el método geométrico.

A través de las ecuaciones (1) y (2), se obtiene como resultado las coordenadas en x y y del extremo de la segunda articulación. En Geogebra, se hizo uso de segmentos, rotaciones, rectas y deslizadoras, éstos últimos para definir el rango de grados de movilidad de cada una de las articulaciones, en las cuales se dio un rango de 20° y 35°, respectivamente.

Figura 11.
Modelo cinemático por método geométrico.



El modelo cinemático se refiere a la descripción geométrica del movimiento de los elementos que conforman el prototipo artromotor. Al aplicar el método geométrico, se estudian las relaciones espaciales entre estos elementos, así como los ángulos y distancias involucrados en su movimiento (Baturone, 2005). Esto proporciona una base sólida para comprender cómo se desplazan las diferentes partes del prototipo y cómo interactúan entre sí.

La importancia del análisis cinemático radica en que permite identificar posibles problemas o limitaciones en el diseño del prototipo artromotor antes de su construcción. Al estudiar las trayectorias y las restricciones de movimiento, es posible detectar interferencias, áreas de conflicto o movimientos no deseados que podrían comprometer el funcionamiento del dispositivo. Estos hallazgos tempranos son esenciales para corregir errores de diseño.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El objetivo principal de este estudio fue diseñar y simular un prototipo artromecánico para la aplicación de cinesiterapia en lesiones. A continuación, se presentan los resultados obtenidos: En primer lugar, se diseñó un sistema artromecánico con base en los principios de la cinemática y la dinámica articulares. El prototipo consiste en un dispositivo robótico que simula los movimientos fisiológicos de la rodilla y el tobillo, permitiendo una amplia gama de ejercicios terapéuticos. Los movimientos de flexión y extensión se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Figura 12.
Movimiento de extensión de prototipo.

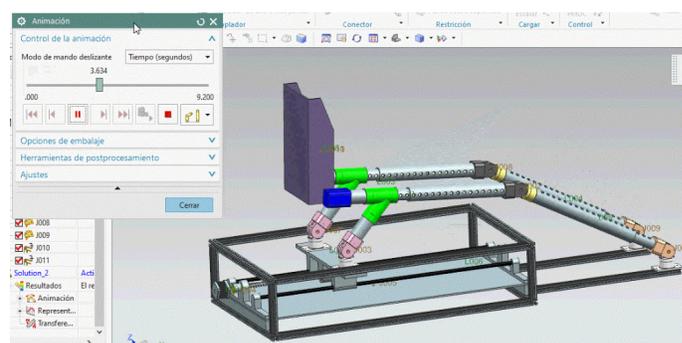
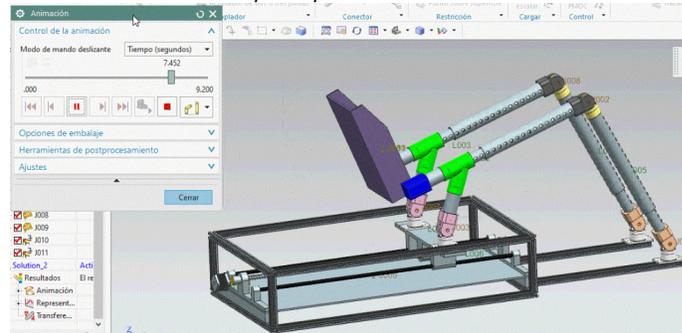


Figura 13.
Movimiento de flexión del prototipo.



Los resultados de la simulación demostraron que el prototipo era capaz de reproducir con precisión los movimientos articulares deseados, proporcionando una adecuada resistencia y soporte durante la cinesiterapia.

La discusión de los resultados se centra en la importancia de contar con un dispositivo artromecánico para la cinesiterapia en lesiones de rodilla y tobillo. La capacidad de simular movimientos articulares específicos y proporcionar resistencia controlada es fundamental para lograr una rehabilitación efectiva.

IV. CONCLUSIONES

En conclusión, el diseño y la simulación de un prototipo artromecánico para la aplicación de cinesiterapia en lesiones de rodilla y tobillo representan un avance significativo en el campo de la rehabilitación física. Mediante la integración de tecnología robótica y sistemas de simulación, se ha logrado desarrollar un

dispositivo versátil y efectivo para el tratamiento de lesiones articulares. Los resultados obtenidos de esta investigación demuestran el potencial del prototipo artromecánico para mejorar la eficacia y eficiencia de la cinesiterapia, permitiendo una recuperación más rápida y completa de los pacientes. Además, este tipo de enfoque innovador sienta las bases para futuros avances en el campo de la medicina y la rehabilitación, brindando nuevas oportunidades para la mejora de la calidad de vida de las personas con lesiones articulares.

El seguimiento a este estudio será la construcción del prototipo sugerido en esta investigación, el cual será evaluado y se compararán los resultados con las estrategias usadas en la actualidad.

En resumen, el diseño y la simulación de este prototipo artromecánico son un paso adelante hacia la aplicación de tecnología de vanguardia en el campo de la rehabilitación, abriendo nuevas posibilidades para el tratamiento de lesiones de rodilla y tobillo.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al Tecnológico Nacional de México (TecNM) y al Instituto Tecnológico Superior de Lerdo por las facilidades brindadas para la realización del presente trabajo. En especial a la división de Posgrado.

VI. REFERENCIAS

- Barrientos, A. (2007). *Fundamentos de Robótica*. McGraw-Hill.
- Baturone, A. O. (2005). *Robótica: Manipuladores y Robots Móviles*. Marcombo.
- Castillón Ramírez, G. A. (2021). *Diseño y desarrollo de un dispositivo de asistencia para la rehabilitación motriz de extremidades inferiores de pacientes con secuela de accidente cerebrovascular (Moveleg)*. Ensenada, Baja California: Instituto Tecnológico de Ensenada.
- Cuéllar, S. Q., & Obregón Sánchez, M. G. (2021). Propuesta de rediseño ergonómico del modelo de utilidad: Órtesis de rodilla para personas con discapacidad motriz. *Revista UPIICSA Investigación Interdisciplinaria*.
- Fernández de las Peñas, C., & Melián Ortiz, A. (2019). *Cinesiterapia: bases fisiológicas y aplicación práctica*. Barcelona, España: Elsevier.
- Gutiérrez, R., Venegas, F., Duque, J., & Avilés, O. (2017). Diseño y Control de un Exoesqueleto para Rehabilitación Motora en Miembro Superior. *Universidad Militar Nueva Granada*.
- Hibbeler, R. C. (2006). *Mecánica de Materiales*. Pearson.
- Hüter-Becker, A., Schewe, H., & Heipertz, W. (2005). *La rehabilitación en el deporte*. Badalona, España: Editorial Paidotribo.
- SIEMENS. (22 de Mayo de 2023). *NX CAD for product engineering*. Obtenido de <https://plm.sw.siemens.com/es-ES/nx/cad-online/>
- Walker, B. (2017). *La Anatomía de las lesiones deportivas*. Editorial Paidotribo.

Diseño de interfaz en MatLab para la activación y monitoreo de señales de control de encendido electrónico computarizado en motores de combustión interna

Torres-Astorga, G. A.¹; González-Vargas, L. A.¹; Alvarado-Tovar, N. ¹; Machado-Diaz, E. ¹; Huerta-Valenzuela, F. ¹

Datos de Adscripción:

¹ Tecnológico Nacional de México, ITS de Lerdo, Divisiones de: Posgrado, Ing. Electrónica, Ing. Electromecánica, Ing. En Sistemas Automotrices. Av. Tecnológico No.1555 Sur, Periférico Gómez-Lerdo Km. 14.5. Ciudad Lerdo, Estado de Durango. México. C.P. 35150.
mm2220003@itslerdo.edu.mx

Resumen - El sistema de encendido, es uno de los sistemas más importantes para el motor de combustión interna, ya que, estos permiten el quemar el combustible en un momento exacto para el mejor aprovechamiento de la energía liberada por la combustión. Anteriormente, estos sistemas eran utilizados mediante sistemas mecánicos que, eran deficientes al incorporar elementos cuya fricción genera que pierdan calibración, por lo que los nuevos sistemas reemplazan el control mecánico del encendido por un control completamente electrónico, donde una serie de sensores permiten determinar el momento preciso para generar la chispa en el sistema de encendido; incluso llegando a dar información a otros sistemas de vital importancia para el funcionamiento del motor. En este trabajo se propone una interfaz de usuario desarrollada en MATLAB APPDesign conectada a un microcontrolador Arduino Mega como medio de adquisición de datos, para activar y monitorizar señales eléctricas y electrónicas del sistema de ignición, con el fin de contar con una herramienta programable que permita verificar y optimizar el comportamiento de los parámetros electrónicos y de potencia en el sistema de ignición, que tengan un impacto en el ahorro energético en los vehículos automotores.

Palabras Clave – Electrónico, Encendido, Interfaz, MATLAB, Motor, Sensor.

Abstract - The ignition systems are one of the most important systems for the internal combustion engine, since they allow the fuel to be burned at an exact moment for the best use of the energy released by combustion. Previously, these systems were used through mechanical systems that were deficient by incorporating elements whose friction causes them to lose calibration, so the new systems replace the mechanical ignition control with a completely electronic control, where a series of sensors allow determining the moment precise to generate the spark in the ignition system; even going so far as to give information to other systems of vital importance for the operation of the engine. In this work, a user interface programmed in MATLAB AppDesign connected to an Arduino Mega card is proposed as a means of data acquisition, to activate and monitor electrical and electronic signals of the ignition system, in order to have a

programmable tool that allows to verify and optimize the behavior of electronic and power parameters in the ignition system, which have an impact on energy savings in motor vehicles.

Keywords – Electronic, Engine, Ignition, Interface, MATLAB, Sensor.

I. INTRODUCCIÓN

El transporte es uno de los mecanismos más importantes de la humanidad, pues, nace de la necesidad de trasladar por diversos medios la mercancía que se dirigía a un punto (Ferro Veiga, 2020).

A medida que avanzaban los años, el transporte pasaba de utilizar la fuerza humana a apoyarse de otros medios, utilizando principalmente la fuerza de los animales que podían domesticar o mediante el aprovechamiento de energías naturales (Rivera y Zaragoza, 2007).

Alrededor del siglo XIX, a medida que avanzaba la revolución industrial y al constante desarrollo en el área de transporte, se comenzaba con la implementación de nuevos sistemas que ayudaran al traslado por carretas sin utilizar animales como medio motriz; llevando a que la idea que tuvo en 1861 el ingeniero Francés Beau de Rochas sobre el principio termodinámico de combustión dentro de una cámara sellada, fuese desarrollada por el ingeniero Alemán Nikolaus Otto en 1876, dando lugar a la máquina térmica que se conoce como motor de combustión interna regida por el funcionamiento de un ciclo de cuatro tiempos; creando de esta forma el primer modelo funcional del Motor de combustión interna de ciclo Otto (Gaviria-Ríos et al., 2002).

Los Motores de Combustión Interna (MCI) son un tipo de máquina que obtiene energía mecánica directamente de la energía química de un combustible que arde dentro de la cámara de combustión (Brunetti, 2018), por lo que se le considera una máquina térmica cuyas formas de convertir la energía contenida en el combustible cambiaran basándose en la forma de la cámara interna, los elementos internos que lo componen y los sistemas auxiliares apoyen a la generación de los tiempos del ciclo Otto y a su control (Rovira et, 2015).

Los MCI traen consigo una de las problemáticas más comunes al tratarse de máquinas térmica, pues, la emisión de contaminantes lleva a la incorporación de sistemas más sofisticados para un mejor control y aprovechamiento del

combustible que, por ende, reducirá las emisiones de carbono y de hidruros productos de una combustión ineficiente (Gerardo et al., 2019). Gracias a esto, en las últimas décadas del siglo XX, se han creado normas que acrediten la disminución de emisiones y la incorporación de las nuevas tecnologías en las unidades más modernas (Reif, 2014).

La incorporación de los modernos sistemas para el control de emisiones y estado de los MCI está limitada a nuevos motores, debido a que es necesario rediseñar ciertos elementos para contemplar las nuevas tecnologías, pues, cada una de las piezas no solo se deben ver como un elemento individual, sino también contemplar basándose en las necesidades automotrices, toda la electrónica necesaria a alojar (Noroña, Gómez, 2019).

La presente investigación tiene el propósito de diseñar un prototipo de encendido electrónico controlado mediante una interfaz de MATLAB con la finalidad de reemplazar el control mecánico de un MCI; utilizando la tarjeta Arduino Mega como comunicación entre sensores, la interfaz de monitoreo y el sistema de potencia requerido.

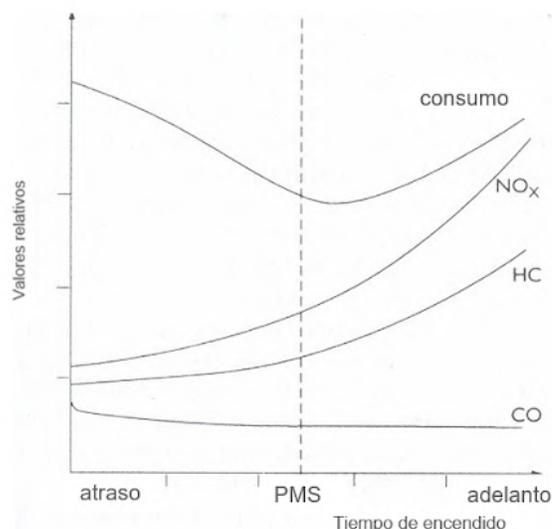
II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

A. Análisis del encendido por chispa y su generación

El motor de combustión interna por gasolina contempla como la tercera fase del ciclo Otto (explosión), la detonación del combustible por medio de una chispa que salta a través de un espacio de aire de 0.6 mm, en un cilindro del motor, bajo una alta compresión. Dicha detonación requiere una precisión para encender la mezcla de aire-gas, los cuales son controlados por el sistema de encendido. El elemento generador de la chispa, dentro del sistema, es la bobina de encendido, que eleva los 12 volts de entrada, suministrados por la batería, a un aproximado de 30 kV en el voltaje de salida. El aumento del voltaje en el circuito primario que controla la bobina hace que se suspenda el flujo de la energía eléctrica, lo que provoca una excitación en el circuito secundario, generando la chispa que llegará a la bujía (Aras, 2004).

El tiempo de encendido (o bien el momento en que se produce la chispa), tiene un efecto significativo en factores como: el consumo de combustible, el torque, la capacidad de conducción, y las emisiones de escape. Para una eficiencia óptima en la operación del motor, el ángulo de avance de encendido debe ser tal, que haga que la presión máxima de combustión ocurra justo después del Punto Muerto Superior (PMS), es decir, cuando el pistón del motor está en el punto máximo de compresión (Payri González & Desantes, 2011). La Figura 1 muestra los consumos en la combustión respecto al PMS. Si el tiempo se adelanta o se atrasa, los valores están fuera del equilibrio.

Figura 1
Efectos en los cambios del tiempo de encendido



Nota: Efectos en los cambios del tiempo de encendido [Fotografía], por Vineet P. Aras, 2004

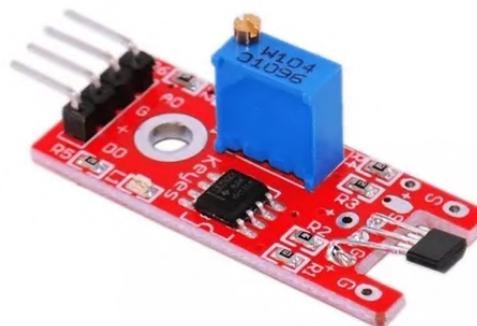
Considerando las necesidades del motor para un aprovechamiento óptimo del combustible, es necesario conocer el momento exacto para la generación de la chispa dentro de la fase de explosión.

A.1. Generación de pulsos

Comúnmente los MCI utilizan sensores de posición para determinar la fase correspondiente para cada cilindro que conforma al motor.

Existen diversos tipos de sensores que pueden brindar las pulsaciones indicadas, los más frecuentes, son los sensores por efecto Hall, los cuales generan señales eléctricas de onda cuadrada, manteniendo un tipo de señal digital (Mariño Grijalva & Villagomez Cholota, 2009). Utilizando el sensor KY-024 (Figura 2) es posible conocer los pulsos de entrada. Sin embargo, un solo sensor limita la posibilidad de un control de multipunto por lo que es necesario agregar sensores basándonos en las condiciones y distribución de los cilindros.

Figura 2
Sensor de posición KY-024



Nota: Módulo Sensor Magnético de Efecto Hall Breakout KY 024 [Fotografía], por Carrod Electrónica, 2014, Carrod Electrónica (<https://www.carrod.mx/products/copy-of-modulo-sensor-magnetico-de-efecto-hall-breakout-3144e>)

La Tabla 1 muestra las posibles combinaciones de múltiples sensores de posición de efecto Hall por medio de la tabla de verdad generada por los estados ON, OFF de la señal digital; manteniendo la distribución común de 3 sensores para el control de los motores.

Tabla 1
Tabla de combinaciones de pulsos disponible

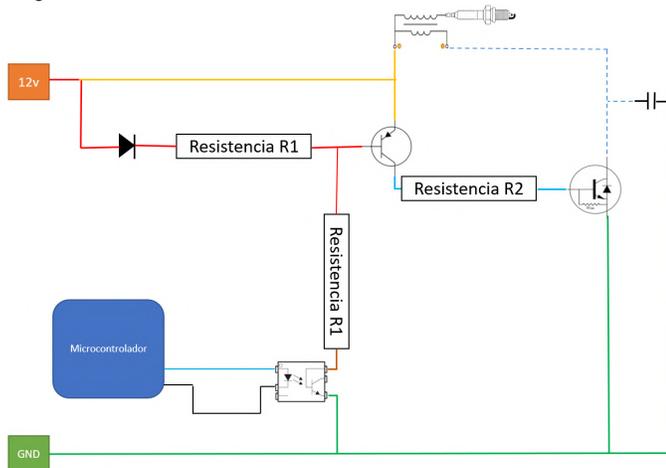
Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3
0	0	0
0	0	1
0	1	0
0	1	1
1	0	0
1	0	1
1	1	0
1	1	1

A.II. Generación de chispa.

La generación de la chispa necesita de la combinación de un sistema de control y uno de generación, la cual se debe contemplar para el control mediante transistores en conjunto a resistores de potencia para la demanda de 12 a 14.7 volts y una corriente de 6 amperes en el circuito primario; mientras que, en la conmutación del circuito secundario, se necesita que el transistor soporte más de 600 V (BorgWarner, 2023).

Basándonos en esto, se plantea un circuito que incorpore el control necesario para utilizar una de las salidas del Arduino para el control de cada bobina. Conociendo las características técnicas, se utilizan resistencias, transistores y capacitores para la generación de chispa; mientras que para controlar el encendido se incluyen optoacopladores con salida a transistor y diodos para la protección. La Figura 3 muestra el diagrama del circuito que es necesario utilizar para el control de una de las bobinas para la generación de chispa.

Figura 3
Diagrama de control de encendido electrónico



B. Control de encendido y monitoreo

La generación de la chispa y la obtención de pulsos mediante sensores, abren la posibilidad de vincularse para el diseño del sistema de control mediante la plataforma de MATLAB utilizando como tarjeta adquisitoras al Arduino MEGA para obtener la información necesaria para la posición de cada cilindro y las condiciones que se deben cumplir para una optimización del motor ante las condiciones de trabajo.

B.I. Determinación de condiciones

Una de las condiciones necesarias a cumplir para el correcto funcionamiento del motor es la fase de trabajo en la que se encuentren los cilindros. Sin embargo, los sensores de posición permiten múltiples combinaciones como se demostró en la Tabla 1, por lo que es necesario definir una combinación apropiada para saber el momento en el que cada cilindro comenzará la fase de combustión.

La Tabla 2 muestra las condiciones que se deben cumplir para energizar cada uno de los cilindros considerando la relación de giro entre el árbol de levas y el cigüeñal de 1:2 y el caso de un motor de 4 cilindros con el orden de encendido 1-3-4-2.

Tabla 2
Tabla de verdad de encendido

Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Cilindro
1	0	0	Cil. 2
1	0	1	Cil. 4
1	1	0	Cil. 3
1	1	1	Cil. 1

Otras de las condiciones necesarias a contemplar es la temperatura del motor, la apertura de la mariposa en el cuerpo de aceleración, la presión en el múltiple de admisión y la presión de aceite; ya que son condiciones de estado del motor que permiten realizar ajustes en los tiempos de encendido y en la apertura de los inyectores. Estos sensores tienen una salida análoga, por lo que debe contemplarse el rango de trabajo y su linealidad al momento de programarse la interfaz, ya que, dependiendo del sensor que se utilice, contempla variaciones que afectan al código de control.

B.II. Elementos de apoyo

Para la obtención de lectura de los sensores de posición, es necesario agregar o modificar elementos del motor con la finalidad de obtener la lectura de la posición.

Considerando la Tabla 2, se debe contemplar la repetitividad de la señal que cumple cada sensor, por lo que se puede llegar a la idea que el sensor 3 debe enviar lectura mediante el giro del cigüeñal, ya que el cilindro 1 y 4 están hermanados, cumpliendo la condición de "ON" cuando están en la posición deseada para la combustión. Para incorporar el sensor se debe considerar la modificación de la Polea del cigüeñal, debido a que es una pieza de fácil acceso y solo tiene una posición de ensamble. La Figura 4 muestra la polea con las modificaciones necesarias a considerar.

Figura 4

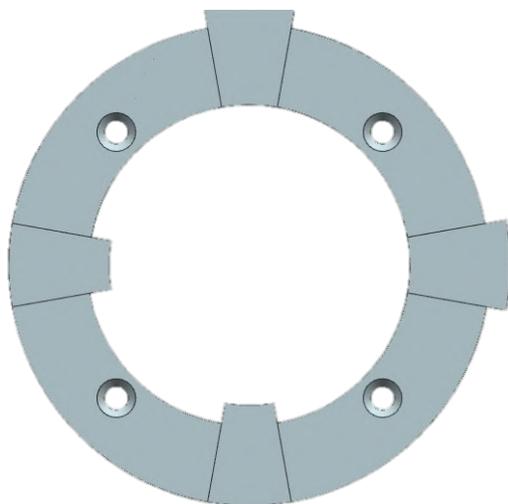
Diseño de polea de cigüeñal mediante el software Siemens NX



Para el caso del sensor 1 y 2, se debe diseñar un elemento que se pueda montar al árbol de levas, ya que de esta forma podremos conseguir las siguientes dos posiciones de encendido con mayor facilidad, a diferencia de colocar otro o todos los sensores en el cigüeñal. La Figura 5 muestra el diseño preliminar de un disco lector que permita leer la posición del árbol de levas.

Figura 5

Diseño de aro lector para árbol de levas



B.III. Monitoreo de estado

El control de la chispa debe ser monitoreado por los sensores de posición, sin embargo, es necesario utilizar otros elementos que permitan un cálculo de la inyección y no solo el momento para realizarla, ya que el motor varía la cantidad de combustible solicitada con base en su estado y las exigencias del conductor.

Comúnmente, se utilizan sensores del tipo potenciométricos, arrojando una señal analógica como respuesta a los fenómenos físicos medidos. En el control electrónico es común utilizar:

- Temperatura del motor (Sensor ECT): Es un sensor enroscado en la cabeza del motor o en el múltiple de la toma interna, el cual envía lecturas por una señal analógica, mediante la caída en la resistencia, a medida que la temperatura del motor aumenta (ISOPRETOL Lubricants del Perú, 2019)

- Carga exigida (Sensor MAP): Esta lectura se obtiene gracias a la presión absoluta del colector de admisión. Este sensor lee la presión por medio de un diafragma de silicio, con piezo-resistores conectados en un puente de Wheatstone.

- Aceleración del motor (sensor TPS): Es un tipo de sensor potenciómetro, que proporciona voltaje variado correspondiente a la posición del acelerador. Esta información también se utiliza para determinar el tiempo, en condiciones de velocidad mínima en las revoluciones del motor (Zapata Maya, 2017).

La incorporación de estos sensores se realizará mediante la interfaz de usuario implementando potenciómetros digitales, pues al tratarse de un prototipo, es difícil tener lectura del estado del motor sin las modificaciones a elementos con los que ya cuenta actualmente.

B.IV. Inyección electrónica

La inyección del combustible es un paso fundamental para el funcionamiento correcto del motor, en el que se debe contemplar una relación ideal de combustible (AFR) de 14.7 partes de aire por 1 de combustible.

El cálculo del tiempo de inyección se puede realizar mediante el método de flujo de aire, sin embargo, deben de realizarse algunos cálculos extra para determinar el flujo de aire al no incorporar un sensor de flujo (Aras, 2004).

La ecuación (1) muestra el cálculo del caudal de aire (A_v), utilizando la velocidad del motor (RPM), la eficiencia volumétrica (V_e) y el desplazamiento del motor (D).

$$A_v = \left[\left(\frac{RPM}{60} \right) \left(\frac{D}{2} \right) V_e \right] \quad (1)$$

También debe considerarse la densidad del aire de entrada (D_a) para un cálculo más precisó, por lo que (2) considera la lectura de presión de admisión (P_i), la temperatura de admisión (T_i), y las propiedades del aire a nivel del mar (D_o , P_o , T_o).

$$D_a = D_o \left(\frac{P_i}{P_o} \right) \left(\frac{T_o}{T_i} \right) \quad (2)$$

Con los datos obtenidos mediante (1) y (2), se obtiene el flujo másico de aire (A_m) mediante (3).

$$A_m = D_a * A_v \quad (3)$$

Con esto se calcula la cantidad de combustible a inyectar (F), considerando el AFR

$$F = \frac{A_m}{AFR} \quad (4)$$

Con el valor obtenido en (4), se obtiene el ancho de pulso de inyección (T) considerando F y la tasa de entrega del inyector de combustible (R_f).

$$T = \frac{F}{R_f} \quad (5)$$

C. Interfaz de usuario

La interfaz de usuario es uno de los puntos más importantes para el monitoreo y control, ya que la tarjeta Arduino será utilizada como tarjeta adquisitoria de datos, solo enviará y recibirá información de la interfaz por lo que debe configurarse cada uno de los diferentes procesamientos para un correcto encendido. Para esto, se debe emparejar el Arduino a utilizar con el software de MATLAB y con su complemento AppDesign.

Dentro del AppDesign, se utilizan medios indicativos un tacómetro para las revoluciones, un medidor de presión de aceite y de temperatura del refrigerante para el monitoreo de estado del motor, indicadores luminosos de presencia de aceite, encendido de ventiladores, de energización para la ignición, el motor de arranque, las bujías e inyectores correspondientes a cada cilindro.

De igual forma, se deben agregar algunas alertas con la intención de informar al usuario acerca de posibles averías presentes en el sistema electrónico, la elevada temperatura y problemas de lubricación en el motor, y problemas en la carga de la batería. Estos son los indicadores de averías más comunes en los tableros de los vehículos.

También se deben de incluir algunos que nos permitan simular en el prototipo la acción correspondiente al sensor de temperatura (ECT) y al sensor de posición de mariposa (TPS), siendo estos sensores potenciométricos que se pueden ajustar a cumplir su trabajo conociendo las condiciones que presentan al funcionar el motor a distintas revoluciones.

Una vez se tiene la interfaz, se comienza a programar cada componente de la interfaz. Se debe considerar las configuraciones, cálculos y condiciones correspondientes para el correcto trabajo para un motor de 4 cilindros, al igual que las salidas que se visualizaran para cada bobina de encendido e inyector.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al comenzar con el diseño del prototipo de encendido electrónico para las bobinas, se tiene en consideración la bobina de encendido, seleccionando la bobina C872 (Figura 6), cuyos datos técnicos de tensión es de 8 a 14 volts de trabajo y de 4 a 6 Amperes. En base a esto se selecciona un transistor de potencia que soporte la corriente y 100 veces la tensión máxima.

Figura 6
Bobina de encendido c872



También, se necesita un transistor que controle al transistor de potencia, por lo que se selecciona un transistor en conjunto a una resistencia de 15Ω que soporten alrededor de 1 Amper para conmutar la base del transistor, para de esta forma se permita la energización del secundario de la bobina. Del mismo modo, se protege el circuito de control utilizando un diodo 4N4007 como protector al transistor de control en conjunto con resistencias de 100Ω como protección del corto circuito controlado que efectúa el módulo mediante el optoacoplador.

La Figura 7, muestra el módulo prototipo para el control de las bobinas de encendido, donde utilizamos disipadores de calor y un ventilador como accesorio para evitar el sobrecalentamiento de los componentes; por lo que se colocaron los circuitos control y potencia en tabllas separadas y puedan ser enfriados sus transistores.

Figura 7
Circuito prototipo de encendido electrónico



Para los aros lectores, se realizó el maquinado en Nylamid de manera experimental, con el propósito de observar las posibles modificaciones para la lectura de sensores. En la Figura 8 se puede observar el resultado del maquinado realizado y de cómo este queda sujeto a un engrane de árbol de levas que se utiliza en algunos motores de combustión interna.

Figura 8
Aro lector del árbol de levas



Sin embargo, debido a que los sensores necesitan obtener lectura mediante la detección de un campo magnético, se le incrustan imanes en los puntos de lectura del aro lector.

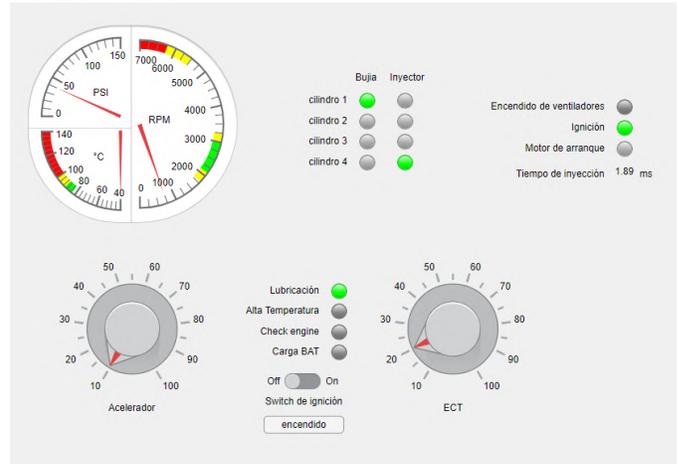
Figura 9
Aro lector del árbol de levas con imanes incrustados



Como se aprecia en la Figura 9, los imanes se colocaron en las zonas de manera que los sensores puedan detectarlos en la posición correspondiente a la lectura.

La interfaz de usuario desarrollada muestra la información más común en los tableros de instrumentos de los vehículos, pero con la diferencia de también mostrar las acciones realizadas en cada cilindro, como es la inyección y la chispa de la bujía; al igual que el tiempo de inyección y la ejecución de algunos accesorios de apoyo, como son el motor de arranque y el ventilador de enfriamiento.

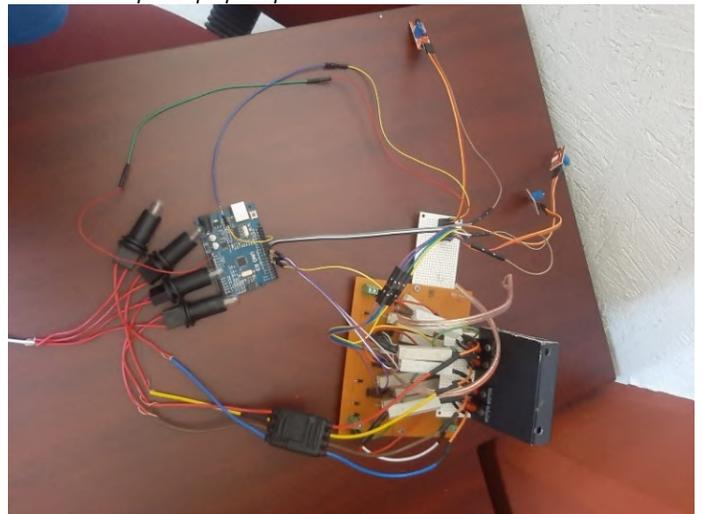
Figura 10
Interfaz de usuario



La Figura 10, muestra el diseño de interfaz realizado; cuyo procesamiento programado en sus líneas de código permitirá que el Arduino MEGA le envíe información, a la vez que este recibe órdenes de la información que proceso la aplicación que entrega información al usuario; datos del estado del motor y algunas condiciones de falla.

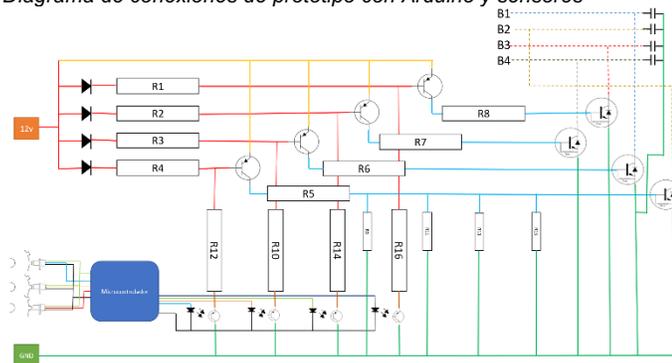
Las pruebas hechas del prototipo de encendido y del emparejamiento, se utilizaron algunos focos de uso automotriz con el propósito de simular el funcionamiento del control de las bobinas de encendidos.

Figura 11
Conexión del prototipo para pruebas



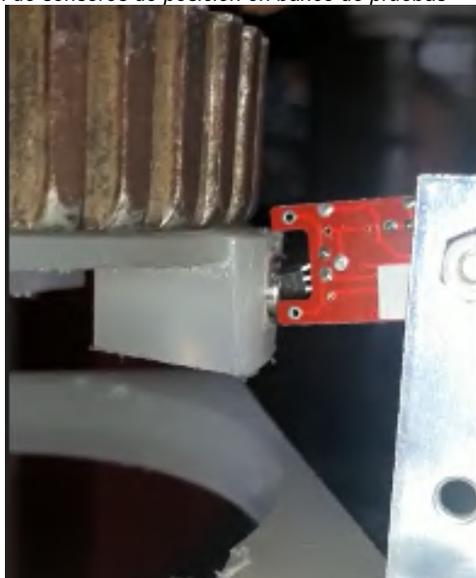
La Figura 11 muestra las conexiones del prototipo de encendido con los focos en las terminales donde se conectarían las bobinas. También, se puede observar las conexiones de los sensores KY 024 y el microcontrolador Arduino que posteriormente se conectaría a una computadora vía USB. La Figura 12 muestra el diagrama de conexiones de cada uno de los componentes de la Figura 11.

Figura 12
Diagrama de conexiones de prototipo con Arduino y sensores



Las pruebas fueron realizadas mediante un banco de pruebas donde, se sujetaron los sensores KY 024 y, por medio de un eje motriz, se realiza el giro del engrane lector. La Figura 13 muestra el banco de pruebas montado con los sensores, donde se ajustaron las alturas y calibraron los sensores para la correcta lectura de datos.

Figura 13
Calibración de sensores de posición en banco de pruebas



Una vez se terminó de ajustar la altura y tolerancia de los sensores con el aro lector, se conectaron al microcontrolador Arduino para obtener la lectura de posición y, se montó el circuito del prototipo de encendido para que reciba las señales de la interfaz desarrollada.

Figura 14
Pruebas del módulo prototipo con la interfaz desarrollada



Como se puede observar en la Figura 14, el microcontrolador Arduino recibe las señales provenientes de los sensores de posición, logrando visualizar en la interfaz el momento en el que se realiza la chispa en los cilindros, que a su vez, se puede observar en los focos el momento en el que uno de estos se apaga, indicando que la bobina dejaría de energizar el circuito primario y comenzar a elevar el voltaje para realizar la chispa en la bujía.

IV. CONCLUSIONES

Los sistemas electrónicos que se incorporan a los motores de combustión interna traen consigo una mejora significativa para obtener un mejor desempeño, para lo que es necesario realizar una correcta calibración y selección de cada uno de los elementos instalados, pues, en el mercado existe una amplia variedad de componentes los cuales cambiarán sus especificaciones de energización, rangos de operación y la forma de trabajo.

Debe mencionarse que, el uso de una interfaz como procesador de información es un apoyo visual de lo que puede llegar a ocurrir en los sistemas una vez se instale el prototipo en un motor de combustión interna ante diversas condiciones de operación. Sin embargo, no es rentable el utilizar una computadora externa para el control del funcionamiento de los sistemas del motor, ya que parte de los recursos de la PC los utilizaría en otros procesos del sistema operativo u otras aplicaciones instaladas.

También se ha llegado a la conclusión que la incorporación del prototipo a un vehículo en su estado actual trae consigo algunos problemas de espacio, pues, al realizar un diseño muy robusto es propenso a que el espacio que se necesita para alojarse en el habitáculo del motor lo vuelva incompatible con muchos vehículos, por lo que se debe reducir el tamaño del prototipo en

trabajos posteriores; así como la incorporación de un control completo en el microcontrolador.

Por último y no menos importante, durante el desarrollo del prototipo se realizaron algunos diseños que no fueron utilizados, a pesar de ello, el presente trabajo abre las puertas a futuras investigaciones, las cuales pueden incorporar los presentes diseños prototipos a un motor, considerando las posibles modificaciones a realizar, pues, algunos motores pueden cambiar la sujeción de sus componentes y por ende, la forma de alojar los aros de lectura y de los sensores.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México, Campus ITS de Lerdo; así como al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por proporcionar los recursos económicos, literarios y de infraestructura; necesarios para la realización del presente trabajo, a través de la División de Posgrado de esta institución educativa.

VI. REFERENCIAS

- Aras, V. P. (2004). Design of electronic control unit (ECU) for automobiles (pp. 9–42) [Tesis]
- BorgWarner. (2023). All about ignition coils [Información técnica].
- Brunetti, F. (2018). Motores de Combustão Interna - Vol. 1. Editora Blucher.
- Carrod Electrónica (2014). Módulo Sensor Magnético de Efecto Hall Breakout KY-024 [Fotografía]. Carrod Electrónica Online S de R.L. de C.V. <https://www.carrod.mx/products/copy-of-modulo-sensor-magnetico-de-efecto-hall-breakout-3144e>
- Ferro Veiga, J. M. (2019). Transporte, Actividades y Comunicaciones. Blurb.
- Gaviria-Ríos, J. E., Mora-Guzmán, J. H., & Agudelo, J. R. (2002). Historia de los motores de combustión interna. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 26(26), 68–78. <https://revistas.udea.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/326361/20783635>
- Gerardo, L., Vela, S., De Jesús, M., Gallegos, F., Flores, O., José, C., Hernández, R., David, J., Vega, V., Eliseo, M., & Acevedo, C. (2019). revisión de la normativa internacional sobre límites de emisiones contaminantes de vehículos de carretera. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt562.pdf>
- ISOPRETOL Lubricants del Perú. (2019, September 23). ¿Qué es el Sensor ECT? Cam2. <https://www.cam2.com.pe/single-post/2019/09/23/-que-es-el-sensor-ect>
- Mariño Grijalva, D. A., & Villagomez Cholota, D. F. (2009). Diseño y construcción de un módulo interface con la ECU para el control de operación de las rpm del motor [Tesis].
- Noroña, M., & Gómez, M. (2019). Desarrollo e innovación de los sistemas mecatrónicos en un automóvil: una revisión. *Enfoque UTE*, 10(1), 117–127. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v10n1.350>
- Payri González, F., & Desantes, J. M. (2011). Motores de combustión interna alternativos. Editorial REVERTÉ S.A.
- Reif, K. (2014). *Gasoline Engine Management*. Springer.
- Rivera, V., & Zaragoza, M. (2007). ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE VOL1: CONCEPTOS BÁSICOS. <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt307.pdf>
- Rovira, A., Marta Muñoz Domínguez, & Proquest. (2015). Motores de combustión interna. Uned - Universidad Nacional De Educación A Distancia.
- Zapata Maya, V. M. (2017). Diseño y fabricación de módulo simulador de sensores electrónicos automotrices [Tesis]. <https://repositorio.pascualbravo.edu.co/handle/pascualbravo/339>

Implementación de la arquitectura Modelo Vista Controlador con el framework Razor .Net Core en el sistema web de actividades complementarias

Flores-Luevanos, M.G.¹, Moreno-Núñez, E.¹, Rodríguez-Lozano, K.V.¹

Datos de Adscripción:

¹ Tecnológico Nacional de México, Campus Lerdo / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Av. Tecnológico No. 1555 Sur. Periférico Gómez - Lerdo. Km. 14.5, Ciudad Lerdo, Estado de Durango. C.P. 35150. México.

*maría.fl@itslerdo.edu.mx

Resumen - La arquitectura Modelo-Vista-Controlador, es un patrón de diseño de software de fácil organización que se puede adaptar a diferentes frameworks. Este modelo permite escalar fácilmente las versiones de un software y facilita el trabajo en equipo. El Sistema Web para el control de Actividades Complementarias, utilizado en el Tecnológico Superior de Lerdo, ha tenido constantes cambios, lo que ha derivado en la publicación de diferentes versiones en corto tiempo. La arquitectura utilizada en sus inicios ha quedado obsoleta, por lo que ha sido necesaria su actualización. El objetivo de esta investigación aplicada es la actualización de la arquitectura y entorno de trabajo de ese sistema institucional, para la corrección y optimización de la ejecución de las funciones existentes y el cumplimiento de los requisitos administrativos del lineamiento de actividades complementarias del TecNM. Se documenta el proceso de implementación del Modelo Vista Controlador con el Framework ASP .NET 6 Razor Core, en el Sistema Web de Actividades Complementarias. Se determinaron marcos de trabajo para la gestión ágil del proceso de desarrollo del proyecto. Como resultado del proyecto, el Sistema Web SAC cumplirá con los objetivos y requerimientos establecidos, facilitando el uso del mismo para los jefes de carrera, docentes y estudiantes.

Palabras Clave - *Actividades complementarias, Arquitectura, MVC, Razor,*

Abstract - The Model-View-Controller architecture is an easily organized software design pattern that can be adapted to different frameworks. This model allows easy scalability of software versions and facilitates teamwork. The Web System for the control of Complementary Activities, used at Tecnológico Superior de Lerdo, has undergone constant changes, which has resulted in the publication of different versions in a short time. This fact has generated that the architecture used for its development has become obsolete, so it has been necessary to update it. The objective of this applied research is to update the architecture and framework of this institutional system, for the correction, optimization and execution of the existing functions and the fulfillment of the administrative requirements of the TecNM's complementary activities guidelines. The implementation process of the Controller View Model with ASP Framework .Net 6 Razor Core, in the SAC System (Complementary Activities System) is documented. Frameworks for the agile management of the project development process were

determined. As a result of the project, the SAC Web System will comply with the established objectives and requirements, facilitating its use for career managers, teachers and students.

Keywords - *Architecture, Complementary Activities, MVC, Razor,*

I. INTRODUCCIÓN

En el Instituto Tecnológico Superior de Lerdo se implementan los lineamientos del Tecnológico Nacional de México, entre los que figura el de la acreditación de actividades complementarias; que especifica que los alumnos deben cumplir con una formación integral y acreditar las siguientes actividades: tutoriales, culturales, deportivas, de lectura e investigación. Debido a la creciente cantidad de población estudiantil en el tecnológico, se desarrolló un sistema web en el año 2015, el SAC (Sistema de Actividades Complementarias) para llevar el control de las actividades, generar reportes e imprimir la carta de liberación de cada actividad. El sistema mencionado ha tenido cambios importantes debido a nuevos requerimientos o a la mejora de los procesos, que se traducen en nuevas funcionalidades. Sin embargo, a través del tiempo la tecnología ha evolucionado a pasos agigantados, por ello se tuvo la necesidad de crear una nueva versión con nuevas tecnologías y mejorando notablemente la interfaz gráfica. Para implementar adecuadamente los cambios pertinentes se tuvo que realizar una gestión adecuada, reajustar el sistema para ubicar las modificaciones en los procesos de trabajo, integrar nuevas funcionalidades y mejorar ya las existentes, actualizar el código y solucionar incidencias detectadas. En el proceso de desarrollo se utilizó la metodología agile o Agile Management, que permitió adecuar el proyecto al equipo de trabajo y a los tiempos demandados, y su desarrollo en las condiciones específicas del entorno. La tecnología seleccionada para el proyecto es la arquitectura MVC Razor Pages en ASP.NET Core, que facilita la programación de escenarios centrados en páginas y hace más productivos los controladores y las vistas. (Anderson, 2023). En la sección de resultados del artículo se muestran los productos del diseño y análisis, se incluyen los principales diagramas UML, el mapa de navegación, la arquitectura MVC y las principales interfaces del sistema web desarrollado.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

A. Metodología

Los métodos ágiles son un método de trabajo dirigido a resultados que extiende el proceso de desarrollo, integrando nuevas funcionalidades y actualizaciones de forma continua, asegurando el lanzamiento en plazos razonables. Las metodologías ágiles buscan adaptar pequeños cambios a las rutinas de trabajo teniendo como punto esencial las personas y el trabajo en equipo orientado a resultados. Existen diversas metodologías ágiles que se pueden implementar, cada una de estas se enfoca en ciertos aspectos del desarrollo de software que la hace ideal para cubrir necesidades específicas de un proyecto.

Para la realización de este proyecto, fue necesario establecer una metodología que permitiera la implementación de un entorno de trabajo colaborativo, definiendo roles y tareas con el objetivo de tener avances constantes en el desarrollo del sistema. La metodología ágil utilizada es la SCRUM, la cual se define como un marco de trabajo leve que permite definir roles, eventos y reglas para lograr el éxito en el desarrollo de un proyecto.

El proyecto gestiona los procesos para poder seguir la metodología SCRUM en el desarrollo de los productos de software. Para ello se creará una aplicación web orientada a tecnologías .NET que facilita la programación de los escenarios, incrementando la productividad de los controladores y las vistas.

B. Arquitectura Modelo-Vista-Controlador

El Modelo-Vista-Controlador es un patrón arquitectónico de tres capas, para la construcción de software. Se enfoca al desarrollo de software en partes, con los objetivos de facilitar la implementación, actualización y mantenimiento independientemente de sus elementos y reducir el esfuerzo requerido en la fase de codificación, entre otros. (Ávila, 2019).

En esta arquitectura, el modelo (representado por su letra inicial M en el acrónimo) se encarga de controlar los datos fuente de la aplicación, por medio de la definición de reglas de negocio y notifica a las vistas los cambios provocados por un agente externo; la vista (V) es el conjunto de ítems visibles a los usuarios por medio de las interfaces, recibe los datos de su controlador asociado y tiene un registro de éste; el controlador (C) recibe los eventos de entrada, contiene las reglas de gestión de las peticiones al modelo o a la vista y manipula los datos del modelo para mostrarlos a los usuarios.

Las principales ventajas de la implementación de frameworks con el patrón MVC son: la separación física y lógica de los componentes de las aplicaciones, la optimización de la actualización y del mantenimiento del software. (Díaz y Fernández, 2012).

El marco de ASP.NET MVC posee generadores de los archivos base, en un entorno de poca complejidad y fácil de probar.

ASP.NET Core MVC representa, desde el 2015, año de su presentación, un cambio radical para los desarrolladores web que utilizan la plataforma de Microsoft. Este framework enfatiza la arquitectura limpia, los patrones de diseño, la capacidad de

prueba; y no oculta su funcionamiento en entornos web. (Freeman, 2022).

ASP.NET Core es un marco de trabajo completamente nuevo, al estar basado en .NET Core, es compatible con aplicaciones web en una gama de plataformas, provee la funcionalidad de ASP.NET MVC construido en la nueva plataforma ASP.NET Core.

ASP.NET Core MVC sigue la arquitectura modelo-vista-controlador, para conformar las aplicaciones web ASP.NET y las interrelaciones de sus elementos.

El patrón MVC data de 1978, pero ha ganado popularidad al día de hoy como un patrón para aplicaciones web por dos razones principales: 1) la interacción del usuario en una aplicación con esta arquitectura es lógica, cuando el usuario demanda una acción, la aplicación modifica su modelo de datos para responder con una vista actualizada; este ciclo se ajusta convenientemente a las aplicaciones web, con una secuencia de peticiones y respuestas en http; 2) las app web combinan tecnologías diferentes, como lo son bases de datos, HTML y código ejecutable, que usualmente se dividen en capas. Estas combinaciones de patrones se mapean de forma natural en los conceptos del patrón MVC, así, ASP.NET Core MVC implementa una variante del patrón MVC especialmente adecuada para aplicaciones web. (Freeman, 2022)

C. Razor .NET Core

Razor es un framework de desarrollo web para .NET que se utiliza para crear aplicaciones web modernas y escalables.

En una app ASP.NET Core MVC, un componente llamado motor de vista (*view engine*) se usa para producir el contenido enviado a los clientes. El motor de vista default es el Razor, responsable de incorporar los datos en los documentos HTML. La habilidad de generar contenido dinámicamente es esencial para poder escribir apps web. Razor provee características que facilitan el trabajo, usando declaraciones C# (Freeman y Sanderson, 2012)

Las expresiones Razor son agregadas al código HTML estático en los archivos de las vistas, estas expresiones son evaluadas para generar las respuestas a las solicitudes de los clientes. (Freeman, 2022)

Algunas de las características ventajosas de usar páginas Razor es que se facilita la implementación de los patrones que comúnmente se utilizan con exploradores web, permite la reutilización de plantillas; es intuitiva para los programadores en el entorno .NET, tiene una sintaxis comprensible en la creación de las vistas y brinda un alto nivel de protección contra código malicioso; las validaciones se declaran en la clase del modelo y son aplicables en todo el sistema web; entre sus desventajas principales están las limitaciones en su integración con herramientas de otros sistemas operativos distintos a Windows u otras plataformas; otra es que debido a su alto nivel de personalización, los sistemas web pueden ser altamente complejos y grandes en cuanto a tamaño, lo que se podría reflejar en la afectación del tiempo de carga de las páginas web y el rendimiento general de la aplicación. (Anderson, Brock y Larkin, 2023)

D. SQL Server 2019

SQL Server es el sistema gestor para bases de datos relacionales, seleccionado para el desarrollo de esta nueva versión del sistema web de AC. SQL Server, en su versión 2019 (15.0) incluye mejoras a las anteriores versiones que repercuten

en el rendimiento de las cargas de trabajo de las BD, sin necesidad de modificar su diseño o el de las aplicaciones. Específicamente, el procesamiento inteligente de consultas, que permite la ejecución de cargas de trabajo paralelas y la compatibilidad con dispositivos de memoria persistente. SQL Server 2019 utiliza conjuntos de macrodatos de SQL Server y proporciona funciones y mejoras adicionales para el motor de base de datos de SQL Server, SQL Server Analysis Services, SQL Server Machine Learning Services, SQL Server en Linux y SQL Server Master Data Services. (Microsoft Learn, 2023)

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Alcance

Para determinar y priorizar los requisitos para la nueva versión del Sistema web de Actividades Complementarias, fue necesario elaborar los modelos de casos de uso y de clases, para lo que se utilizó la herramienta de software orientada al lenguaje unificado de modelado ArgoUML®. A continuación, en las figuras 1 a la 3, se presentan los diagramas de casos de uso de las funciones sustantivas del sistema.

Figura 1

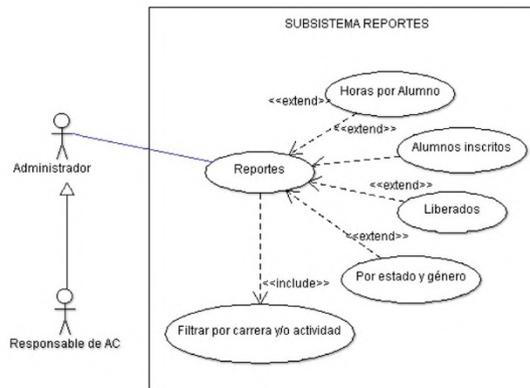
Diagrama general de casos de uso del sistema web



En la figura 1, se aprecian las funcionalidades del SAC: el usuario, que es cualquier miembro de la comunidad escolar del TecNM campus Lerdo, podrá ingresar al sistema web, mediante la validación de su nombre de usuario y una contraseña particular; a continuación, dependiendo del rol que se identifique mediante sus credenciales de acceso, podría tener las facultades de configurar su cuenta, efectuar consultas, gestionar a los alumnos, a los responsables o a las subactividades, generar reportes y consultar la sección de preguntas frecuentes.

Figura 2

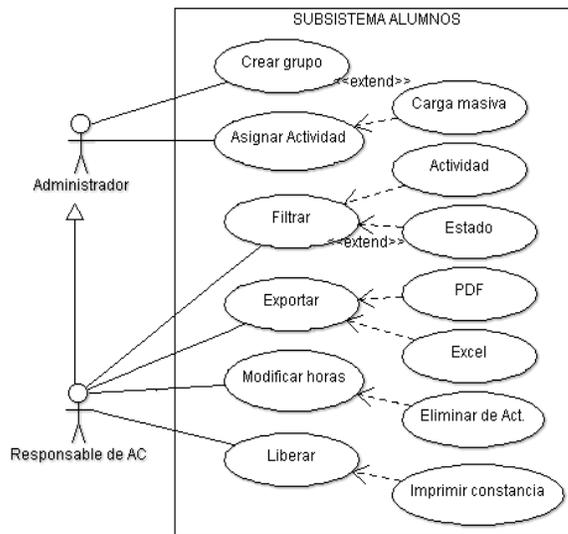
Diagrama de casos de uso del subsistema de reportes



En la figura 2 se muestra la diversidad de opciones para generar los reportes del sistema, en cualquiera que se ejecute, se deberá filtrar a los estudiantes por la carrera en que están inscritos o bien por actividad complementaria; las opciones de reporte son: el listado de los estudiantes inscritos en cualquier actividad complementaria; el número de horas que tiene registradas el estudiante en la actividad; la relación de alumnos que ya acreditaron la actividad, por lo que ya fueron liberados y un reporte especial que cuenta a los estudiantes de cada género y por estado del alumno en la actividad: “en curso”, “liberado” o “completado”.

Figura 3

Diagrama general de casos de uso Alumnos

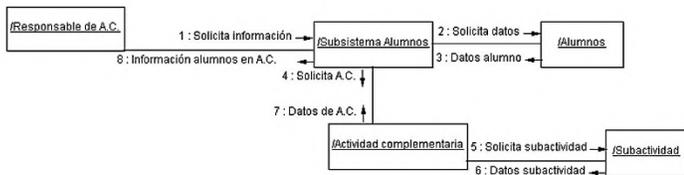


La figura 3 representa a los servicios del subsistema Alumnos, que están disponibles para el administrador del sistema o el profesor responsable de cualquier actividad complementaria. Estos actores tienen la opción de crear un grupo de estudiantes y asignarle una actividad complementaria a ese grupo o bien a un alumno. Es posible cargar los datos de los alumnos que conforman un grupo en forma masiva, obteniendo los datos de un archivo en formato de Excel. También es posible filtrar la información de los alumnos por actividad complementaria o por

cualquiera de los estados descritos anteriormente, exportar esos datos en un archivo con formato PDF o Excel, modificar las horas del estudiante o del grupo, eliminar su suscripción a una actividad, liberarlos cuando ya completaron sus horas e imprimir su constancia de cumplimiento.

En la figura 4, se muestra el diagrama de colaboración entre las clases del sistema, que contempla las acciones desencadenadas cuando el subsistema de alumnos recibe una solicitud de tratamiento de información emitida por el responsable de alguna actividad complementaria (actor) y están presentes todas las condiciones para que la consulta tenga buen término.

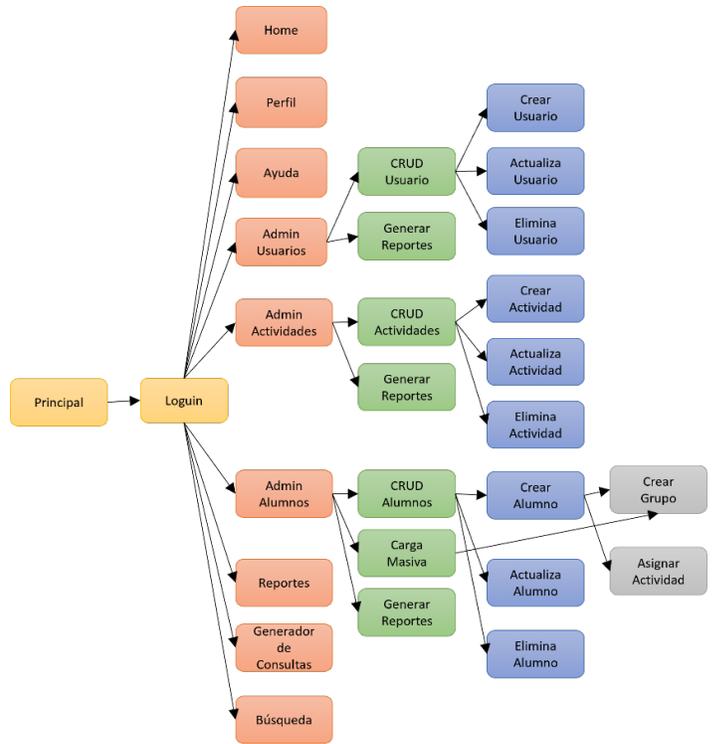
Figura 4
Diagrama de colaboración de tratamiento de información de los alumnos en actividad complementaria



3.2 Construcción

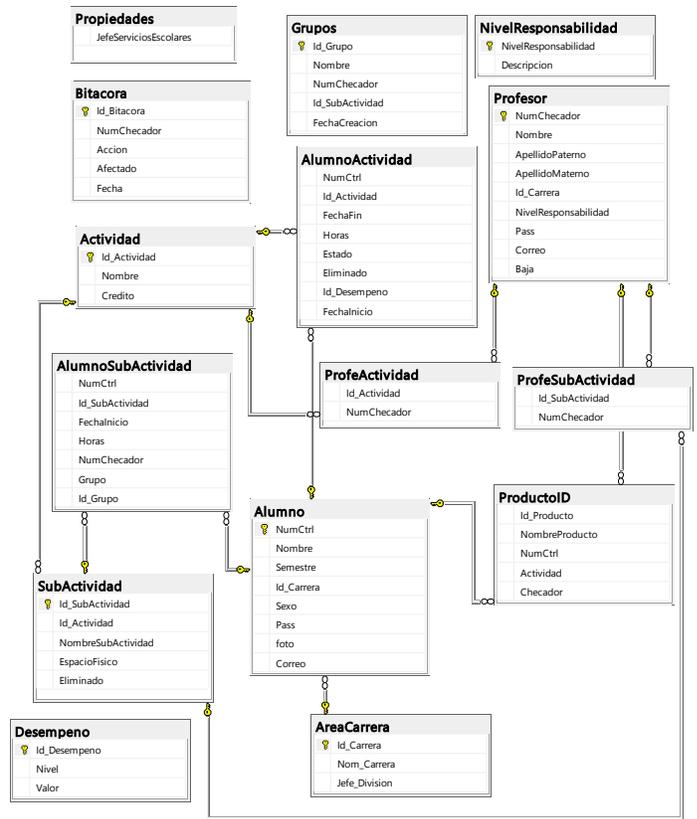
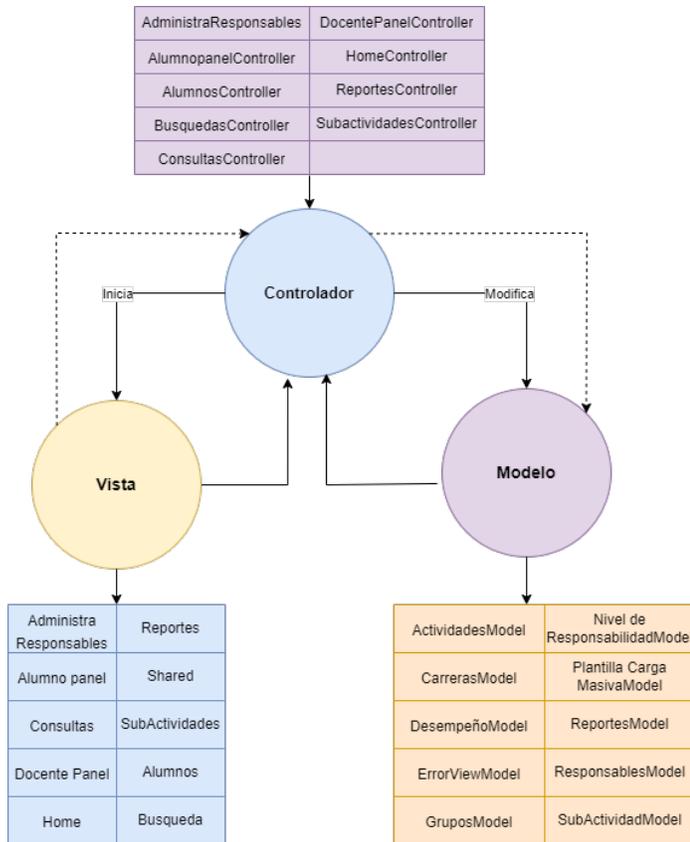
El mapa de navegación web, también conocido como mapa del sitio o *sitemap*, es la representación visual de todas las páginas que conforman el sitio web, proporcionando una visión general de la forma en que está organizado un sitio, lo que facilita la navegación intuitiva al usuario. La figura 5, muestra la estructura jerárquica de las páginas del sitio web (SAC) y la relación entre ellas. Dentro de algunas figuras en el diagrama se escriben las siglas CRUD, que significa "Create-Crear, Read-Leer, Update-Actualizar y Delete-Borrar".

Figura 5
Mapa de navegación sitio web



En la Figura 6, se muestra la arquitectura MVC del Sistema de Actividades Complementarias, esta arquitectura permite una mayor modularidad y reutilización de código. También facilita el mantenimiento y la evolución del software, ya que los cambios en una capa no afectan directamente a las otras capas. La imagen describe cómo desde el controlador se extraen, establecen y modifican los datos, que son actualizados en las vistas. El sistema web migró desde Aspx a Asp.Net, con Framework 6 y arquitectura MVC.

Figura 6
Arquitectura MVC



El modelo relacional ha sido ampliamente adoptado en la gestión de bases de datos debido a su simplicidad, flexibilidad y eficiencia, proporcionando una estructura organizada para almacenar y gestionar datos relacionales. El diagrama relacional utilizado en el sistema SAC, está compuesto por 16 tablas, que permiten relacionar al alumno con las actividades complementarias que está realizando dentro de un grupo o de manera individual y supervisado por un profesor. Esta base de datos también cuenta con procedimientos almacenados para ejecutar sentencias que agilicen la interacción con los datos del lado del servidor; es por este motivo, que en la nueva versión con MVC, no se incluyó el uso de *EntityFramework ni Linq* y se optó por crear objetos que sirven como intermediarios entre la base de datos y los modelos del sistema.

Figura 7
Modelo Relacional

3.3 Producción

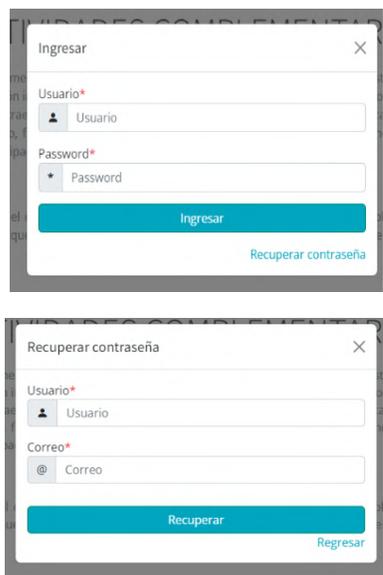
La figura 8 muestra la pantalla de inicio del sistema, aquí se pueden encontrar las opciones “Acerca de AC”, “Actividades” y “Contacto”, así como el botón para ingresar al sistema. La opción “Acerca de AC”, muestra el objetivo de las actividades complementarias, la opción de Actividades proporciona al usuario cuales son las actividades y una breve descripción de ellas, en la sección de contacto se despliegan los nombres y correos electrónicos de las personas encargadas de las actividades.

Figura 8
Interfaz principal de acceso al sistema web SAC



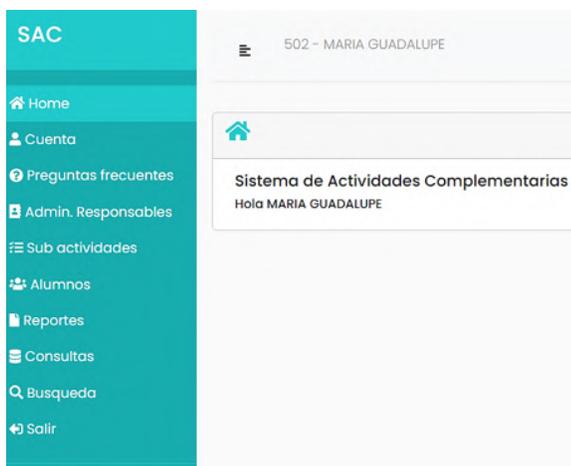
La figura 9 muestra la interfaz gráfica de login, en la que el usuario ingresa su usuario y contraseña. En caso de haber sido olvidada por el usuario, podrá recuperarla mediante su cuenta de correo electrónico.

Figura 9
Interfaz de acceso al sistema y Recuperación de contraseña.



En la figura 10 se muestra el menú principal, desplegado a la izquierda de la pantalla: las opciones que tiene el usuario son: Home, que regresa a la pantalla inicial; Cuenta, para modificación de la contraseña o el correo electrónico registrados; la sección de Preguntas Frecuentes; Administración de responsables; Alumnos, para inscribir a los estudiantes a las subactividades, modificar sus horas de trabajo y acreditarles la actividad; Reportes, para la creación de diversos reportes del sistema; Consultas y Búsqueda, que permiten buscar a los estudiantes por número de matrícula o por actividad complementaria.

Figura 10
Interfaz del menú de opciones



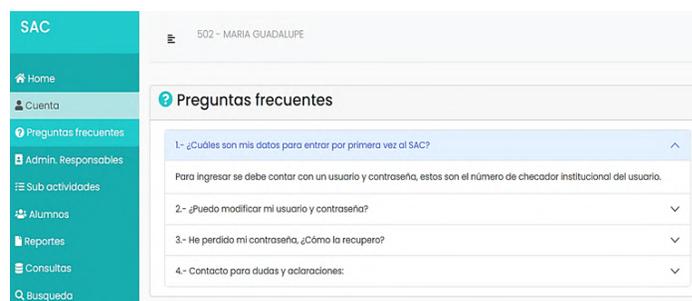
En la figura 11 se aprecian las opciones para la administración de la cuenta, que son básicamente la modificación de la contraseña o el correo electrónico registrados por el usuario. Cabe mencionar que el email registrado es el medio para la recuperación de la contraseña, en caso de olvido.

Figura 11
Interfaz de administración de cuenta.



Se incluyó una sección de FAQ (*Frequently Asked Questions*), como se muestra en la figura 12, en respuesta a la experiencia con las anteriores versiones del sistema; se le nombró "Preguntas Frecuentes" y se presentan en forma de una lista desplegable de preguntas y sus respuestas; también se le recuerda al usuario que en cada encabezado de las diferentes secciones aparece el icono de la ayuda (un signo cerrado de interrogación (?)) para que la ayuda hipertextual correspondiente se despliegue, en forma de cuadros de texto con indicaciones específicas acerca de la tarea en la que se encuentra el usuario.

Figura 12
Interfaz de preguntas frecuentes



En la figura 13, muestra la administración de responsables, en el sistema se puede asignar cualquiera de cinco tipos de roles a los usuarios permitiendo la seguridad, la eficiencia y adaptabilidad a diferentes contextos dependiendo del actor; a cada usuario se le asignan y permiten funcionalidades y características específicas. Los roles que maneja el SAC son: Administrador, Institucional, Académico, Jefe de Carrera y Servicios Escolares. Los Administradores tienen control total del sistema, el Institucional es el encargado de cada actividad complementaria, el académico es quien realiza la actividad con los alumnos, el jefe de carrera puede ver y consultar diferentes tipos de reportes. El rol de Servicios Escolares fue agregado para

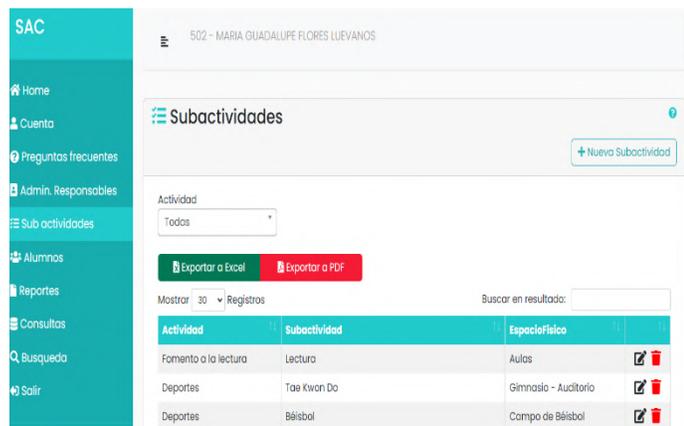
que este departamento pueda consultar o generar las cartas de término y/o liberación de las actividades complementarias.

Figura 13
Interfaz de Administración de responsables



La figura 14 corresponde a la sección de Subactividades, mediante la cual el profesor responsable de cada una de éstas puede registrar una nueva subactividad, modificarla o eliminarla. Cabe mencionar que las subactividades son las diversas acciones que se asignan a los estudiantes para que las realicen y de esta manera acumulen sus horas de trabajo, hasta completar las necesarias para que se les acredite una actividad complementaria.

Figura 14
Interfaz de Asignación de Subactividades



IV. CONCLUSIONES

Se concluye que la utilización del Framework Razor en el desarrollo de aplicaciones web dinámicas, aportó al sistema web una sintaxis fácil de leer y escribir, mezclando de forma fluida el código del lado del servidor (Backend) con la estructura de las páginas componentes. Razor, que es uno de los motores de vistas compatibles en ASP.NET Core, se utilizó en la generación del contenido HTML que se envía al navegador y permitió a los desarrolladores tener un mayor control y flexibilidad en la generación del contenido de las páginas que componen el sistema web.

La implementación de la arquitectura MVC (Modelo-Vista-Controlador), fomenta la escalabilidad del sistema web al permitir agregar nuevas vistas o modelos sin afectar el funcionamiento de los existentes.

La aplicación de código para serializar y deserializar a objetos .NET es de gran utilidad para la comunicación cliente-servidor y la visualización de los datos en las vistas. En el sistema web, las consultas se realizan en la base de datos y el resultado se regresa serializado en un objeto; en la vista éste se deserializa y los datos se presentan al usuario en la estructura requerida.

Las ventajas obtenidas al migrar el SAC de la plataforma ASP4x a una ASP.NET Core es el uso de las páginas Razor en la creación de las interfaces de usuario web, se aprecia un mayor rendimiento del sistema en el entorno de ejecución .NET CORE que en su versión anterior en ASP.NET 4.x

V. AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen en primera instancia al titular de la Subdirección de Investigación y Desarrollo Tecnológico del ITSL, Ing. Jesús Alejandro Valdés Nieblas, por su apoyo en este proyecto. El agradecimiento se extiende a los estudiantes que a lo largo de los años han colaborado con su dedicación y esfuerzo en la mejora del sistema.

VI. REFERENCIAS

Anderson, R; Brock, D & Larkin, K (2023). *Introducción a Razor Pages en ASP.NET Core*. Microsoft Learn. <https://learn.microsoft.com/es-es/aspnet/core/razor-pages/?view=aspnetcore-7.0&tabs=visual-studio-code#razor-pages>

Ávila Garzón, C. (2019). Modelo Vista Controlador. Repositorio Digital Konrad Lorenz Fundación Universitaria. <https://repositorio.konradlorenz.edu.co/handle/001/1528>

Brind, M..(2022) ASP.NET Core Razor Pages in Action. Manning

Díaz González, Y., & Fernández Romero, Y. (2012). Patrón Modelo-Vista-Controlador. Telemática, 11(1), 47–57. <https://revistatelematica.cujae.edu.cu/tele/article/view/15>

Freeman, A., & Sanderson, S. (2013). Pro Asp. net Mvc 4. Apress

Freeman, A. (2022) Pro ASP.NET Core 6: Develop Cloud-Ready Web Applications Using MVC, Blazor, and Razor Pages 9th ed. Apress.

Lasa Gómez, C., Álvarez García, A., De las Heras del Dedo, R. (2017). Métodos Ágiles. Scrum, Kanban, Lean. Comercial Grupo Anaya, S.A.

Microsoft Learn (2023) Novedades de SQL Server 2019 (15.x). <https://learn.microsoft.com/es-es/sql/sql-server/what-s-new-in-sql-server-2019?view=sql-server-ver15>

Schwaber, K., y Sutherland, J. (2013). La Guía Definitiva de Scrum: Las Reglas del Juego.

Sutherland, J., y Sutherland, J. J. (2015). Scrum: El revolucionario método para trabajar el doble en la mitad de tiempo. Grupo Planeta Spain.

Prototipo de aplicación móvil para la detección oportuna de estudiantes en riesgo de abandono o deserción escolar

Aguirre-Mejía, E.T; Parada-Morado, L; Meraz-Salazar, E.A; Rodríguez-Campos, F; Carreón-Pulido, V.H; Ramírez-Zarate, A.

Datos de Adscripción:

¹ Tecnológico Nacional de México Campus Lerdo, Av. Tecnológico 1555 Sur, Periférico Gómez-Lerdo Km 14.5, Cd. Lerdo, Durango, México. lilia.pm@itslerdo.edu.mx

Resumen - El objetivo general de la presente investigación es el analizar, diseñar y desarrollar un prototipo que brinde apoyo al departamento de desarrollo académico para el análisis y detección de alumnos en riesgo de abandono escolar e identificación oportuna de posible deserción. La metodología utilizada es cualitativa con uso de la técnica Weiss-Kulikowski que propone el desarrollo de un prototipo en 7 etapas, combinada con la metodología CommonKADS que proporciona un conjunto de modelos que permiten predefinir del proyecto en su totalidad. Los resultados permiten obtener del análisis de requerimientos: la identificación de variables que se transfieren al desarrollo de una APP móvil y un entorno WEB como complemento, se definen y diseñan las plataformas de uso, los tipos de usuarios, las herramientas de apoyo y se presentan el prototipo del sistema de la APP móvil y el prototipo del entorno WEB complemento.

Palabras clave - Abandono escolar, Aplicación Móvil, CommonKADS, Detección de riesgos, Prototipo móvil, Weiss-Kulikowski.

Abstract - The general objective of this research is to analyze, design and develop a prototype to support the academic development department of ITSL for the analysis and detection of students at risk of dropping out of school and timely identification of possible dropouts. The methodology used is qualitative with the use of the Weiss-Kulikowski technique that proposes the development of a prototype in 7 stages, combined with the CommonKADS methodology that provides a set of models that allow predefining the project in its entirety. The results allow to obtain from the requirements analysis: the identification of variables that are transferred to the development of a mobile APP and a WEB environment as a complement, the platforms of use, the types of users, the support tools are defined and designed, and the prototype of the mobile APP system and the prototype of the complementary WEB environment are presented.

Keywords – CommonKADS, Mobile Application, Mobile prototype, Risk detection, School dropouts, Weiss-Kulikowski.

I. INTRODUCCIÓN

A. Causas de deserción y abandono escolar.

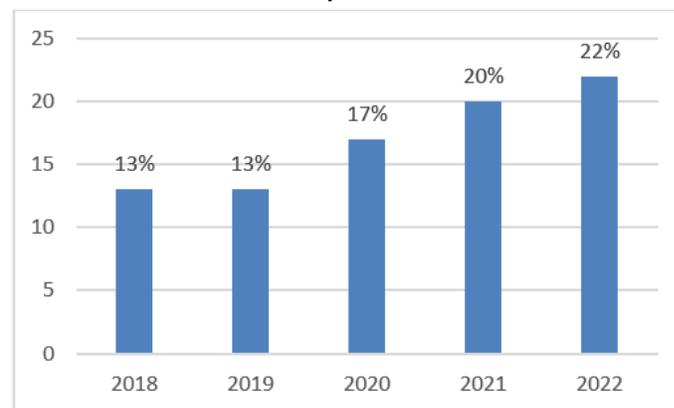
La deserción escolar es el abandono temporal o definitivo e

impide terminar el ciclo académico (Martínez, et al., 2022). Es considerada una problemática educativa que tiene diversas raíces (Gordillo y Trujillo, 2022), autores como Van (2012) reconocen el factor personal como la causa principal relacionada con la motivación intrínseca. Existen otros factores que contribuyen al abandono como: nulo acompañado en su vida universitaria, problemas motivacionales, personales o psico-afectivos; sentimientos de frustración, desorientación vocacional, baja autoestima y la adaptación al medio (Torres, et al., 2015). Algunos autores identifican que el factor económico detona necesidad de trabajar y trae como consecuencia el abandono escolar (Gordillo y Trujillo, 2022). El factor académico es considerado causa de abandono en primer lugar (Van, 2012), las causas principales identificadas en este factor son: reprobación, falta de competencias previas, falta de competencias finales, falta de entendimiento, ausencia de comprensión y falta de acompañamiento académico (Gordillo y Trujillo, 2022).

A nivel institucional se ha identificado una tasa de abandono escolar en aumento significativo en los últimos cinco años (ver Figura 1), en el periodo 2018-2019 se tuvo un aumento en la tasa de abandono del 0.06% con respecto al año anterior; para el periodo 2019-2020 el porcentaje de esta tasa tuvo un aumento del 4.2%; en el periodo 2020-2021 se registra nuevamente un incremento del 3%; y lamentablemente para el periodo 2021-2022 la tendencia continua reflejando una tasa de 2% más con respecto al periodo anterior.

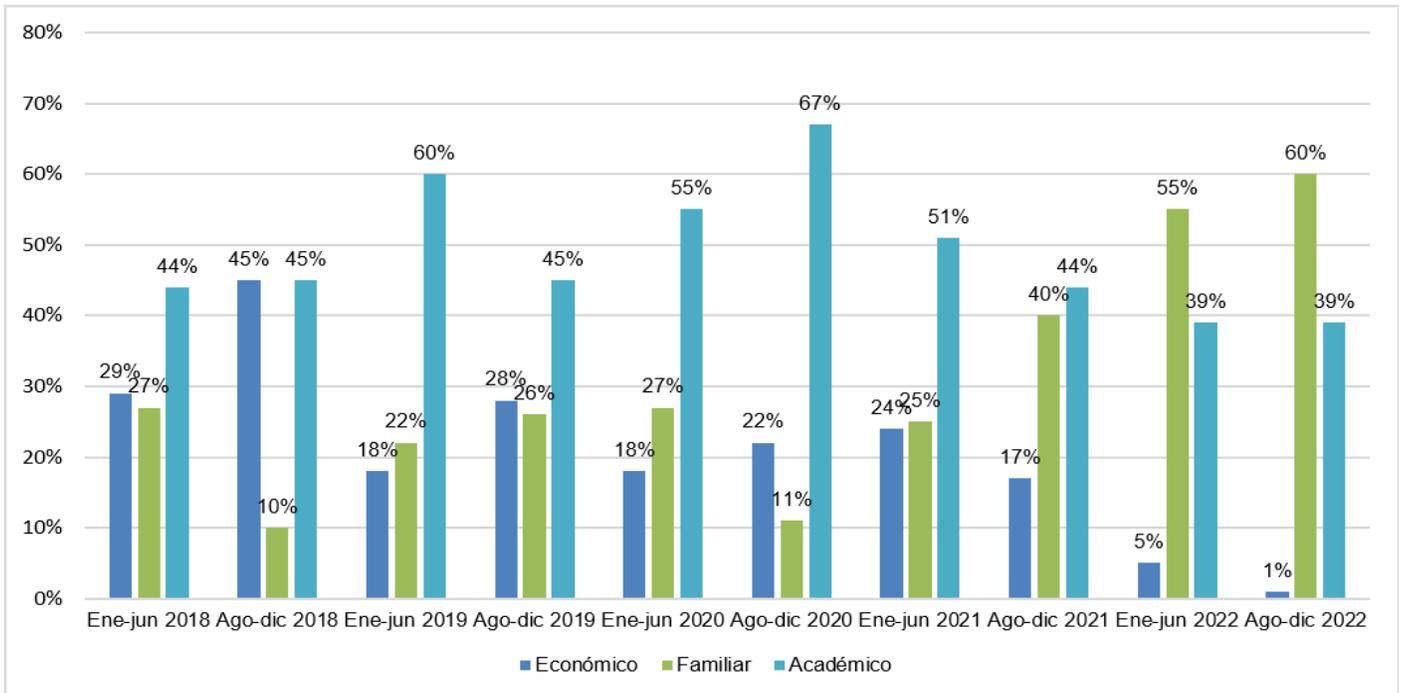
Figura 1.

Aumento de la tasa de abandono y deserción escolar



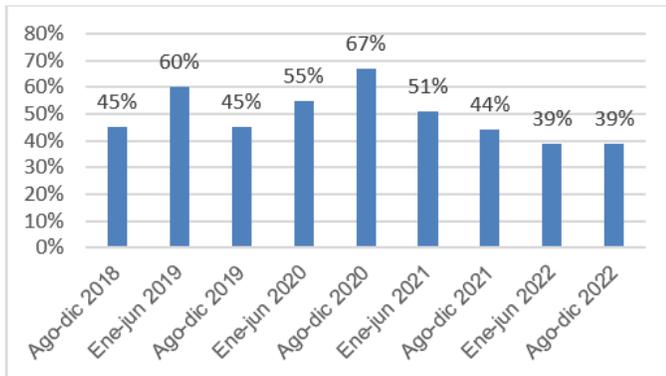
Al observar el comportamiento institucional en la figura 2, es claro identificar que las causas de abandono o deserción escolar en los periodos 2018, 2019, 2020 y 2021 y 2022, el factor académico es el que ocupa el primer lugar. Se identifica que, en el semestre Ene-Jun 2022 la causa significativa de abandono por problemas académicos es 39%, manteniendo un comportamiento similar en el semestre agosto - diciembre 2022.

Figura 2.
Causas principales de deserción escolar.



Se puede observar en la figura 3 que, a pesar de disminuir la tasa de abandono en el año 2022, éste sigue siendo alto.

Figura 3.
Bajas institucionales registradas por causas académicas.



Es necesario reconocer que el abandono o deserción escolar son problemáticas institucionales, que deben atenderse de manera urgente, razón que propicia el desarrollo de la presente investigación y coadyuvar en la detección oportuna de alumnos en riesgo y generar una herramienta que de soporte tanto a alumnos en su seguimiento y acompañamiento, como a la propia institución para toma de decisiones. En este sentido el objetivo de la presente investigación es diseñar y desarrollar un prototipo de aplicación que brinde apoyo al departamento de desarrollo académico para el análisis y detección oportuna de alumnos en riesgo de abando o posible deserción escolar y logre ser una herramienta para la toma de decisiones vertical y horizontal.

B. Desarrollo de aplicaciones para detección y solución de problemas.

El desarrollo de aplicaciones o sistemas informáticos para solucionar problemas es una actividad muy común hoy en día; las aplicaciones móviles han demostrado efectividad en el acercamiento a jóvenes universitarios (Vera, et al., 2022), también se han utilizado para monitorear y mantener comunicación estrecha y privada con jóvenes (Morales et al., 2022). Las aplicaciones móviles brindan un entorno amigable, permiten crear diseños lúdicos que motiven a los jóvenes a querer utilizarlas (Sanz, et al., 2022). Investigaciones recientes han demostrado el éxito en el desarrollo e implementación de una APP dentro de un sistema educativo, en algunos casos para apoyar en procesos formativos, en otros para analizar la percepción de un servicio y otros más para el acompañamiento y monitoreo de su desempeño (Islas, et al., 2018), (Andrango & Calvache, 2016), (Meneses & Laveriano, 2016).

C. Metodologías para desarrollo de aplicación móvil.

Existen metodologías que orientan el desarrollo de aplicaciones móviles, abarca el análisis de requerimientos hasta obtener un producto final tangible y observable (Suárez, 2008). Para el desarrollo de aplicaciones móviles se utilizan dos metodologías comunes, robustas y generan certidumbre en cada paso de desarrollo (Molina, 2013). La metodología Weiss-Kulikowski (Díez y Martínez, 2001); (Pineda et al., 2010) se orienta principalmente para generar sistemas expertos que considera las siguientes características: Alto desempeño; Capacidad de Respuesta: a un nivel de competencia igual o superior al de un especialista en el campo; Confiabilidad: el sistema experto debe ser confiable y no propenso a fallos; Comprensible: ser capaz de

explicar los pasos de su razonamiento; Flexibilidad: contar con un mecanismo eficiente para añadir, modificar y eliminar el conocimiento y Representación: explícita del conocimiento. La metodología CommonKADS (Calád y Navarro, 2001) plantea un sistema basado en el conocimiento y basado en el desarrollo de siete modelos del problema o su solución:

- Modelo de organización se encuentra la descripción de la empresa/organización donde se estudiará se llevará a cabo la implementación de la solución.
- Modelo de tareas de alto nivel que representa los procesos de negocio involucrados con el proceso.
- Modelo de agentes, que describe las personas y los sistemas automáticos inmersos en el problema y que forman parte de la solución.
- Modelo de conocimientos, concentra la experiencia de los agentes para ejecutar las tareas de alto nivel.
- Modelo de comunicación, para intercambio de información entre todos los agentes involucrados en el sistema, para intercambio de conocimientos y alcance de los objetivos establecidos en el módulo de tareas de alto nivel.
- Modelo de diseño, describe y especifica de manera puntual la arquitectura y diseño global del sistema.
- Modelo de tareas de tiempo real, como el nombre lo indica permite identificar las tareas que se ejecutan en tiempo real dentro del sistema.

Los modelos de organización, agentes, tareas de alto nivel, conocimientos, comunicación pertenecen a la fase de análisis y corresponde a la fase de diseño los modelos de diseño y tareas de tiempo real.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

La metodología utilizada es cualitativa con uso e integración de técnicas para el desarrollo de prototipos Weiss-Kulikowski (Pineda et al., 2010) de 7 etapas: 1) Planteamiento del problema cuyo objetivo es definir y delimitar el problema resultado de un objetivo previamente planteado; 2) Encontrar expertos que puedan solucionar el problema que tiene como objetivo identificar posibles propuestas de solución al problema; 3) Diseño de prototipo que tiene como objetivo identificar la visión clara del sistema; en esta fase se combina con la metodología CommonKADS (Calád y Navarro, 2001) que proporciona un conjunto de modelos predefinidos de modo que cada uno de ellos se centra en un aspecto limitado del proyecto que incluye: Modelo de la Organización, Modelo de Tareas, Modelo de Agentes, Modelo del Conocimiento y Modelo de Comunicación; 4) Elección de las herramientas para el desarrollo que tiene por objetivo elección del lenguaje y demás herramientas que se utilizarán en las siguientes etapas del desarrollo del sistema, así como la integración de la metodología de experiencia del usuario. 5) Desarrollo y prueba de un prototipo, objetivo, construir y presentar un prototipo funcional y 6) Refinamiento y generalización objetivo corregir posibles fallos. 7) Mantenimiento y puesta al día objetivo detectar problemas o defectos del prototipo, corregir errores, actualizar el producto con nuevos avances, etc.

En esta etapa se considera iterar las veces necesarias hasta la aprobación y satisfacción completa por parte del cliente.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Planteamiento del problema

En esta etapa se estudia el problema por parte del equipo de desarrollo, que, en este caso, se deriva de un diagnóstico de necesidades dentro del ITSL, en esta etapa es fundamental definir y delimitar el problema resultado de un objetivo previamente planteado. La ejecución de esta etapa consiste en identificar y describir el problema. Los resultados que se presentan en esta etapa son: a) Se identifican las causas de abandono derivadas del análisis estadístico interno de los últimos 3 años. b) Se establece un seguimiento necesario de tipo tecnológico que brinde acompañamiento a los alumnos en la fase inicial de su carrera universitaria y proporcione información en tiempo real sobre la situación académica, económica, social y psicológica de los alumnos. c) Se identifican las posibles variables de identificación de posibles candidatos a deserción académica, así como los factores causantes del mismo, agrupando las variables en dichos factores.

B. Encontrar expertos que puedan solucionar el problema.

Esta etapa tiene como objetivo identificar posibles propuestas de solución al problema, es decir plantear un entendimiento profundo del problema mediante el análisis detallado del objetivo. Los resultados que se presentan en esta etapa son: Identificación de posibles variables de estudio dentro de la APP, Identificación de información que debe recolectar la APP, Definición de requisitos de información que requiere la APP, Identificación y definición de tipos de usuarios de la APP, Definición de bloques y tipo de información que proporcionará la APP, Definición de estructura y tipos de presentación de la APP.

C. Diseño de prototipo

Esta etapa consiste en identificar la visión clara del sistema, a raíz de la determinación de requerimientos, forma parte de la proyección a futuro de nuevos elementos del sistema, componentes que permitan almacenar el conocimiento, el motor de inferencia, así como los subsistemas de ayuda e interfaz de usuario, entre otras.

Para el desarrollo de esta etapa surge la necesidad de implementar y hacer una modificación a la metodología original, la implementación que se utiliza para el caso específico del desarrollo del prototipo de la APP es la integración de la técnica Modelos de conocimiento CommonKADS, establece de manera clara un conjunto de modelos predefinidos los cuales describen a detalle cada aspecto del proyecto, lo que permite obtener una visión global, permitiendo abarcar en cada modelo al sistema completo.

Como resultado de esta fase se definen los siguientes modelos:

- a) Modelo de la Organización: Este modelo analiza las características de la organización, para identificar las oportunidades de mejora en los sistemas del conocimiento, establece viabilidad para las acciones necesarias para implementar las acciones que resulten de las áreas de oportunidad. Como resultado de este modelo de la organización: Se determina necesidad de obtener acceso a la información que maneja el departamento de Servicios escolares. Se determina que es necesario información sobre matrícula estudiantil para identificar carreras, semestres y materias.

- b) Modelo de Tareas: las tareas son los módulos que integran el sistema, son procesos relevantes lleva a cabo la aplicación, resultado de una distribución general de tareas, con entradas y salidas, condiciones, requisitos y criterios de realización, así como recursos necesarios. Como resultado de este modelo se identifican las siguientes tareas: Avisos. Notificaciones institucionales. Esta actividad contempla la configuración, vista y acceso a: fechas de tutorías, becas, pláticas. Alertas para alumno que recuerde ingresar a la APP para responder, recordar acudir a asesorías en caso de asistir. Reportes. Horarios de asesorías/inscripciones. Encuestas. Después de cada corte cómo le fue en sus materias, cada quince días su estado socioemocional y económico. Check-list de actividades para estudiantes. (Barra de avance)
- c) Modelo de Agentes: los agentes serán los que ejecuten las tareas, es decir, en esta etapa se identifican a los posibles usuarios del sistema, tanto para la parte de alimentación, configuración, ejecución, análisis y uso de la APP. Como resultado de este modelo se identifican los siguientes agentes: Alumno/usuario. Estudiante en programa académico. Diseñador/usuario. Responsable de desarrollo académico que integre las preguntas pertinentes para detectar a los alumnos en riesgo de deserción o abandono. JPA/usuario. Jefes de los diferentes programas académicos, se permitirá el acceso para consultar los reportes de los alumnos. Administrador/usuario, el usuario administrador permitirá dar de alta los usuarios en el sistema y asignar los roles/agente de participación.
- d) Modelo del Conocimiento: Permite identificar los tipos y estructuras de conocimientos que permiten realizar las actividades propósito de la aplicación, brinda la descripción que permite el desarrollo de la implementación y define el rol de los diferentes componentes del conocimiento y el papel que juega en la solución del problema. Como resultado de este modelo se identifican los siguientes agentes: Opción académica con barra de avance, con cuestionarios, restringir avance. Distinción de estudiante virtual/presencial. Opción socioemocional 3, inicio, seguimiento y final. Cinco a diez preguntas, en escala de Likert.
- e) Modelo de Comunicación: Puesto que en una tarea pueden participar varios agentes, es importante modelar las transacciones comunitarias entre estos agentes. Este modelo se encarga de la descripción de estos aspectos de una forma conceptual e independiente de la implementación. El tipo de comunicación entre agentes identificados, para este caso en particular es unidireccional, es decir el único usuario de la APP es el alumno quien solo brinda información y alimenta la APP.

D. Elección de las herramientas para el desarrollo.

Aquí se decide el lenguaje y demás herramientas que se utilizarán en las siguientes etapas del desarrollo del sistema, y se itera con el modelo del conocimiento. En esta fase se integra la metodología de experiencia del usuario.

A partir de este momento se debe considerar que el desarrollo de la aplicación no solo será en el futuro para dispositivos móviles, también es necesario considerar una plataforma web que de soporte a necesidades existentes del problema. Al proporcionar la especificación técnica del sistema en términos de

arquitectura, plataformas de implementación, módulos software, elementos constructivos de representación y mecanismos computacionales necesarios para implementar las funciones descritas del sistema, se identifican los siguientes parámetros: plataforma multiusuario, establecer privacidad de datos, establecer frecuencia de cuestionarios (interacción con usuarios), usuarios de primero a cuarto semestre de todas las carreras, para Prueba piloto solo alumnos de primer semestre. En esta etapa se establece el uso de las siguientes aplicaciones que dan soporte al diseño de la herramienta: Figma: herramienta de interfaz de usuario en línea gratuita para crear, colaborar, crear prototipos y transferir. Notion Projects: herramienta de gestión de proyectos. UML: lenguaje visual unificado para desarrollo de la arquitectura del sistema, herramienta que apoya en la descripción de límites, estructura y comportamiento de los objetos del sistema y en la generación de código mediante el modelado de objetos. El prototipo se está desarrollando en JavaScript con un framework llamado React Native, así como PHP con el framework Laravel para la administración del Panel de control que permitirá configurar la aplicación. Esto permitirá tener una app para dispositivos móviles con sistema operativo Android. La conexión a la base de datos será posible con el lenguaje de PostgreSQL para la administración de los datos de acceso de los estudiantes.

E. Desarrollo y prueba de un prototipo

Esta etapa está compuesta por dos subfases: Construcción y prueba. En las figuras 4, 5 y 6, se puede observar la construcción de la interfaz de la APP, donde se puede observar las diversas pantallas de presentación, configuración, historial, avisos, actividades recomendadas y concentrado de encuestas realizadas.

Figura 4.
Construcción de la interfaz de la APP

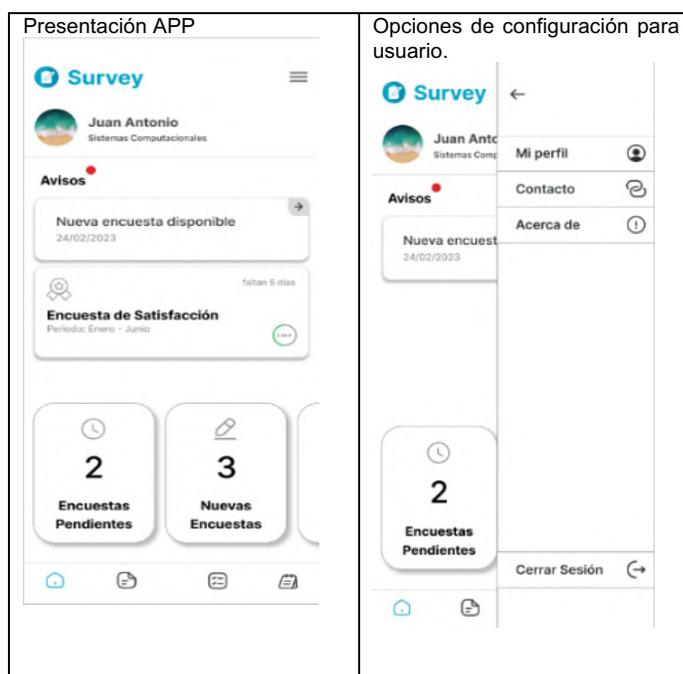


Figura 5.
Construcción de la interfaz de la APP

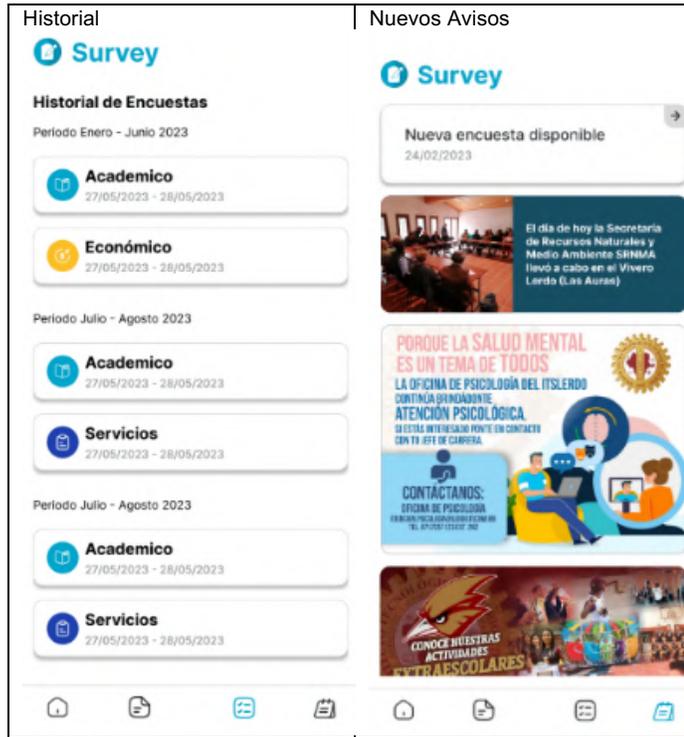
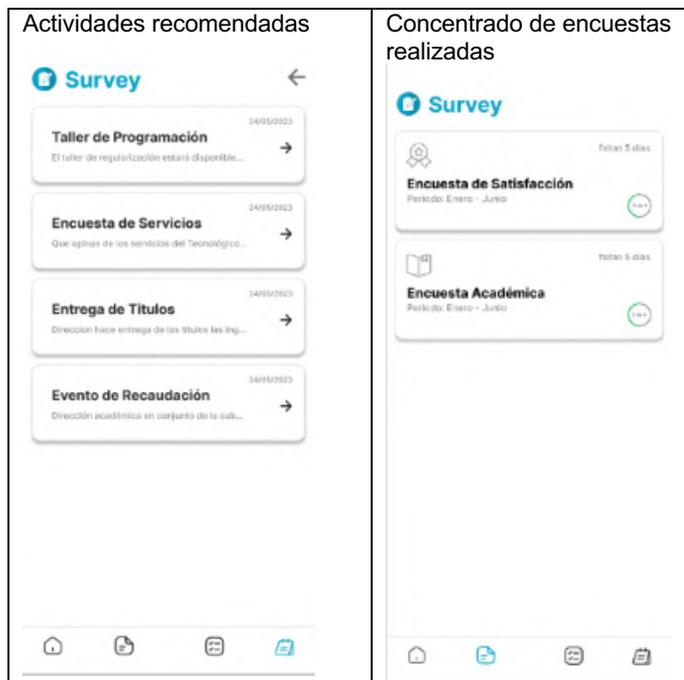


Figura 6.
Diseño de resumen de actividades.



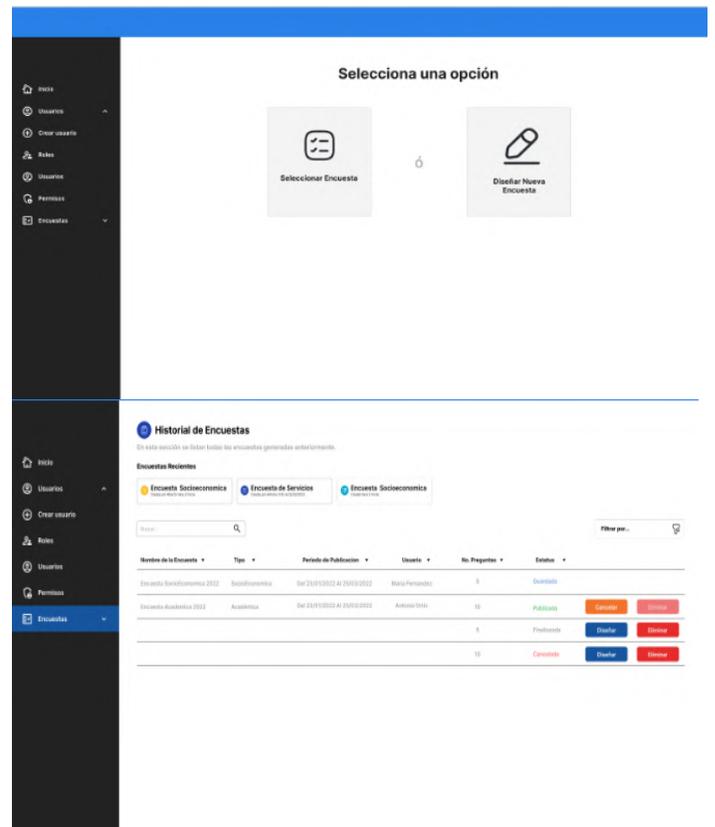
Bajo la metodología seleccionada, el diseño de prototipo permite simular y observar de manera práctica el boceto de la aplicación. Si el prototipo no permite realizar las tareas, no se ejecuta correctamente o no pasa la evaluación de prueba es necesario regresar a la etapa previa para un nuevo análisis y detección del fallo en la construcción, rectificar y remodelar el sistema las veces que sea necesario hasta cumplir el objetivo propuesto.

F. Refinamiento y generalización

En refinamiento se realizan las correcciones, adaptaciones e incorporación de nuevos elementos que no se hayan detectado en el diseño inicial y permitan perfeccionar la aplicación.

En esta etapa se considera integrar un generador de encuesta que pueda configurarse al inicio de cada ciclo escolar el cual se conecte con la APP móvil. La figura 7, muestra el historial de encuestas diseñadas.

Figura 7
Historial de encuestas



El diseño de encuestas es la parte medular de la aplicación, ya que en este apartado el usuario podrá generar, programar, revisar y visualizar encuesta. En las figuras 8 y 9 se presentan las pantallas del prototipo.

Figura 8
Generar y programar encuesta.

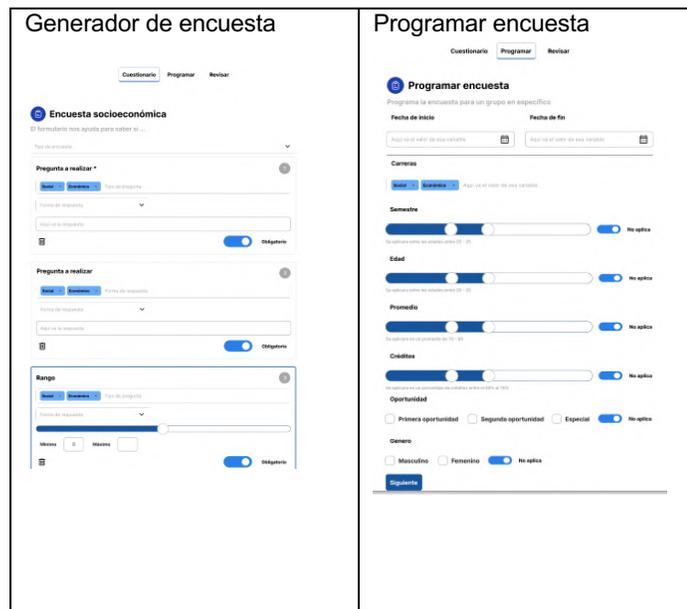
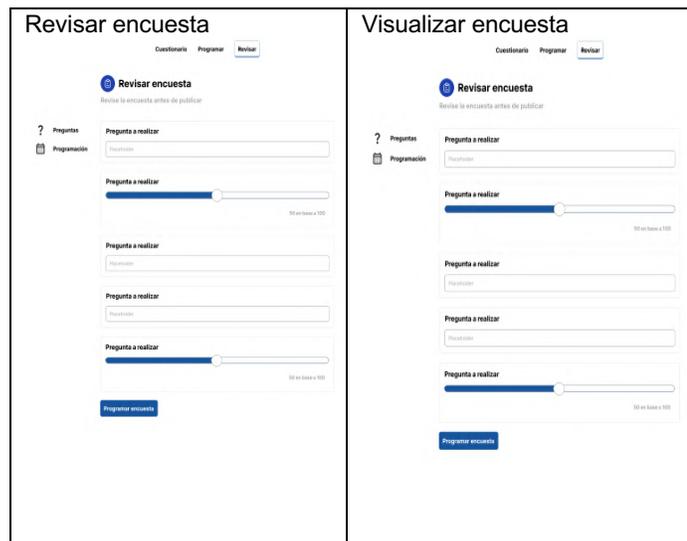


Figura 8
Revisar y visualizar encuesta.



G. Mantenimiento y puesta al día.

Esta etapa permite, realizar ejecuciones en tiempo real, y detectar si es necesario hacer correcciones o ajustes que permitan obtener un producto listo para que el cliente lo observe y realice las repeticiones necesarias hasta tener su aprobación y satisfacción de necesidades. La metodología de desarrollo contribuye a la construcción de la APP a la par que se desarrollan las interfaces gráficas del usuario, que permiten al cliente ir observando el avance de su proyecto de manera tangible.

IV. CONCLUSIONES

Como resultado del análisis, se detecta la necesidad de apoyar al departamento de Desarrollo académico para coadyuvar en la detección de alumnos en riesgos de deserción o abandono escolar. De acuerdo con las necesidades detectadas se diseña el prototipo tipo APP para el acompañamiento dirigido a los alumnos, la APP diseñada servirá para recolectar información estadística sobre el comportamiento estudiantil, por carrera, por semestre, por edad, por sexo, por docente y por tutor asignado. Y con esta información se podrán tomar decisiones oportunas para detectar temprano a los estudiantes en riesgo de abandono o deserción y en conjunto con las Academias crear estrategias para retener.

V. AGRADECIMIENTOS

El equipo de autores agradece a Secretaría de Educación Pública por el financiamiento brindado para el desarrollo del presente proyecto, agradece también el apoyo de Dirección General, el respaldo de Subdirección de Posgrado e Investigación, Departamento de Desarrollo Académico, así como al personal académico y administrativo de TECNM Campus Lerdo por las facilidades brindadas para la realización del prototipo.

VI. REFERENCIAS

Andrango Quinchiguango, E. A., & Calvache Tapia, P. A. (2016). *Desarrollo de un sistema de gestión de información académica para estudiantes universitarios en dispositivos móviles* (Bachelor's thesis, Quito, 2016.). <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/15209/1/CD-6984.pdf>

Cálad, M. H., & Navarro, V. B. (2001). *CommonKADS RT: Una Metodología para el Desarrollo de Sistemas Basados en el Conocimiento de Tiempo Real* (Doctoral dissertation, Tesis Doctoral en Sistemas Informáticos y Computación, Universidad Politécnica de Valencia, España). <http://cdv08.gti-ia.dsic.upv.es/sma/thesis/pdf/TesisMonicaH.pdf>

Díez, R. P., Gómez, A. G., & de Abajo Martínez, N. (2001). *Introducción a la inteligencia artificial: sistemas expertos, redes neuronales artificiales y computación evolutiva*. Universidad de Oviedo.

Gordillo, M., y Trujillo, M. (2022). Caracterización de las causas de deserción escolar una licenciatura a distancia; No escolarizada. *Revista Iberoamericana de Investigación en Educación*, 4(6), 33-41. <https://riied.org/index.php/v1/article/view/69/118>

Islas, Y. D. G., Ojeda, E. R., & Zazueta, A. G. (2018). Prototipo de minería de datos en la detección oportuna de estudiantes en riesgo de abandono escolar guía (gestión universitaria integral del abandono). *Pistas Educativas*, 39(129). <https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/view/1562/1301>

León, J. G. P., Hernández, J. H., Noriega, J. A. V., & Guerrero, R. A. C. (2022). Causas asociadas a la deserción escolar en educación superior. Una revisión sistemática del 2010 al 2020. *Ra Ximhai: revista científica de sociedad, cultura y desarrollo sostenible*, 18(1), 83-101. <https://drive.google.com/file/d/1PJRVud6TCAM87rEQA1KOUpogaegiwnq/view>

Martínez, M., Tortolero, R., Soto, M., Mercado, V., Meza, A., y Quiñonez, E. (2022). Causas de la deserción escolar durante el

- periodo covid-19 en la Universidad Tecnológica de Durango México. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(3), 179-192.
<https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/2209/3215>
- Meneses Sánchez, J. D., & Laveriano Meca, E. C. (2016). Prototipo de aplicación móvil utilizando la metodología Mobile-D para la verificación de la formalidad en el servicio de taxi metropolitano en la ciudad de Lima.
<http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/5304>
- Molina, S. G. R. (2013). Metodologías ágiles enfocadas al modelado de requerimientos. *Informes Científicos Técnicos-UNPA*, 5(1), 1-29.
<https://publicaciones.unpa.edu.ar/index.php/ICTUNPA/article/view/429/408>
- Morales, F. R., Vargas, M. V. P., Galindo, M. D. O., Prada, E. D. I., Cruz, L. C. H., Alarcón, M. P. C., ... & Izquierdo, S. R. (2022). Descripción de las aplicaciones móviles relacionadas en la prevención, manejo y promoción de acoso y ciberacoso escolar en Colombia. *Pediatría*, 55(1), 24-29. DOI:
<https://doi.org/10.14295/rp.v55i1.240>
- Pineda, E., Leal, E., & Barrera, C. (2010). Los sistemas expertos como alternativa de solución a la deserción universitaria. In *de Congreso Académico UDI, Bucaramanga*.
https://www.udi.edu.co/congreso/historial/congreso_2010/ponencias/sistemas/03_EliecerPineda_CarolinaBarrera_ElizabethLeal.pdf
- Sánchez, S. y Pérez, A. (2011). *Titulo: Sistema Experto para la gestión de la Base de Conocimientos de NovaDesk* (Doctoral dissertation, Universidad de las Ciencias Informáticas).
https://repositorio.uci.cu/jspui/bitstream/ident/TD_05082_11/1/TD_05082_11.pdf
- Sanz Blas, S., Buzova, D., Garrigós Simón, F. J., & Narangajavana Kaosiri, Y. (2022). Tecnología móvil y aplicaciones educativas móviles: percepciones, actitudes e intenciones de uso de los estudiantes universitarios.
<https://doi.org/10.4995/INN2021.2021.13645>
- Suárez-Arango, J. A. G. (2008). *Titulo: Desarrollo del sistema SEDIM-SV utilizando la metodología Weiss-Kulikowski* (Doctoral dissertation, Universidad de las Ciencias Informáticas).
https://repositorio.uci.cu/jspui/bitstream/ident/TD_1663_08/1/TD_1663_08.pdf
- Torres, J., Acevedo, D., Gallo, L. (2015). Causas y consecuencias de la deserción y repitencia escolar: una visión general en el contexto latinoamericano. *Revista Cultura Educación y Sociedad*. Vol. 6 (2). Pp. 157-187.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7823292>
- Van-Dijk, S. (2012). La política pública para abatir el abandono escolar y las voces de los niños, sus tutores y sus maestros. *Revista Mexicana de Investigación Educativa*, 17(52), 115-139.
<https://www.scielo.org.mx/pdf/rmie/v17n52/v17n52a6.pdf>
- Vera, G. Y. B., Allaica, J. C. M., Yépez, J. E. P., & Veloz, R. B. U. (2022). Aplicación móvil educativa para fortalecer el proceso de enseñanza-aprendizaje de la asignatura de inglés en tiempo de pandemia. *Alfa Publicaciones*, 4(2.2), 39-55.
<https://doi.org/10.33262/ap.v4i2.2.213>
- (s.f.) Qué es el lenguaje unificado de modelado, Lucidchart,
<https://www.lucidchart.com/pages/es/que-es-el-lenguaje-unificado-de-modelado-uml>

Diseño y componentes para el prototipo de prótesis para antebrazo con retroalimentación de agarre-paciente

J. A. Valenzuela-Romero¹, M. Cisneros-Romero¹, H. Coto-Fuentes¹.

Datos de Adscripción:

¹ Tecnológico Nacional de México-Campus Lerdo. Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Dgo. División de Posgrado, Av. Tecnológico No. 1555 Sur Periférico Gómez - Lerdo Km. 14.5, Ciudad Lerdo, Estado de Durango C.P. 35150.México.
MM2210989@itslerdo.edu.mx.

Resumen – Los brazos y las manos son partes importantes del cuerpo humano, jugando un papel fundamental en todas las actividades cotidianas que se realizan como individuo y como ser social. Según datos del INEGI poco más del 10% de las amputaciones se realizan en miembros de superiores, que incluyen partes o la totalidad de los mismos. En el presente trabajo se muestra una recopilación y análisis de los principales elementos a usar para la fabricación de la prótesis de antebrazo con características biónicas. Entre los aspectos abordados se mencionarán distintos sensores de actividad muscular, materiales de fabricación y elementos utilizados para poder implementar una retroalimentación hacia los amputados de las distintas acciones que podrían realizar las prótesis, como también un diseño preliminar de la prótesis.

Palabras Clave: Antebrazo, diseño, fabricación, prótesis, retroalimentación.

Abstract - The arms and hands are important parts of the human body, playing a fundamental role in all daily activities carried out as an individual and as a social being. According to INEGI data, just over 10% of amputations are performed on upper limbs, which include parts or all of them. In the present work a compilation and analysis of the main elements to be used for the manufacture of the forearm prosthesis with bionic characteristics is shown. Among the aspects addressed will be mentioned different sensors of muscle activity, manufacturing materials and elements used to be able to implement a feedback to the amputees of the different actions that the prosthesis could perform, as well as a preliminary design of the prosthesis.

Keywords: Forearm, design, manufacture, prosthesis, feedback.

I. INTRODUCCIÓN

Una prótesis, es un sustituto artificial de una parte de cuerpo faltante ya sea de un brazo, mano o pierna, son dispositivos los cuales son fabricadas con plástico o metal, cuya función es reemplazar la extremidad que haya sometida a una amputación de forma total o parcial.

En ocasiones se realizan amputaciones de alguna parte del cuerpo ya sea porque el paciente tubo un accidente o por una enfermedad, en estos casos es viable la utilización de un dispositivo que sustituya la extremidad amputada.

Existen diferentes tipos de prótesis, pero la función y objetivo de todas ellas es conseguir que sean de ajuste estable y cómodas para el paciente, para obtener una buena funcionalidad.

Las prótesis pueden ser exo esqueléticas o endo esqueléticas.

- **Prótesis exo esqueléticas:** son aquellas que tienen forma de extremidad y están fabricadas de plástico y/o metal, estas son fijas y no son ajustables. Suelen ser las preferidas por los pacientes por utilizarlas en trabajos físicos.
- **Prótesis endo esqueléticas:** son aquellas que son de estructura esquelética, son también ajustables, pero no suelen ser duraderas. Estos dispositivos por lo común están fabricados con un material suave con forma de extremidad y lo que parece ser piel sintética.

Dentro de las prótesis para extremidad superior existen 5 tipos: (Stokosa, 2021)

- Prótesis pasivas.
- Prótesis accionadas por el cuerpo.
- Prótesis mioeléctricas accionadas externamente.
- Prótesis híbridas.
- Prótesis específicas para cada actividad.

Dentro de los tipos de prótesis, existen las prótesis mioeléctricas, son sistemas accionados por servomotores, estos servos son controlados por señales electromiográficas (EMGS), estas señales son intramusculares; para detectar estas señales musculares existen sensores que mediante agujas o también electrodos se captura la señal del muñón, a la actividad eléctrica de los músculos se le denomina electromiografías.

Se produce una pequeña señal de 5 a 20 micro voltios, dependiendo si el musculo se contraen o se relejan, que es creada por la interacción química que se sucede en el cuerpo.

Para detectar las señales se utilizan los electrodos, estos al tener contacto con la piel registran la señal EMG. Esta señal una vez registrada, esta se amplifica, se procesa después por un controlador que hace que los motores se enciendan y apaguen en la mano o ya sea en el codo o en la muñeca. (Caerres, 2018)

Existe una problemática con las prótesis, después del sufrir el proceso de amputación los pacientes pueden verse en situación de no saber que sigue, es importante que realicen un proceso de duelo airoso, para que luego utilice un equipo multidisciplinario y así acudan con un profesional para que los asesore durante el proceso de rehabilitación y colocación del dispositivo que reemplazara su extremidad. Pero estos equipos sobre pasan los presupuestos de las familias, provocando que

no puedan conseguirlas.

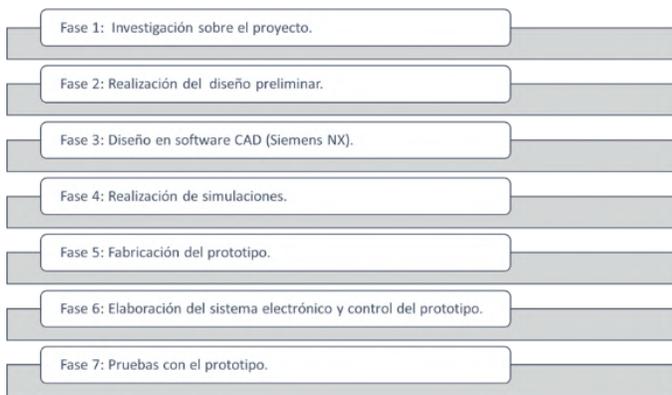
Muchas prótesis que el sector de la salud de México que puede ofrecer a las personas, son las mecánicas, estos dispositivos solo cumplen la función de apertura y cierre a voluntad, controlados por un arnés que se colocan al hombro sujetados en parte del pecho y del brazo. Como ya menciono que solo cumplen la función de abrir y cerrar lo que sustituye a la mano, entonces, este dispositivo solo se utiliza para el agarre de objetos grandes y medianos debido a la poca precisión del mecanismo.

Esto significa que el área de la salud necesita la aplicación de nuevas tecnologías, en este caso de las prótesis para brazo no cuentan con una retroalimentación que le diga al paciente que tan fuerte o con que suavidad toma las cosas, provocando que el paciente no se acostumbre a la prótesis y haciendo que su tiempo de rehabilitación sea más largo, además que estas prótesis suelen ser incómodas para el paciente y más en la zona amputada.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

Para explicar mejor la metodología el proyecto este fue dividido en diferentes etapas o fases como se puede apreciar en la figura 1. Esto con la finalidad de analizar los resultados y para confirmar si se cumplieron de forma óptima y para dar paso a futuras investigaciones que puedan basarse en los problemas y soluciones que se presentan en la realización del proyecto.

Figura 1
Fases del desarrollo del proyecto

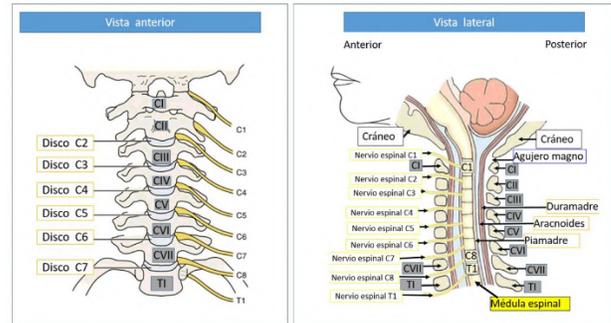


A. Investigación preliminar.

Como dice la figura 1 para el desarrollo del proyecto fue una investigación sobre anatomía de la mano y del brazo, también se buscó la asesoría de una profesional de la salud en fisioterapia a manera de responder dudas sobre el objetivo de la investigación.

Primero se realizó una investigación sobre los nervios cervicales, los primeros siete vertebras que nacen de la medula espinal. Tras nacer de la medula espinal, estas emergen de la columna vertebral, se distribuyen por territorios sensitivos y motores específicos de la cabeza, cuello, el hombro y brazos.

Figura 2
Nervios cervicales



De la mano se indaga sobre el plexo braquial, es una red nerviosa que da lugar a todos los nervios motores y sensitivos de las extremidades superiores, las cuales se presentan a continuación:

- C5: Deltoides
- C6: Biceps
- C7: Flexoe
- C8: Flexores de los dedos

Como se mostrará a continuación en la figura 3 se visualmente los nervios. (Philip Peng, 2023)

Figura 3
Plexo braquial



(Serrano, 2023)

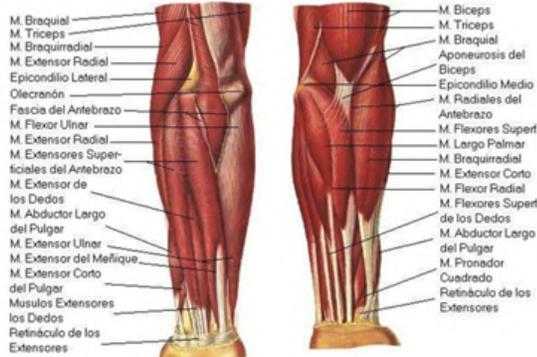
En la figura 3 se muestra una imagen de los nervios cervicales, estos se denominan o mas bien a este conjunto de nervios se les conoce como plexo braquial, estos nervios son los responsables por la inervación motora y sensitiva de los brazos, incluyendo el musculocutáneo, axilar, radial, mediano, y ulnar (cubital). (Serrano, 2023)

Posteriormente de haber entendido el origen de los nervios se realizó la investigación de los músculos, en este caso los del brazo y el antebrazo (ver figura 4 y 5), los músculos del antebrazo son un grupo de 20 músculos en los compartimientos anterior y posterior del antebrazo. Se encuentran divididos en dos grupos principales:

- Músculos del compartimento anterior, o flexores—pronadores.
- Músculos del compartimento posterior, o extensores—supinadores.

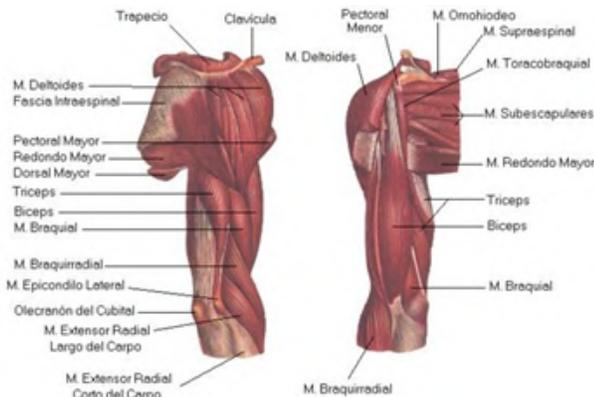
Cada de estos compartimentos se dividen en capas superficial y profunda, en general que estos músculos están distribuidos en 4 capas. Las funciones de estos son el flexionar, extensión, pronación, y supinación.

Figura 4
Músculos del antebrazo



Gracias a estos músculos podemos realizar los movimientos de flexión y extensión. Es por ello que estos músculos juegan un papel importante en nuestras acciones y actividades que realizamos diariamente. Al referirnos al brazo hablamos de la porción de la articulación del codo y el hombro. En esa porción encontramos 5 músculos, el bíceps braquial, músculo braquial, músculo coracobraquial, músculo tríceps braquial y músculo ancóneo. Los primeros 3 que se mencionaron corresponden al compartimento anterior y estos se ven involucrados al realizar el movimiento de flexión y los demás músculos realizan la extensión del antebrazo. Como los músculos intrínsecos del hombro se insertan en el húmero (el único hueso del brazo), a menudo se aprenden junto con los músculos del brazo (Nova, 2023).

Figura 5
Músculos del brazo

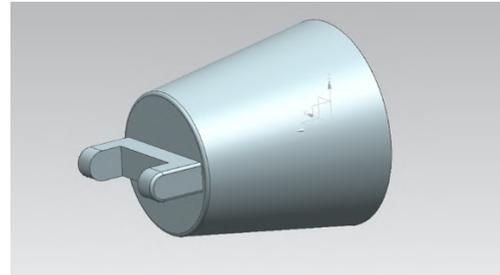


B. Diseño de la primera versión de la prótesis.

Para el diseño del prototipo de la prótesis se utilizó el software Siemens NX, ya que la institución tiene la licencia para que los alumnos utilicen el software, por lo que pudo realizar el diseño, pero si alguien está interesado Siemens tiene la facilidad de que se obtenga una licencia de uso estudiantil.

Lo primero que hizo fue seleccionar fue escoger cómo será la prótesis ya que uno de los factores es el tipo del muñón, dependiendo de las causas de porque fue la amputación se determina el área del corte y el resultado el muñón. Por eso hay diferentes tipos y formas del muñón, en este caso el diseño se hizo pensando en que la amputación fue del antebrazo y quedo el muñón cerca del codo, en la figura 6 se muestra el diseño del brazo, estos diseños que se van a mostrar son los primeros diseños y es la primera versión de esta, más adelante se ira modificando el diseño.

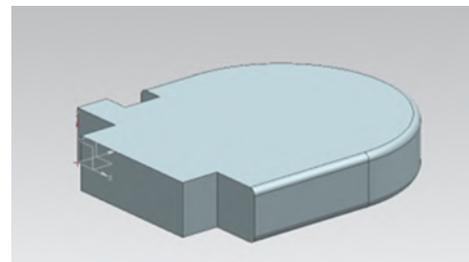
Figura 6
Diseño preliminar del brazo



En la figura 6 se observa que al frente esta algo que parece un mecanismo, la intención de esto es porque en esa zona ira conectada la mano y también ese mecanismo ejecutara el movimiento de la muñeca, y por obiedad en la parte de atrás ira conectado el muñón.

En la figura 7 se presenta la primer versión de lo que será la mano, este diseño no presenta los 4 dedos de la mano ya que la intención es diseñar una garra pero que tenga la forma de mano, solo se diseñó el pulgar.

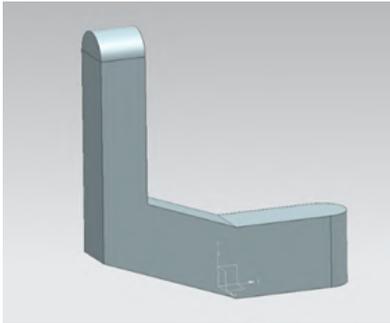
Figura 7
Diseño preliminar de la mano



La figura 7 presenta la falta de unos detalles sobre todo en las zonas de las articulaciones durante valla avanzando el proyecto se ira mejorando, en la zona posterior se observa una saliente, esa es la conexión de la muñeca (figura 6).

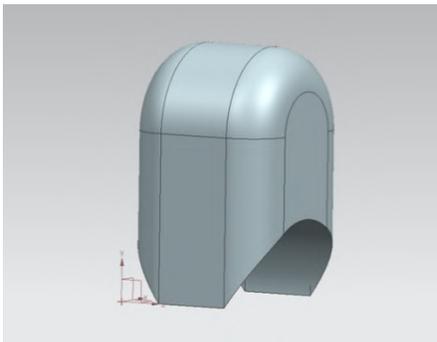
En la figura 8 y 9 muestra el diseño preliminar del dedo pulgar también le falta detalle ya que es la primera versión, la pieza de la figura 8 va conectada en la mano (figura 7).

Figura 8
Diseño preliminar del dedo pulgar



La pieza de la figura 9 es la cubierta del dedo pulgar, pero esta también tendrá articulación, la figura 8 también carece de detalle, pero también tendrá articulación, estos son los primeros diseños más adelante se ira modificando.

Figura 9
Diseño preliminar del dedo



También se recomendó sobre con que personas probar la prótesis, esas personas son las que sufrieron la amputación debido a un accidente, debido a que los músculos del muñón están sanos a diferencia de los que pacientes que sufrieron la amputación debido por una enfermedad. Esas son la que tienen diabetes, debido a una infección de herida si no se atienden su brazo sé les en gangrena y así que se les amputa la extremidad, también a un diabético no le funciona correctamente su hígado es por ello que el cuerpo no obtiene los nutrientes que necesita ya que los desecha, entonces una prótesis mio-eléctrica no sería lo correcto ya que sus músculos no están al 100% es por ello que se necesitaría proporcionar pequeñas pulsaciones para que el musculo haga su tarea.

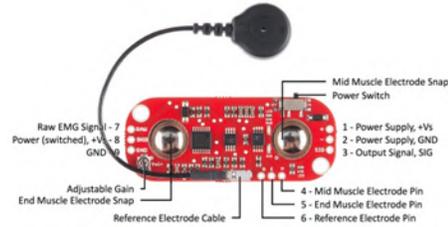
Figura 10
Tipos diferentes de amputaciones



C. Electrónica a utilizar.

Para producir los movimientos de la mano se optó por usar el sensor muscular EMG, es aquel capaz de detectar, mediante el uso de electrodos, los impulsos electrónicos que generan los músculos al contraerse y relajarse, para después tratar esos impulsos y realizar acciones en base a las señales obtenidas (ver figura 11).

Figura 11
Sensor EMG



Estos sensores en bio-medica es muy utilizado hoy en día y debido a sus medidas se ajusta muy bien a la prótesis como también su precio que lo hace accesible.

Otro sensor que se utilizara es el Flexiforce A201, el cual se implementa en pinzas robóticas o sistemas de peso electrónico para saber cuánta fuerza o precisión se está ejerciendo, la señal de salida es un cambio de resistencia, y entre más se presione menor será la resistencia. (Sanchez & Angela, 2020)

Figura 12
Sensor flexiforce A201



Debido a su flexibilidad, al ser una tira, esta se va utilizar en la mano de la prótesis para el sistema de retroalimentación, también se recurrió a este elemento por su precio accesible y según la bibliografía consultada este sensor es muy empleado.

Otro elemento que se va a utilizar serían los electrodos y lo que se seleccionaron son para electroestimulaciones, estos se seleccionaron porque es muy sencillo su mantenimiento, solo se necesitan limpiar una vez al mes, son fáciles de quitar y fácil de desconectar de la prótesis, su limpieza consiste en limpiar la zona que hace contacto con la piel con alcohol y dejar secar y después volver a conectarla al dispositivo, en la figura 13 se mostrara una imagen de ellos, vienen en dos presentaciones, una de forma cuadrada y la otra redonda, se mostrara la redonda. (Eduardo, 2014)

Debido a su flexibilidad al ser una tira esta se va a utilizar en la mano de la prótesis para el sistema de retroalimentación, también se recurrió a este elemento por su

precio accesible y según la bibliografía consultada este sensor es muy empleado.

Otro elemento que se va a utilizar serían los electrodos y lo que se seleccionaron son para electroestimulaciones, estos se seleccionaron porque es muy sencillo su mantenimiento, solo se necesitan limpiar una vez al mes, son fáciles de quitar y fácil de desconectar de la prótesis, su limpieza consiste en limpiar la zona que hace contacto con la piel con alcohol y dejar secar y después volver a conectarla al dispositivo, en la figura 13 se mostrara una imagen de ellos, vienen en dos presentaciones, una de forma cuadrada y la otra redonda, se mostrara la redonda.

Figura 13
Electrodos



Hasta el momento no se tiene contemplado que motor se valla a utilizar para la retroalimentación, pero se va a implementar un sistema de retroalimentación mediante patrones de vibración.

D. Sistema de retroalimentación.

La retroalimentación háptica, esta se utiliza en el campo de los videojuegos, no es una simple vibración. Es algo más. La intención de esta tecnología es jugar con nuestro cerebro haciéndonos sentir como si estuviéramos en el juego, esta retroalimentación está en los controles de las consolas (ver figura 14). Hasta la fecha, los dispositivos electrónicos intentaban de alguna forma comunicarse con nosotros a través de nuestros sentidos, los cuales eran, la vista y el oído. Pero desde la incorporación de la vibración en los mandos de las primeras consolas de videojuegos, se intentó también conquistar el sentido del tacto. (Daniel, 2020)

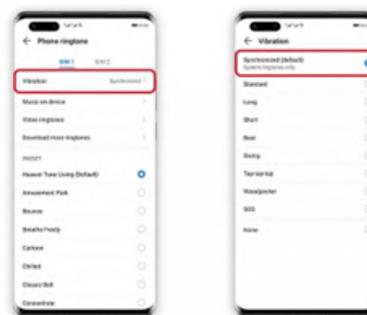
Figura 14
Control de la consola PS5



Esta forma de retroalimentación no es un tema actual, ni es algo exclusivo para las empresas que realizan las consolas, empresas como Iphone® y Xiaomi® están preparando sus

dispositivos para nuevas experiencias hápticas. Desde hace tiempo sea interactuado con esta retroalimentación, por ejemplo, se pueden adaptar los tonos de llamada a diferentes niveles de vibración según las preferencias del usuario (ver figura 15). (Girao, 2021)

Figura 15
Ajustes de los patrones de vibración



E. Material para su fabricación.

Se va a trabajar con el material de nylon, ya que la forma de fabricarlo será empleando la tecnología 3D, el material nylon es un polímero ampliamente utilizado en el sector de fabricación aditiva y sus características son: (Audra, 2012)

- Resistente, duradero y ligero
- Duro y parcialmente flexible
- Resistente al calor y a los impactos

En la figura 16 se observa una imagen con sus propiedades mecánicas.

Figura 16
Propiedades mecánicas del material

Propiedades térmicas	Valor típico	Método de ensayo
Índice de fluidez (MFR)	6,2 g/10 min	ISO 1133 (250 °C, 1,2 kg)
Deformación térmica (HDT) a 0,455 MPa	-	-
Deformación térmica (HDT) a 1,82 MPa	-	-
Transición vítrea	50 °C	-
Coefficiente de expansión térmica	-	-
Temperatura de fusión	185-195 °C	ISO 11357 (20 °C/min)
Contracción térmica	12 ± 2 %	DIN 53866 (100 °C, 30 min)

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al momento solo se cuenta con una propuesta de diseño de la prótesis, pero consultando con especialistas de la salud se recomendó que a los pacientes con amputación no se sienten cómodos con este tipo de prótesis, que para ellos es más cómodo y más seguros utilizando prótesis que se sujeten al torso.

Con respecto a los electrodos será evaluado ya que el número de músculo será la cantidad de los electrodos a utilizar.

De los materiales que fueron investigando, el nylon fue seleccionado por sus propiedades mecánicas de ser más flexible y resistente a los impactos, su precio es accesible económicamente hablando.

El sensor EMG, es un sensor muy utilizado en la bio-médica, se utiliza en brazos protéticos, se trata de un sensor compacto, pequeño y ligero, viene con electrodos para conectarlo de forma directa al músculo, esto es una ventaja para músculos grandes. La retroalimentación con vibración háptica fue la mejor opción de las evaluadas (audio, descarga muscular). La retroalimentación por patrones de vibración consiste en que según la presión y fuerza que el paciente ejerza en los objetos serán el nivel del patrón muscular.

IV. CONCLUSIONES

En este artículo se muestra la investigación que se llevó a cabo para el diseño y fabricación de una prótesis con un sistema de retroalimentación mediante patrones de vibración, en este escrito se presenta todo el desarrollo del proyecto al momento, desde la anatomía hasta el diseño del dispositivo, como también los componentes electrónicos, buscando la manera que sea elaborada con materiales accesible para los pacientes con amputación.

V. AGRADECIMIENTOS

A mi asesor, el Dr. Hesner Coto Fuentes por la confianza dada, así como sus consejos, también a la fisioterapeuta Marijose Cisneros Romero por las facilidades para realizar este proyecto.

VI. REFERENCIAS

- Audra, W. J. (17 de Julio de 2012). *Chemical Heritage Magazine*. Obtenido de <https://www.chemheritage.org/stories/magazine/nylon-a-revolution-in-textiles/>
- Caeres, C. B. (2018). *scribd*. Obtenido de La Biomecánica y Su Aplicación en Las Prótesis: <https://es.scribd.com/doc/62424971/La-biomecanica-y-su-aplicacion-en-las-protesis>
- Daniel, G. (15 de Julio de 2020). *mediavida*. Obtenido de <https://www.mediavida.com/foro/juegos/hilo-general-playstation-5-657906>
- Eduardo, C. J. (14 de Diciembre de 2014). *Robots Didácticos*. Obtenido de <https://robots-argentina.com.ar/didactica/sensor-de-fuerza-flexiforce/>
- Girao, D. (02 de Marzo de 2021). *Movilzona*. Obtenido de <https://www.movilzona.es/2021/03/02/como-funciona-vibracion-haptica-movil/>
- Nova, S. (09 de Febrero de 2023). *kenhub*. Obtenido de <https://www.kenhub.com/es/library/anatomia-es/musculos-del-brazo>
- Philip Peng, R. F. (16 de Marzo de 2023). *Dolopedia*. Obtenido de <https://dolopedia.com/articulo/nervios-cervicales-o-nervios-raquideos-cervicales>
- Sanchez, B., & Angela, F. (2020). La electronica para facilitar el aprendizaje.
- Serrano, C. (30 de Mayo de 2023). *kenhub*. Obtenido de <https://www.kenhub.com/es/library/anatomia-es/plexo-braquial-es>
- Social, I. N. (03 de 11 de 2017). *gobierno de México*. Obtenido de <https://www.gob.mx>
- Stokosa, J. J. (2021). *Merck Manuals*. Obtenido de <https://www.merckmanuals.com/es-us/hogar/temas-especiales/miembro-prot%C3%A9sico/opciones-de-pr%C3%B3tesis-de-miembros#>

Acondicionamiento de variables en corriente alterna y monitoreo de consumos eléctricos a través de un servidor web utilizando ESP32

Olvera-Avila, J. C.¹; Coto-Fuentes, H.¹

Datos de Adscripción:

¹ Tecnológico Nacional de México-Campus Lerdo. Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Dgo. División de Posgrado, Av. Tecnológico No. 1555 Sur Periférico Gómez - Lerdo Km. 14.5, Ciudad Lerdo, Estado de Durango C.P. 35150.México.
MM2210984@itslerdo.edu.mx.

I. INTRODUCCIÓN

Resumen - El monitoreo de variables eléctricas en corriente alterna es fundamental para la mejora de la gestión energética en el sector doméstico e industrial. Los avances tecnológicos en ramas como la electrónica, la instrumentación y las comunicaciones han permitido que dicho monitoreo y gestión se pueda realizar de manera automática y remota, aumentando la eficiencia de los sistemas eléctricos y disminuyendo pérdidas materiales debido a la mala operación de los mismos. En el presente trabajo se desarrolla la etapa de acondicionamiento electrónico y acceso remoto de un sistema para la gestión energética de cargas monofásicas. Entre las variables medidas se encuentran: tensión, corriente y factor de potencia, garantizando el monitoreo de consumos de cargas eléctricas a través de un servidor web asincrónico implementado en un SoC ESP32. Las pruebas de funcionamiento se realizaron en luminarias similares a las utilizadas para la iluminación pública, evaluando aspectos como precisión y exactitud en la medición de variables eléctricas, tiempos de operación y posibles pérdidas energéticas por uso descontrolado de las cargas.

Palabras Clave - Acondicionamiento electrónico, ESP32, Gestión energética, Monitoreo eléctrico.

Abstract - The monitoring of electrical variables in alternating current is essential for the improvement of energy management in the domestic and industrial sector. Technological advances in branches such as electronics, instrumentation and communications have allowed such monitoring and management to be carried out automatically and remotely, increasing the efficiency of electrical systems and reducing material losses due to their misoperation. In the present work the stage of electronic conditioning and remote access of a system for the energy management of single-phase loads is developed. Among the measured variables are: voltage, current and power factor, guaranteeing the monitoring of electrical load consumption through an asynchronous web server implemented in an ESP32 SoC. The performance tests were carried out on luminaires similar to those used for public lighting, evaluating aspects such as precision and accuracy in the measurement of electrical variables, operating times and possible energy losses due to uncontrolled use of the loads.

Keywords - Electrical monitoring, Electronic conditioning, Energy management, ESP32.

La energía eléctrica, en la actualidad, es un elemento indispensable para llevar a cabo actividades productivas, así como factor fundamental en la transformación social, debido a que incide directamente en los servicios básicos que tiene la población mundial, debido a esto, es necesario tener en consideración dos factores fundamentales que tiene la energía eléctrica que influyen directamente en esta investigación, los cuales son consumo de usuarios finales y eficiencia energética.

En el caso del consumo de usuarios finales, según la Secretaría de energía, se define como “la energía utilizada por los diferentes Usuarios finales de la industria eléctrica”, dentro de los que se consideran los usuarios del suministro básico, calificado y de autoabastecimiento remoto, y los cuales forman parte de los sectores residencial, comercial, servicios, agrícola, empresa mediana y gran industria, los cuales tuvieron un ascenso en el 2020, llegando a registrar 45.6 millones de usuarios finales.

La eficiencia energética, según la SENER, tiene como propósito la reducción de la cantidad de energía empleada en la producción de bienes y servicios que se ve reflejado en un ahorro, teniendo como bases el Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía y la actualización realizada dentro de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles mas Limpios que se publicaron por la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía y la Secretaría de Energía, teniendo como trasfondo una estimación realizada en el escenario de línea de base que asegura un aumento de la tasa anual de 1.9% hasta el año 2035 en el consumo final y una disminución en la intensidad energética en menos del 1% por año entre el 2019 y el 2050. (Secretaría de Energía, 2021)

Los sistemas de monitoreo eléctrico se constituyen de una red de medidores que se encuentran conectados a un servidor central, cuyo objetivo principal se enfoca en la adecuada administración de la energía y el proporcionarle al usuario final la información necesaria acerca del monitoreo. Como elementos internos no necesariamente tienen que ser medidores eléctricos, ya que en algunos casos se puede agregar el monitoreo de otros elementos energéticos, tales como gasto de agua, presión hidráulica, etc. (Chacon, 2020)

La tecnología que se tiene en la actualidad permite obtener una comparativa de una cantidad de procesos tan variados como los mencionados con respecto a las mejoras pertinentes de los sistemas que ya se tenían anteriormente en el ámbito general, esto debido a que el impacto de la tecnología ha ido marcando una diferencia visible, las cuales se reflejan en estrategias de gestión como los Sistemas Integrados de Gestión, Sistemas de Gestión Energética, entre otras. (Sornoza Bravo & Sabando Piguabe, 2021)

El tema principal de este artículo se centra en la propuesta

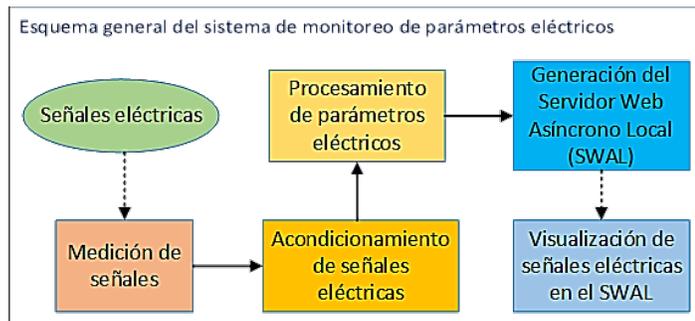
de creación de un sistema de monitoreo de variables eléctricas y la metodología de dicho proceso realizado con elementos de bajo costo que actualmente se tienen en el mercado, así como proporcionar las pruebas necesarias que lo verifiquen.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

Actualmente, el monitoreo eléctrico se puede realizar de múltiples maneras, teniendo como base los sistemas locales y remotos, siendo los más utilizados los sistemas remotos debido a su flexibilidad, pero presentando a su vez el defecto de contar necesariamente con una red de internet para la publicación de los parámetros.

Como parte de la generación de este sistema, se consideró necesario realizar el monitoreo local de las variables eléctricas, pero con su publicación de los parámetros eléctricos mediante medios que permitan la visibilidad en un área determinada. Para la realización del prototipo de pruebas se tomó en consideración los métodos de medición, acondicionamiento de señales y procesamiento de variables, además de la realización de una interfaz gráfica de usuario que permita visualizar los parámetros eléctricos hacia el usuario de manera sencilla, esto se puede ver de manera completa en la Figura 1.

Figura 1
Esquema general del sistema de monitoreo de parámetros eléctricos.



2.1 Método de medición

En el caso del método de medición de los parámetros eléctricos, se tomó en consideración los elementos fundamentales de las señales eléctricas, las cuales se basan en las señales senoidales, y son amplitud, periodo y ángulo de desfase, con esto en mente se eligieron entre los sensores comerciales el sensor de voltaje ZMPT101B y ACS712.

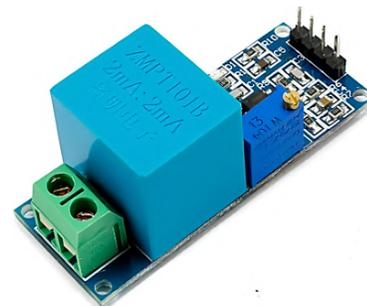
En la medición de voltaje se optó por el transformador de voltaje ZMPT101B de la empresa Qingxian Zeming Langxi Electronic, ya que es un transformador de voltaje que trabaja con una relación de corriente 1:1, posee un voltaje de aislación de 4 kV, además de que su rango de operación de entrada es de 0-1 kV y su rango de operación de salida es de 0 - 10 mA con una resistencia de muestreo de 100Ω. (Qingxian Zeming Langxi Electronic, 2018b)

Figura 2
Transformador de voltaje 2 mA/2 mA ZMPT101B. Tomado de (Qingxian Zeming Langxi Electronic, 2018).



Comercialmente existen placas que ya están creadas para la utilización de este transformador de voltaje (véase la Figura 3), lo que se debe de tener en consideración es que su voltaje de operación es alrededor de los 5V de salida, ya que existen en la actualidad microcontroladores que manejan rangos de medición de 5 V y 3.3 V en sus canales analógicos.

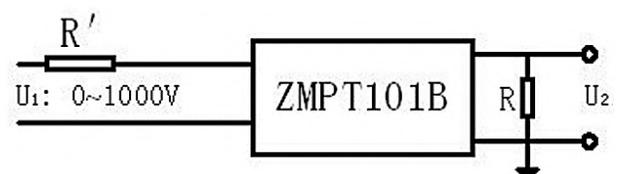
Figura 3
Módulo ZMPT101B Sensor De Voltaje AC. Tomado de (Electrónica THIDO, 2021).



La forma de obtener el voltaje del sensor ZMPT101B, en el caso de solo tener el transformador de voltaje como en la Figura 2, es a partir del circuito de la Figura 4 y para obtener los valores de voltaje se utiliza la ecuación (1), donde U_1 es el voltaje proveniente de la red eléctrica, U_2 es el voltaje de salida del transformador, R' es una resistencia limitadora de corriente de entrada y R es la resistencia de muestreo del transformador.

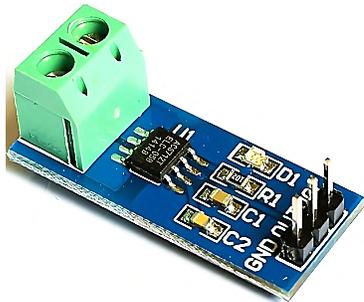
$$U_2 = \frac{U_1}{R'} * R \tag{1}$$

Figura 4
Circuito eléctrico del uso típico del transformador de voltaje ZMPT101B. Tomado de (Qingxian Zeming Langxi Electronic, 2018b).



En la medición de corriente, se optó por el sensor ACS712 de la empresa Allegro (ver Figura 5), el cual es una solución precisa y económica para la medición de corriente AC o DC con aplicaciones industriales, comerciales y de sistemas de comunicación, además de eso, posee un filtro de señal para las señales con ruido, un error de salida total del 1.5%, una resistencia conductora interna de medición de corriente de 1.2 mΩ, una sensibilidad de salida desde 66 hasta 185 mV/A, un voltaje de salida proporcional a la corriente, entre otras cosas. (Octopart, 2020)

Figura 5
Módulo del sensor de corriente ACS712. Tomado de (Naylamp Mechatronics SAC, 2016).



2.2 Acondicionamiento de señales

Los acondicionadores de señales, según (Granda Miguel & Mediavilla Bolado, 2015, pp. 01-40), es un circuito que convierte los parámetros eléctricos de salida de los transductores en una señal eléctrica (corriente, voltaje o frecuencia) que se puede medir fácilmente, el cual incluye todas aquellas transformaciones realizadas a las señales y que son previas al procesado para extraer la información que se necesita.

En el caso de las señales eléctricas que se tienen, los métodos para acondicionar una señal son varios, en este caso se escogió el método de punto pendiente, la cual es determinada dentro de la ecuación (2).

$$Y_{out} = \left(\frac{y_{max} - y_{min}}{x_{max} - x_{min}} \right) (X_{IN} - x_{min}) + y_{min} \quad (2)$$

Teniendo en consideración este escalamiento, en el caso del sensor ZMPT101B, según la ecuación (1), el acondicionador de señal, considerando un voltaje U_1 máximo de 140 Vrms, una resistencia R' de 820 kΩ y una resistencia R de 100Ω, el rango de operación del acondicionamiento de señal es de:

$$-25mV \rightarrow 25mV ; 0 \rightarrow 3300mV$$

Aplicando la ecuación (2):

$$Y_{OUT} = \left(\frac{3300m - 0}{25m - (-25m)} \right) (X_{IN} - (-25m)) =$$

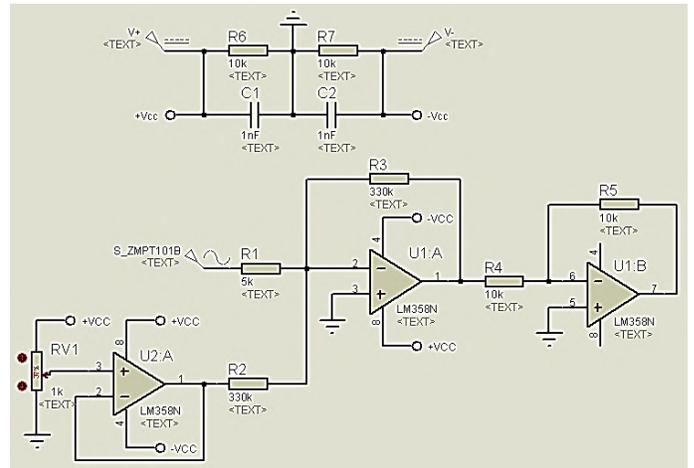
$$Y_{OUT} = \left(\frac{3300m}{50m} \right) (X_{IN} + 25m) \quad (3)$$

$$Y_{OUT} = 66X_{IN} + 1650m$$

Considerando la ecuación (3), el acondicionamiento ideal de este sensor se basó en un amplificador de voltaje en configuración de sumador inversor en cascada con un amplificador inversor (ver Figura 6), dentro de lo cual se toman los valores ideales y se tiene:

$$\frac{R_f}{R_1} = 66 ; si R_f = 330k\Omega \therefore R_1 = \frac{330k}{66} = 5k\Omega \quad (4)$$

Figura 6
Circuito electrónico del acondicionador de señal del transformador de voltaje ZMPT101B.



Teniendo en consideración el escalamiento de la señal de la ecuación (2) y los parámetros del sensor de corriente ACS712, el rango de operación del acondicionamiento de señal es:

$$0 - 5V ; 0 - 3.3V$$

Al aplicar la ecuación (2) en estas condiciones se tiene:

$$Y_{OUT} = \left(\frac{3.3 - 0}{5 - 0} \right) X_{IN} = \frac{33}{50} X_{IN} \quad (5)$$

Considerando la ecuación (4), el escalamiento ideal para el sensor de voltaje, sin necesidad de utilizar elementos adicionales como amplificadores operacionales, es una reducción de voltaje por un divisor de tensión, el cual se calcula:

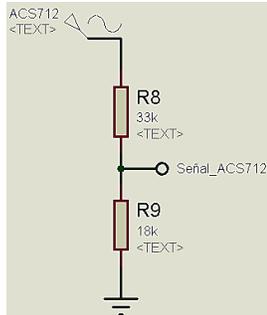
$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{33}{50} ; si R_1 = 33k\Omega;$$

$$R_2 = \frac{17R_1}{33} = \frac{17(33k)}{33} = 17k\Omega \quad (6)$$

Considerando que el valor más cercano de R_2 comercial es de 18 kΩ, este será el valor utilizado en el prototipo.

Teniendo estos valores se genera un circuito eléctrico como el de la Figura 7, el cual es el modelo que se utilizó para medir los parámetros eléctricos dentro del prototipo de pruebas.

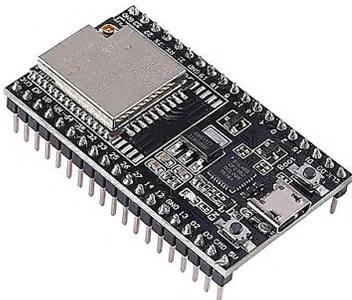
Figura 7
Circuito electrónico del acondicionador de señal del sensor de corriente ASC712.



2.3 Procesamiento de variables

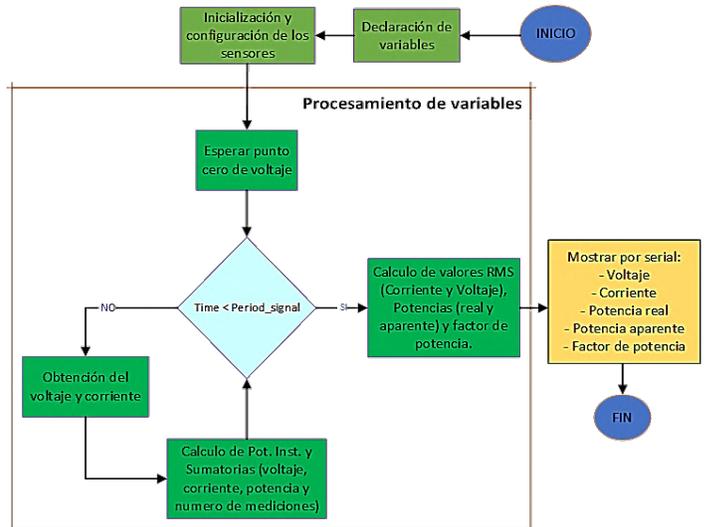
El procesamiento de las variables eléctricas se llevó a cabo mediante un procesamiento por microcontrolador, esto con base en las señales eléctricas que se midieron y acondicionaron, el microcontrolador seleccionado fue el SoC ESP 32 (ver la Figura 8), esto debido a que es un elemento que internamente contiene un módulo genérico de WIFI, Bluetooth y Bluetooth LE MCU, además de que dentro de sus especificaciones destacan un doble microprocesador Xtensa de 32 bits de tipo LX6, 34 GPIO programables de nivel de 3.3 V, un doble ADC de 12 bits de tipo SAR, un host de tipo SD/eMMC/SDIO, entre otras cosas, que reducen la cantidad de elementos dentro del sistema del prototipo de pruebas. (Espressif Systems, 2023).

Figura 8
Tarjeta de desarrollo ESP32-WROOM-32U. tomado de (Electrónica I + D, 2023).



Dentro del SoC ESP32 se llevaron a cabo las tareas de medición de variables, dentro de estas fueron variables directas (tales como voltaje y corriente) y variables indirectas (potencia real, potencia aparente y el factor de potencia), todo esto siguiendo el diagrama de la Figura 9.

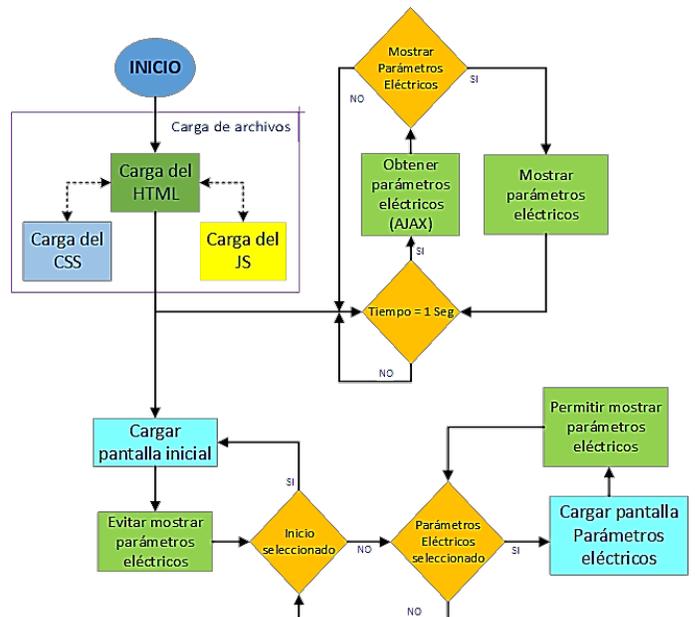
Figura 9
Diagrama de flujo del proceso de medición de variables eléctricas.



2.4 Interfaz de usuario

La interfaz gráfica de usuario (GUI) aplicada en el prototipo de pruebas se llevó a cabo mediante Visual Studio Code IDE, en el cual se programó mediante HTML, CSS y JavaScript la página web, para después incluir estos archivos dentro del SoC ESP32, esto a partir de la funcionalidad de almacenar algunos tipos de archivos en la memoria interna del SoC mediante el sistema de archivos flash SPI (SPIFFS).

Figura 10
Diagrama de flujo del proceso de la página web del Servidor Web Asíncrono Local.



III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Acondicionamiento de señales

Mediante las ecuaciones (3), (4), (5) y (6), así como los diagramas esquemáticos de la Figura 6 y de la Figura 7, se realizaron las pruebas con el circuito físico y las señales producidas por el prototipo se pueden ver en la Figura 11 y la Figura 12.

Figura 11

Oscilogramas de las señales del escalamiento analógico de la Figura 7, considerando la señal de entrada (Color azul) y la señal de salida (Color Amarillo).

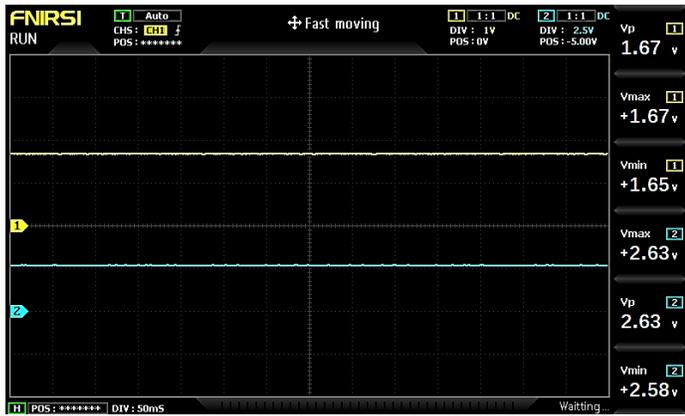
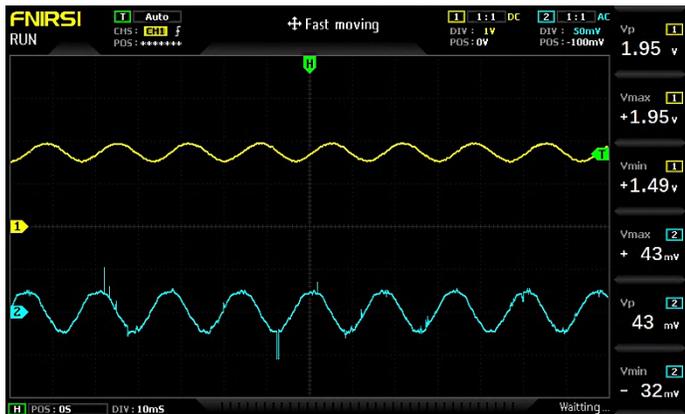


Figura 12

Oscilogramas de las señales del escalamiento analógico de la Figura 6, considerando la señal de entrada (Color azul) y la señal de salida (Color Amarillo).

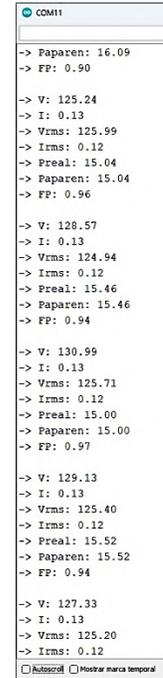


3.2 Procesamiento de variables

El procesamiento de las variables se realizó mediante el SoC ESP32, el cual siguió el procedimiento de la Figura 9, para poder obtener los resultados que se visualizan en la Figura 13.

Figura 13

Impresión de las variables por comunicación serial entre el SoC ESP32 y la computadora.



3.3 Interfaz de usuario

La interfaz de usuario, según lo teorizado en la sección D del capítulo II, y teniendo en consideración el diagrama de flujo de la Figura 10 se pudieron obtener los elementos visualizados dentro de la Figura 14 y la Figura 15.

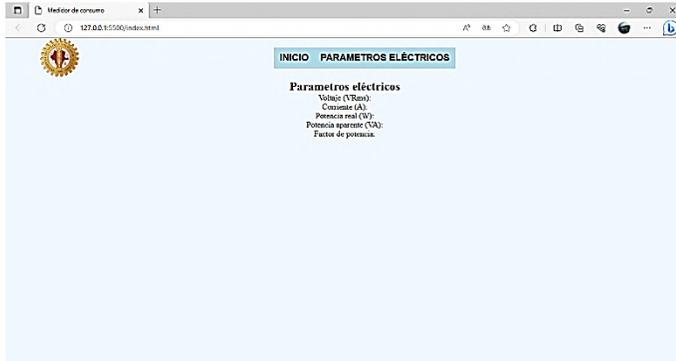
Figura 14

Interfaz gráfica de usuario realizada dentro de Visual Studio Code IDE a partir de la Figura 10 (Pantalla inicial).



Figura 15

Interfaz gráfica de usuario realizada dentro de Visual Studio Code IDE a partir de la Figura 10 (Pantalla de parámetros eléctricos).



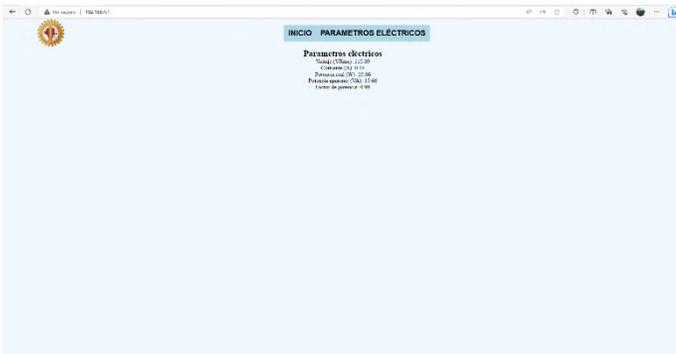
3.4 Servidor Web Asíncrono Local

Al obtener la integración de los códigos de medición de parámetros eléctricos con el código de visualización del servidor se generaron los resultados vistos en la Figura 16, esto a partir de los diagramas de la Figura 9 y la Figura 10.

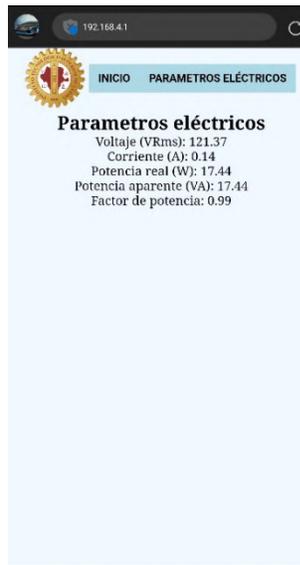
Al tener un sistema basado en Web, existe una mayor probabilidad de obtener un sistema multiplataforma, debido a esto, se realizaron pruebas con otros aparatos electrónicos, los cuales presentaron los resultados expuestos en la Figura 17 y la Figura 18.

Figura 16

Interfaz gráfica de usuario aplicado en el servidor a partir de la Figura 15 y visualizado en una laptop (Pantalla de parámetros eléctricos).

**Figura 17**

Interfaz gráfica de usuario aplicado en el servidor a partir de la Figura 15 y visualizado en teléfono celular (Pantalla de parámetros eléctricos).

**Figura 18**

Interfaz gráfica de usuario aplicado en el servidor a partir de la Figura 15 y visualizado en una tableta (Pantalla de parámetros eléctricos).



3.5 Prototipo de pruebas

El prototipo físico se realizó a partir de la integración de los diagramas esquemáticos de los escalamientos electrónicos del sistema, en la Figura 19 se puede ver el armado del circuito prototipo de pruebas, en la Figura 20 se puede observar la comunicación serial del prototipo de pruebas que muestra algunas acciones realizadas en el servidor web y en la Figura 21 se puede visualizar el diagrama esquemático completo del prototipo de prueba.

Cabe mencionar que este sistema se realizó mediante dos SoC ESP32, esto debido a que la cantidad de procesos utilizados dentro del Servidor Web Asíncrono Local en conjunto con el procesamiento de señales entregaban errores debidos a la cantidad de memoria que se tenían.

Figura 19

Prototipo de pruebas con la integración del sistema completo para el monitoreo de variables eléctricas.

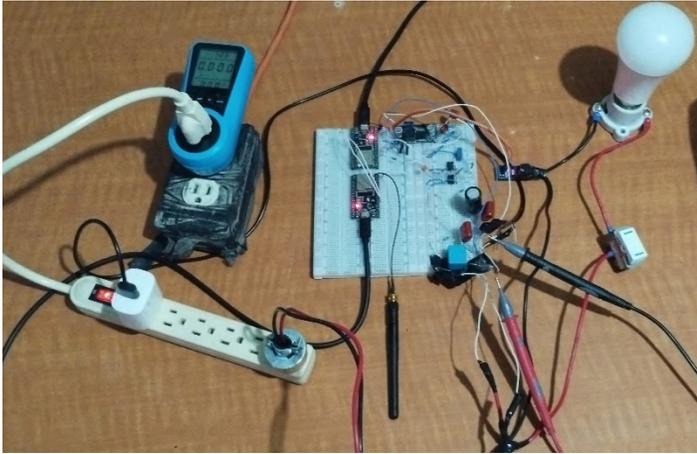
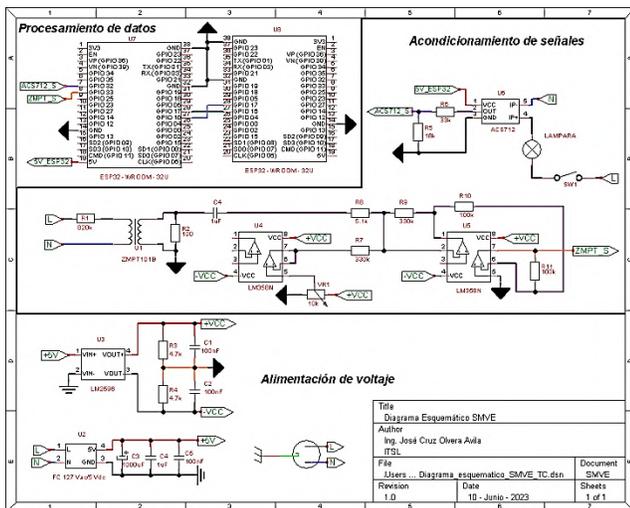


Figura 20
Impresión de actividades del Servidor del prototipo de pruebas del sistema de la Figura 19.

```

COM6
Enviar
rst:0x1 (POWERON_RESET),boot:0x13 (SPI_FAST_FLASH_BOOT)
configsip: 0, SPIWP:0xee
clk_drv:0x00,q_drv:0x00,d_drv:0x00,cs0_drv:0x00,hd_drv:0x00,wp_drv:0x00
mode:DIO, clock div:1
load:0x3fff0018,len:4
load:0x3fff001c,len:1216
ho 0 tail 12 room 4
load:0x40078000,len:10944
load:0x40080400,len:6388
entry 0x400806b4
Setting AP (Access Point)...
AP IP address: 192.168.4.1
    
```

Figura 21
Diagrama esquemático del circuito de la Figura 19 (prototipo de pruebas)



3.6 Comparación de la medición de consumo eléctrico

En el caso de la medición del consumo eléctrico se puede ver en el apartado 3.5 la realizada por el prototipo de pruebas, el cual ha sido sometido a comparativas a partir de un medidor de consumo eléctrico comercial encontrado en (DeRemate.Com (Mercado Libre), 2023), las cuales se pueden observar en la Figura 22.

A partir de esto se han encontrado resultados cercanos a los generados con el prototipo de pruebas, con una diferencia aproximada de 8 VRms, 2W y 0.06 en el caso del factor de potencia, esto permite visualizar el error de medición que se cuenta al momento de medir con el prototipo desarrollado.

Figura 22
Mediciones de parámetros eléctricos de un medidor comercial.



IV. CONCLUSIONES

Los sistemas de monitoreo de las variables eléctricas como el presentado en el artículo permiten obtener los parámetros deseados de la red eléctrica de manera directa e indirecta, esto por métodos matemáticos a partir de la medición de los parámetros fundamentales, además de que presentan un reto para la realización del mismo debido a la calidad de los materiales con los que se cuenta, aunado a esto, el poder realizar un sistema de esta categoría con elementos de bajo costo representa la viabilidad de realizar sistemas de bajo costo para poder monitorear procesos dedicados a la red eléctrica.

Estos sistemas de monitoreo local permiten la visualización de los parámetros eléctricos sin la necesidad de tener una red Wi-Fi o contar con internet para interactuar con el sistema, lo que permite expandir el área de aplicación del sistema a los lugares donde no se cuentan con estos elementos.

Los elementos presentados presentan una buena funcionalidad, pero en recomendación es necesaria una mejora en código debido a los tiempos de procesamiento y cálculo, obteniendo una mejora en tiempos y en efectividad.

Con base en los resultados expuestos en el presente documento, se planea implementar este sistema de manera integral con un control de cargas eléctricas, permitiendo obtener tanto el control como la medición de las variables, realizando un sistema más completo de los procesos eléctricos.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo económico por parte del CONAHCYT referente a las becas otorgadas por el mismo organismo a estudiantes por sus estudios de posgrado.

VI. REFERENCIAS

- Chacon, H. (2020, June 10). Sistema de monitoreo eléctrico, gestión y ahorro energético. Energiayredes.com.
<https://energiayredes.com/monitoreo-de-energia-electrica/>
- DeRemate.com (Mercado Libre). (2023). Medidor de consumo eléctrico ahorrador luz wattmetro benkel. Artículo.mercadolibre.com.mx.
https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-1371618429-medidor-de-consumo-electrico-ahorrador-luz-wattmetro-benkel-_JM
- Electrónica I + D. (2023). Tarjeta de desarrollo ESP32-WROOM-32U. Didacticaselectronicas.com.
<https://www.didacticaselectronicas.com/index.php/sistemas-de-desarrollo/espressif-systems/esp32/tarjeta-de-desarrollo-esp32-wroom-32u-tarjetas-modulos-de-desarrollo-con-de-wifi-y-bluetooth-esp32u-con-conector-u-fl-tarjeta-comunicaci%C3%B3n-wi-fi-bluetooth-esp32u-iot-esp32-nodemcu-d0wd-detail>
- Electrónica THIDO. (2021). Módulo ZMPT101B sensor de voltaje AC. Electronicathido.com.
<https://www.electronicathido.com/detallesProducto.php?id=Q2hZNHMvRiZYVDhFcTJocUVkQVvrQT09>
- Espressif Systems. (2023). ESP32 WROOM32D & ESP32 WROOM32U datasheet. In Espressif Systems (pp. 01-33). Espressif Systems.
https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32d_esp32-wroom-32u_datasheet_en.pdf
- Granda Miguel, M., & Mediavilla Bolado, E. (2015). Instrumentación electrónica: Transductores y acondicionadores de señal (1st ed., Vol. 1, pp. 01-40). Editorial De La Universidad De Cantabria.
- Naylamp Mechatronics SAC. (2016). Tutorial sensor de corriente ACS712. Naylamp Mechatronics - Perú.
https://naylampmechatronics.com/blog/48_tutorial-sensor-de-corriente-ac712.html
- Octopart. (2020, January 30). Datasheet for ACS712ELCTR-30A-T allegro microsystems current sensors. Octopart.
<https://octopart.com/datasheet/acs712elctr-30a-t-allegro+microsystems-38944689>
- Qingxian Zeming Langxi Electronic. (2018). 2mA/2mA voltage transformer - buy voltage transformer, 2ma/2ma voltage transformer, potential transformer product on qingxian zeming langxi electronic devices co., ltd. Www.micro-Transformer.com. <https://www.micro-transformer.com/2ma-2ma-voltage-transformer-ZMPT101B.html>
- Qingxian Zeming Langxi Electronic. (2018b). ZMPT101B current-type voltage transformer. In www.micro-transformer.com (pp. 1-2).
<https://5nr0rxhmqqjjik.leadongcdn.com/ZMPT101B+specification-aidijBqoKomRilSqqokpjkp.pdf>
- Secretaría de Energía. (2021). Programa para el desarrollo del sistema eléctrico nacional 2021-2035. In Centro Nacional De Control De Energía (pp. 35-77). Centro Nacional De Control De Energía.
https://www.cenace.gob.mx/Docs/16_MARCOREGULATORIO/Prod ecen/14%202021-2035%20Cap%C3%ADtulos%201%20al%206.pdf
- Sornoza Bravo, J. C., & Sabando Piguabe, L. F. (2021). Estado del arte de la gestión energética en la industria. Dominio de Las Ciencias, 7(3), 778-802. <https://doi.org/10.23857/dc.v7i3.1966>

Aumento en la efectividad de ventilación en interior mina mediante comparación de estándares.

Núñez - Cabral, J. C ¹; Carrera - Barraza, M. J ²; Valdez - Diaz, J. M ²; Pinales - Valdez, E G ²; Carrera - Barraza, B ³

Datos de Adscripción:

¹ Ingeniería y Control Industrial: Ferrocarril Internacional Mexicano No. Ext 1757 A, Rincón la merced, Torreón Coahuila México C.P. 27269

² Tecnológico Nacional de México: campus Instituto Tecnológico Superior de Lerdo: Av. Tecnológico N° 1555 . Periférico Lerdo Km. 14.5, Placido Domingo Cd Lerdo, Dgo, México. C.P.35150

³ Tecnológico Nacional de México: campus Instituto Tecnológico de Torreón, Carretera. Torreón-San Pedro km 7.5, Ejido Ana. Torreón, Coahuila México C.P. 27170

Resumen - Uno de los retos principales que se tiene en la operación de las minas subterráneas es lograr una ventilación adecuada para salvaguardar la salud del personal y operatividad de los equipos, los cuales están en riesgo a causa de la alta concentración de gases generados por detonaciones con explosivos, gases productos de los propios metales encontrados, el calor que producen la utilización de equipos diésel, así como el consumo humano.

En base a lo anterior se llevó a cabo el presente trabajo, el cual tiene como finalidad aumentar la ventilación en interior mina que abarca dos cuerpos de explotación, el proyecto consistió en evaluar las condiciones actuales del circuito de ventilación en base al cumplimiento de lo señalado en la norma Mexicana, para posteriormente compararlo específicamente con norma Chilena y proponer alternativas de mejora en los sistemas de ventilación con ayuda de simuladores, logrando mejorar el flujo y calidad del aire limpio, para garantizar la salud del personal, así como cumplir con las obligaciones de la Secretaría del Trabajo y Previsión Social, NOM-023- STPS-2012 Minas subterráneas y minas a cielo abierto. Con lo anterior se ayuda a reducir los riesgos y condiciones inseguras, aumentando la productividad del personal operativo.

Palabras Clave: Interior mina, Productividad, Salud, Ventilación.

Abstract - Increase ventilation effectiveness inside mine.

One of the main challenges in underground mining operations is to have adequate ventilation to preserve personnel health and correct equipment operation which are in risk die high concentration of gasses created during explosive detonations, fumes from metal themselves, heat generated by operating diesel equipment and human breathing.

This evaluation was done based on above information and has the objective of increasing ventilation inside the mine with two different exploitation bodies, this project evaluated current conditions of ventilation circuit based on compliance with what is indicated in the Mexican standard, and then compare it specifically with the Chilean standard and propose alternatives to work on ventilation systems using

simulators to improve clean air flow and quality to guarantee personnel health and meet Secretaría del Trabajo y Prevención Social obligations NOM-023-STPS-2012 underground and open air mining. These improvements reduce risks and increase safety conditions and personnel productivity.

Keywords: Health, Inside mine, Productivity, Ventilation.

I. INTRODUCCIÓN

El derecho a un trabajo seguro es un aspecto fundamental de los derechos laborales y se refiere al derecho que tienen las personas a realizar sus labores en un entorno de trabajo que garantiza su integridad física y mental, protegiéndolas de cualquier riesgo o peligro que pueda dañar su salud o seguridad. Este derecho está reconocido por diversas leyes y normativas laborales en muchos países, y tiene como objetivo principal proteger a los trabajadores de accidentes, enfermedades profesionales y otros riesgos laborales.

En lo particular en el caso de México dicho derecho se encuentra declarado en el artículo 123 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, el cual establece los derechos laborales de los trabajadores en general. (Cámara de diputados, 2023, pág.135), y que, al ser la cima de la pirámide de Kelsen, garantiza el cumplimiento todas las demás leyes, normas y disposiciones, que emanan de ella en relación a la seguridad en el trabajo. (Concepto, 2020, párr. 2)

La seguridad laboral de los trabajadores es un aspecto abordado también por organismos internacionales, como es el caso la Organización Mundial de la Salud (OMS) que afirma que en promedio se pasa del 80 al 90% en espacios cerrados durante una jornada de trabajo, por lo que de la calidad de su ambiente interior depende en gran medida el bienestar y el confort de las personas. (Redacción Médica, 2018, pág. 18), lo anterior es retomado en la publicación de la guía de calidad del aire interior, de la comunidad española.

Al hablar de minas subterráneas, el porcentaje anteriormente mencionado se cubre y muchas veces se sobrepasa, por lo es inevitable tener en la mente que un aspecto crítico en relación con un ambiente seguro y de confort en el trabajo, es la ventilación o también llamada en el argot, ventilación de interior mina, lo que es fácilmente descifrable, por la relación entre la calidad del aire y el bienestar del trabajador, o cualquier ser vivo, según las Naciones Unidas, el aire limpio es importante para la salud y la vida cotidiana de las personas, siendo la contaminación atmosférica el mayor riesgo ambiental para la salud humana y una de las principales causas de muerte y enfermedad en todo el mundo. (NACIONES UNIDAS, 2020, párr. 9)

En un ambiente de trabajo con una incorrecta ventilación, existen principalmente dos tipos de riesgos en relación a la misma, los cuales corresponden a factores biológicos que pueden provenir de diversas fuentes como lo son las bacterias, virus, hongos, parásitos, moho, levaduras, ácaros, esporas y otros microorganismos y factores químicos, entendiéndose por estos aquellos elementos o situaciones relacionadas con la presencia de sustancias químicas que pueden tener efectos nocivos sobre la salud de los trabajadores en un entorno industrial y que pueden provenir de varias fuentes y como lo son los gases tóxicos, compuestos orgánicos, elementos volátiles, humos, olores.

Dentro de los elementos que se debe de cubrir con una ventilación adecuada son:

- Cumplir con un porcentaje mínimo de oxígeno
- Tener la capacidad de diluir los gases tóxicos, hasta un nivel inferior al marcado por la normativa aplicable.
- Climatización del área. (El Blog de la ventilación eficiente, 2021, párr. 4)

La importancia del cuidado del aire en un centro de trabajo, se incrementa cuando se trata de una mina subterránea, la cual es conceptualizada como un espacio confinado, lo anterior de acuerdo a la definición declarada en la Norma Oficial Mexicana NOM-033-STPS-2015, Condiciones de seguridad para realizar trabajos en espacios confinados, que lo define como un lugar sin ventilación natural, o con ventilación natural deficiente, en el que una o más personas puedan desempeñar una determinada tarea en su interior, con medios limitados o restringidos para su acceso o salida, que no está diseñado para ser ocupado en forma continua. (DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACION, 2015, pág. 12)

En la actualidad se pudiera pensar que con los adelantos tecnológicos la ventilación en mina, no es factor de riesgo, sin embargo, los índices de accidentes por intoxicación de gases en minería subterránea siguen siendo muy elevados por la exposición a polvo y temperaturas extremas presentándose accidentes letales. (Llancho Alhuirca & Vargas Castro, 2020, pág. 25)

En el interior de la mina, se trabaja con equipos cuyo combustible es el diésel, estos equipos son con los que se ejecutan las diversas actividades relacionadas con la obtención de los minerales, tales como extracciones, barrenaciones y anclajes, las actividades antes mencionadas generan una gran concentración de contaminación, que, sumada a la combustión humana, el calor presente en la mina y la ausencia de la corriente del aire, pueden dar origen a condiciones no adecuadas para realizar el trabajo, existiendo posibilidades de que se generen condiciones inseguras y por consiguiente actos inseguros derivados del aire viciado.

El presente estudio se ejecutó en una mina efectuando mediciones del flujo de aire actual, para posteriormente hacer uso del simulador Ventsim, logrando identificar los espacios en donde se requería hacer modificaciones para conseguir un mayor flujo de la corriente del aire, y dar solución a la problemática acerca de la incertidumbre de contar y mantener la calidad de

aire necesaria para la salud de los trabajadores diluyendo contaminantes a niveles seguros. sin dejar de lado la operatividad de la mina, lo anteriormente señalado se realizó en dos cuerpos de exploración.

En ambos cuerpos de exploración se cuenta con gran variedad de equipos diésel destinados a realizar tareas de extracción de mineral, barrenación y anclaje, realizándose actividades de como accesos, rampas, rebajes, cueles, contra-pozos entre otros estos para encontrar la mejor forma de llegar hasta donde se encuentra el mineral, comunicación de niveles o realizar contra-pozos de ventilación en interior-mina.

El método de extracción del mineral se lleva mediante acarreo con equipos Diésel hasta superficie, siendo el lugar de vaciado el patio o la parrilla, de ambos cuerpos deben extraerse diariamente aproximadamente 5,000 Toneladas de mineral para el Stock Pile.

En interior mina la concentración de gases es originado por las detonaciones con explosivos, gases generados por metales en estado natural, manejo de equipos diésel y el consumo humano, por eso es que al no ser suficiente la ventilación natural, que consiste en el movimiento de masas de aire producto de diferencias de temperaturas entre las labores y la superficie es necesario recurrir a la ventilación mecánica es decir, ventilación auxiliar o secundaria y son aquellos sistemas que hacen uso de ductos y ventiladores auxiliares. (Quispe Caceres, 2020, Resumen)

La atmósfera de la mina es una composición muy específica y va en relación con dos variables, para desarrollar el trabajo con seguridad, salud y que se obtengan altos rendimientos de los trabajadores, dichas variables son la temperatura y grado de humedad. (Revista seguridad minera, 2020, párr. 6), las cuales intervienen en la difusión de los gases y principalmente en la concentración del oxígeno, elemento esencial en la salud de los trabajadores, en la TABLA 1 puede observarse el porcentaje de concentración que puede llegar a representar un riesgo de salud ya sea temporal o permanente. (Safety Instruments, 2018, Diapositiva 18)

Tabla 1.
Efectos en la salud del trabajador

<i>Efectos del Oxígeno</i>	
<i>Efectos en la salud del trabajador si falta oxígeno en el ambiente</i>	
23.5%	Nivel Máximo de Seguridad (OSHA)
21%	Oxígeno en el aire
19.5%	Nivel Inferior (OSHA)
17%	Se afecta el juicio
16%	Primeros síntomas de Anoxia
16 - 12%	Respiración y pulso elevados
14 - 10%	Fatiga y dificultad para respirar
10 - 6%	Nauseas, vomito, inhabilidad para moverse y pérdida del sentido
<6%	Convulsiones, sofoco, se detiene la respiración y el corazón unos minutos después
3 - 5%	Tiempo de vida: 3 - 5 minutos

Conmoción con cianosis intensiva, ataques de pérdida de conocimiento hasta el coma, respiración rápida superficial que conduce a la convulsión, muerte rápida

Entre los principales gases que se encuentran en la atmósfera de la mina se encuentran los mostrados en la Tabla 2, mostrándose los niveles de alarma, así como la media ponderada en el tiempo (TWA) y el límite de concentración del gas tóxico al que se puede estar expuesto de forma continua durante un breve intervalo de tiempo sin sufrir efectos adversos para la salud. (STEAL). (safetyinstruments, 2021, Diapositiva 18)

Tabla 2.
Niveles de alarma

Gas	Puntos de Alarma y Valores Permisibles			
	Alarma Baja	Alarma Alta	TWA	STEAL
CO ₂	0.5 % Vol.	1 % Vol.	0,5 % Vol.	3 % Vol.
CO	25 PPM	50 PPM	25 PPM	400 PPM
H ₂ S	1 PPM	5 PPM	1 PPM	5 PPM
O ₂	19.5 % Vol.	23.5 % Vol.	. ---	----
CH ₄	0.5 % Vol.	1 % Vol.	----	---
NO ₂	3 PPM	6 PPM.	1 PPM.	5 PPM

Complementando la Tabla 2 se puede señalar que el principal contaminante de un ambiente cerrado es el monóxido de carbono, y se incrementa de forma considerable al usar maquinaria de combustión a diésel, como es el caso de los scoop tram, jumbos, jumbos ancladores, máquina contrapocera robbins, amacizadores, retroexcavadoras, camiones de servicios, camiones de volteo, camiones orquesta, entre otros usados en la operación de la mina.

La peligrosidad del CO₂ radica en que es un gas inodoro e incoloro al que puede estar expuesto el personal, sin darse cuenta. (NATIONAL CENTER FOR ENVIRONMENTAL HEALTH, 2023)

Hasta los párrafos anteriores se ha hecho énfasis en el impacto que tiene la falta de ventilación en el ser humano, sin embargo, cabe resaltar que la falta de aire fresco, afecta también la productividad de la mina, dado que sería imposible operarla, es decir es un asunto de también de productividad.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

El proyecto consistió en determinar el cálculo del requerimiento total del flujo de aire requerido en el área, en base a la cantidad de equipo y del personal que permanece en el área durante el turno de mayor ocupación, para el cumplimiento del estándar NOM-023-STPS-2012.

Para lo anterior se emplearon (1) y (2), para determinar el caudal según personal que trabaja, así como el Caudal según equipos diésel, respectivamente.

$$Q_1 = (q)(n) \text{ (m}^3\text{/min)} \quad (1)$$

Donde:

Q_1 = Cantidad de aire necesario para el personal (m³/min)

q = Volumen de aire necesario por persona

n = Número de personas trabajando

$$Q_2 = (K)(N) \text{ (m}^3\text{/min)} \quad (2)$$

Donde:

Q_2 = Cantidad de aire necesario para uso de equipos diésel (m³/min)

K = Cantidad de aire mínimo por cada HP

N = Número de HP de los equipos autorizados y que trabajan en la mina.

Posterior a la obtención de los resultados de (1) y (2), estos se usarán para determinar la demanda de aire en el interior de la mina, la cual se obtendrá mediante (3)

$$Q_T = (Q_1 + Q_2 + Q_{fu}) \text{ (m}^3\text{/min)} \quad (3)$$

Donde:

Q_T = Caudal total de aire demandado en interior mina (m³/min)

Q_1 = Cantidad de aire necesario para el personal (m³/min)

Q_2 = Cantidad de aire necesario para uso de equipos diésel (m³/min)

Q_{fu} = 15 % del Q_1 , como coeficiente de pérdida.

El caudal total de aire demandado en interior mina, se obtendrá en base al mínimo requerido en la normativa nacional mediante la NOM-023-STPS-2012, así como también con estándares internacionales de países referenciales en el ámbito minero, como lo es el caso de Chile a través el art. n° 132.

De acuerdo a la NOM-023-STPS-2012, los mínimos requeridos son:

- a) 1.50 metros cúbicos por minuto por cada trabajador.
- b) 2.13 metros cúbicos de aire por minuto por cada caballo de fuerza de la maquinaria accionada por motores de combustión diésel.

De acuerdo a la norma chilena, del art. n° 138 los caudales mínimos son:

- a) 3 metros cúbicos por minuto por cada trabajador.
- c) 2.83 metros cúbicos de aire por minuto por cada caballo de fuerza de la maquinaria accionada por motores de combustión diésel.

Para el cálculo de los caudales, se obtuvieron los datos de los trabajadores del turno de mayor ocupación, así como la totalidad de los equipos utilizados, obteniéndose los datos mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 3.

Datos por turno.

Cantidad de equipos utilizados en el turno	Totalidad de HP en el turno	Cantidad de personal en el turno más numeroso
16	4,539	500

Tabla 5.

Cantidad de aire necesario para uso de equipos diésel

Normas	K	N	Q2
Norma Mexicana	3	4,539	13,617
Norma Chile	2.83	4,539	12,845

Tabla 6.

Coefficiente de perdida

	Qfu
Norma Mexicana	112.5
Norma Chile	225

Tabla 7.

Caudal total de aire demandado en interior mina (m³/min)

Normas	Q1	Q2	Qfu	Qt
Norma Mexicana	750	13,617	112.5	14,479.50
Norma Chile	1,500	12,845	225	14,570.37

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este apartado permite presentar los resultados de la investigación científica. En las tablas subsecuentes se muestran los resultados obtenidos para la cantidad de aire para personal correspondiente a la norma mexicana y Chilena, los valores corresponden a 750 y 1500 m³/min.

En lo que respecta a los resultados de Cantidad de aire necesario para uso de equipos diésel los valores corresponden a 13,617 m³/min para la norma mexicana y 12,845 m³/min. para la norma chilena

Para los valores correspondientes al caudal total de aire demandado en interior mina de acuerdo a los cálculos se obtuvieron 112.5 225 m³/min para norma mexicana y norma Chilena.

Tabla 4.

Cantidad de aire para personal (m³/min)

Normas	q	n	Q1
Norma Mexicana	1.5	500	750
Norma Chile	3	500	1500

Figura 1.

Comparativo de cantidad de aire para personal

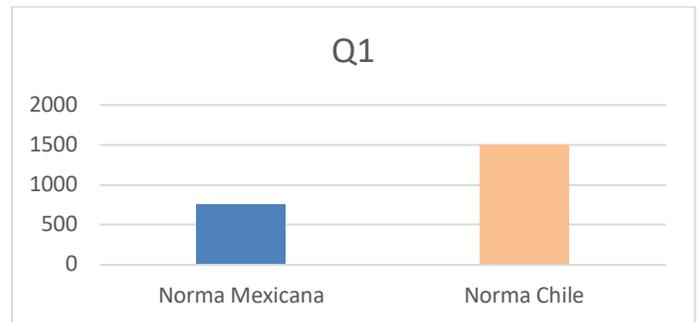
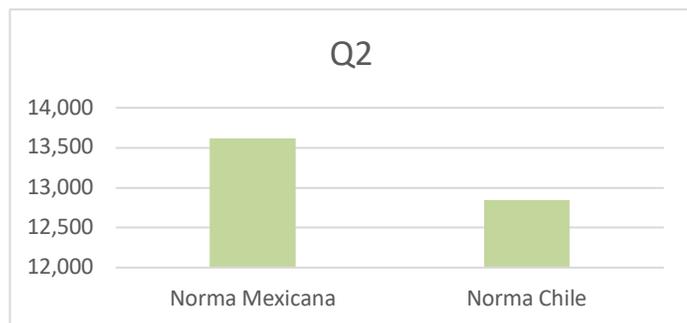


Figura 2.

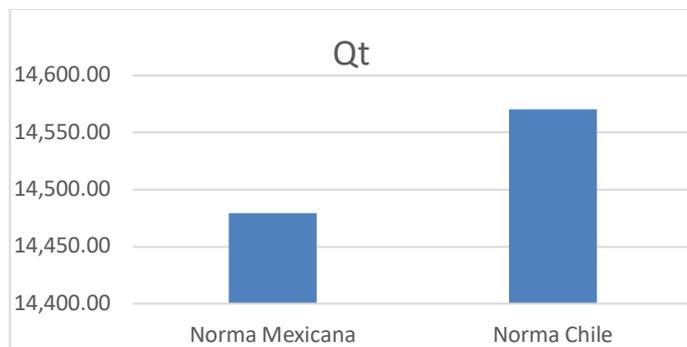
Comparativo de Cantidad de aire necesario para uso de equipos diésel.



Chile puede ser considerado como referente en el giro minero debido a la cantidad y experiencia acumulada en el ramo por lo que el resultado obtenido cobra valor debido a que los niveles de m^3/min garantizan el cumplimiento mexicano y otorga una diferencia favorable debido a que los gases generados tanto por maquinaria a diésel y gasto por combustión humana no es una variable estática.

Figura 3.

Comparativo de caudal total de aire demandado en interior mina



IV. CONCLUSIONES

Al realizar la comparación entre las dos normas, se concluye que la norma mexicana se encuentra en un nivel de cumplimiento de caudal menor al requerido por la norma Chilena, por lo tanto la empresa opto por implementar acciones para cubrir la cantidad de $14,570.37 m^3/min$, con lo que se satisface y excede a lo solicitado por NOM-023-STPS-2012, lo cual es correcto dado que la misma determina el límite inferior a cumplir.

Con un margen de cumplimiento más amplio en cuanto al caudal de aire proporcionado, favorece el ambiente de seguridad y se reduce significativamente el riesgo de trabajar en un contexto que por su naturaleza se presume peligroso.

La empresa al determinar el caudal objetivo, conoce la capacidad necesaria de los ventiladores a instalar, lo anterior se logra al convertir las unidades de m^3/min a unidades CFM, lo cual es el acrónimo de cubic feet per minute, es decir pie^3/min , teniendo como resultado $30,872,866$ cubic foot per minute (cfm), que, al combinarse con una ventilación mixta, es decir aspirante / soplante, elegida mediante la simulación en Ventsim, permitirá tener equilibrio entre los beneficios y los costos de la ventilación instalada, el cual puede representar según datos históricos alrededor del 50 % de los costos de operación de una mina. (Gomez De La Torre Hernández & Alcalá Adrianzen, 2021, párr 6)

V. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Tecnológico Nacional de México campus Instituto Tecnológico de Torreón e Instituto Tecnológico Superior de Lerdo por los medios proporcionados por la realización del presente estudio, así mismo se agradece a la empresa involucrada, por atender a la solicitud de información para esta investigación

VI. REFERENCIAS

- Cámara de diputados. (18 de mayo de 2023). *Cámara de diputados*. doi:<https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/cpeum.htm>
- Concepto. (1 de Septiembre de 2020). *Concepto*. doi:<https://concepto.de/piramide-de-kelsen/>
- Diario oficial de la federacion. (31 de agosto de 2015). *Diario Oficial De La Federacion*. Obtenido de Diario Oficial De La Federacion: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5405659&fecha=31/08/2015#gsc.tab=0
- El Blog de la ventilación eficiente. (17 de mayo de 2021). *El Blog de la ventilación eficiente*. Obtenido de El Blog de la ventilación eficiente: <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/aplicacion-de-la-ventilacion-en-la-mineria-subterranea/>
- Gomez De La Torre Hernandez, A., & Alcalá Adrianzen, M. E. (14 de 03 de 2021). *iiis.org*. doi:<https://www.iiis.org/CDs2022/CD2022Spring/papers/CB220KJ.pdf>
- Llancho Alhuirca, U., & Vargas Castro, A. (2020). <https://repositorio.utp.edu.pe/>. Obtenido de <https://repositorio.utp.edu.pe/>: https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/3417/Ubaldo%20Llancho_Armando%20Vargas_Tesis_Titulo%20Profesional_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Naciones Unidas. (7 de SEPTIEMBRE de 2020). *Naciones Unidas*. Recuperado el 2023, de Naciones Unidas: <https://www.un.org/es/observances/clean-air-day#:~:text=El%20aire%20limpio%20es%20importante,mundo%20que%20se%20podr%C3%ADan%20evitar>.
- National center for environmental health. (18 de enero de 2023). *National center for environmental health*. Obtenido de National center for environmental health: <https://www.cdc.gov/nceh/>
- Positiva compañía de seguros. (16 de Noviembre de 2020). *Positiva compañía de seguros*. Obtenido de positiva compañía de seguros: https://www.anm.gov.co/sites/default/files/folleto_mineria_ventilacion.pdf
- Quispe Caceres, P. (13 de septiembre de 2020). *repositorioslatinoamericanos*. Obtenido de repositorioslatinoamericanos: <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3280760>
- Redacción Médica. (7 de febrero de 2018). *Redacción Médica*. doi:<https://www.redaccionmedica.com/secciones/ingenieria/calidad-del-aire-interior-filtracion-y-nueva-norma-iso-16890-8107>
- Revista seguridad minera. (5 de junio de 2020). *Revista seguridad minera*. Obtenido de Revista seguridad minera: <https://www.revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/metodos-y-planeacion-de-ventilacion-de-minas-subterranas/>
- Safety Instruments. (15 de mayo de 2018). *Safety Instruments*. Obtenido de Safety Instruments: https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/resentacion_multidetectors_ibrid-mx6.pdf
- Safetyinstruments. (8 de febrero de 2021). *safetyinstruments*. Obtenido de safetyinstruments: <https://www.safetyinstruments.com.co/>
- Women for safety. (19 de noviembre de 2020). *WOMEN FOR SAFETY*. Obtenido de WOMEN FOR SAFETY: <https://womenforsafety.medium.com/la-ventilaci%C3%B3n-proceso-clave-en-las-operaciones-mineras-subterr%C3%A1neas-3a8b27992fa8>

Desarrollo del proceso de aprobación de piezas de producción como ventaja competitiva en una empresa de manufactura

Rojas - López, I. A ¹; Carrera - Barraza, B ²; Cháirez - Acosta. L I ², Chiv - Gramillo. E D ²; Magallanes - Armendáriz. J F ²

Datos de Adscripción:

¹ Setramex, Juan F. Brittingham #140, Ciudad Industrial, C.P. 27019, Torreón, Coahuila. irisrojas@gmail.com

² Instituto Tecnológico de Torreón, Carretera. Torreón-San Pedro km 7.5, Ejido Ana. Torreón, Coahuila, México C.P. 27170

Resumen - En la actualidad y desde hace ya varios años atrás, las organizaciones han aceptado, así como reconocido su compromiso en la generación de productos finales con respecto a la característica de calidad, decidiendo para lo anterior comprar los diversos componentes a proveedores, lo que conlleva un riesgo intrínseco en la selección de los mismos, en relación al aseguramiento y cumplimiento de calidad, dado que dichos proveedores varían de tamaño yendo desde pymes hasta grandes empresas.

El propósito del presente proyecto es analizar, además de probar el proceso de aprobación de piezas de producción (PPAP) como una herramienta para incorporar calidad en el nuevo producto y procesos, garantizando que el producto cumpla con las expectativas del cliente, generándose así una ventaja competitiva con respecto a sus rivales, al evitarse o reducirse, defectos o retrabajos por incumplir las expectativas del cliente, lo anterior se manifiesta en el documento con el PPAP ya implementado, como un proceso auxiliar dentro de las actividades de fabricación, para garantizar que las piezas elaboradas se ajustan a las especificaciones del cliente, permitiendo a los proveedores aportar pruebas de sus procesos, que garanticen su capacidad de producir piezas que cumplen sistemáticamente las especificaciones del cliente..

Palabras Clave – Calidad, Manufactura, PPAP, Productividad, Seis Sigma, Ventaja Competitiva.

Abstract - For several years now, organizations have acknowledged and committed to the generation of quality products, deciding to procure numerous and different components from global suppliers, which entails a risk in the selection of those, related to quality assurance and compliance, since these suppliers vary in size ranging from SMEs to large enterprises.

The objective of this project is to test and analyze the production parts approval process (PPAP) as a tool to incorporate quality into new products and processes, satisfying customer's expectations and generating a competitive advantage over their competitors by avoiding or reducing, defects or rework for failing to meet specifications. The above is manifested in the document with the PPAP

already implemented as an auxiliary process of the manufacturing activities, to ensure manufactured conforming parts and allowing suppliers to evidence and guarantee their ability to produce parts that systematically will meet customer's specifications and standards.

Keywords - Competitive Advantage, Manufacturing, PPAP, Productivity, Six Sigma, Quality.

I. INTRODUCCIÓN

A lo largo de décadas han existido diversos autores y gurús en el tema de calidad que han sido referentes en la industria, todos ellos generando diversos conceptos enfocados en relación al cumplimiento de requisitos del usuario final, por lo anterior es que no existe una única y definitiva definición de calidad, sin embargo, una definición apropiada para los objetivos del presente estudio es la declarada en ISO 9000:2015, en la que se establece el término de calidad como el grado en el que un conjunto de características inherentes cumple con los requisitos (ISO 9001, 2020).

Antes de continuar, cabe resaltar que con la definición anterior es trascendental puntualizar que cada cliente presenta diferentes necesidades, por lo que dichas características pertenecientes a los productos o servicios, es adaptable a dichos requisitos.

Para que una empresa logre desarrollar una ventaja competitiva, es necesario que alcance la plena satisfacción del cliente, lo anterior se obtiene al coincidir la calidad programada, la calidad realizada y la calidad necesitada por el cliente (CEUPE, 2021).

Cuatrecasas y González (2017), sostienen que la fuerte competitividad en todos los sectores exige un elevado nivel de calidad en los productos (Díaz & Salazar, 2021), una manera de lograr lo anterior y de estar posicionados en el mercado, así como crecer en el mismo, es a través de la obtención de una ventaja competitiva o distintiva, la cual Michael Porter (1985) define como cualquier característica basada en atributos que ofrece esa superioridad y aísla a la empresa de los competidores (CINCODIAS,2020), sin embargo ante las necesidades globales actuales, es necesario que esa ventaja ahora no sea estática, sino adaptativa, la cual hace referencia a la capacidad que poseen las unidades de negocios, de evolucionar con el cambio, sin permanecer estancados en un entorno concreto (EMPRESARIADOS,2023).

Una manera de responder a las ya mencionadas necesidades de los clientes es a través de un proceso de aprobación de partes de producción (PPAP), dado que el propósito de este es garantizar que la compañía entienda los requerimientos del Cliente (Diaz,2018), así como proporcionar evidencia que demuestre que el proceso de elaboración posee la capacidad de procesar productos que satisfacen los requerimientos declarados por el cliente al momento de estarse fabricando.

El proceso de aprobación de partes de producción forma parte de las herramientas que constituyen las Core Tools (TCM,2020), que como se ha mencionado anteriormente permite crear una ventaja mediante el aseguramiento en el cumplimiento de la pieza desde diseño, materiales, dimensiones, funcionalidad, apariencia, además de requerimientos normativos que puedan aplicar (TCM,2020).

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

La aplicación de un PPAP requiere gran cantidad de documentación, organización. y colaboración del personal de la organización, tanto operativo, como administrativo (Addlink,2022).

Para el desarrollo del PPAP de este proyecto se parte de que ya se cuenta con la materia prima y todas las herramientas necesarias para la fabricación de la pieza.

El presente trabajo es pionero en la empresa y aplicable para todas las piezas que se fabriquen, desde las actuales hasta las de clientes potenciales, los elementos desarrollados durante el estudio, corresponden a la elaboración de los 18 elementos clave del PPAP:

1) Documentación de diseño: Se partió de generar toda la información relacionada con el diseño del producto, en esta fase, se declararon las especificaciones, así como se crearon dibujos, se especificaron necesidades particulares de tratamientos especiales o bien equipos especializados a utilizar.

2) Cambios de ingeniería autorizado: En estableció que, en caso de existir desviaciones del diseño con respecto a lo requerido por el cliente, se realiza cambios en los planos, los cuales se justifican detalladamente, exponiendo la causas y efectos de dichos cambios.

3) Aprobación de ingeniería: Esta fase corresponde a la solicitud de evidencias de aprobación por parte del cliente acerca del diseño presentado, la cual se genera por al área de ingeniería del mismo, o lo correspondiente.

4) Análisis Modal de Fallos y Efectos del Diseño: Se establece que si el diseño de la pieza es responsabilidad de la empresa contratada, realizara el AMFE del diseño, con la finalidad de identificar las posibles fallas y sus efectos en el producto

5) Diagrama de flujo de proceso: Corresponde a la realización de los diagramas de flujo y procesos, garantizando estandarizar operaciones y brindando información acerca de la

comunicación existente entre operaciones, ayudando a un diseño de layout que minimice actividades que no agregan valor, como el transporte y espera.

6) Análisis Modal de Fallos y Efectos del Proceso: Durante esta etapa, se lleva a cabo el análisis de fallas del proceso graficado en el punto anterior, con el objetivo de explorar, las partes del proceso y las posibilidades de falla, así como la severidad y frecuencia de ocurrencia de las mismas.

7) Plan de Control: Corresponde a generar una lista de parámetros que deben de controlarse al momento de llevarse a cabo el proceso, responsables, frecuencia y plan de acción.

8) Sistema de Análisis de Medición: Se estipulo realizar un estudio de Gage Repetibilidad y Reproducibilidad, llamado también como GR & R acerca de los atributos críticos, siendo el departamento de calidad el responsable de seleccionar los datos que consideren relevantes.

El estudio GR & R, refleja la repetibilidad relacionada con la capacidad del propio instrumento de medición para dar resultados consistentes, es decir precisos y reproducibilidad, consiste en la capacidad de los procesos para arrojar resultados repetidos independientemente del operador que realiza la prueba (BUEHLER,2021).

9) Resultados Dimensionales: Se estableció una lista de verificación de las magnitudes del dibujo y la evaluación de las mismas.

10) Registros de Materiales / Pruebas: Se llevo a cabo un listado de las pruebas realizadas, fechas en las que se efectuaron, y resultados de las mismas, considerando todos los materiales de la pieza.

11) Estudios Iniciales del Proceso: Esta sección incluye los estudios de capacidad del proceso, y gráficos de control estadísticos, sobre las variables de la pieza, que se consideran críticas, previo a estos análisis se deben de estipular los niveles que se consideran aceptables, en (1), se muestra la ecuación correspondiente al cálculo de la capacidad del proceso.

$$C_p = \frac{\text{Rango de especificaciones}}{\text{Habilidad del proceso}} = \frac{LES-LEI}{6S} \quad (1)$$

Donde:

LES – Es el límite de Especificación Superior

LEI – Es el límite de Especificación Inferior

S – Es la desviación Estándar

12) Documentación del Laboratorio Calificado: Se realizaron actividades de inspección realizadas por laboratorios acreditados y calificados.

13) Reporte de Aprobación de Apariencia: Equivale a una lista para verificar y realizar la aprobación de la apariencia de la pieza, con atributos como colorimetría, texturizado y apariencia en general del producto.

14) Muestra de Partes de Producción: Se realizó mediante la entrega de piezas muestras producidas por parte de la empresa al cliente, para ser evaluadas.

15) Muestra Maestra: Se entregaron al cliente muestras de las diversas partes, las cuales son de utilidad para entrenar a inspectores de calidad.

16) Ayudas en el Chequeo: Consistió en generar una lista en donde se consideren las herramientas utilizadas en las verificaciones del cumplimiento de la pieza, así como el programa de calibración de las mismas.

17) Requisitos específicos del cliente: Se generó un formato destinado para que los clientes especifiquen requisitos concretos en el proceso.

18) Presentación de Información de partes: Representa la garantía otorgada al cliente, de que se le entregará un producto que cumple con los requisitos especificados desde el dibujo del diseño.

Los elementos anteriores fueron los considerados en el proyecto, sin embargo, es importante señalar que pueden variar de acuerdo al cliente, se pueden omitir algunos puntos, al no participar en el diseño de la pieza.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Entre los resultados generados en la empresa en donde se realizó el proyecto, fue el haber obtenido la creación e implementación del procedimiento relacionado con la elaboración de documentos para la realización de prototipos de los clientes recientes o potenciales, tal como se señala en el libro "PPAP PRODUCTION PART APPROVAL PROCESS", se establecieron documentos para los 18 requerimientos importantes que conforman la implementación del PPAP, en la Tabla 1. se muestra, la manera en que se resguardaron los certificados, en relación al nivel de emisión, basados en las fuentes bibliográficas correspondiente (SPCGROUP,2022)

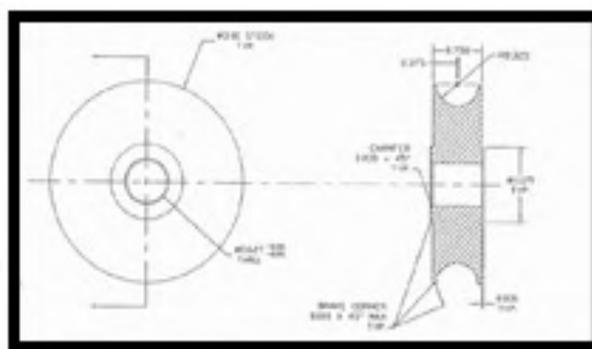
Tabla 1
Elementos del informe PPAP (<https://spcgroup.com.mx/ppap/>)

Elementos del informe PPAP:	Niveles				
	1	2	3	4	5
1) Documentación de diseño	R	S	S	•	R
2) Cambios de ingeniería autorizado	R	S	S	•	R
3) Aprobación de ingeniería	R	R	S	•	R
4) Análisis Modal de Fallos y Efectos del	R	R	S	•	R

Diseño					
5) Diagrama de flujo de proceso	R	R	S	•	R
6) Análisis Modal de Fallos y Efectos del Proceso	R	R	S	•	R
7) Plan de Control	R	R	S	•	R
8) Sistema de Análisis de Medición	R	R	S	•	R
9) Resultados Dimensionales	R	S	S	•	R
10) Registros de Materiales / Pruebas	R	S	S	•	R
11) Estudios Iniciales del Proceso	R	R	S	•	R
12) Documentación del Laboratorio Calificado	R	S	S	•	R
13) Reporte de Aprobación de Apariencia	S	S	S	•	R
14) Muestra de Partes de Producción	R	S	S	•	R
15) Muestra Maestra	R	R	R	•	R
16) Ayudas en el Chequeo	R	R	R	•	R
17) Requisitos específicos del cliente	R	R	R	•	R
18) Presentación de Información de partes	S	S	S	•	R
S = La organización deberá emitir a cliente y retener una copia de este documento					
R = La organización deberá retener una copia de este documento y presentarla al cliente en caso de ser requerida					
• = La organización deberá retener una copia y entregarla a cliente en caso de ser requerida					

Con el desarrollo del proyecto, se alcanzó la aceptación de la pieza, con la que se trabajó como piloto, para la creación de los procedimientos, la cual se muestra en la Figura 1

Figura 1
Pieza Piloto.



En la Figura 2. se muestra el resultado del estudio de capacidad del proceso (Cp), realizado para la pieza piloto en el software Minitab, en el cual se denota una capacidad del proceso igual a 2.82, el cual es calculado mediante (1).

Partiendo que se entiende como capacidad del proceso, a la amplitud de la variación natural de éste para una característica de calidad, permite saber en qué medida tal característica de calidad es satisfactoria, es decir cumple las especificaciones (Gutiérrez,2013).

Figura 2
Capacidad del Proceso



Como se mencionó en el párrafo anterior, el índice de capacidad obtenido fue de 2.82 al contrastarlo con los parámetros correspondientes, mostrados en la Tabla 2, se concluye, que el proceso mostro evidencia de cumplir con los estándares de calidad seis sigma, lo que representa una ventaja competitiva, al garantizar el cumplimiento de las especificaciones del cliente.

Tabla 2
Valores del Cp y su Interpretación. (Gutiérrez & de la Vera, 2013)

Valores del Cp y su Interpretación		
Valor del índice Cp	Clase o categoría del proceso centrado	Decisión
$Cp \geq 2$	Clase Mundial	Se tiene calidad Seis Sigma.
$Cp > 1.33$	1	Adecuado.
$1 < Cp < 1.33$	2	Parcialmente adecuado, requiere de un control estricto.
$0.67 < Cp < 1.3$	3	No adecuado para el trabajo. Es necesario un análisis del proceso. Requiere de modificaciones serias para alcanzar una

		calidad satisfactoria.
$Cp < 0.67$	4	No adecuado para el trabajo. Requiere de modificaciones muy serias

Para apoyar en el cumplimiento de las especificaciones del cliente, se utilizan ayudas visuales, las cuales se muestran en la Figura 3 y que apoyan en la eliminación de variabilidad tanto en maquinado, estética o medidas específicas.

Figura 3
Ayudas Visuales



Los resultados mostrados en párrafos anteriores denotan la pertinencia de un procedimiento PPAP al momento de cumplir de las especificaciones del cliente, lo que se traduce en un flujo de valor, que en realidad es un conjunto exhaustivo de actividades y comunicaciones que en forma colectiva crean y entregan el valor al cliente (Reidenbach & Goeke, 2013), es decir la calidad se diseña en el producto, antes de ponerlos a disposición de Manufactura (Besterfield,2009).

El implementar un PPAP advierte a la empresa de manera anticipada posibles desviaciones del diseño del producto, lo que posiciona a la empresa fabricante en un lugar de mayor jerarquía frente a los competidores., o en otras palabras le genera una ventaja competitiva, lo cual cobra gran importancia al existir en el mundo más de 800,00 empresas, según un estudio de Statista, por lo que es indispensable ofrecer algo que tus competidores aún no hacen (Da Silva,2022).

El desarrollo del procedimiento de PPAP, le permitió a la empresa generar una diferenciación en base a las estrategias competitivas genéricas de Michael Porter (CEPYMNews,2022), siendo estas las que se muestran en la Figura 4.

Figura 4
Estrategias Genéricas de Porter



Los datos recolectados durante el estudio demostraron haber alcanzado la estrategia de liderazgo en costos, dado que, al reducir el proceso aceptación de piezas, se logra reducir costos involucrados con los intentos de aceptación de diseño, o procesos involucrados en la manufactura, los costos van en relación a eliminación de los 7 desperdicios de lean manufacturing.

Por otra parte, la estrategia de diferenciación se logró al obtener el procedimiento que permite el diseño de piezas de calidad, con una capacidad de proceso que garantiza la venta de las mismas, dado que los clientes las identifican como notables, con relación a la competencia, al garantizar y comprobar el uso de materias primas de calidad.

Finalmente, la estrategia de enfoque, se concreta al ofrecer un trabajo con altos estándares de calidad, no adecuado para cualquier empresa, sino para aquellas que se ocupen en estar con niveles de variabilidad mínima, en busca del estándar seis sigma.

Con la totalidad de los resultados anteriores se evidencia que el cumplimiento de los requerimientos de los clientes, mediante una metodología establecida, como la es PPAP en la empresa propicia el reconocimiento de los clientes como una empresa cuyo enfoque a procesos, cumple con todos los requisitos especificados por los clientes.

IV. CONCLUSIONES

El desarrollo de ventajas competitivas en las empresas, independientemente del giro al que pertenecen, es de vital importancia si quieren prevalecer en el mercado.

Un camino para el desarrollo de las mismas es la búsqueda del aseguramiento de la calidad, lo que implica la disminución o eliminación de las fuentes de variabilidad en los procesos, garantizando la satisfacción de los clientes actuales y la

posibilidad de crecer en el mercado con la adquisición de clientes potenciales.

La diferenciación de las empresas a través del cumplimiento de los requisitos del cliente, es una manera de garantizar el éxito de las empresas

V. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Instituto Tecnológico de Torreón por los medios proporcionados por la realización del presente estudio, así mismo se agradece a la empresa involucrada, por atender a la solicitud de información para esta investigación.

VI. REFERENCIAS

- Todo para la ISO 9001. (16 de octubre de 2020). *Todo para la ISO 9001*.
doi:<https://calidad.genebraquality.com/index.php/2020/10/16/terminos-y-definiciones-iso-9000/>
- CEUPE magazine. (6 de enero de 2021). *CEUPE magazine*.
doi:<https://www.ceupe.com/blog/importancia-calidad-organizaciones.html>
- Díaz Muñoz, Gabriel Alejandro, & Salazar Duque, Diego Alfredo. (2021). La calidad como herramienta estratégica para la gestión empresarial. *Podium*, (39), 19-36. Epub 28 de junio de 2021. <https://doi.org/10.31095/podium.2021.39.2>
- CINCODIAS. (28 de septiembre de 2020). *CINCODIAS*.
doi:https://cincodias.elpais.com/cincodias/2020/09/25/opinion/1601048268_471795.htm
- EMPRESARIADOS. (4 de enero de 2023). *EMPRESARIADOS*.
doi:<https://empresariados.com/que-es-la-ventaja-adaptativa-y-como-influye-en-las-empresas/>
- Díaz Rocha, S. B. (6 de diciembre de 2018). *CIATEQ*.
doi:[file:///C:/Users/Propietario/Downloads/DiazRochaSaraiBetzabe%20MDGPI%20RN%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Propietario/Downloads/DiazRochaSaraiBetzabe%20MDGPI%20RN%20(1).pdf)
- TCM. (22 de enero de 2020). *TCM*.
doi:<https://www.tcmetrologia.com/blog/que-son-las-core-tools-y-para-que-se-utilizan/>
- TCM. (13 de octubre de 2021). *TCM*.
doi:<https://www.tcmetrologia.com/blog/ppap-proceso-de-aprobacion-de-piezas-para-produccion/>
- Addlink. (1 de marzo de 2022). *Addlink*.
doi:<https://www.addlink.es/noticias/minitab/3157-como-hacer-que-un-proceso-ppap-sea-sencillo-refinado-y-agradable-para-sus-clientes>
- BUEHLER. (28 de mayo de 2021). *BUEHLER*.
doi:<https://www.buehler.com/mx/blog/repetibilidad-y-reproducibilidad/>
- SPCGROUP. (14 de agosto de 2022). *SPCGROUP*.
doi:<https://spcgroup.com.mx/PRODUCTION-PART-APPROVAL-PROCESS-PPAP/#:~:TEXT=EL%20PROCESO%20DE%20APROBACI%>

C3%B3N%20DE,Y%20DESPU%C3%A9S%20DE%20LA%20
FABRICACI%C3%B3N.

- Gutierrez Pulido, H., & De la Vera Salazar, R. (2013). Control Estadístico De La Calidad Y Seis Sigma. México, D.F: McGRAW-HILL. Recuperado el 14 de enero de 2023
- 13] Reidenbach, E., & Goeke, R. (2010). SIX SIGMA ESTRATEGICA Clavs para lograr una ventaja competitiva sostenible. Estados Unidos de America: Panorama. Recuperado el 18 de marzo de 2023
- Besterfield, D. (2009). Control de Calidad. Mexico: Pearson Educación.
- Da Silva, D. (5 de agosto de 2022). Zendesk.
doi:<https://www.zendesk.com.mx/blog/ventaja-competitiva-empresa/>
- CEPYMEnews. (24 de agosto de 2022). CEPYMEnews.
doi:<https://cepymenews.es/las-3-estrategias-competitivas-genericas-de-michael-porter/>

Operación óptima de turbina eólica con DFIG con funciones de tensión en rotor que sustituye a convertidor electrónico de potencia.

López-Carrasco, M. I.¹; Loera-Palomo, R.²; Sellschopp-Sánchez, F. S¹; Álvarez-Macías, C¹.

Datos de Adscripción:

¹ Instituto Tecnológico de la Laguna. División de Estudios de Posgrado e Investigación, Av. Instituto Tecnológico de La Laguna, 27000, Primero de Cobián Centro, Torreón, Coahuila, México.
m.milopezc@correoitallaguna.edu.mx

² CONAHCyT – Instituto Tecnológico de la Laguna. 27000 Torreón, Coahuila, México.

Resumen - En el presente trabajo se describe un modelo completo de un sistema eólico de velocidad variable con un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG) para simulaciones en redes eléctricas, en donde el convertidor electrónico de potencia es sustituido por funciones de tensión en el rotor que aseguran una operación óptima de la turbina eólica, obteniendo así la máxima entrega de potencia dentro de las regiones II y III de operación. El modelo del sistema eólico involucra al modelo de la turbina eólica, transmisión mecánica y el modelo dinámico del DFIG en el marco de referencia qd; a través de las expresiones de corriente, potencia reactiva del estator, el par electromagnético, la tensión del estator y parámetros conocidos de la turbina eólica, se determinaron los enlaces de flujo por segundo de estator, de rotor y la tensión en terminales de rotor necesarias, logrando que el modelo del generador mantenga sus condiciones óptimas. Estos resultados permiten establecer las condiciones operativas que debe de satisfacer los convertidores electrónicos de potencia usados en generación eólica con DFIG.

Palabras Clave – DFIG, Condiciones iniciales, Modelado, Operación óptima, Sistema eólico.

Abstract - This research describes a complete model of a variable speed wind system with a doubly-fed induction generator (DFIG) for power grid simulations, where the power electronic converter is replaced by rotor voltage functions that ensure an optimal operation of the wind turbine, getting the maximum power of the turbine into regions II and III of operation. The wind system model requires the wind turbine model, mechanical transmission and the DFIG dynamic model in the qd reference frame; through the expressions of current, stator reactive power, electromagnetic torque, stator voltage and known wind turbine parameters, it was possible to determine the stator flux linkages per second, rotor flux linkages per second and voltage in terminals of the rotor necessary for the generator model to maintain its optimum conditions. These results allow establishing the operating conditions that must be satisfied by the power electronic converters used in wind power generation with DFIG.

Keywords – DFIG, Initial conditions, Modeling, Optimal operation, Wind System.

I. INTRODUCCIÓN

La generación de electricidad por medio de sistemas eólicos ha alcanzado una gran importancia a nivel mundial, ya que la demanda energética crece rápidamente conforme la sociedad crece y avanza. Lo anterior lleva a que se presenten problemas en el análisis de sistemas eléctricos de potencia, especialmente donde se hayan involucradas las turbinas eólicas de velocidad variable y generadores asíncronos.

El modelado de sistemas eólicos es conocido, sin embargo, la adecuación de los modelos para que satisfagan ciertas características para el análisis de sistemas de potencia es importante. En cualquier caso, una dificultad a enfrentar en sistemas que incluyen un DFIG es obtener una operación en estado estable a partir de condiciones iniciales conocidas, donde el grado de dificultad aumenta dado a que es necesario alimentar al rotor con las tensiones adecuadas con la finalidad de mantener constante la generación de potencia nominal para cualquier velocidad de viento, esta problemática ha sido cubierta parcialmente por diversos autores, los cuales presentan trabajos con diversos métodos para calcular dichas condiciones, por ejemplo, en (Feijóo, 2010, p.3) y (Amutha, 2014, p.1) se mencionan métodos basados en algoritmos iterativos Newton-Raphson, en (Seshadri, 2019, p.308) señala algoritmos iterativos con representación de condiciones en el plano complejo; los trabajos presentados en (Wu, M, 2017, p.4) y (Ekanayake et al., 2003, p.335) proponen procedimientos no iterativos con la finalidad de obtener esquemas de control de potencia, velocidad angular y de tensión en terminales de rotor; (Slootweg et al., 2001, p.4) presentan un análisis enfocado a integrar dichos generadores a la red de potencia, analizar flujos de cargas y transitorios; (Vladislav, 2002, p.92) muestra su aporte con el objetivo de diseñar controles de velocidad y análisis de transitorios; así como en (Perdana, 2008, p.77,124) enfoca su modelado para estudios de fallo en red y diseño de controladores. Sin embargo, y en su mayoría, los modelos y análisis presentados toman en cuenta al generador aislado y no presentan una representación del sistema eólico completo, además de no agregar un modelo del convertidor, por lo que las condiciones iniciales para la tensión del rotor encontradas dependen más de las condiciones deseadas en el generador que en variables de entrada en la turbina como la velocidad de viento o el par mecánico de la turbina eólica, por lo tanto no se muestran comportamientos de potencia, tensiones y corrientes con respecto a la operación variable del sistema analizado, además de no presentar una participación importante del convertidor electrónico de potencia.

En este trabajo, en el modelado y análisis del comportamiento del DFIG fue indispensable la obtención de funciones de tensión en las terminales de rotor, con el objetivo de validar la correcta operación del modelo desarrollado como un sistema eólico completo sin la directa necesidad de modelar y acoplar un

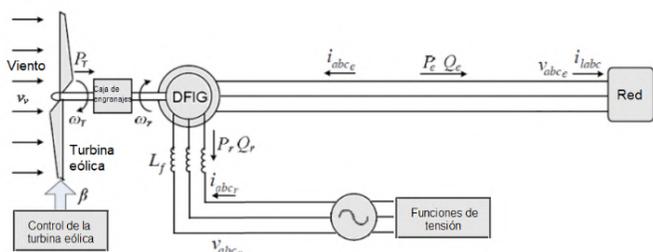
convertidor, lo cual conduce al ahorro de recursos computacionales, de tiempo de análisis y de la oportuna obtención de una representación simplificada con propósitos de análisis de flujos de potencia y de comportamientos con respecto a la velocidad de viento, viéndose como un modelo completo con una operación análoga que se manifiesta en el convertidor. Además, se ofrece un procedimiento algebraico relativamente sencillo, sin necesidad de recurrir a iteraciones y/o métodos numéricos. El trabajo propuesto no excluye posibles desarrollos futuros de sistemas de control, análisis adicionales o mejoras en su estructura.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

2.1. Modelo de sistema eólico

El sistema eólico estudiado consta de una turbina de velocidad variable que está acoplado, mediante una etapa de transmisión mecánica a un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG), un convertidor electrónico de potencia bidireccional de tipo *back-to-back*, que cumple la función de alimentar al rotor con las tensiones, corrientes y potencia necesarios para que, mediante el control de dichos parámetros, sea posible mantener la generación de electricidad, además de incrementar el rango de velocidad del generador (Kouro et al, 2015, p.8). En este trabajo se propone un sistema que permite prescindir de dicho convertidor electrónico, mediante su sustitución por funciones de tensión controladas conservando sus condiciones operativas, con el objetivo de lograr la simplicidad del análisis del sistema eólico; este sistema propuesto es mostrado en la figura 1:

Figura 1
Sistema eólico sin convertidor electrónico de potencia.



2.2. Turbina eólica

La energía cinética proveniente del viento es convertida en electricidad por medio de un sistema electromecánico, donde dicho proceso comienza con la obtención de energía mecánica dado por las álabes de la turbina eólica, siendo la potencia del viento incidente dada por (1):

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A_T v_v^3 \quad (1)$$

donde ρ es la densidad del aire, A_T es el área de barrido de los álabes y v_v es la velocidad del viento, en m/s. En (2) se muestra la potencia mecánica a la salida del eje:

$$P_T = P_v C_p = \frac{1}{2} \rho A_T v_v^3 C_p \quad (2)$$

La relación entre la potencia eólica incidente y la potencia mecánica producida por la turbina indica la eficiencia de

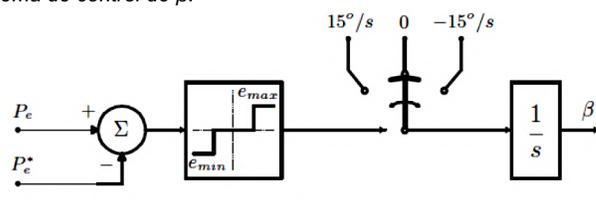
conversión, cuya relación se denomina coeficiente de potencia, la ecuación es mostrada en (3) y (4):

$$C_p(\lambda_T, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \beta^2 - c_5 \right) e^{\left(\frac{-c_6}{\lambda_i} \right)} + c_7 \lambda_T \quad (3)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda_T + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (4)$$

donde las constantes $c_1 \dots c_7$ dependen de las características aerodinámicas de la turbina. Además, las álabes cuentan con un control de rotación ajustable, donde es manipulado el ángulo de las mismas, denominado β . El control del ángulo de las palas de la turbina eólica que se utiliza dentro de este trabajo que se propone en (El-Tous, 2008, p.119), se muestra en la figura 2, en la cual las variables a comparar son la potencia nominal de la turbina eólica y la potencia generada, donde, dependiendo del valor de la señal de error, el sistema ejerce la acción de control que determina el ángulo β correspondiente a la velocidad de viento incidente.

Figura 2
Sistema de control de β .



La operación de dicho control está limitada entre 0° correspondiente a la extracción máxima de potencia desde la velocidad de viento de arranque, hasta 90° que es el peor ángulo de ataque para velocidades de viento que exceden la velocidad de corte, con la finalidad de cesar la extracción de energía para salvaguardar la estructura del sistema eólico de potenciales daños (Kouro et al., 2011, p.29). La ecuación (5) describe la relación de velocidad de punta, la cual relaciona la velocidad tangencial de la turbina con la velocidad del viento incidente:

$$\lambda_T = \frac{\omega_T R_T}{v_v} \quad (5)$$

La operación entre velocidad de arranque y nominal requiere de un ángulo de ataque de cero, con el objetivo de extraer la mayor cantidad de potencia posible del viento; es decir, los parámetros presentados pasan a ser llamados óptimos. Cuando la relación de velocidad de punta es óptima, se obtiene un coeficiente de potencia máximo, por lo tanto, a partir de (5) y considerando la velocidad de viento nominal es posible obtener la potencia óptima y, por lo tanto, al par óptimo:

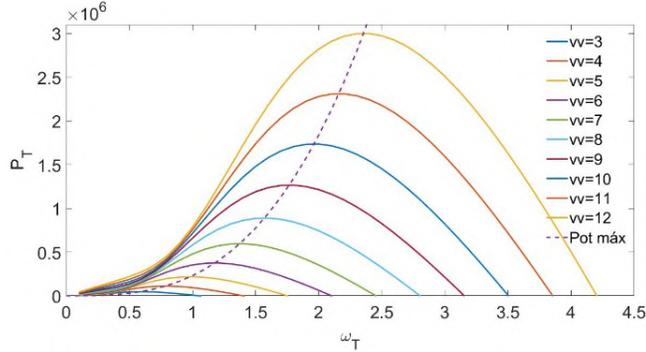
$$P_{T \text{ opt}} = \frac{1/2 \rho \pi R_T^5 \omega_{T \text{ opt}}^3}{\lambda_{\text{opt}}} C_{p \text{ max}} \quad (6)$$

$$T_{T \text{ opt}} = \frac{P_{T \text{ opt}}}{\omega_T} \quad (7)$$

En la figura 3 se muestra, en función de la velocidad angular de rotación, la relación de la potencia desarrollada por la turbina eólica para diferentes velocidades de viento, así como la potencia óptima objetivo.

Figura 3

Potencia de la turbina con respecto a la velocidad angular.



2.3. Acoplamiento mecánico

El acople mecánico entre la turbina y el generador eléctrico es dado por la ecuación (8) según (Beltrán et al, 2009, p.2):

$$J_{eq} \frac{d\omega_T}{dt} = T_T - B_{eq}\omega_T - NT_{em} \quad (8)$$

Donde

J_{eq} es la inercia asociada a la masa de la turbina eólica.

ω_T es la velocidad angular de la turbina eólica.

T_T es el par generado por la fuerza del viento.

B_{eq} es el coeficiente de fricción viscoso debido a la resistencia de rotación por el aire.

N es la relación de transmisión.

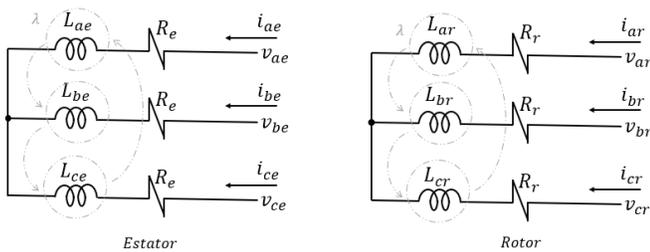
T_{em} es el par electromagnético del rotor, depende de la demanda de corriente eléctrica en la carga

2.4. Modelo del DFIG

Para obtener el modelo del DFIG es necesario comenzar con la obtención de las ecuaciones de tensión de fase para estator y rotor, los circuitos trifásicos representativos se muestran en la figura 4 (Krause et al, 2002, p.143):

Figura 4

Circuitos trifásicos de estator y rotor



Dado que el circuito del estator induce campos electromagnéticos, tensiones y corrientes en el circuito del rotor, se considera que ambas partes están magnéticamente acopladas, por lo tanto, se debe de analizar un circuito con respecto al otro, en este caso fue referido el circuito del rotor al

estator (Ong, 1998, p. 175), considerando al sistema magnético acoplado como lineal y en términos de enlaces de flujo. De esta manera se pueden representar las ecuaciones de tensión, y con la finalidad de reducir el número de ecuaciones y su variación en el tiempo, las ecuaciones trifásicas balanceadas se transforman al marco de referencia $qd0$; además, y con el propósito de simplificar el procedimiento, se representan los enlaces de flujo como enlaces de flujo por segundo:

$$\psi = \omega_b \lambda \quad (9)$$

Obteniéndose para el estator

$$v_{qe} = R_e i_{qe} + \frac{d\psi_{qe}}{dt} + \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{de} \quad (10)$$

$$v_{de} = R_e i_{de} + \frac{d\psi_{de}}{dt} - \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{qe} \quad (11)$$

Y para el rotor

$$v'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \frac{d\psi'_{qr}}{dt} + \frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b} \psi'_{dr} \quad (12)$$

$$v'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \frac{d\psi'_{dr}}{dt} - \frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b} \psi'_{qr} \quad (13)$$

En donde, la velocidad angular base se considera igual a la velocidad angular del marco de referencia síncrono:

$$\omega_B = \omega \quad (14)$$

Y el deslizamiento se obtiene a través de:

$$s = \frac{\eta_{sinc} - \eta_r}{\eta_{sinc}} = \frac{\omega - \omega_r}{\omega_B} \quad (15)$$

El par electromagnético con las variables eléctricas de estator es definido por (16):

$$T_{em} = \frac{P}{2} \frac{3}{2} \frac{1}{\omega_B} (\psi_{de} i_{qe} - \psi_{qe} i_{de}) \quad (16)$$

Las corrientes de estator y rotor son

$$i_{qe} = \frac{(\psi_{qe} - \psi_{mq})}{x_{le}} \quad (17)$$

$$i_{de} = \frac{(\psi_{de} - \psi_{md})}{x_{le}} \quad (18)$$

$$i'_{qr} = \frac{(\psi'_{qr} - \psi_{mq})}{x'_{lr}} \quad (19)$$

$$i'_{dr} = \frac{(\psi'_{dr} - \psi_{md})}{x'_{lr}} \quad (20)$$

Considerando entonces las siguientes ecuaciones, donde (21) es la reactancia de la rama magnetizante del estator

$$x_M = \omega_b L_M \quad (21)$$

L_M representa la inductancia mutua de los devanados del estator. Las ecuaciones (22)-(24) representan la saturación magnética (Krause et al, 2002, p.185):

$$\psi_{md} = x_{ad} \left(\frac{\psi_{de}}{x_{le}} + \frac{\psi'_{dr}}{x'_{lr}} \right) \quad (22)$$

$$\psi_{mq} = x_{aq} \left(\frac{\psi_{qe}}{x_{le}} + \frac{\psi'_{qr}}{x'_{lr}} \right) \quad (23)$$

$$x_{aq} = x_{ad} = \left(\frac{1}{x_M} + \frac{1}{x_{le}} + \frac{1}{x'_{lr}} \right)^{-1} \quad (24)$$

Al sustituir las ecuaciones de la corriente (17)-(20) en las de tensión (10)-(13) se obtienen nuevas ecuaciones de tensión (25)-(28) para el estator y el rotor respectivamente en función de las reactancias:

$$\frac{d\psi_{qe}}{dt} = \omega_b [v_{qe} - \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{de} + \frac{R_e}{x_{le}} (\psi_{mq} - \psi_{qe})] \quad (25)$$

$$\frac{d\psi_{de}}{dt} = \omega_b \left[v_{de} + \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{qe} + \frac{R_e}{x_{le}} (\psi_{md} - \psi_{de}) \right] \quad (26)$$

$$\frac{d\psi'_{qr}}{dt} = \omega_b [v'_{qr} - \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{dr} + \frac{R'_r}{x'_{lr}} (\psi_{mq} - \psi'_{qr})] \quad (27)$$

$$\frac{d\psi'_{dr}}{dt} = \omega_b [v'_{dr} - \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{qr} + \frac{R'_r}{x'_{lr}} (\psi_{md} - \psi'_{dr})] \quad (28)$$

Las potencias real y reactiva en el estator en qd (Krause et al, 2002, p. 139) son calculadas por medio de la ecuación (29) y (30) respectivamente:

$$P_{qde} = \frac{3}{2} (v_{qe} i_{qe} + v_{de} i_{de}) \quad (29)$$

$$Q_{qde} = \frac{3}{2} (v_{qe} i_{de} - v_{de} i_{qe}) \quad (30)$$

2.5. Cálculo del punto de operación del DFIG

El cálculo de condiciones iniciales parte de tomar las ecuaciones de tensión del modelo en estado estable, por lo tanto, las ecuaciones diferenciales (25)-(28) son igualadas a cero, y la ecuación que representa al acople mecánico descrita en (8), y despreciando el coeficiente de fricción, es considerada ahora en (31), donde N es la relación de transmisión por el acople mecánico, con respecto al eje del DFIG:

$$T_{em} = \frac{T_T}{N} \quad (31)$$

Es esta parte, donde el acople mecánico cumple su función de relacionar directamente la velocidad de viento con las variables del generador, el punto de equilibrio se obtiene al ser igualados el par de la turbina eólica y el del par electromagnético. Por lo que, se obtiene un sistema de cuatro ecuaciones con seis incógnitas descritas en (32)-(35):

$$0 = v_{qe} - \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{de} + \psi_{qe} \frac{R_e x_{aq}}{x_{le}} \left(\frac{1}{x_{le}} - \frac{1}{x_{aq}} \right) + \psi'_{qr} \frac{R_e x_{aq}}{x_{le} x'_{lr}} \quad (32)$$

$$0 = v_{de} + \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{qe} + \psi_{de} \frac{R_e x_{aq}}{x_{le}} \left(\frac{1}{x_{le}} - \frac{1}{x_{aq}} \right) + \psi'_{dr} \frac{R_e x_{aq}}{x_{le} x'_{lr}} \quad (33)$$

$$0 = v'_{qr} - \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{dr} + \psi'_{qr} \frac{R_r x_{aq}}{x'_{lr}} \left(\frac{1}{x'_{lr}} - \frac{1}{x_{aq}} \right) + \psi_{qe} \frac{R_r x_{aq}}{x_{le} x'_{lr}} \quad (34)$$

$$0 = v'_{dr} + \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{qr} + \psi'_{dr} \frac{R_r x_{aq}}{x'_{lr}} \left(\frac{1}{x'_{lr}} - \frac{1}{x_{aq}} \right) + \psi_{de} \frac{R_r x_{aq}}{x_{le} x'_{lr}} \quad (35)$$

Dado que la potencia activa depende de la potencia capturada por la turbina eólica, se tomó la ecuación de la potencia reactiva, así que, si se toman (30) y la ecuación del par electromagnético (16) y se sustituyen las corrientes (17)-(20) y las de saturación magnética (22)-(24) es posible obtener:

$$T_{em} = \frac{3P x_{aq}}{4\omega_b x_{le} x'_{lr}} (\psi_{qe} \psi'_{dr} - \psi_{de} \psi'_{qr}) \quad (36)$$

$$Q_{qde} = \frac{3x_{aq}}{2x_{le}} \left[v_{qe} \left(\frac{\psi_{de}}{x_{aq}} - \frac{\psi_{de}}{x_{le}} - \frac{\psi'_{dr}}{x'_{lr}} \right) - v_{de} \left(\frac{\psi_{qe}}{x_{aq}} - \frac{\psi_{qe}}{x_{le}} - \frac{\psi'_{qr}}{x'_{lr}} \right) \right] \quad (37)$$

Por lo que ahora se cuentan con seis ecuaciones y seis incógnitas. Si al despejar ψ'_{qr} y ψ'_{dr} de (32) y (33) respectivamente, y al sustituir en (34)-(37), se obtienen ahora un sistema de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas, mostradas en (38)-(41), donde se logra eliminar la dependencia a ψ'_{qr} y ψ'_{dr} :

$$0 = v'_{qr} + v_{de} \left[\frac{(\omega - \omega_r) x_{le} x'_{lr}}{\omega_b R_e x_{aq}} \right] - v_{qe} \left[\frac{(x_{aq} - x'_{lr}) x_{le} R_r}{x_{aq} x'_{lr} R_e} \right] + \psi_{qe} \left[\frac{(\omega - \omega_r) \omega x_{le} x'_{lr}}{\omega_b^2 R_e x_{aq}} + \frac{R_r x_{aq}}{x_{le} x'_{lr}} - \frac{(x_{aq} - x'_{lr})(x_{aq} - x_{le}) R_r}{x_{aq} x'_{lr} x_{le}} \right] + \psi_{de} \left[\frac{(\omega - \omega_r)(x_{aq} - x_{le}) x'_{lr}}{\omega_b x_{le} x_{aq}} + \frac{(x_{aq} - x'_{lr}) x_{le} \omega R_r}{\omega_b R_e x_{aq} x'_{lr}} \right] \quad (38)$$

$$0 = v'_{dr} - v_{de} \left[\frac{(x_{aq} - x'_{lr}) x_{le} R_r}{x_{aq} x'_{lr} R_e} \right] - v_{qe} \left[\frac{(\omega - \omega_r) x_{le} x'_{lr}}{\omega_b R_e x_{aq}} \right] - \psi_{qe} \left[\frac{(\omega - \omega_r)(x_{aq} - x_{le}) x'_{lr}}{\omega_b x_{le} x_{aq}} + \frac{(x_{aq} - x'_{lr}) x_{le} \omega R_r}{\omega_b R_e x_{aq} x'_{lr}} \right] + \psi_{de} \left[\frac{(\omega - \omega_r) \omega x_{le} x'_{lr}}{\omega_b^2 R_e x_{aq}} + \frac{R_r x_{aq}}{x_{le} x'_{lr}} - \frac{(x_{aq} - x'_{lr})(x_{aq} - x_{le}) R_r}{x_{aq} x'_{lr} x_{le}} \right] \quad (39)$$

$$T_{em} = \frac{3P}{4\omega_b R_e} \left[-v_{de} \psi_{qe} - \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{qe}^2 + v_{qe} \psi_{de} - \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{de}^2 \right] \quad (40)$$

$$Q_{qde} = \frac{3\omega}{2\omega_b R_e} [v_{qe} \psi_{qe} + v_{de} \psi_{de}] \quad (41)$$

De la ecuación de la potencia reactiva (30), se opta por despejar ψ_{qe} y es sustituido dentro de la ecuación del par electromagnético (16), obteniéndose una ecuación cuadrática mostrada en (42):

$$0 = \psi_{de}^2 \left[\frac{\omega}{\omega_b} \frac{(v_{qe}^2 + v_{de}^2)}{v_{qe}^2} \right] + \psi_{de} \left[\frac{-(v_{qe}^2 + v_{de}^2)v_{qe} - 4/3 R_e Q_e v_{de}}{v_{qe}^2} \right] + \left[\frac{4\omega_b R_e T_{em}}{3P} + \frac{2\omega_b R_e Q_e}{3\omega v_{qe}} \left(v_{de} + \frac{2R_e Q_e}{3v_{qe}} \right) \right] \quad (42)$$

Donde las soluciones se presentan en la ecuación (43)

$$\psi_{de1,2} = \omega_b \left[\frac{-(v_{qe}^2 + v_{de}^2)v_{qe} - 4/3 R_e Q_e v_{de}}{2\omega(v_{qe}^2 + v_{de}^2)} \right] * \left\{ -1 \pm \sqrt{1 - \frac{8\omega R_e v_{qe}^2 (v_{qe}^2 + v_{de}^2) \left[\frac{2T_{em}}{P} + \frac{Q_e}{\omega v_{qe}} \left(\frac{3v_{de}v_{qe} + 2R_e Q_e}{3v_{qe}} \right) \right]}{3[-(v_{qe}^2 + v_{de}^2)v_{qe} - 4/3 R_e Q_e v_{de}]^2}} \right\} \quad (43)$$

Con la cual, finalmente se consigue una ecuación que solo depende de valores ya conocidos; por lo tanto, dadas las tensiones del estator, se conoce el enlace de flujo por segundo ψ_{de} , con el cual es posible encontrar ψ_{qe} y ser sustituidos en (38) y (39) para encontrar las tensiones producidas en el rotor según la velocidad de viento de entrada. Cabe mencionar que el par electromagnético será igualado al par óptimo, asegurando que las tensiones de rotor llevan al sistema eólico a su punto de operación óptimo.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las tablas 1 y 2 se muestran los parámetros utilizados para realizar el presente estudio, tomando como referencia un sistema eólico de 3MW (Wu, 2017, p. 444, 451).

Tabla 1

Datos de la turbina eólica de 3MW.

C1	0.3915
C2	116
C3	0.4
C4	0
C5	5
C6	21
C7	0.0192
Radio	43.36 m
Velocidad viento arranque	7 m/s
Velocidad viento nominal	12 m/s
Velocidad viento de corte	25 m/s
Potencia nominal	3 MW
Par nominal	1273 KN m
Velocidad nominal del rotor	22.3 RPM = 2.38 rad/s
C _p óptimo	0.48
Λ _T óptima	8.5128
Inercia J _{eq}	680 Kg m ²
Relación de transmisión	96

Tabla 2

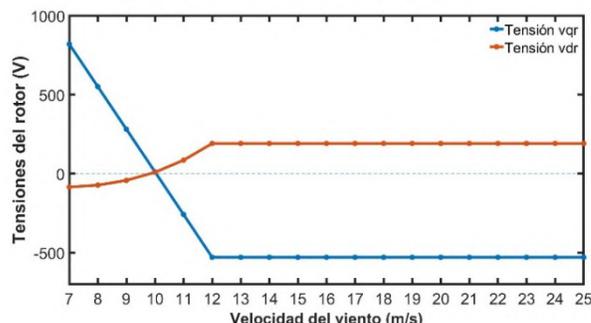
Parámetros y especificaciones de DFIG de 3MW.

Frecuencia estator	60 Hz
Número de polos	4
Resistencia devanados estator	27.285 mΩ
Resistencia devanados rotor	21.264 mΩ
Inductancia devanados estator	1.785 mH
Inductancia devanados rotor	1.607 mH
Inductancia mutua estator y rotor	15.168 mH
Velocidad del marco de referencia	377 rad/s
Velocidad base	377 rad/s
Reactancia devanados estator	0.6729 Ω
Reactancia devanados rotor	0.6058 Ω
Reactancia de rama de magnetización estator	5.7182 Ω

Para obtener las condiciones iniciales requeridas, se especifica la velocidad de viento de entrada al sistema y mediante el uso del programa *MATLAB*® son obtenidas las curvas características de tensión, corriente y potencia en el rotor. En la figura 5 se muestra la operación del DFIG con respecto a la región II de operación (de 7 m/s a 12 m/s), la cual muestra un comportamiento variable, en contraste a la región III (12 m/s a 25 m/s) donde se aprecia un suministro de tensión constante necesaria para mantener la generación de potencia eléctrica nominal. Cabe mencionar que el comportamiento de las tensiones de la región III se debe a que el control del ángulo de pala está actuando, regulando la potencia del sistema eólico.

Figura 5

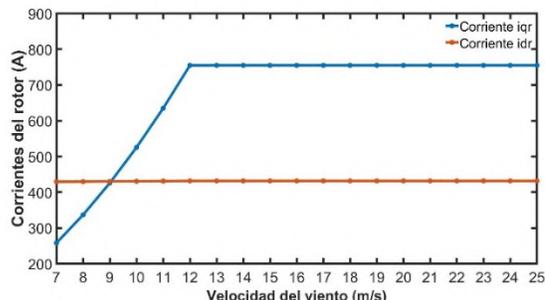
Curvas características de tensión del rotor.



En la figura 6 se aprecia un aumento en la demanda de la corriente i_{qr} en el rotor conforme aumenta la velocidad del viento, y al rebasar a la velocidad de viento nominal de 12 m/s se mantiene constante (región III). En cuanto a la corriente i_{dr} , esta se mantiene constante tanto en la región II como en la región III de operación.

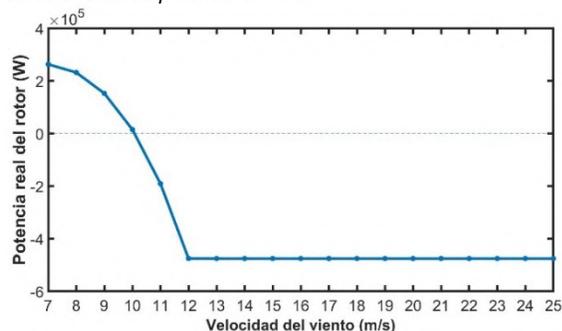
Figura 6

Curvas características de corriente del rotor.



En la figura 7 se aprecia la potencia del rotor, en la cual, conforme alcanza la velocidad de viento nominal, se obtienen valores negativos asociados a la generación de electricidad, correspondiente a los comportamientos de tensión y en especial de las corrientes mostradas anteriormente.

Figura 7
Curva característica de potencia en rotor.



El modelo obtenido fue simulado en el programa *Simulink*® validando la correcta operación del sistema, proyectada anteriormente en las figuras 5, 6 y 7. Fueron seleccionadas las velocidades de viento 12 m/s, 7 m/s y 10 m/s respectivamente, con una duración de 40 segundos cada uno. Es posible apreciar en la figura 8 que los comportamientos obtenidos son correspondientes a las figuras anteriormente descritas, presentándose siempre una de las tensiones negativas (región II). En la figura 9 se muestra que las corrientes se mantienen positivas al igual que en la figura 6 (región II).

Figura 8
Operación de tensión en rotor en región II.

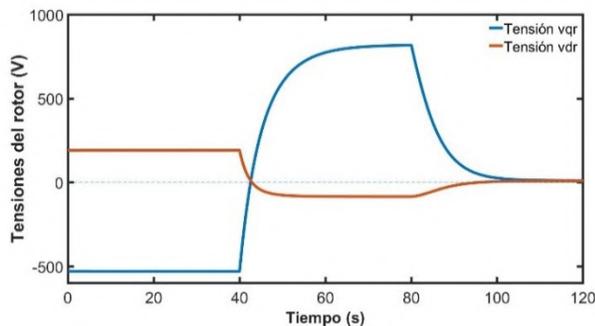
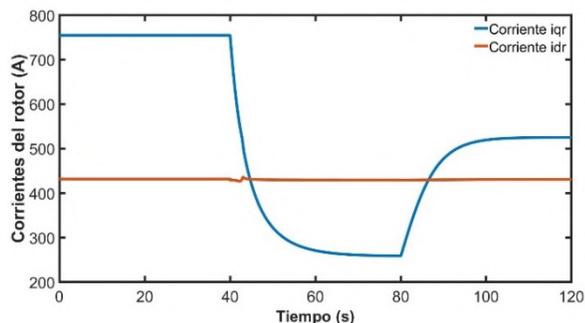
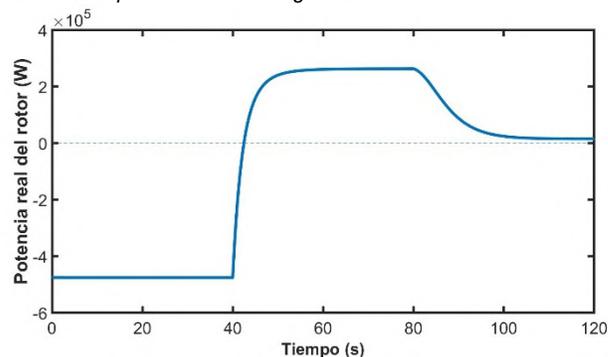


Figura 9
Operación de las corrientes en rotor región II.



En la figura 10 se muestra el comportamiento de la potencia en el rotor, donde se aprecia que para una velocidad de viento de 12 m/s esta es negativa. El cambio de velocidad de viento a 7 m/s implica que la potencia del rotor sea positiva, como se estableció en la figura 7. Este comportamiento se da como consecuencia de la tensión y corriente bidireccionales descritos anteriormente.

Figura 10
Operación de la potencia en rotor región II.



IV. CONCLUSIONES

Del estudio realizado en este trabajo, se han obtenido funciones de tensión que son capaces de alimentar al rotor del DFIG y de proveer de potencia bidireccional, los cuales operan análogamente al de un convertidor de potencia del tipo *back to back*, por lo que fue posible representar al sistema eólico como un modelo que abarca a la turbina eólica, el control de ángulo de las álabes, el acoplamiento mecánico, el DFIG y dichas funciones de tensión en rotor sin la necesidad de acoplar el modelo del convertidor electrónico de potencia, reduciendo así la complejidad del proceso de modelado, y además fue posible la obtención de condiciones iniciales enfocadas a la operación del DFIG con sólo la velocidad de viento como entrada, lo cual reduce significativamente el tiempo de simulación del sistema. Por lo tanto, este trabajo propone un modelo completo que ofrece la posibilidad de realizar análisis adicionales o de ser modificado con la finalidad de expandir las oportunidades de estudio de un sistema eólico tan complejo, como lo es el de velocidad variable.

V. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue apoyada por CONACYT, México, bajo el proyecto 1982 de cátedras CONACYT; y por PRODEP a través de IFLAG-CA-10.

VI. REFERENCIAS

Amutha, N. y Kalyan Kumar, B. (2014). Initialization of DFIG based wind generating system. *Eighteenth National Power Systems Conference (NPSC)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/NPSC.2014.7103814>

Beltrán, A., González, E., Morilla, F. y Vázquez, F. (2009). *Modelado y Análisis de Interacción de un Generador Eólico para Control*

Multivariable. Congreso Anual de la Asociación de México de Control Automático. Zacatecas, México.

- Ekanayake, J.B., Holdsworth, L., Wu, X.G. y Jenkins, N. (2003). Direct solution method for initializing doubly-fed induction wind turbines in power system dynamic models. *IEEE, Proc.-Gener. Transm. Distrib*, 150(3), 1-9.
<https://doi.org/10.1049/ip-gtd:20030245>
- El-Tous, Y. (2008). Pitch Angle Control of Variable Speed Wind Turbine. *American J. of Engineering and Applied Sciences*, 1(2), 118-120.
<https://doi.org/10.3844/ajeassp.2008.118.120>
- Feijóo Lorenzo, A. E. y Medina Padrón, J. F. (2010). Calculating Steady State Operating Conditions for Doubly-Fed Induction Generator Wind Turbines. *IEEE Transactions on power systems*, 25(2), 1-7.
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2036853>
- Kouro, S., Lang, Y., Wu, B. y Zargari, N. (2011). *Power Conversion and Control of Wind Energy Systems*. IEEE PRESS.
- Kouro, S., Narimani, M., Paresh C. Sen, P.C., Wu, B. y Yaramasu, V. (2015). High-Power Wind Energy Conversion Systems: State-of-the-Art and Emerging Technologies. *Proceedings of the IEEE*, 103(5), 740-788.
<https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2378692>
- Krause, P. C., Sudhoff, S. D. y Wasynczuk, O. (2002). *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*. IEEE PRESS.
- Ong, C. (1998). *Dynamic Simulation of Electric Machinery Using MATLAB®/SIMULINK*. PRENTICE HALL PTR.
- Perdana, A. (2008). *Dynamic Models of Wind Turbines* [Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden].
<https://core.ac.uk/download/pdf/70577950.pdf>
- Seshadri Sravan Kumar, V. (2019). Computation of Initial Conditions for Dynamic analysis of a Doubly Fed Induction Machine based on Accurate Equivalent Circuit. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 307-313.
<https://doi.org/10.1109/IEMDC.2019.8785085>
- Slootweg, J.G., Kling, W.L., Polinder, H. y (2001). Initialization of Wind Turbine Models in Power System Dynamics Simulations. *IEEE Porto Power Tech Proceedings*, 1-6.
<https://doi.org/10.1109/PTC.2001.964827>
- Vladislav, A. (2002). Variable-Speed Wind Turbines with Doubly-Fed Induction Generators. Part I: Modelling in Dynamic Simulation Tools. *SAGE journals, Wind Engineering*, 26(2), 1-24.
<https://doi.org/10.1260/030952402761699278>
- Wu, B. y Yaramasu, V. (2017). *Model predictive control of wind energy conversion systems*. IEEE PRESS.
- Wu, M., y Xie, L. (2018). Calculating Steady-State Operating Conditions for DFIG-based Wind Turbines. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 9(1), 293-301.
<https://doi.org/10.1109/TSTE.2017.2731661>

Disminución del porcentaje de defectos en línea de producción de una empresa automotriz mediante el uso de Lean Manufacturing

Remigio-Lopez, S.K.¹; Pinales-Valdez, E.G.²; Valdez-Diaz J.M.²; Carrera-Barraza, M.J.²; Carrera-Barraza, B.³

¹ Autosistemas de Torreón S.A. de C.V. Pipila 210, Alamedas CP: 35805. Cuencame,, Durango Coordinadas GPS:25.5659216, -103.4834623

² Tecnológico Nacional de México: campus Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Avenida Tecnológico N° 1555. Periférico Lerdo Km 14.5 Placido Domingo, cp. 35150, Lerdo Durango México. jose.vd@itslerdo.edu.mx

³ Tecnológico Nacional de México: campus Instituto Tecnológico de Torreón, carretera antigua Torreón San Pedro km 7.5 cp. 27170 Torreón Coahuila, México.

I. INTRODUCCIÓN

Lean Manufacturing es más que una serie de herramientas esenciales para el aumento de productividad, es una filosofía de cultura de calidad y de forma de trabajo, que se puede aplicar en cualquier tipo de industria que repercute en mejorar la calidad en el producto y tener a trabajadores motivados para hacer las cosas cada vez mejor.

Manufactura esbelta como es conocida en español Lean Manufacturing. también es llamada producción ajustada, producción limpia o producción sin desperdicios, es un modelo de gestión enfocado a la creación de flujo, para poder entregar el máximo valor para los clientes, utilizando para ello los mínimos recursos necesarios (Lean Cleaning, 2017), es decir es una herramienta encaminada a la eficiencia derivada del Toyota Production System, enfocada en la salida de los procesos productivos

Una empresa consiente de la importancia de instaurar Lean Manufacturing como metodología de trabajo es una empresa que asegura la competitividad en todos aspectos y logra permanencia a lo largo del tiempo, a través de la eliminación de las Mudas, cuya palabra proviene del japonés y cuyo significado literal es algo inútil o que genera algún tipo de desperdicio. (Merzthal Toranzo, 2021)

Así como del empowerment, dado que este es una clave esencial de Lean Manufacturing, que permite confiar a los empleados tareas importantes, bajo la premisa que pueden aprender nuevas habilidades e incluso hacerse cargo de actividades mientras no se encuentre el líder cerca, en pocas palabras empoderarlos con estas responsabilidades puede ayudar a la mejora continua. (REVERSCORE, 2020)

Como se ha mencionado Lean Manufacturing o metodología Toyota es un sistema de trabajo que pone todo su esfuerzo en la mejora de la producción. Basa su éxito en la eliminación de actividades que no aportan valor al proceso productivo, lo anterior con la aplicación de los elementos que forman la base de la filosofía y las cuales corresponden a la estandarización del trabajo, la nivelación de la producción como medio utilizado para adaptar el flujo al comportamiento de la demanda, o bien llamado. heijunka (Salazar, 2019) y kaizen conceptualizada como la lluvia de ideas e implementación de actividades diarias que mejoran continuamente los procesos. (kaizen, 2023)

Cuando la metodología Toyota es aplicada correctamente brindará beneficios a largo plazo para la organización, entre los que se encuentran (Linked in,2018) :

Resumen - En la industria automotriz se considera de suma importancia el cumplimiento de estándares de calidad como ventaja competitiva, por lo que el objetivo de este proyecto consistió en alcanzar la meta interna en relación al porcentaje de defectos admitidos de un máximo del 22%, por lo anterior se definió la línea de producción, la cual se mejoró hasta alcanzar la meta. El porcentaje de defectos promedio medido mes a mes era mayor al 40%.

Basado en los datos anteriores se aplicaron diferentes herramientas de manufactura esbelta, se llevó a cabo un cambio de liderazgo en dicha línea que ayudó en gran medida para ver reflejado los resultados, se realizaron actividades para mantener la motivación en el personal de trabajo de la línea y se aplicó el uso de la metodología interna Hai Q, para lograr la implementación total de la nueva forma de trabajo. Una vez establecida la nueva forma de producción en la línea se llevaron a cabo las mediciones pertinentes obteniendo como resultado un porcentaje de defectos del 20.07%, cumpliendo la meta establecida.

Palabras Clave - Calidad, Defectos, Kanban, Lean Manufacturing, Mejora continua, Productividad.

Abstract - Compliance to Quality standards is a key competitive advantage in automotive industry therefore this project objective is to reach internal goal of max 22% of rejection rate, production line was improved to meet this goal average defective rate month to month was above 40%.

Based on above information, different lean manufacturing tools were used, leadership change was done in this production line which helped to show results improvements, different activities were performed to maintain personnel motivation at work and internal methodology Hai Q was applied to get full implementation of new work Methodology. New measurements were done once new production line methodology was established getting a defective rate of 20.07%, meeting established goal.

Keywords – Continuous improvement, Defects, Kanban, Lean Manufacturing, Productivity, Quality.

- La eliminación de recursos y tiempos perdidos.
- Encontrar alternativas de bajo costo a tecnología cara.
- Construir una cultura de aprendizaje para lograr mejorar de manera continua.
- Desarrollar calidad en los sistemas de trabajo

Se estima que las empresas más competitivas a nivel mundial utilizan Lean Manufacturing por lo que podemos concluir que una empresa que no utiliza esta herramienta está en una desventaja muy grande. Varios casos de éxito de la aplicación de esta metodología Lean se han suscitado en Estados Unidos donde empresas como Nike obtuvieron grandes resultados en cuanto a la disminución de la tasa de defectos al 50%, el tiempo de entrega al 40%, el mejoramiento de su productividad en un 20% y reconociendo además la aplicación del modelo mucho más rápido que en otras empresas. (Palaleo Torres, 2022)

Un defecto se puede definir como cualquier instancia en la que un producto no cumple con las especificaciones de diseño o fabricación. Si bien la posibilidad de una reproducción exacta en copia carbón es nula en la gran mayoría de los casos, las piezas y los productos se pueden fabricar o producir dentro de parámetros aceptables. (Worximity, 2018)

Así que, en este proyecto se utilizan técnicas y herramientas de Lean Manufacturing con el objetivo de establecer y uniformar un procedimiento que permita mejorar de manera continua la reducción de defectos o actividades que no se consideren de valor agregado, las cuales son definidas bajo este nombre en cualquiera de las siguientes circunstancias (Muñoz Guevara, 2022):

- El cliente no se encuentra dispuesto a pagar por esa actividad.
- La actividad no transforma físicamente la materia prima o material en proceso.
- La actividad no está realizada de manera satisfactoria, cumpliendo los estándares de calidad.

Para la realización del proyecto se procedió a identificar las variables consideradas como variables críticas, estas favorecen la disminución del porcentaje de unidades defectuosas y así mismo ayudan a reducir el producto no conforme al nivel mínimo. Por esta razón se consideró diseñar un plan que de oportunidad a mejorar por medio de un diagnóstico que logre identificar las causas de las raíces principales del problema de alto margen de unidades defectuosas y una vez identificadas implementar y controlar el plan de mejora que fue planteado en este proyecto.

Todo esto debido a la necesidad de la empresa automotriz de minimizar el porcentaje de defectos que se generó en sus líneas de producción. Por eso, a lo largo de este proyecto se trabaja la pregunta ¿es posible que aumente la productividad si se logrará disminuir el porcentaje defectuoso? A través de este estudio se podrá establecer esto y se podrá contribuir al mejoramiento de la misma.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

El presente proyecto se realizó en una empresa manufacturera de origen japonés dedicada a la fabricación de arneses automotrices. Actualmente la planta tiene clientes líderes a nivel mundial en la industria automotriz.

Este proyecto inicio recolectando la información de las líneas que presentaban un mayor porcentaje de defectos en el mes de agosto de 2021, mediante la realización de un mapeo de procesos, a través de un diagrama de flujo, en el cual se ponía de manifiesto la manera de realizar el proceso.

En particular se decidió trabajar con la línea que arrojó un porcentaje de defectos más alto. A lo largo del mes de agosto se presentaron distintos defectos por parte de diferentes operadores, por lo que se decidió implementar algunas herramientas de Lean Manufacturing para lograr disminuir el número de defectos en dicha línea.

En la Tabla 1 se muestran los datos de la línea en cuestión en el mes de agosto.

Tabla 1
Datos de base mes de agosto.

	Esperados	Obtenidos
Defectos	66	136
Producción	8565	6825
In process	1770	3003
In Process %	20.66%	43.99%

Figura 1
Defectos generados en el mes de agosto.

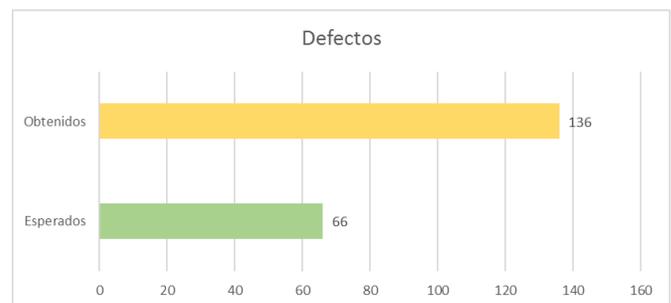
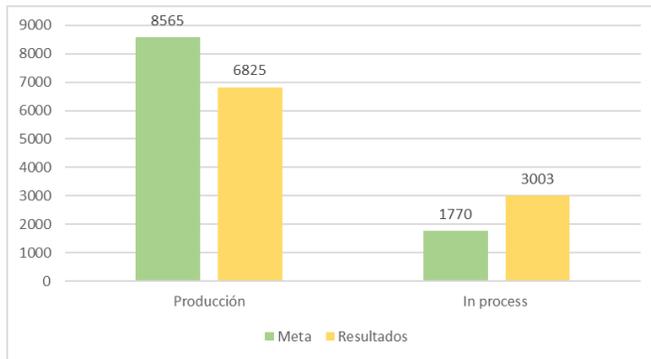


Figura 2
Producción real vs. producción en proceso mes de agosto.

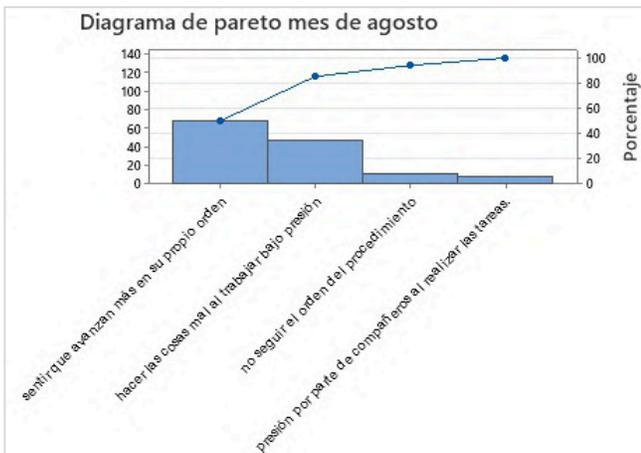


Con la elaboración y la implementación de un plan de mejora, se busca reducir un 12% como mínimo el número de defectos en esta línea, así como tener un mejor control de la producción. Se pretende que este porcentaje se mantenga dentro de la nueva meta de 4 defectos por día (1.03%). Se tomaron como base los datos del mes de agosto para lograr hacer la correcta comparación de los meses siguientes en los que se implementó el plan de mejora.

Con los datos recolectados, se pudieron identificar distintas causas que ocasionan los defectos de dicha línea tales como

1. No seguir el orden del procedimiento
2. Hacer las cosas mal al trabajar bajo presión
3. Sentir que avanzan más en su propio orden
4. Presión por parte de compañeros al realizar las tareas.

Figura 3
Diagrama de Pareto mes de agosto.



En base a la recolección de datos mencionada anteriormente se observa en la figura 3 Diagrama de Pareto mes de agosto que la causa encontrada con una mayor frecuencia corresponde a sentir que avanzan mas en su propio orden.

Ante esta problemática, se diseñó un plan de mejora que cuenta con el objetivo de reducir como mínimo un 12% el porcentaje defectuoso de la línea, esto mediante distintas actividades empleadas a lo largo del mes de septiembre y octubre de 2021, esperando ver resultados en estos meses y lograr hacer la comparación correspondiente con el mes de agosto 2021. Con ayuda de los supervisores de producción, procesos, entrenamiento y calidad se tomaron en cuenta ciertas actividades que podrían ayudar a la reducción de defectos, se tomaron las que se consideraron mejores opciones y se procedió a implementarlas.

Entre las acciones realizadas se procedió a llevar a cabo un entrenamiento a los operadores con el fin de identificar la forma correcta de inserción mediante el entrenamiento de imagen considerando los elementos correspondientes a el concepto de fabrica visual que consiste en que los recursos visuales refuerzan los estándares y señalan las anomalías. Esto es especialmente importante durante la fase inicial de implementación de la manufactura esbelta, cuando las empresas usan conceptos como 5S, Trabajo Estándar, y Mantenimiento Productivo Total para crear una base de estabilidad operativa. (Rodriguez, 2019)

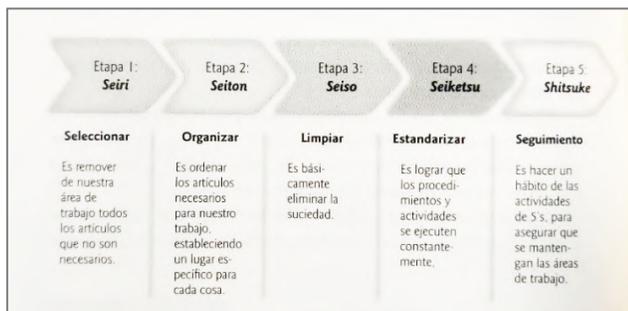
Esta gestión visual en cada estación incluía el uso de tarjetas KANBAN. Los operadores fueron enviados al área de entrenamiento donde se les otorgo la capacitación para la identificación de tarjetas KANBAN, donde se aplicó el ejercicio, tomó tiempos y se evaluó si el llenado es correcto o no.

Se realizó la evaluación de asimilación para operadores de sub-ensamble, en un periodo de 20 minutos, 2 veces en el día. Esta etapa consistió en utilizar diez minutos para estudiar el método correcto y los diez minutos restantes para contestar varias veces la evaluación, esto con el fin de poder comprender de forma correcta la metodología.

Las herramientas Lean constituyen un gran avance para la implementación de las mejoras en los procesos que generan valor en un negocio. Sin embargo, uno de los elementos de gran importancia para esto tiene que ver con la cultura y los hábitos desarrollados a lo largo del tiempo. Por ello al hablar de orden y limpieza, se considera no solo la aplicación de una herramienta básica sino el desarrollo de buenos hábitos de orden y limpieza que establezcan bases más consistentes

Otra acción realizada fue la implementación de la metodología 5's en la línea de producción. La figura 4 ilustra como se construye mediante el desarrollo por medio de las siguientes etapas. (Socconini, 2015)

Figura 4
Etapas de implementación 5's



En el contexto internacional se puede evidenciar la importancia que ha tomado las 5S, varios investigadores e instituciones se han dedicado a estudiar esta metodología y evaluar su implementación.

Dentro de la implementación de la metodología se concientizo a los trabajadores el alcance de las 5's para lograr implementarlas en conjunto esto con el fin de optimizar su entorno de trabajo, facilitar su labor y potencializar su capacidad para la detección de problemas.

Se otorgaron a los trabajadores las herramientas adecuadas para realizar su labor y a su vez se eliminó de la línea de producción aquellos elementos que puedan dificultarla, se eliminaron tiempos no productivos asociados a la búsqueda de materiales y desplazamientos que no eran necesarios, se realizó una limpieza completa del sitio de trabajo y de las máquinas que se emplean en el proceso de producción, se mantuvieron altos niveles de organización y limpieza y como punto final se capacito a los trabajadores con el objetivo de que de manera autónoma puedan realizar dichas tareas.

La adecuada implementación de esta metodología proporciona espacios de trabajo óptimos que permiten reducir accidentes, stocks y mejorar la productividad aumentando la satisfacción de los trabajadores dentro de la empresa. Por estas razones es prioritario mantener y fomentar los lineamientos de esta disciplina continuamente

Como parte del control del proyecto se realizaron mediciones en el mes de septiembre dando pie a la realización de acciones complementarias para llegar a un resultado optimo.

Una vez obtenidas las métricas se optó por un cambio en el puesto de supervisor de la línea denominado como líder esto debido a la cantidad de defectos que seguían surgiendo en el mes de septiembre.

Se buscó dentro de la plantilla de supervisores una persona que cumpliera con ciertas características tales como visión, empatía, capacidad de formar equipos de trabajo y dinamismo. Al realizar una comparativa entre el líder anterior y el nuevo líder tuvieron las siguientes observaciones.

El líder anterior no contaba con la capacidad de prever algún fallo en el proceso lo cual traía como consecuencia el no cumplir

con la meta establecida, sin embargo, el nuevo líder contaba con entusiasmo y un alto grado de prevención que lo llevo a cumplir las metas establecidas aplicando las herramientas de Lean Manufacturing.

Un punto muy importante de mejora consistió en la capacidad de formar equipos. El líder anterior no tenía desarrollada la capacidad de formar buenos equipos de trabajo y solo brindaba apoyo a los trabajadores con los que mantenía un vínculo personal al contrario del nuevo líder que logro formar buenos equipos de trabajo y lograba identificar a los elementos que no se adaptaban al equipo y hacia cambios para no afectar la productividad de dicho equipo.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en esta empresa perteneciente al ramo automotriz después de la implementación de herramientas Lean Manufacturing en la línea de producción se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 2
Datos obtenidos mes agosto.

	Agosto	
	Esperados	Obtenidos
Defectos	66	136
Producción	8565	6825
In process	1770	3003
In Process %	20.66%	43.99%

Tabla 3
Datos obtenidos mes de septiembre.

	Septiembre	
	Esperados	Obtenidos
Defectos	76	118
Producción	8632	7102
In process	1771	2490
In Process %	20.51%	35.06%

Tabla 4
Datos obtenidos mes de octubre.

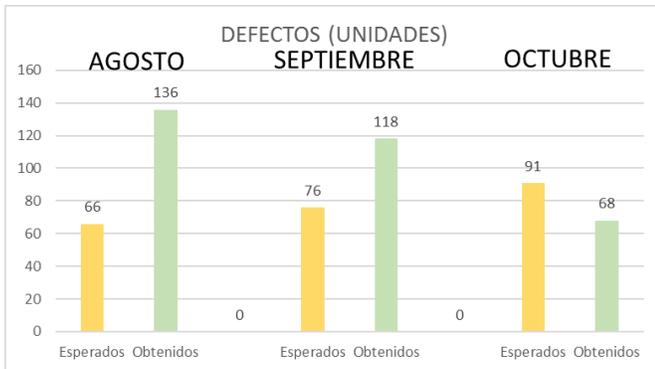
	Octubre	
	Esperados	Obtenidos
Defectos	91	68
Producción	8376	7842
In process	2270	1574
In Process %	27.09%	20.07%

Cabe resaltar que durante el mes de agosto no estaban incluidas herramientas de Lean Manufacturing, en este mes estuvo presente por lo que el número de unidades con defectos estuvo presente en una proporción de más del doble.

Durante el mes de septiembre una vez instauradas herramientas de Lean Manufacturing las observaciones representan un incremento de 76 defectos esperados a 118 defectos obtenidos lo cual corresponde al 55.26%.

Como se observa en la figura 5 Defectos detectados, durante el último mes registrado el número de defectos se redujo en un 25.27% lo cual corresponde a lo esperado en el mes de octubre, teniendo como registro la disminución de 91 unidades a 68 unidades defectuosas.

Figura 5
Defectos detectados



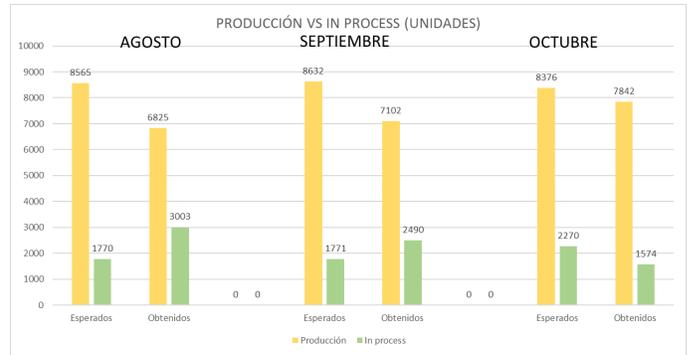
La figura 6, producción real vs producción in process, muestra los siguientes registros: En el mes de agosto la producción observada fue del 79.68% correspondiente a lo esperado, contra la producción in process que registra un aumento de 69.66% de lo esperado.

En el mes de septiembre se produjo el 82.27% esperado, mientras que la producción in process registra un aumento de 40.59%.

Durante el mes de octubre se registra un 93.62% de la producción esperada mientras que la producción in process corresponde a una reducción del 30.66 %.

Cabe resaltar que durante el ultimo mes de registro el aumento de producción esta presente en un porcentaje cercano a lo programado y la producción in process se redujo lo cual tiene una relación directa con el aumento de productividad.

Figura 6
Producción real vs. producción en proceso meses subsecuentes.



Los resultados mostrados permiten incorporar el concepto de Calidad que indica lo siguiente: Es la totalidad de los rasgos y características de un producto o servicio que se sustenta en su habilidad para satisfacer las necesidades y expectativas del cliente, y cumplir con las especificaciones con la que fue diseñado. (Muñoz Cayapu, 2018)

Para alcanzar esta calidad es de suma importancia la disminución de defectos con la propuesta de la implementación de las herramientas de la Manufactura Esbelta se logró incrementar la productividad y eliminar desperdicios que no generen valor en el proceso de producción.

IV. CONCLUSIONES

En el proyecto se trabajó en una empresa donde se identificaron varias áreas de oportunidad al recabar los datos. De acuerdo a los resultados obtenidos en la realización del plan de mejora, se observaron fallas a nivel operativo, dado que no demostraban evidencia de una planeación alineada con las operaciones, carecían de una estructura definida en diversos procesos y procedimientos, así como tampoco había formalidad en el seguimiento de los procesos, adicional de la carencia de estándares en los procedimientos de orden y limpieza.

En cuanto al nivel de producción se pudo observar que el flujo del proceso indicaba defectos, por lo cual al implementar algunas de las herramientas correspondientes de Lean Manufacturing se concluye que beneficiaron al mejoramiento del porcentaje de defectos en la fabricación de arneses. Con los datos obtenidos en la etapa de la implementación se logró reducir las unidades defectuosas en un 15% en el mes de septiembre y un 54% el mes de octubre.

Por lo tanto, se recomienda disminuir la sobrecarga de trabajo considerando que la productividad por hora puede disminuir cuando la semana laboral sobrepasa las 50 horas trabajadas.

V. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Tecnológico Nacional de México campus Instituto Tecnológico Superior de Lerdo e Instituto Tecnológico de Torreón por los medios proporcionados por la realización del presente estudio, así mismo se agradece a la empresa involucrada, por atender a la solicitud de información para esta investigación

VI. REFERENCIAS

- Merzthal Toranzo, J. (31 de Agosto de 2021). *ConexionEsan*. Obtenido de <https://www.esan.edu.pe/conexion-esan/cual-es-el-concepto-de-muda-y-su-impacto-en-las-organizaciones>,
- Muñoz Guevara, J. A. (2022). *repositorio.utp.edu.co*. (D. Restrepo Suárez , Ed.) Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/<https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/b5ad2e22-e1fe-45ba-b872-54ea0d9817fd/content>
- Lean Cleaning. (03 de Enero de 2017). <https://leancleaning.es/>. Obtenido de <https://leancleaning.es/sobre-el-lean-manufacturing/>
- Linked in. (17 de Marzo de 2018). *Linked in*. Obtenido de <https://www.linkedin.com/pulse/toyota-way-14-management-principles-from-worlds-de-sousa-mba>
- Muñoz Cayapu, D. A. (2018). *Biblioteca digital.usb.edu.co*. Obtenido de <https://bibliotecadigital.usb.edu.co/server/api/core/bitstreams/546b61bd-2bc6-4a28-8745-bd60ca4b707f/content>
- Palaleo Torres, J. p. (Septiembre de 2022). <https://docplayer.es/>. Obtenido de <https://docplayer.es/231417826-Universidad-tecnica-de-ambato-facultad-de-ingenieria-en-sistemas-electronica-e-industrial.html>
- REVERSCORE. (10 de Octubre de 2020). *REVER*. Obtenido de <https://reverscore.com/why-employee-empowerment-is-the-key-to-lean-transformation/>
- Rodriguez, J. (13 de Noviembre de 2019). *SPC Consulting Group*. Obtenido de <https://spcgroup.com.mx/que-es-la-fabrica-visual/>
- Salazar López , B. (30 de Octubre de 2019). *Ingenieria industrial online.com*. Obtenido de <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/lean-manufacturing/heijunka-nivelacion-de-la-produccion/>
- Santos Gonzalez, C. (2021). *Repositorio Institucional UPN*. Obtenido de <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/30836?show=full&locale-attribute=es>
- Socconini, L. (2015). *Lean Manufacturing*. Mexico, Df: Imprimex, S.A. de C.V.
- Trout , J. (s.f.). <https://www.reliableplant.com/Read/10818/>. Obtenido de <https://www.reliableplant.com/Read/10818/kaizen-lean-manufacturing>
- Worximity. (13 de Abril de 2018). *www.worximity.com*. Obtenido de <https://www.worximity.com/blog/defects-waste-in-lean-manufacturing>
- Zane Narvaez, R. (2017). *Acceso Libre a Informacion Cientifica para la Innovación*. Obtenido de https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCVV_1d1395cf05d866f728be84e1a4ceba60

Comportamiento de la fase librada por disparo monopolar de línea de transmisión con falla monofásica

E. Gonzalez-Dominguez^{1*}, F.S.Sellschopp-Sanchez¹, V.M.Cabrera-Morelos¹, R. Loera-Palomo², H.Ramirez-

Datos de Adscripción:

¹ TecNM / Instituto Tecnológico de la Laguna, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Blvd. Revolución y, Av. Instituto Tecnológico de La Laguna s/n, Col. Centro, 27000 Torreón, Coahuila, México.

² CONACYT-TecNM / Instituto Tecnológico de la Laguna, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Blvd. Revolución y, Av. Instituto Tecnológico de La Laguna s/n, Col. Centro, 27000 Torreón, Coahuila, México.

³ TecNM / Instituto Tecnológico de la Laguna, Depto. Eléctrica-Electrónica-Renovables, Blvd. Revolución y, Av. Instituto Tecnológico de La Laguna s/n, Col. Centro, 27000 Torreón, Coahuila, México.

* m.egonzalezd@correo.itlalaguna.edu.mx

Resumen – En este trabajo de investigación se analiza el comportamiento de la tensión inducida en una de las fases de una línea de transmisión que se encuentra librada debido al disparo monopolar por causa de una falla monofásica. La fase fallada se abre en ambos extremos de la línea provocando que ésta sea susceptible a las inducciones electromagnéticas y electrostáticas de las fases sanas, contribuyendo a la aparición de una tensión en dicho conductor. Para evaluar dicha tensión, se estudiaron dos líneas de transmisión con la misma longitud, pero una de ellas con transposiciones, donde la falla monofásica se aplicó a diferentes distancias, por lo que la fase debe librarse después de un tiempo mediante el esquema de disparo monopolar y de esta manera medir las tensiones que se inducen debidas a la interrupción de la corriente de corto circuito aplicados en los diferentes tramos de la fase fallada propuestos en esta investigación. De acuerdo a los resultados obtenidos, la mayor tensión inducida en ambas líneas de transmisión se obtuvo cuando la falla es más cercana a la fuente eléctrica, y la menor severidad se encontró con el esquema de las líneas transpuestas. Este estudio se realizó utilizando el software PSCAD/EMTDC, modelando líneas de transmisión largas empleando parámetros distribuidos utilizando tres segmentos para la aplicación de las fallas, con el caso de transposición y sin transposición de la línea de transmisión.

Palabras Clave – *falla monofásica, línea de transmisión, PSCAD/EMTDC, transposición.*

Abstract – In this paper, the behavior of the induced voltage in one of the phases of a transmission line that is released due to a single-pole trip due to a single-phase fault is analyzed. The faulty phase opens at both ends of the line, being it susceptible to electromagnetic and electrostatic inductions from the healthy phases, contributing to the presence of a voltage in that conductor. To evaluate this voltage, the single-phase fault was applied at different distances, so the phase must be released after a while using the single-pole tripping scheme and, in this way, measure the voltages that are induced due to the interruption of the short-circuit current from different sections of the faulted phase proposed in this investigation. According to the results

obtained, the highest induced voltage in both transmission lines was obtained when the fault is closer to the electrical source, and the lowest severity was found with the transposed lines scheme. This study was performed using PSCAD/EMTDC software, modeling long transmission lines employing distributed parameters using three segments for the application of faults, with the case of transposition and without transposition of the transmission line.

Keywords – *PSCAD/EMTDC, single-phase fault, transmission line, transposition.*

I. INTRODUCCIÓN

Las líneas de transmisión en un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) son elementos simples en su estructura física, pero constituyen la mayor parte del sistema y desempeñan un papel fundamental al transportar la energía eléctrica desde las centrales de generación hasta los puntos de consumo (yuan et al. 2007). Estas redes eléctricas se clasifican en aéreas, subterráneas y submarinas, siendo las redes aéreas las predominantes en los sistemas de transmisión (Braun et al. 2017). La adecuada modelación de las líneas de transmisión es crucial para realizar un análisis, operación y control preciso del sistema eléctrico en su conjunto (yuan et al. 2007).

El estudio de una línea de transmisión se divide según el tipo de análisis requerido. En el análisis transitorio electromagnético, se representan las líneas mediante modelos en el dominio de la fase y el dominio modal, realizando transformaciones entre estos dominios utilizando matrices que consideran los efectos transitorios. La línea se caracteriza por una serie de parámetros que describen su comportamiento en el tiempo, mientras que, en estado estable, la representación es independiente del tiempo. Al analizar una línea de transmisión o distribución que consta de múltiples conductores, es necesario emplear parámetros como la impedancia característica y la impedancia mutua, los cuales dependen de las especificaciones de los conductores y su espaciado. Para obtener estos parámetros, se pueden aplicar simplificaciones y supuestos que reducen la complejidad del modelo.

En los SEP, y en general en las líneas de transmisión, se presentan fenómenos transitorios como sobrevoltajes temporales, sobrevoltajes por maniobra y sobrevoltajes por descargas atmosféricas. Aunque estos fenómenos tienen una duración muy corta, pueden tener consecuencias significativas en los componentes del sistema. Comprender el comportamiento de estos fenómenos es crucial para coordinar el aislamiento del sistema y determinar los tiempos necesarios para ajustar las protecciones de los equipos.

El estudio de los modelos de líneas permite comprender el comportamiento de estos fenómenos mediante modelos matemáticos que son suficientemente precisos para un rango específico de frecuencias (Restrepo et al. 2008).

En este trabajo de investigación se evalúa el comportamiento de una línea de transmisión para un sistema eléctrico de potencia donde se le aplica una falla monofásica a tierra. Debido al tipo de falla considerado, se realiza una maniobra para los sistemas de línea de transmisión llamada Disparo y Recierre Monopolar (DRM); esta maniobra es utilizada la mayoría de las veces cuando ocurre esta falla en las líneas de transmisión, ya que entre el 80% y 90% de las fallas son del tipo fase a tierra, (Turnip, S. 1995).

El presente artículo tiene como finalidad el estudio y la comparativa de la tensión inducida en la fase librada de una línea de transmisión con transposición y sin transposición aplicando la falla fase-tierra a diferentes distancias, buscando los resultados de mayor y menor severidad de ese fenómeno inducido.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

Los sistemas considerados son modelados en PSCAD/EMTDC, y están compuestos por unidades generadoras de 500 kV por lo que están clasificados como Sistemas Eléctricos de Potencia de Extra alto voltaje, con una línea de transmisión trifásica de 1 conductor por fase con longitud de 344 km dividida en 3 segmentos transpuestos para el primer escenario. El segundo escenario no se considera la transposición en la línea de transmisión con la finalidad de analizar los voltajes y corrientes inducidos en la fase librada. Cada segmento de la línea de transmisión tiene una longitud de 114.666 km, los sistemas cuentan con unidades de carga alimentadas a 288 kV por fase, y la línea está diseñada empleando el modelado con parámetros dependientes de la frecuencia J. Martí.

A. Modelado de línea de Transmisión para transitorios electromagnéticos.

El modelo de J. Martí (Martí, J. R. 1982). utiliza matrices de transformación constantes en el dominio real para la descomposición Fase-Modo. Sin embargo, este enfoque presenta problemas de precisión cuando se aplican a líneas desbalanceadas. Debido a la distribución de las pérdidas a lo largo de la línea y a la dependencia de los parámetros con la frecuencia, resulta más conveniente desarrollar las ecuaciones de la línea en el dominio de la frecuencia (Restrepo et al. 2008). Esto se ilustra en las ecuaciones (1) y (2):

$$V_k(\omega) = Z_c(\omega)I_k(\omega) + E_{kh}(\omega) \quad (1)$$

$$V_m(\omega) = Z_c(\omega)I_m(\omega) + E_{mh}(\omega) \quad (2)$$

Donde

$$E_{kh} = A(\omega)F_{pk} = [V_k(\omega) + Z_c(\omega)I_k(\omega)]e^{-\gamma(\omega)l} \quad (3)$$

$$E_{mh} = A(\omega)F_{pm} = [V_m(\omega) + Z_c(\omega)I_m(\omega)]e^{-\gamma(\omega)l} \quad (4)$$

Son las fuentes de voltaje historiales en los nodos k y m . La impedancia característica Z_c y la constante de propagación γ de las ecuaciones (3) y (4), se ilustran en las ecuaciones (5) y (6):

$$Z_c(\omega) = \sqrt{\frac{R'(\omega) + j\omega L'(\omega)}{G'(\omega) + j\omega C'(\omega)}} \quad (5)$$

$$\gamma(\omega) = \sqrt{(R'(\omega) + j\omega L'(\omega))(G'(\omega) + j\omega C'(\omega))} \quad (6)$$

El circuito equivalente de las ecuaciones (1) y (2) en el dominio de la frecuencia, se ilustra en la figura 1. Transformando las ecuaciones (1) y (2) al dominio del tiempo, se obtienen las ecuaciones (7) y (8):

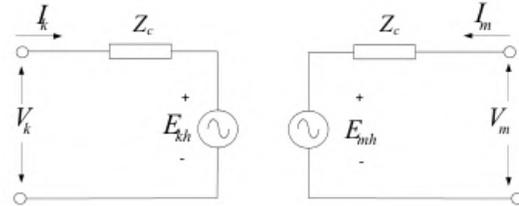
$$v_k(t) = Z_c * i_k(t) + [v_m(t) + Z_c * i_m(t)] \quad (7)$$

$$v_m(t) = Z_c * i_m(t) + [v_k(t) + Z_c * i_k(t)] \quad (8)$$

La evaluación de las ecuaciones (7) y (8) requiere de sintetizar la impedancia característica Z_c y la función de propagación A , debido a la naturaleza irracional de γ y Z_c , con lo cual se obtienen exponenciales en el dominio del tiempo, para aplicar técnicas recursivas para obtener rápidamente una solución, (Martí, J. R. 1982).

Figura 1.

Circuito equivalente del modelo de J. Martí en el dominio de la frecuencia.



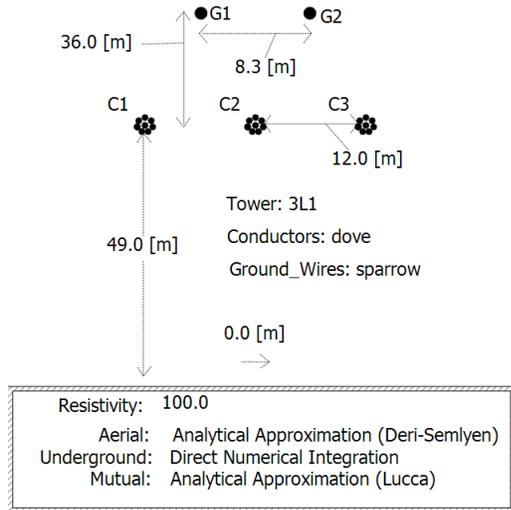
El modelo de J. Martí no es muy exacto en bajas frecuencias y para secciones de línea muy cortas, debido a las imprecisiones presentes para los cálculos en el dominio del tiempo (Noda et al. 1996).

B. Línea de Transmisión.

El sistema de transmisión debe asegurarse de no introducir ningún desequilibrio en la energía transportada. Sin embargo, debido a la geometría de las torres de transmisión, se crean desequilibrios debido a que las distancias entre fases y entre las fases y tierra no son iguales, como se muestra en la Figura 2. Como resultado, se generan desequilibrios en los flujos de energía.

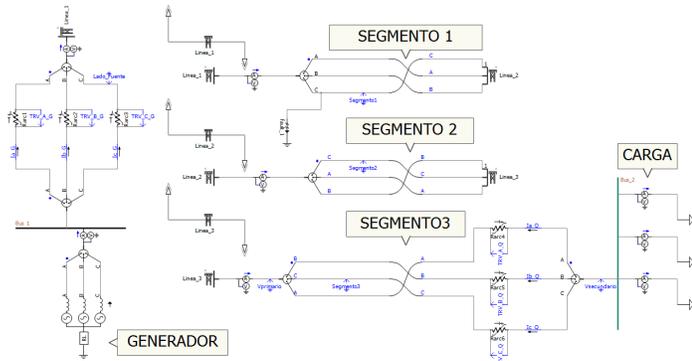
Por lo tanto, la geometría de las torres en las líneas de transmisión de alta tensión crea una asimetría en la impedancia, lo cual a su vez provoca desequilibrios correspondientes en la tensión y corriente en el extremo de la línea.

Figura 2. Geometría de la torre y configuración de los conductores en (PSCAD/EMTDC v5.0.1 Update 3).



La asimetría de la línea puede ser eliminada en la frecuencia fundamental mediante la técnica de transposición de fase, que implica dividir la línea en secciones múltiples de tres. Como resultado, las transposiciones son comúnmente utilizadas en líneas de transmisión largas como un método para equilibrar la impedancia y admitancia de la línea a la frecuencia fundamental. La transposición en las líneas de transmisión implica cambiar la posición de las fases en el circuito, tal como se ilustra en la Figura 3. En la figura 4 se muestra la misma línea de transmisión, pero sin las transposiciones.

Figura 3. Sistema eléctrico de potencia modelado en (PSCAD/EMTDC v5.0.1 Update 3). con 3 segmentos transpuestos, falla ubicada en el segmento 1, elaboración propia.

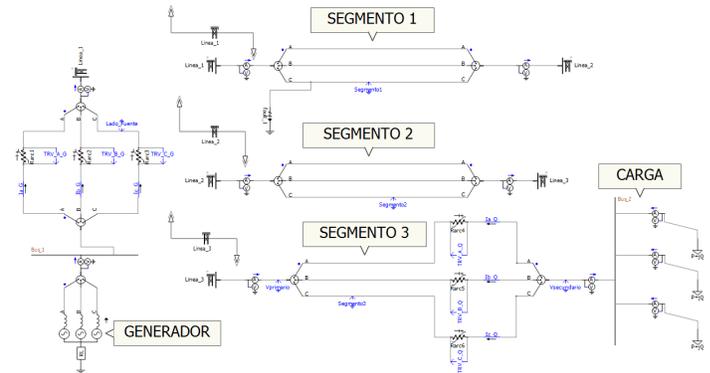


En general, en los estudios de transitorios electromagnéticos, es común representar las líneas de transmisión como si estuvieran idealmente transpuestas. Sin embargo, una línea con una sección de transposición real puede considerarse como si estuviera idealmente transpuesta solo a la frecuencia fundamental, pero no para todo el rango de frecuencias. Dommel, H. W. (1992), (Portela et al. 2002). Los detalles del conductor utilizado en la línea de transmisión y sus características se encuentran en la Tabla 1.

Tabla 1. Conductor utilizado en la línea de transmisión.

Nombre	Radio (mm)	dc.res. (Dc ohms/km)	No, Trenzados	Radio de Trenzado (mm)	Permeabilidad
Dove	23.5458	0.10094	28	3.71602	1

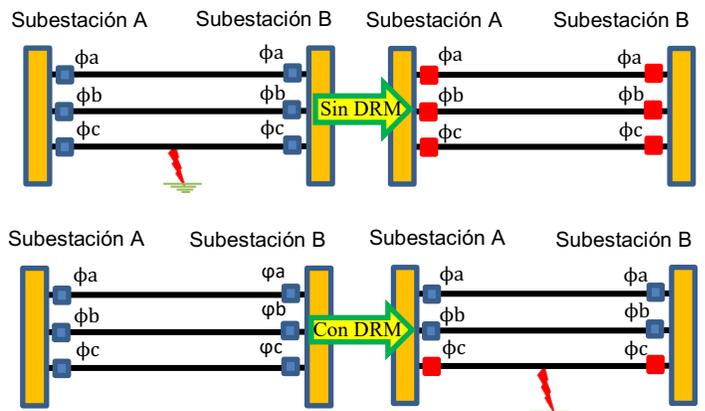
Figura 4. Sistema eléctrico de potencia modelado en PSCAD, con 3 segmentos No transpuestos, falla ubicada en el segmento 1, elaboración propia.



C. Maniobra de protección ante una falla monofásica, DRM.

Ante una falla monofásica, se puede emplear el esquema DRM para evitar la interrupción total de la línea de transmisión. Mediante la implementación de este esquema, las fallas de fase a tierra se solucionan abriendo ambos extremos de la fase afectada, mientras que las otras dos fases permanecen cerradas, como se muestra en la Figura 5.

Figura 5. Esquema de la maniobra de protección de los sistemas de transmisión para falla monofásica a tierra DRM.



- Sin DRM: En ausencia del esquema DRM, las fases de la línea de transmisión se abren de manera tri-polar para eliminar la falla, lo que resulta en la interrupción total del flujo de potencia.
- Con DRM: Con la implementación del esquema DRM, solo se abre la fase afectada, lo que permite resolver la falla sin interrupción completa de la línea. Sin embargo, el flujo de potencia posterior a la falla es menor que el flujo previo, aproximadamente alrededor del 60%.

D. Acoplamiento Electroestático y Electromagnético hacia la fase librada.

En un esquema DRM se aísla la fase afectada al abrir los interruptores en ambos extremos de la línea, lo que teóricamente debería eliminar la corriente de falla. Sin embargo, el conductor de la fase fallada aún permanece energizado debido al acoplamiento electromagnético y electrostático con las fases paralelas que están energizadas. Esto implica que se mantiene una tensión en el punto de falla, lo que puede mantener la corriente de falla. Anderson, P. M. (1999).

La fase afectada se acopla tanto electromagnética como electrostáticamente con las fases no afectadas, siendo el acoplamiento capacitivo el más significativo. La transposición de las líneas afecta esta capacitancia, y si la transposición es completa, se logran capacitancias iguales, como se muestra en la Figura 6. Anderson, P. M. (1999).

La fuente que alimenta una línea de transmisión completamente transpuesta y simétrica puede ser dividida en dos componentes: uno real y otro imaginario. Kimbark, E. W. (1964).

$$V_a = E \tag{9}$$

$$V_b = -0.5 E - j 0.866 E \tag{10}$$

Primer grupo:

$$V_{a^1} = E \tag{11}$$

$$V_{b^1} = -0.5 E \tag{12}$$

$$V_{b^1} = -0.5 E \tag{13}$$

Segundo grupo:

$$V_{a^2} = 0 \tag{14}$$

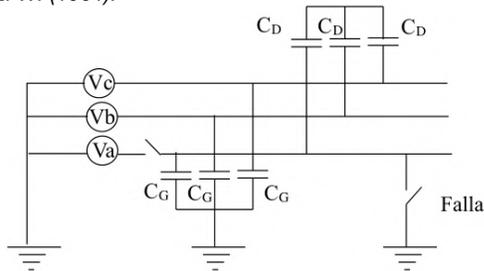
$$V_{b^2} = -j 0.866 E \tag{15}$$

$$V_{b^2} = +j 0.866 E \tag{16}$$

Debido a la simetría del segundo grupo con respecto a la fase A, esta fase está exactamente a un potencial a tierra.

Figura 6.

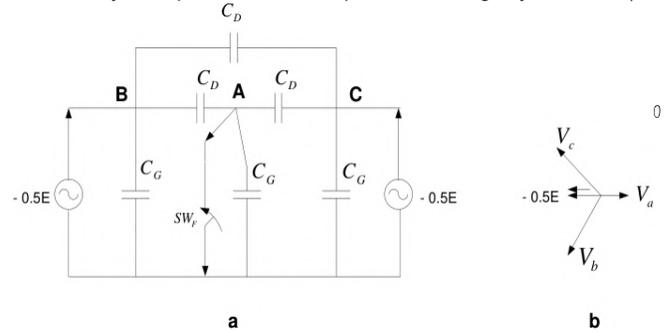
Diagrama de línea de transmisión simétrica y completamente transpuesta Kimbark, E. W. (1964).



En el segundo grupo de fuentes, no hay tensión a lo largo de la trayectoria de la falla cuando la fase A está abierta, y no hay corriente cuando la trayectoria de la falla está cerrada (Yanque Montufar, M. 2014). La figura 7.a representa un esquema monofásico de una línea completamente transpuesta y simétrica. En este ejemplo, la fase A se encuentra en condición abierta, con una capacitancia C_D entre cada par de fases y una capacitancia C_G de cada fase a tierra. La conexión de la fase A a tierra se muestra como SW_F . El fasor de la tensión efectiva se ilustra en la Figura 7.b.

Figura 7.

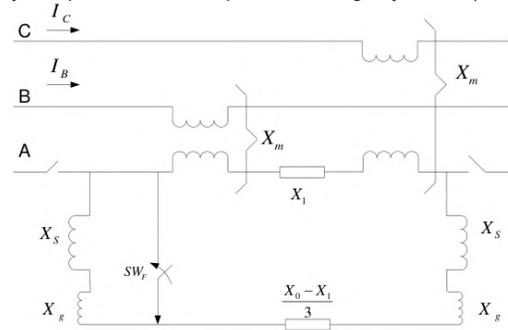
Diagrama del acoplamiento electroestático de una línea de transmisión simétrica y completamente transpuesta. Eztergaloy et al. (1992).



Por otro lado, los acoplamientos magnéticos de las fases contribuyen también en el fenómeno, figura 8, induciendo corriente en la fase A cuando está abierta. La determinación precisa de todos estos parámetros involucra el análisis de los transitorios electromagnéticos, ya que la inducción mutua es la suma de múltiples variables dinámicas que incluyen las corrientes que circulan por las fases no afectadas, la carga de la línea adyacente, el método utilizado para extinguir el arco secundario, entre otros factores, (Yanque Montufar, M. 2014).

Figura 8.

Diagrama del acoplamiento electromagnético de una línea de transmisión simétrica y completamente transpuesta. Eztergaloy et al. (1992).

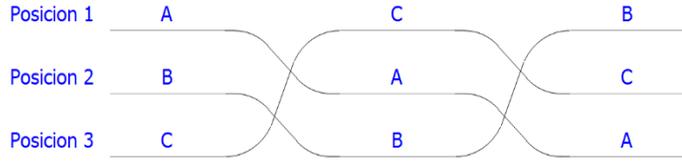


E. Impedancia de Líneas Transpuestas.

Para lograr la igualación de las impedancias mutuas, se lleva a cabo un intercambio regular de posiciones entre los conductores a lo largo de la línea. De esta manera, cada conductor ocupa la posición original de los otros conductores a una distancia uniforme. Este intercambio de posiciones de los conductores se conoce como transposición. Si se divide una línea en tres segmentos de igual longitud, separados por rotaciones de los conductores, se dice que la línea está completamente transpuesta o que existe una transposición simétrica. En la Figura 9 se muestra una línea con dos transposiciones aplicadas.

Figura 9.

Ciclo práctico de transposición de un circuito de 3 fases elaboración propia utilizando PSCAD/EMTDC v5.0.1 Update 3.



Puede observarse que las impedancias no dependen de la designación de fase de los conductores, sino de la posición que ocupan en la línea. Entonces se tiene que para la sección 1:

$$Z_{aa} = Z_{bb} = Z_{cc} = Z = R + R_g + j\omega kln \frac{D_e}{R_{MG}} \quad (17)$$

$$Z_{ab} = M1 = R_g + j\omega kln \frac{D_e}{D_{12}} \quad (18)$$

$$Z_{ac} = M2 = R_g + j\omega kln \frac{D_e}{D_{13}} \quad (19)$$

$$Z_{bc} = M3 = R_g + j\omega kln \frac{D_e}{D_{23}} \quad (20)$$

Para la sección 2:

$$Z_{cc} = Z_{bb} = Z_{aa} = Z = R + R_g + j\omega kln \frac{D_e}{R_{MG}} \quad (21)$$

$$Z_{ca} = M1 = R_g + j\omega kln \frac{D_e}{D_{12}} \quad (22)$$

$$Z_{cb} = M2 = R_g + j\omega kln \frac{D_e}{D_{13}} \quad (23)$$

$$Z_{ab} = M3 = R_g + j\omega kln \frac{D_e}{D_{23}} \quad (24)$$

Para la sección 3:

$$Z_{bb} = Z_{cc} = Z_{aa} = Z \quad (25)$$

$$Z_{bc} = M_1 \quad (26)$$

$$Z_{ba} = M_2 \quad (27)$$

$$Z_{bc} = M_1 \quad (28)$$

Por lo tanto, la ecuación para encontrar la matriz de impedancias después de aplicar la transposición es:

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} Z_s & Z_{M1} & Z_{M2} \\ Z_{M1} & Z_s & Z_{M3} \\ Z_{M2} & Z_{M3} & Z_s \end{bmatrix} \quad (30)$$

Donde:

$$Z_s = l \cdot Z \quad (31)$$

$$Z_{M1} = l_1 M_1 + l_2 M_3 + l_3 M_2 \quad (32)$$

$$Z_{M2} = l_1 M_2 + l_2 M_1 + l_3 M_3 \quad (32)$$

$$Z_{M1} = l_1 M_3 + l_2 M_2 + l_3 M_1 \quad (32)$$

En el caso especial en que las longitudes de los tramos de línea sean $l_1 = l_2 = l_3 = l$, se trata de una línea completamente transpuesta. Para este caso se cumple que las impedancias son $Z_{M1} = Z_{M2} = Z_{M3} = Z_M$. La matriz de impedancias al efectuar una transposición completa es:

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} Z_s & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_s & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_s \end{bmatrix} \quad (33)$$

Es decir, el efecto de realizar transposición completa en una línea es la de balancear la matriz de impedancias. Si existe carga y generación balanceada, la línea no incluirá desbalance en el sistema, Stevenson Jr., W. D. (1996).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este trabajo se proponen varios casos de estudio considerando dos líneas de transmisión: un sistema con transposición y otro sin transposición. Los casos de estudio constan de aplicar una falla monofásica en los diferentes segmentos de la fase C de ambas líneas de transmisión considerando siempre aplicar la falla en el valor máximo de la tensión de fase fallada buscando obtener las mismas condiciones de aplicación de cortocircuito en los sistemas.

La falla monofásica aplicada tiene una duración de 25 milisegundos, donde posterior a ello opera el esquema DRM abriendo ambos extremos de la fase fallada. Durante la apertura de la fase C, se libera el cortocircuito aplicado a la fase y se registra la tensión inducida, con la finalidad de analizar los valores de tensión pico alcanzados en ese lapso de tiempo. El esquema de recierre del DRM no se considera dentro de este estudio ya que se propone analizar la tensión inducida que se presenta en la fase librada.

A continuación se mostraran los escenarios de falla de los 2 sistemas de línea de transmisión, aplicando la falla monofásica de fase C a tierra en los diferentes segmentos, mostrando las mediciones de corriente de cortocircuito y la tensiones inducidas en cada segmento de la fase librada.

CASO 1: Falla aplicada en Fase C, segmento 1.

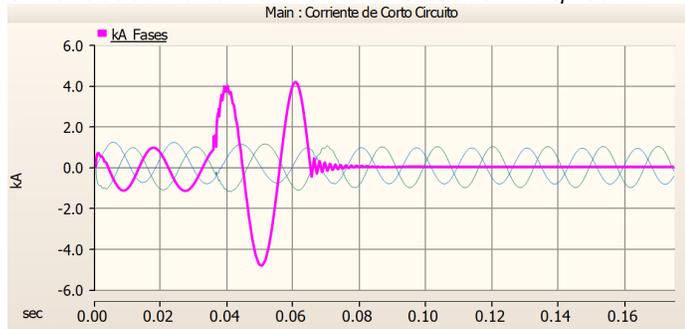
En la figura 10 y 11, se muestra el comportamiento de la corriente de corto circuito ante una línea de transmisión con una disposición transpuesta y una línea de transmisión convencional, sin transposición.

Figura 10.

Corriente de corto circuito en línea de transmisión con transposición.



Figura 11.
Corriente de corto circuito en línea de transmisión sin transposición.



En la figura 12 y 13, se muestra el comportamiento de la tensión inducida ante una línea de transmisión con una disposición transpuesta y una línea de transmisión convencional, sin transposición como se menciona en el caso 1 esta es Falla aplicada en la Fase C, segmento 1.

Figura 12.
Tensiones inducidas en fase librada, segmentos 1, 2 y 3 en línea de transmisión con transposición.

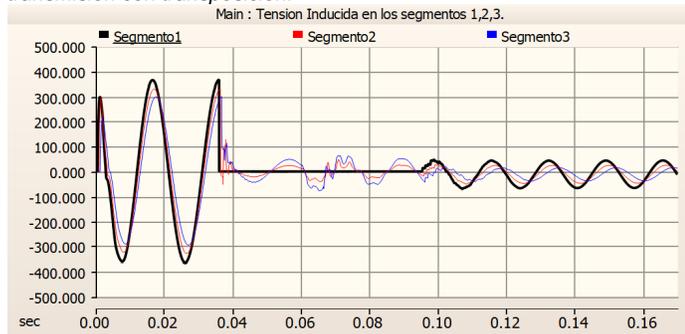
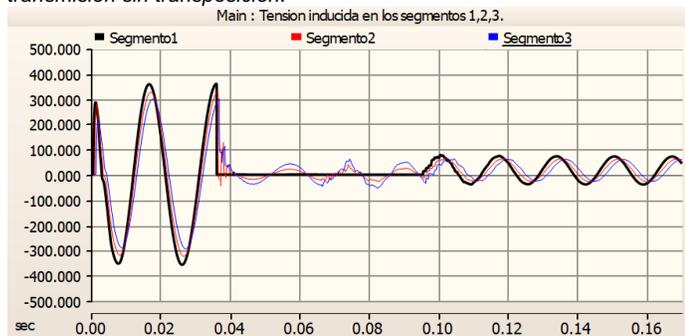


Figura 13.
Tensiones inducidas en fase librada, segmentos 1, 2 y 3 en línea de transmisión sin transposición.



La falla en fase C aplicada en el segmento 1 ocurre a los 0.035910 seg y se libera a los 0.05945 seg, observándose los siguientes valores:

Tabla 2.
Valores máximos alcanzados para corriente de falla y tensión inducida.

L.T.	C.C. kA	kV seg. 1	kV seg. 2	kV seg. 3
Con transposición	4.63	43.41	24.47	15.33
Sin transposición	-4.84	73.45	62.54	61.23

Como se observa en la Tabla 2, el sistema con mayor tensión inducida en todos los segmentos en la fase librada es la línea de transmisión sin transposición.

CASO 2: Falla aplicada en Fase C, segmento 2.

En una línea de transmisión no transpuesta, los conductores están dispuestos de manera paralela y separados entre sí. Cuando se produce un cortocircuito en esta configuración, la corriente de cortocircuito tiende a fluir predominantemente en el conductor más cercano al punto de falla.

Esto puede ocasionar un desequilibrio en la distribución de corriente entre los conductores, lo que puede resultar en altas tensiones y posibles daños en el sistema en la figura 14 y 15 se muestran dichos comportamientos ante las disposiciones mencionadas anteriormente.

Figura 14.
Corriente de corto circuito en línea de transmisión con transposición.

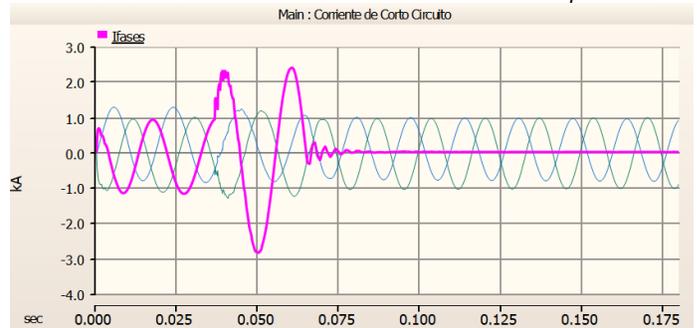
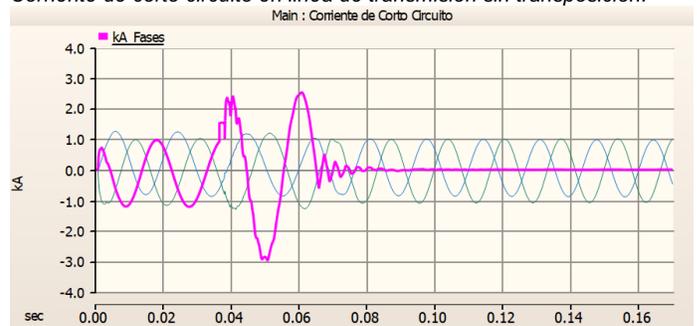


Figura 15.
Corriente de corto circuito en línea de transmisión sin transposición.



En la figura 16 y 17, se muestra el comportamiento de la tensión inducida ante una línea de transmisión con una disposición transpuesta y una línea de transmisión convencional, sin transposición.

Figura 16.
Tensiones inducidas en fase librada, segmentos 1, 2 y 3 en línea de transmisión con transposición.

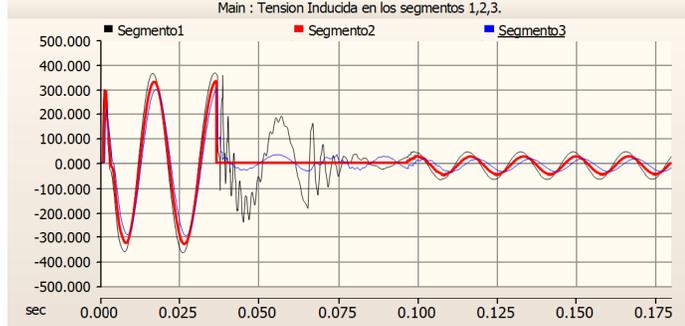
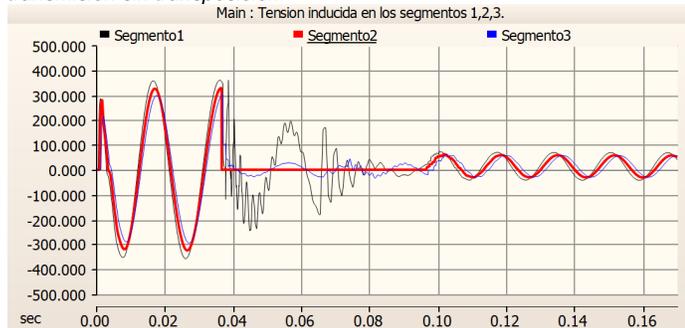


Figura 17.
Tensiones inducidas en fase librada, segmentos 1, 2 y 3 en línea de transmisión sin transposición.



La falla en fase C aplicada en el segmento 2 ocurre a los 0.0365 seg y se libera a los 0.06004 seg. Como se puede apreciar en la Tabla 3, en la línea de transmisión sin transposición se genera la mayor tensión inducida en cada segmento de la fase liberada. Además, se observa que la tensión en el sistema sin transposición presenta componente de CD con una ligera reducción en la tensión máxima con respecto al Caso 1.

Tabla 3.
Valores máximos alcanzados para corriente de falla y tensión inducida.

L.T.	C.C. kA	kV seg. 1	kV seg. 2	kV seg. 3
Con transposición	2.85	44.41	25.67	16.18
Sin transposición	2.95	70.64	59.76	58.18

CASO 3: Falla aplicada en Fase C, segmento 3.

En la figura 18 y 19, se muestra el comportamiento de la corriente de corto circuito ante una línea de transmisión con una disposición transpuesta y una línea de transmisión convencional, sin transposición.

En una línea de transmisión no transpuesta, los conductores están dispuestos de forma paralela y separados entre sí. Cuando se produce una falla en una fase, la tensión inducida tiende a concentrarse principalmente en esa fase en particular. Esta alta concentración de tensión puede causar problemas, como aislamiento inadecuado y posibles daños en el sistema.

Figura 18.
Corriente de corto circuito en línea de transmisión con transposición.

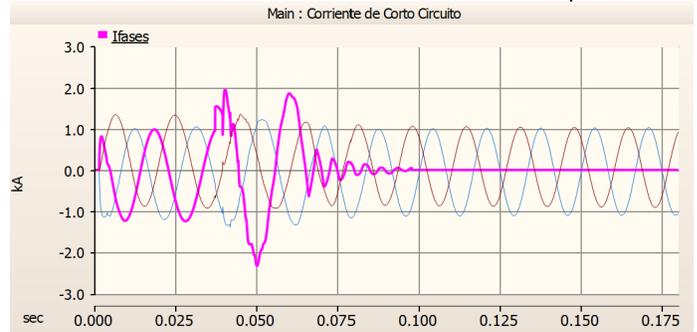
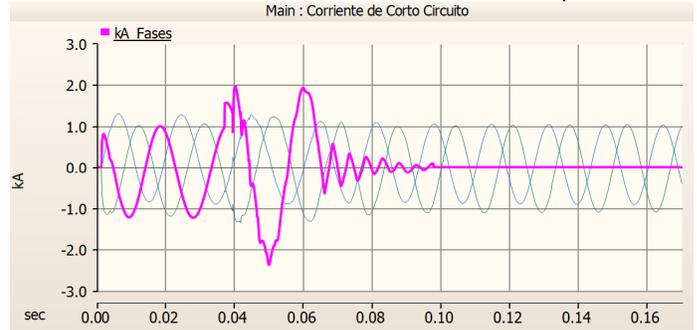


Figura 19.
Corriente de corto circuito en línea de transmisión sin transposición.

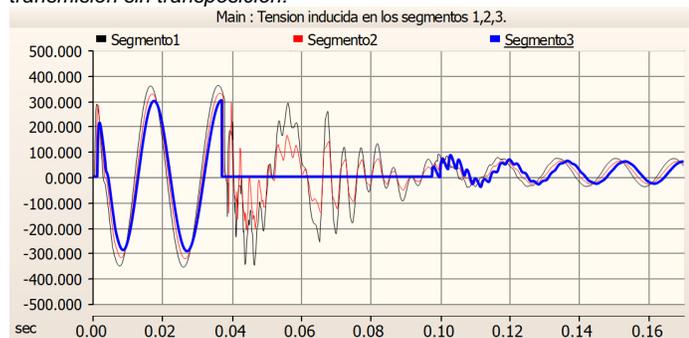


Por otro lado, en una línea de transmisión transpuesta, los conductores se entrelazan en forma de hélice o se cruzan entre sí a lo largo de la longitud de la línea. Debido a esta disposición entrelazada, la tensión inducida se distribuye de manera más equilibrada entre las fases afectadas por la falla. Esto ayuda a reducir la concentración de tensión en una sola fase y, por lo tanto, disminuye los posibles daños y problemas asociados. En las figuras 20 y 21, se muestra el comportamiento de la tensión inducida en una línea de transmisión con las disposiciones mencionadas anteriormente.

Figura 20.
Tensiones inducidas en fase librada, segmentos 1, 2 y 3 en línea de transmisión con transposición.



Figura 21.
Tensiones inducidas en fase librada, segmentos 1, 2 y 3 en línea de transmisión sin transposición.



La falla en fase C aplicada en el segmento 3 ocurre a los 0.0370 seg y se libera a los 0.06054 seg. Como se observa en la Tabla 4, el sistema con mayor tensión inducida en todos los segmentos en la fase librada es la línea de transmisión sin transposición. También se observa que las tensiones inducidas alcanzadas son mayores que las obtenidas en los Casos 1 y 2, a pesar de que la corriente de cortocircuito alcanzada es aun de menor amplitud que los casos anteriores. Así mismo se observa la componente de CD en ambos casos.

Tabla 4.
Valores máximos alcanzados para corriente de falla y tensión inducida.

L.T.	C.C. kA	kV seg. 1	kV seg. 2	kV seg. 3
Con transposición	2.32	66.62	47.48	40.0
Sin transposición	2.37	75.49	64.87	67.64

Con la finalidad de evaluar los comportamientos con los escenarios de falla monofásica en las otras dos fases A y B, se aplica la misma metodología de aplicación de falla. Las tablas 5 y 6 muestran los siguientes resultados.

Tabla 5.
Valores máximos alcanzados para corriente de falla y tensión inducida

Fase fallada A				
L.T.	C.C. kA	kV seg. 1	kV seg. 2	kV seg. 3
Con transposición	4.13	52.20	44.58	23.65
Sin transposición	4.54	85.80	77.58	56.65
Tiempo de aplicación (s)		0.0425	0.04308	0.04360

Tabla 6.
Valores máximos alcanzados para corriente de falla y tensión inducida

Fase fallada B				
L.T.	C.C. kA	kV seg. 1	kV seg. 2	kV seg. 3
Con transposición	3.49	49.28	35.38	29.51
Sin transposición	4.12	57.25	43.32	38.91
Tiempo de aplicación (s)		0.04965	0.05	0.0505

IV. CONCLUSIONES

El estudio realizado en dos sistemas eléctricos con líneas de transmisión con y sin transposición arroja resultados en los que

la fase librada por el esquema DRM presenta importantes inducciones de tensión cuando la fase está abierta. La mayor afectación entre los dos sistemas se origina con la línea de transmisión sin transposición, logrando siempre las mayores tensiones pico inducidas. Así mismo, la afectación máxima se da cuando la falla se origina en el segmento 1, el escenario más crítico en una línea de transmisión con transposición y sin transposición ocurre en el primer segmento cercano a la unidad generadora debido a la menor impedancia de la línea en ese punto. La capacidad de la fuente generadora para suministrar corriente en caso de una falla monofásica se ve influenciada por esta baja impedancia, lo que resulta en una alta corriente de falla en ese segmento. Como el segmento 1 se encuentra al 33% de la línea lo cual conduce alta corriente con bajo efecto capacitivo y más inductivo dejando un 67% de la línea donde se encuentra potencial cero recibiendo las inducciones de las 2 fases sanas.

Este sería un efecto de divisor de tensión y atribuyéndole una menor la inducción cuando se encuentra la falla monofásica a tierra en el segmento 2 y 3.

Por otro lado, la línea de transmisión con transposición resultó con menores tensiones inducidas, pero con un patrón de comportamiento similar a los casos sin transposición, por lo que esto puede ser atribuible al desbalance que se presenta durante la operación de falla y esquema DRM. Finalmente, en ambos casos se aprecia que la tensión inducida llega a tener valores importantes de tensión, los cuales pueden originar nuevas descargas eléctricas en caso de que la falla de fase no se haya librado totalmente.

V. AGRADECIMIENTOS

El alumno del Tecnológico Nacional de México y de la División de estudios de posgrado e investigación, Emilio González Domínguez, agradece por la ayuda otorgada de parte de la institución y de la división, al igual que a su familia y Docentes. De igual manera se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico otorgado para la obtención de este artículo de investigación.

VI. REFERENCIAS

Yuan, L., & Nguyen, T. (2007). Alternative way to derive equivalent PI circuit model of transmission lines. *in Proceedings of the Annual Southeast Symposium on System Theory* (pp. 186-188). <http://dx.doi.org/10.1109/SSST.2007.352345>.

Braun, C., Rahman, M., & Cecchi, V. (2017). A transmission line model with non-uniformly distributed line impedance. *in 2017 North American Power Symposium (NAPS 2017)* (Vol. 2). <http://dx.doi.org/10.1109/NAPS.2017.8107223>.

Kurokawa, S., Daltin, R. S., Prado, A. J., & Pissolato, J. (2007). An alternative modal representation of a symmetrical nontransposed three-phase transmission line. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(1), 500-501. <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRS.2006.889117>.

Restrepo, L. H., Caicedo Delgado, G., & Castro-Aranda, F. (2008). Modelos de línea de transmisión para transitorios electromagnéticos en sistemas de potencia (Informe técnico). [Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería Eléctrica y electrónica, Cali, Colombia].

- <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/xmlui/bitstream/handle/10893/1471/V.16No.1-p.21-32.pdf?sequence=2>.
- Turnip, S. (1995). Analysis of Single Pole Auto Reclosure In Extra-High Voltage Systems. University Of Tasmania. Thesis.
<https://doi.org/10.25959/23241038.v1>.
- Marti, J. R. (1982). Accurate modeling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101(1), 147-155. Jan. 1982.
<https://doi.org/10.1109/TPAS.1982.317332>.
- Noda, T., Nagaoka, N., & Ametani, A. (1996). Phase domain modeling of frequency-dependent transmission lines by means of an-ARMA model. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11(3), 401-411.
<https://doi.org/10.1109/61.484040>.
- PSCAD/EMTDC v5.0.1 Update 3, G. Fortran v4.6, G. Fortran v8.1 (64-bit) Educational.
- Dommel, H. W. (1992). EMTP Theory Book (2da ed., p. 4-34). Microtran Power System Analysis Corporation.
<https://www.scribd.com/doc/212398005/Theory-Book>.
- Portela, C., & Tavares, M. C. (2002). Modelling simulation and optimization of transmission line. Applicability and limitations of some used procedures. *En IEEE Transmission and Distribution Latin América 2002* (pp. 38). SP, Brazil.
<https://www.dsce.fee.unicamp.br/~crisrina/palestras/TD2002/CPortelaMCTavaresTD2002artcnvidador2CCcpc.pdf>.
- Anderson, P. M. (1999). Power System Protection. *IEEE Press Power Engineering Series*. Mc Graw-Hill.
<https://archive.org/download/POWERSYSTEMPROTECTIONP.M.Anderson/POWER%20SYSTEM%20PROTECTION%2C%20P.%20M.%20Anderson.pdf>
- Kimbark, E. W. (1964). Suppression of Ground-Fault Arcs on Single-Pole-Switched EHV Lines by Shunt Reactors, " in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 83, no. 3, pp. 285-290, March 1964.
<https://doi.org/10.1109/TPAS.1964.4766000>.
- Yanque Montufar, M. (2014). *Análisis de la corriente de arco secundario para recierres monofásicos en líneas de extra alta tensión*, [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú].
<https://1library.co/document/z1dkml8z-analisis-corriente-sekundario-recierres-monofasicos-lineas-extra-tension.html>
- Eztergalovs, J., Andrichack, J., Colwell, D. H., & Dawson, D. C. (1992). Single Phase Tripping and Auto reclosing of Transmission Lines. *IEEE Committee Report. Transactions on Power Delivery*, 7(1).
- Stevenson Jr., W. D. (1996). Analysis of electrical power systems. North Carolina State University.
<https://catedras.facet.unt.edu.ar/sep/wpcontent/uploads/sites/20/2020/03/An%C3%A1lisis-de-Sistemas-de-Potencia-Grainger-Stevenson.pdf>.

Desarrollo y aplicación de prototipo para el estudio de acabados en materiales utilizando módulo láser controlado mediante PWM

Rodríguez-Luévanos, Y.L.¹; Castro -Juárez, E. II.²; Machado-Díaz, E.³

Datos de Adscripción:

¹Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, División de Ingeniería en Sistemas Automotrices, Av. Tecnológico No. 1555 Sur Periférico Gómez - Lerdo Km. 14.5, Ciudad Lerdo, Durango; México. C.P. 35150.
eduardo.md@itslerdo.edu.mx

esumen – En este artículo se muestra el desarrollo de un prototipo para el estudio de acabados en materiales aplicando un haz de láser, los acabados analizados fueron grabados en materiales como madera y policloruro de vinilo, mediante los cuales se analizan efectos relacionados con la transferencia de calor. El desarrollo del proyecto incluye cálculo y selección del módulo láser, cálculo de pérdidas por conducción y radiación, analizados de manera manual y mediante software, además de desarrollar una interfaz visual a través de MATLAB, el software NX de SIEMENS permite la creación de materiales en su biblioteca, dichos programas permiten analizar térmicamente y comprar a través de la interfaz visual los resultados obtenidos por el láser y por la simulación.

La movilidad de módulo láser se efectúa mediante un prototipo de brazo robótico con seis grados de libertad. La variación de potencia del módulo láser es controlada por PWM mediante una interfaz visual, la cual simula la transferencia de calor en tiempo real.

Los resultados obtenidos son las comparativas entre las variaciones de potencia, distancia y tiempo en cual se obtiene el equilibrio térmico. Con este proyecto se beneficia al ámbito educativo, impactando principalmente en materias como lo son transferencia de calor, termodinámica y mecánica de fluidos.

Palabras Clave – Conducción, Convección, Radiación, Transferencia de calor.

Abstract - This article shows the development of a prototype for the study of finishes on materials applying a laser beam, the finishes analyzed were engraved on materials such as wood and polyvinyl chloride, through which the effects related to heat transfer will be analyzed. The development of the project includes calculation and laser module, calculation of conduction and radiation losses, analyzed manually and by software, in addition to developing a visual interface through MATLAB, SIEMENS NX software allows the creation of materials in its library These programs allow thermal analysis and comparison through the visual interface of the results obtained by the laser and by the simulation.

The mobility of the laser module is carried out by means of a robotic arm prototype with six degrees of freedom. The power variation of the laser module is controlled by PWM through a visual interface, which simulates heat transfer in real time.

The results obtained are the comparisons between the variations of power, distance and time in which the thermal equilibrium is obtained. This project benefits the educational field, mainly impacting on materials such as heat transfer, thermodynamics and fluid mechanics.

Keywords – Conduction Thermal, Convection Thermal, Radiation, Transfer of heat.

I. INTRODUCCIÓN

Al estudiar el tema de acabados en materiales existe una gran variedad de técnicas según su proceso de fabricación o aplicación, en cuanto a grabado algunas de ellas son corte por chorro de agua, arenado, chorreado con vidrio y corte con láser. Actualmente la obtención de parámetros referentes a acabados de materiales es de suma importancia en diferentes ámbitos como en la industria para poder conocer el comportamiento de propiedades mecánicas y físicas del material. Otro ámbito donde es de suma importancia conocer parámetros referentes a acabados de materiales es el área educativa, enfocado en la obtención de valores relacionados con transferencia de calor, el cual es un contenido temático de asignaturas relacionadas con propiedades físicas y mecánicas de materiales.

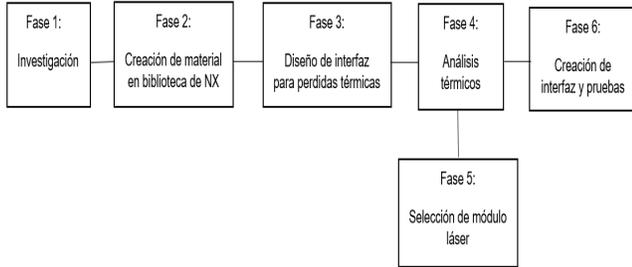
En algunos ámbitos de la industria para poder conocer el comportamiento mecánico y físico del material se realizan pruebas empíricas, viendo afectados tiempos de producción y calidad. Debido a que la mayoría de las propiedades mecánicas y físicas de los materiales suelen mostrar dependencia con la temperatura, el láser permite una interacción focalizada entre el haz de luz, material, medio ambiente obteniendo variaciones en temperatura. El acabado de materiales con láser proporciona una serie de ventajas como mayor versatilidad, precisión y calidad en comparación a otro tipo acabado (D, 2007). El proceso consiste en la focalización del haz láser en un punto del material que se desea tratar, para que éste funda y evapore lográndose así el grabado/corte con una determinada potencia procedente del generador y de un sistema de conducción, un grupo óptico se encarga de focalizar el haz con un diámetro determinado sobre un punto de interés del material a tratar. La gran desventaja que presenta el corte por láser frente a otros procedimientos reside principalmente en el espesor máximo que se puede cortar. (Rodríguez Díaz del castillo, 2011, pp. 11-16)

El prototipo para estudio de acabados de materiales con láser que se presenta en este artículo consta de cálculos para la obtención de parámetros como número de Nusselt, Rayleigh, Grashof y Prandl aplicados en la selección de equipo, programación de interfaz visual, simulaciones térmicas los cuales se relacionan directamente con los materiales analizados

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

El desarrollo del proyecto se realizó a partir de las siguientes seis fases las cuales se presentan en la Figura 1.

Figura 1
Desarrollo del proyecto



2.1 Investigación preliminar

La primera fase del proyecto fue una investigación de las diferentes formas de transferencia de calor siendo estas conducción, convección y radiación (Carballo, 2018) y como afecta el medio ambiente en este proceso.

La clasificación de los diferentes tipos de láser los cuales se encuentran documentados en diferentes páginas electrónicas, siendo el diodo láser el más común por la sencillez de manejo y bajo costo. En la bibliografía consultada (L. Bachs, 1988, pp. 60-64) donde se presenta un prototipo que opera a velocidades

altas y potencias bajas, se comentó entonces que el corte y grabado dichos procesos se realizan por medio de la modulación de ancho de pulso, se menciona que es de suma importancia la concentración de energía. El control de potencia con PWM mediante Arduino una plataforma de código libre es ideal para la disminución de costos y modificaciones en código de programación.

Otro Factor importante a considerar es el proporcionar movimiento en dos dimensiones al módulo láser, lo cual se realizará mediante un prototipo de brazo robótico, analizando si el prototipo con seis grados de libertad era capaz de soportar aproximadamente 450 gramos.

2.2 Creación de material en biblioteca de NX de SIEMENS

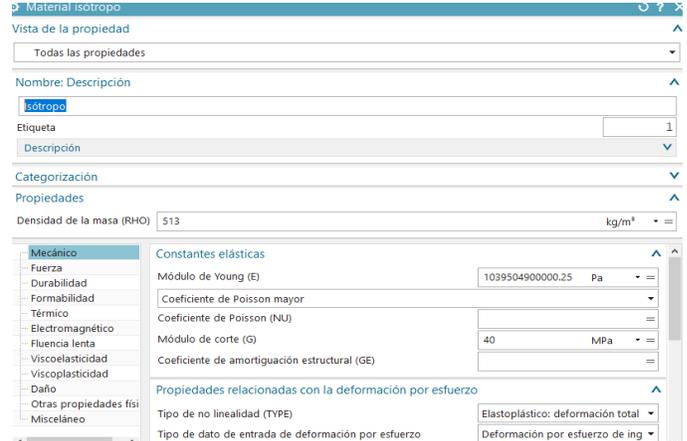
Algunos materiales no se encontraron establecidos en la biblioteca NX de SIEMENS. Por lo cual fue necesario la creación del material madera, de ello depende la realización de posteriores análisis térmicos. Para ello se realizaron diseños del prototipo y recopilación de propiedades térmica y mecánicas mostradas en Tabla 1.

Tabla 1
Propiedades mecánicas de la madera

Propiedad Mecánica	Valor
Densidad de la masa	513 Kg/m ³
Módulo de elasticidad	10395049000 Pa
Coefficiente de poisson	0.25
Limite elástico	13729310Pa
Tensión a la rotura	40MPa
Conductividad térmica	0.115 Wm/K
Calor específico	1.38 KJ/Kg.K

La caracterización de la madera como material establece clasificaciones (blanda y dura). De ambas maderas fue seleccionada la blanda, debido a su versatilidad y bajo costo. En el entorno de simulaciones térmicas se encuentra un apartado denominado biblioteca MATMI mostrado en la Figura 2, donde se clasifica la madera como un material isotrópico debido a que sus propiedades mecánicas son iguales en todas direcciones. Posteriormente se genera un archivo ubicándose en los archivos con terminación.ptr.

Figura 2
Biblioteca MATMI



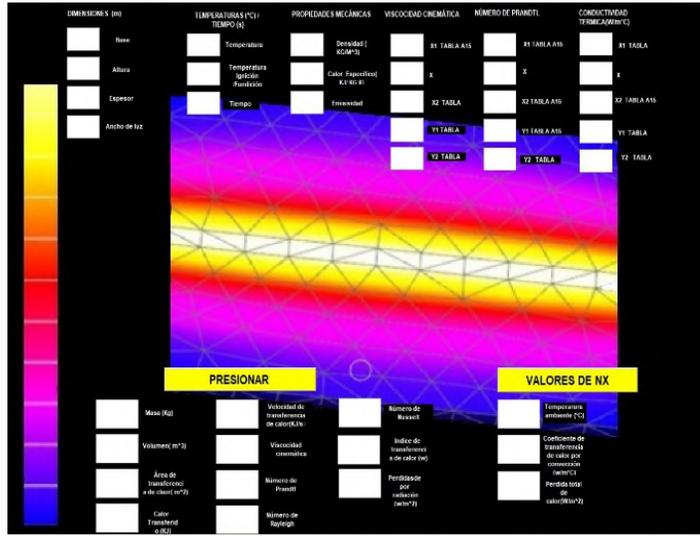
2.3 Diseño de interfaz visual para pérdidas térmicas

Guide es un entorno disponible en MATLAB, utilizado para crear interfaces gráficas mediante una interfaz visual, el cual necesita un ingreso continuo de datos (Orlando, 2023, p. 2). Con la finalidad de obtener diversos parámetros se optó por la creación de una interfaz visual. Siendo capaz proporcionar parámetros numéricos obtenidos mediante operaciones matemáticas y utilizados en simulaciones térmicas. Es necesario mencionar que al modificar alguna dimensión de la placa, los valores cambiarían por completo. Por tal motivo el procedimiento fue estandarizado, permitiendo introducir valores del material a analizar.

La interfaz visual mostrada en la Figura 3 se divide en dos apartados, programación y diseño visual, los cuales se comunican mediante controlador denominado callback, el cual direcciona la programación expresada en código y generada automáticamente. Al seleccionar los controladores se formulan las operaciones referentes a pérdidas (flujo de calor y coeficiente de transferencia de calor por convección) siendo necesario ingresar las relaciones geométricas enfocadas a la superficie del material, posteriormente se ingresan las propiedades mecánicas siendo algunas de ellas densidad y calor específico.

La obtención de datos se realiza dando clic en el rectángulo amarillo denominado PRESIONAR, el cual proporciona como resultado los valores a introducir en el software NX de SIEMENS, utilizados posteriormente en simulaciones térmicas. La finalidad de las simulaciones térmicas es visualizar el como se propaga el calor en la placa del material.

Figura 3
Interfaz visual



2.4 Análisis térmico

Algunos diseños en ingeniería cuentan con condiciones geométricas o comportamientos térmicos poco usuales. Debido a ello se deben de establecer diferentes métodos para la resolución de simulaciones térmicas con la finalidad de determinar parámetros y propiedades térmicas, algunas de ellas son difusividad y equilibrio térmico, siendo uno de los resultados a obtener. Uno de los métodos más utilizados es elemento finito aplicado en análisis térmicos, estructurales y de viento (NX soluciones CAD, s.f.).

El análisis térmico es un conjunto de técnicas analíticas que estudian el comportamiento térmico de los materiales. Cuando un material se calienta o se enfría su estructura o composición química puede sufrir cambios (Serrano Hernandez A, 2018).

La simulación térmica inicia con la elaboración de pieza considerando las dimensiones Tabla 2, trayectoria que seguirá el módulo láser y área del haz de luz cuando entra en contacto con el material. La pieza es segmentada en tres secciones idealizando la geometría con la finalidad de la correcta distribución de las cargas térmicas obtenidas mediante la interfaz visual para perdidas térmicas y simulación de transferencia de calor en estado transitorio proporcionada por el haz de luz láser y distribución del calor en placa.

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.

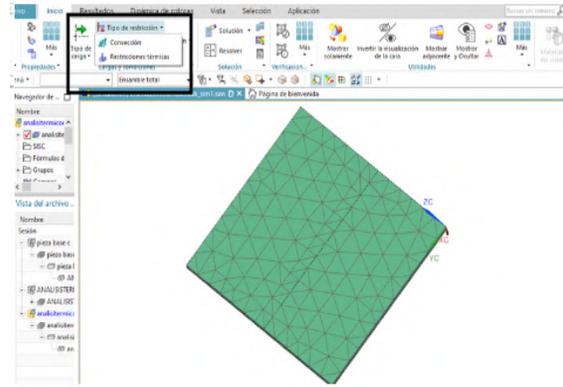
Tabla 2
Dimensiones de piezas a analizar

Dimensión	Medida
Largo	100 mm
Ancho	100 mm
Espesor	5 mm

El procesamiento de la simulación se realiza en los entornos FEM Y SIM del software NX de SIMENS. El entorno FEM secciona la pieza en múltiples segmentos según la geometría del material y su optimización asignando el tamaño de malla, siendo

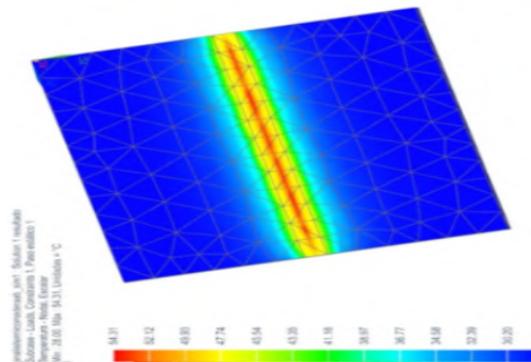
este el inicio del método del elemento finito. Se debe mencionar que existe una relación entre el mallado y la exactitud del resultado, en la Figura 4 se muestra la pieza con asignación de mallado en entorno FEM.

Figura 4
Mallado de pieza.



Las restricciones correspondientes a las cargas térmicas son consideradas en el entorno SIM, dando como resultado la variación de transferencia de calor en pieza según Figura 5. Se puede observar como el calor afecta a la placa y cuál es la temperatura máxima que se puede alcanzar antes de la ignición del material. El análisis se realiza con cada uno de los materiales a analizar. La finalidad de los análisis térmicos es contar con un parámetro referente a la máxima y mínima temperatura que puede soportar los materiales analizados, con ello tener una idea de el margen de potencia del módulo láser a utilizar.

Figura 5
Transferencia de calor en placa.



2.5 Selección del módulo láser

La selección del módulo láser se realizó considerando perdidas de convección y radiación, con la finalidad de comprender mejor el procedimiento se segmentan las perdidas térmicas, al efectuarse la transferencia de calor entre el material analizado y medio ambiente. La selección del módulo láser considero geometría de placa, propiedades mecánicas y térmicas del material mostrando en esta ocasión los datos de la madera debido a que tiene un mayo parámetro de ignición. La Tabla 3 muestra los valores a considerar para la obtención de flujo de calor en estado transitorio.

Tabla 3

Datos para la obtención del flujo de calor.

Datos	Valor	
Temperatura ambiente	28°C	
Densidad de la madera	513 Kg/m ³	
Calor específico	1.38 KJ /Kg .K	
Temperatura de ignición de la madera blanda	70°C	
Largo de la placa de madera	100mm	
Ancho de la placa de madera	100mm	
Espesor de la placa de madera	5mm	
Volumen placa de madera	0.00005m ³	
Ancho del spot donde se aplica el haz de láser	6mm	
Largo del área donde se aplica el spot	10cm	
Área placa de madera	0.01m ²	

Al transferir energía desde una masa o hacia ésta mediante mecanismos como el calor, fue necesario conocer la cantidad de calor transferido durante el proceso como se indica en (1).

$$Q = m \cdot C_p (T_2 - T_1) = \quad (1)$$

$$(1.539 \times 10^{-4} \text{Kg}) \left(1.38 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \cdot \text{K} \right) (70^\circ\text{C} - 28^\circ\text{C}) = 8.920044 \times 10^{-3} \text{KJ}$$

En cuanto a la obtención de la masa como cantidad de materia de un cuerpo se calcula de la siguiente manera (2).

$$m = \rho \cdot V = (513 \text{ Kg} / (\text{m}^3)) (0.000007 \text{m}^3) = 1.539 \times 10^{-4} \text{ kg} \quad (2)$$

El calor transferido se interpreta como la energía que necesito transferir al sistema para de 28°C aumentar a 70°C. La velocidad de transferencia de calor también conocida como razón de transferencia de calor involucra la derivada de calor transferido por unidad de tiempo, por lo cual se denomina índice de transferencia de calor (3).

$$Q_{\text{prom}} = Q/\Delta t = (8.920044 \times 10^{-3} \text{KJ})/10\text{s} = 8.92 \text{ W} \quad (3)$$

Cuando se cuenta con un área de transferencia de calor y la velocidad de transferencia de calor, se podrá conocer el flujo de calor siendo la cantidad de calor transferido por unidad de área y unidad de tiempo (4).

$$q = (Q/A) = 8.92 \text{W} / (6 \times 10^{-4} \text{ m}^2) (0.1) = 148.66 \text{W} / \text{m}^2 \quad (4)$$

El mecanismo de convección natural sobre una superficie depende de la orientación geométrica y variación de temperatura. Si se desea expresar la transferencia de calor en convección natural, es necesario la obtención del número de Rayleigh (5) es el producto de los números de Grashof y Prandtl, estableciendo la configuración geométrica del área superficial.

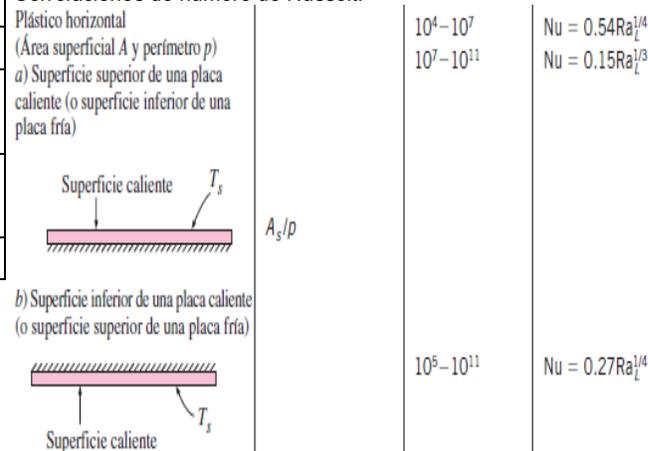
$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} = \quad (5)$$

$$\frac{(9.81 \text{m/s}^2)(1/322 \text{K})(70 - 28 \text{K})(0.025)^3}{(1.7884 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}})^2} (0.72306) = 5.8591 \times 10^4$$

Considerando las correlaciones empíricas para el numero de Nusselt en convección natural, verificar el intervalo correspondiente a número de Rayleigh. El número de Nusselt es la división del flujo de calor por convección sobre el flujo de calor por conducción Figura 6 .

Figura 6

Correlaciones de número de Nusselt.



Fue necesario obtener el coeficiente de transferencia de calor por convección. Siendo la transferencia de convección proporcional a la diferencia de temperatura. Lo antes mencionado se puede expresar por la ley del enfriamiento de Newton (6).

$$h = \frac{k}{L_c} Nu = \frac{0.027278 \text{W} / \text{m} \cdot ^\circ\text{C}}{0.025 \text{m}} (8.401428) = 9.1669 \text{W} / \text{m} \cdot ^\circ \quad (6)$$

Considerando la temperatura inicial de 28 °C y final de 270 °C para obtener el coeficiente de expansión (7). Siendo la viscosidad cinemática del fluido y el número de Prandtl se consideró los valores en el intervalo de 45 y 50 °C, mediante la fórmula de interpolación lineal. La fórmula de interpolación lineal puede ser aplicada cuando se cuenta con un valor a conocer y dos valores conocidos (8).

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{49} = 0.020 \quad (7)$$

$$Y = Y_1 + \frac{X-X_1}{X_2-X_1}(Y_2-Y_1) = 2.745 \times 10^{-5} + \frac{49-45}{50-45}(0.7228 - 0.7241) = 0.72306 \quad (8)$$

Al compensar pérdidas ocasionadas por el medio ambiente, fue considerada la razón de transferencia de calor promedio. La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere la presencia de un medio interventor, la radiación térmica, es la forma de radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura. La obtención de la transferencia de calor por radiación (9), utilizando la constante de Stefan-Boltzmann $5.67 \times 10^8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$.

$$\dot{Q}_{\text{radiación}} = \epsilon * \sigma * A_s * T_s^4 = (0.92) \left(\frac{5.67 \times 10^8 \text{ W}}{\text{m}^2} \right) (6 \times 10^{-4} \text{ m}^2) (343^4 - 301^4) = 7.3223 \times 10^{-4} \text{ W} \quad (9)$$

La radiación depende de la emisividad térmica, mostrando algunos valores de emisividad en la Tabla 4.

Tabla 4
Emisividad de materiales a 300K.

Material	Emisividad
Hoja de aluminio	0.07
Alumino anonizado	0.82
Cobre pulido	0.03
Plata pulida	0.02
Acero inoxidable pulido	0.17
Pintura negra	0.98
Pintura blanca	0.9
Papel blanco	0.92-0.97
Pavimento de asfalto	0.85-0.93
Ladrillo rojo	0.93-0.96
Piel ahumada	0.95
Madera	0.82-0.92
Suelo	0.96
Agua	0.96

2.6 Simulación de temperaturas en tiempo real

Una parte importante en la interfaz visual es la simulación de temperaturas en tiempo real la cual no es posible sin considerar la conducción de calor en régimen transitorio contando con dos métodos de análisis implícito y explícito, en cualquiera de ellos la pieza se segmenta en partes llamadas nodos entre más nodos existan más exacto es el valor obtenido según la variación del

tiempo, la diferencia radica en los intervalos de tiempo mientras al método implícito se asigna $i + 1$, el explícito solamente consideramos i siendo la literal mencionada un contador para los intervalos de tiempo en régimen transitorio.

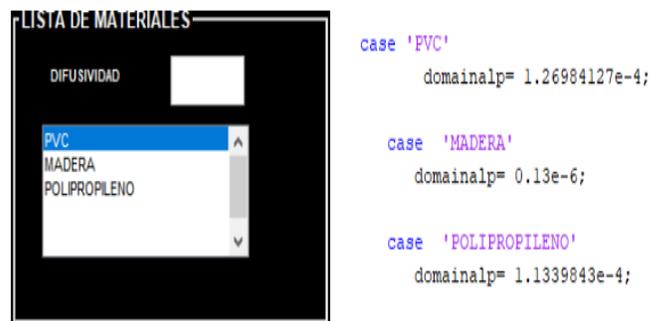
La conducción de calor se encuentra caracterizada mediante el número de Fourier (Fo), implicando la velocidad de conducción y el almacenamiento de energía el cual debe cumplir con el criterio de estabilidad, de lo contrario no es válido este tipo de análisis $Fo \leq 0.5$ (A.Cengel, 2007, p. 316).

El procedimiento para simular transferencias de calor suele ser repetitivo, sin embargo, se debe mencionar la variación de temperaturas obtenidas y difusividad (10) que implica propiedades físicas del material, entre ellas se encuentran densidad, calor específico y conductividad térmicas las cuales fueron consideradas según la aplicación de código Math Works (Cheng, 2022).

$$\alpha = \frac{k}{\rho * Cp} \quad (10)$$

En transferencia de calor mediante régimen transitorio se consideró el tiempo proporcionado por el recorrido total del módulo laser sobre la geometría asignada a la placa, siendo 6 segundos, los datos anteriores se consideran en la elaboración de la interfaz visual como se muestra en la Figura 7.

Figura 7
Conductividad térmica implementada en código



La potencia del módulo láser se es controlada por PWM por sus siglas en inglés, Pulse Width Modulation este tipo de método se utiliza para transmitir señales de información en forma de pulsos utilizando esta para reducir la energía total entregada a una carga (Chavez Talavera Ricardo Emanuel, 2015).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos implican análisis térmicos mediante el método de elemento finito, siendo un proceso que implica variación de potencia en materiales a analizar. La herramienta principal utilizada fue un módulo láser con potencia de 5.5 W.

Los resultados obtenidos mediante análisis térmico correspondiente a madera blanda, con temperaturas en el rango 28°C y 53°C. En los análisis térmicos mediante NX de SIEMENS, no superando a la temperatura de ignición, ya que los análisis

térmicos se realizaron con una potencia correspondiente a la de 1W. La transferencia de calor mediante régimen transitorio, corresponde a la simulación del calor con diferentes potencias y alturas como se muestra Tabla 5.

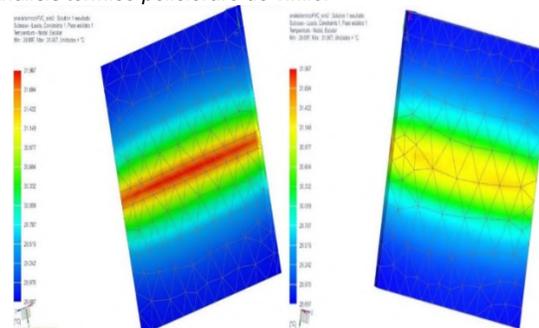
temperatura de ignición en 415°C, ya que los análisis térmicos se realizaron con una potencia correspondiente a la de 1W.

Tabla 5
Pruebas madera a 5mm de espesor.

Potencia	Grados/cm	Temperatura inicial	Tiempo	Observaciones
10%-0.55	130°-6	29	5	No presenta daño visible en el material, al avanzar el módulo láser existe rápidamente un equilibrio térmico.
	135°-4	33	5	No presenta daño visible en el material, al avanzar el módulo láser existe rápidamente un equilibrio térmico.
50%-2.75	130°-6	30	5	Presenta perforaciones. Tarda 15 segundos en llegar al equilibrio térmico.
	135°-4	30	5	Tarda 25 segundos en llegar al equilibrio térmico.
90%-4.95	130°-6	36	5	Presento perforaciones. Tarda 30 segundos en llegar al equilibrio térmico.
	135°-4	33	5	No presenta daño visible en el material, al avanzar el módulo láser existe rápidamente un equilibrio térmico.

El segundo material a analizar fue policloruro de vinilo (PVC), mediante la interfaz visual se obtuvieron los valores solicitados en simulaciones térmicas, como referencia la temperatura de ignición del policloruro de vinilo es de 415°C. muestra los resultados obtenidos para el análisis térmico en NX de SIEMENS. Los resultados obtenidos mediante análisis térmicos vista frontal y posterior con temperaturas en el rango 31.97°C y 28.69°C, corresponde a policloruro de vinilo (PVC) Figura 8. Por lo cual, los valores obtenidos en las simulaciones no superan la

Figura 8
Análisis térmico policloruro de vinilo.



IV. CONCLUSIONES

Los acabados de materiales cada día son más comunes en industria metal mecánica, maderera y textil. Es necesario el mejorar las herramientas para incrementar el número de producción sin desperdiciar material y eficientar costos.

En el presente proyecto se analizó de manera manual y mediante software, como actúa el material aplicando una fuente de calor. Por lo cual en un inicio el proyecto se encontraba enfocado solamente en el sector industrial. Sin embargo, es un campo de posibilidades para el sector educativo especialmente en aquellas materias relacionadas con termodinámica, transferencia de calor y mecánica de fluidos.

La interfaz gráfica proporciona parámetros numéricos obtenidos mediante operaciones matemáticas para posteriormente utilizarlos en simulaciones térmicas, con la finalidad de poder predecir de una manera idealizada el comportamiento del material. El proceso para la obtención puede ser replicado siempre y cuando coincida la misma forma de transferencia de calor y realizando las adecuaciones según la geometría de la pieza a analizar.

Los análisis térmicos fueron muy cercanos a los obtenidos en temperaturas mediante la cámara termográfica. Al mencionar son muy cercanos debemos de tener en cuenta que el módulo láser no se utilizó con su potencia máxima por el sobrecalentamiento.

La detección de áreas de oportunidad fue posible gracias a la creación de materiales no existentes dentro de la librería del software NX de SIEMENS. En conclusión, este proyecto puede implementarse en el sector educativo e industrial. En el sector educativo permite fortalecer las áreas de programación, transferencia de calor, termodinámica y diseño. Mientras que en el sector industrial puede reducir costos y eficiente los parámetros en cuanto al grabado de materiales, siendo un método aplicable al análisis de otros materiales por transferencia de calor en régimen transitorio.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al Tecnológico Nacional de México (TecNM) y al Instituto Tecnológico Superior de Lerdo por las facilidades brindadas para la realización del presente trabajo.

También a las divisiones de Sistemas Automotrices y Posgrado por el apoyo brindado a la realización del proyecto y conclusión del grado de maestría, así como todos los docentes involucrados. Muchas gracias por su cooperación y participación con sus propuestas de mejora.

VI. REFERENCIAS

- A.Cengel, Y. (2007). *Transferencia de calor y masa*. México, D.F.: McGraw-Hill.
- Carballo, C. A. (2018). *Transferencia de calor repositorio TEC*. Retrieved Julio de 2023, from Transferencia de calor repositorio TEC:
<https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10176/Transferencia%20de%20calor.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chavez Talavera Ricardo Emanuel, C. U. (Julio de 2015).
<https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/18755/1/Protocolo%20cortador%20y%20grabador%20I%C3%A1ser.pdf>
- Cheng, Y. (27 de Enero de 2022). *Math Works*. Math Works: Ye Cheng (2022). Conducción de
<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/40768-transient-heat-conduction>
- D, O. P. (11 de Enero de 2007).
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3903/55856-6.pdf>
- L. Bachs, J. C. (1988). *Aplicaciones industriales del láser* (Vol. 19). Marcombo. Retrieved 05 de Noviembre de 2018.
- NX soluciones CAD, C. (s.f.). <https://www.3dcadportal.com.mx/nx.html>
- Orlando, B. G. (16 de Julio de 2023). *UTM*. Retrieved 07 de 04 de 2022, from utm:
https://www.utm.mx/~vero0304/HCPM/MATLAB_GUIDE.pdf
- Rodriguez Diaz del castillo, F. (2011). Proceso de maquinado sin arranque de viruta.
- Serrano Hernandez A, R. L. (2018). Análisis térmico por el método del elemento finito para determinar las temperaturas internas de las capas aislantes en el enclousurer de una turbina de gas. *Revista ciencia ,Ingeniería y desarrollo tec lerdo*, 243. Retrieved 10 de octubre de 2018.

Disminución del tiempo de respuesta vía telefónica a clientes y distribuidores de empresa desarrolladora de software para equipos de medición aplicando la metodología Seis Sigma

Ochoa-Corona, Y.S.¹; Ruiz-Arroyo, I.¹; Martínez-Rodríguez, U.¹; Ramos-Ochoa, O. F.¹

Datos de Adscripción:

¹Tecnológico Nacional de México campus Instituto Tecnológico Superior de San Pedro de las Colonias. Calzada del Tecnológico #53 Col. El Tecnológico. C.P. 27800. San Pedro de las Colonias, Coahuila. México.
visvi.ochoa@tecsanpedro.edu.mx

Resumen – El presente trabajo muestra la implementación de la metodología Seis Sigma en una empresa desarrolladora de software para equipos de medición utilizados en procesos de aseguramiento de la calidad en diferentes industrias como la automotriz, aeroespacial, productos de consumo, energía y otras industrias. Dicha empresa, dentro de sus servicios ofrece soporte técnico a sus clientes y distribuidores de tres formas posibles: mediante correo electrónico, llamadas telefónicas y página web, para la resolución de dudas y problemas en el uso del mismo.

El objetivo principal de este artículo es reducir los tiempos de respuesta mediante llamadas telefónicas que brinda el soporte técnico de la compañía con la finalidad de mantener la filosofía de soporte al cliente con la que cuenta la empresa: “Tomamos el tiempo necesario para entender su proceso y analizamos sus necesidades antes de asesorarlos acerca de la solución óptima para resolver sus desafíos de medición”.

Los resultados obtenidos mediante la aplicación de la herramienta DMAIC: Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar, es reducir el tiempo estándar que posee la empresa para dar solución a un caso. Se lleva a cabo el análisis inicial del proceso, selección de variables significativas, aplicación de la mejora y el control de la misma; dichos resultados se observan en el nivel sigma del proceso, que antes de la aplicación de la metodología se encontraba en 1.78 y 2.35 para los años 2021 y 2022 respectivamente y actualmente se encuentra con un nivel de 2.88, lo que demuestra que el proceso es capaz, con un 91.6% de productividad.

Palabras Clave - clientes, disminución, seis sigma, soporte, tiempo.

Abstract - This project shows Six Sigma implementation at a software development company used in a quality assurance process in automotive, aerospace, consumer products energy and other companies. That project offers technical support service to customers and partners in three possible ways: by email, telephone calls and the website to solve technical issues relate with the software uses.

The goal of this article is reduced the service time provide by the company in order to keep the company's philosophy: "We take the necessary time to understand the process and analyze the needs before advising them on the optimal solution to solve their measurement challenges".

The results obtained through the application of the DMAIC tool: Define, Measure, Analyze, Improve and Control, is to reduce the number of calls that exceed the standard time that the company has to solve a case. The initial analysis of the process is carried out, selection of significant variables, application of the improvement and its control; these results are observed at the sigma level of the process, which before the application of the methodology was at 1.78 and 2.35 for the years 2021 and 2022 respectively and is currently at a level of 2.88, which shows that the process is capable of, with 91.6% productivity.

Keywords - customers, decrease, six sigma, support, time.

I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la filosofía empresarial, independientemente del ramo de la misma, está centrada en el cliente, pues la calidad se ha convertido en los últimos años en un arma estratégica en el mercado global; ya no basta con mantener el estado de las cosas en tanto un producto genera una ganancia. Las empresas van más allá si quieren permanecer como líderes en su ramo, así lo refiere Koontz (2004): “La antigua filosofía de la suficiencia ya no es aceptable. Ahora el propósito de las compañías debe ser nada menos que la excelencia. Pero para alcanzarla es necesario que los administradores estén dispuestos a colocar las necesidades de sus clientes en primer término. Jamás deben olvidar que los clientes son indispensables. Son la razón de existir de las compañías”.

La empresa en la cual se desarrolló la presente investigación tiene la filosofía arriba mencionada, ubicando al cliente como pieza principal para el desarrollo de sus actividades, basándose en no solo fabricar o servir, sino en satisfacer al cliente que además de exigir un producto de calidad, requiere un asesoramiento pre y post compra, (Camisón, 2006); dichas actividades consisten en desarrollar software para equipos de medición utilizados en procesos de aseguramiento de la calidad en diferentes industrias como la automotriz y aeroespacial, ofreciendo soluciones como lo son: análisis tridimensional 3D, gestión de datos, conectividad digital, ingeniería inversa y modelado 3D; así como también diferentes productos: Inspector, DataLoop, Modeler, Talisman, por mencionar algunos; convirtiéndola en una empresa multinacional de desarrollo de software con sede en Canadá con más de 500 empleados dedicados a hacer de los datos de medición 3D algo esencial para los procesos de fabricación de las empresas.

Para garantizar los objetivos comerciales de los clientes, esta industria ha llevado al soporte técnico a un nivel sin precedentes en el mercado, implementando una filosofía de soporte al cliente que va más allá del soporte tradicional de software: “Tomamos el tiempo necesario para entender su proceso y analizamos su necesidades antes de asesorarles acerca de la solución óptima para resolver sus desafíos de medición” (Polyworks, 2023).

Con el objetivo de seguir ofreciendo un servicio de calidad, la empresa constantemente busca mejorar el soporte técnico que brinda a clientes y distribuidores, motivo por el cual surge el análisis del tiempo de respuesta vía telefónica que se les brinda, llevando a cabo la implementación de la metodología Seis Sigma, definida por Evans (2005) como: “Un enfoque de mejorar en los negocios que busca encontrar y eliminar las causas de los defectos y errores en los procesos de manufactura y servicios, concentrándose en los productos críticos para los clientes y para una clara recuperación financiera en la organización”.

La metodología Seis Sigma, a su vez, utiliza la metodología DMAIC para la solución de problemas, llevando a cabo los cinco pasos que la conforman: Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar; misma que fue utilizada en el presente artículo para llevar a cabo la reducción del tiempo de respuesta estándar que posee la empresa para dar solución a un caso.

A continuación se describe cada uno de los cinco pasos:

1. Definir. “Debe enfocar temas de administración de proyectos en qué se debe hacer, por quién y cuándo”(Evans, 2005).
2. Medir. “Se concentra en cómo medir los procesos internos que tienen impacto. Es necesario entender las relaciones causales entre el desempeño de los procesos y el valor para el cliente” (Evans, 2005).
3. Analizar. “Se concentra en por qué ocurren los defectos, errores o la variación excesiva”(Evans, 2005).
4. Mejorar. “Una vez que se entiende de raíz la causa de un problema, el analista o el equipo necesitan generar ideas para eliminarlo o resolverlo y mejorar los indicadores del desempeño” (Evans, 2005).
5. Controlar. “Se enfoca hacia cómo conservar las mejoras, que incluye tener las herramientas en su lugar para garantizar que las variables clave continúen dentro de los rangos máximos aceptables en el proceso modificado” (Evans, 2005).

Cabe mencionar que el presente trabajo se llevó a cabo en la subsidiaria de México y muestra el desarrollo de las actividades de cada una de las etapas que conforman la metodología DMAIC, efectuando el análisis de los resultados obtenidos y las conclusiones generadas de los mismos.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

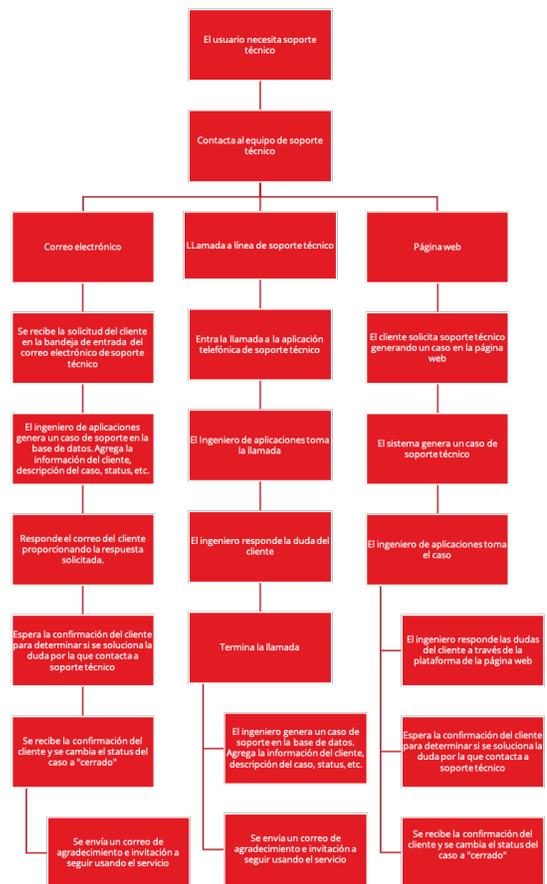
A continuación se muestra la aplicación de la metodología DMAIC, desglosando cada una de sus etapas:

2.1 Definir

La primera etapa consta en, como su nombre lo dice, definir de manera correcta y puntual el problema que se quiere solucionar; es necesario que la definición contenga qué se debe hacer, por quién y cuando. Gutiérrez (2004), sugiere lo siguiente: “Será fundamental identificar las variables críticas para la calidad, establecer metas, definir el alcance del proyecto, precisar el impacto que sobre el cliente tiene el problema y los beneficios potenciales que se esperan del proyecto”; por lo tanto, se definió, en primer lugar el diagrama de flujo actual del proceso, con la finalidad de analizar a detalle cada una de las actividades que se llevan a cabo al momento de atender al cliente o distribuidor vía telefónica; Gutiérrez (2004) reseña la importancia del diagrama de flujo como sigue: “Con la idea de tener un panorama completo del problema es importante realizar un diagrama de flujo en el que se muestren los subprocesos u operaciones principales del proceso completo donde se presenta el problema”.

El procedimiento actual para atender un caso, es el siguiente:

Figura 1
Diagrama de flujo actual del proceso.

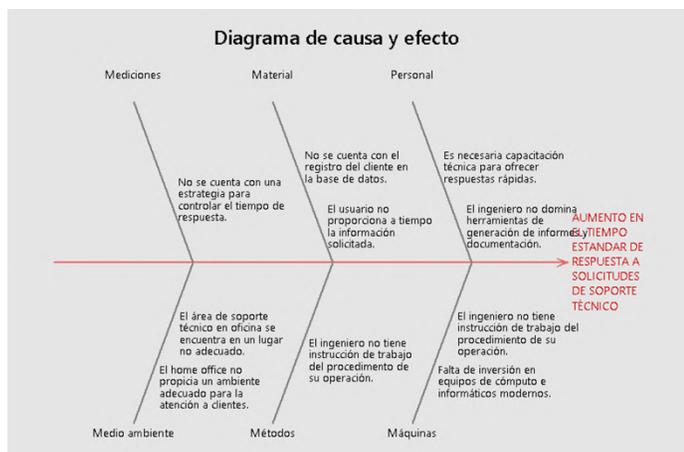


Como se puede observar, existen tres formas de contacto que el cliente puede utilizar para que le brinden soporte técnico: correo electrónico, página web y llamada telefónica, siendo ésta última la más empleada por los usuarios y a su vez, la que la empresa sugiere como ideal para mejorar la presencia de sus servicios con el cliente.

Desde el 2020, la empresa monitorea el tiempo que los ingenieros de aplicación de soporte técnico duran en resolver un caso, dando como resultado de análisis estadísticos anteriores, un tiempo estándar de 2 horas, teniendo un límite superior de 2 horas con 15 minutos y un límite inferior de 1 hora, desde que el ingeniero de aplicación toma la llamada hasta que envía el correo de agradecimiento al cliente; dicho parámetro es importante para la empresa y busca disminuirlo con la finalidad de ampliar la capacidad de respuesta a los usuarios y brindar calidad y facilidad en el servicio; Montgomery (2007) sostiene que: "Hay muchas industrias en las que la percepción del cliente sobre la calidad recibe la influencia directa de la rapidez y la economía con que puede llevarse a cabo una actividad de mantenimiento de rutina o una reparación".

En esta primera parte de la metodología, también fue necesario realizar un diagrama de Ishikawa, para conocer las principales variables que influyen en el tiempo estándar que tiene el equipo de soporte técnico para dar solución a un cliente o distribuidor; así lo infiere Gutiérrez (2004): "La importancia de este diagrama radica en que obliga a contemplar todas las causas que pueden afectar el problema bajo análisis y de esta forma se evita el error de buscar directamente las soluciones sin cuestionar a fondo cuales son las verdaderas causas". Los resultados obtenidos son los siguientes:

Figura 2
Diagrama de causa y efecto.



Realizando el análisis del diagrama causa y efecto y el diagrama de flujo actual del proceso (figura 2), se determina que la fase: "El ingeniero responde duda del cliente" es donde la variable tiempo se ve afectada de forma significativa en el procedimiento, porque no se cuenta con una estrategia para controlar el mismo.

2.2 Medir

La siguiente etapa de la metodología DMAIC, se denomina medir, la cual según Krajewski (2013) conceptualiza como: "Cuantificar el trabajo que realiza el proceso que afecta la diferencia. Seleccionar qué medir, identificar las fuentes de datos y preparar un plan de recolección de datos".

Para realizar las actividades de esta fase, fue necesaria la recolección de los datos, que como ya se mencionó anteriormente, desde el año 2020, la empresa recabó los mismo, teniendo por lo tanto una fuente primaria de datos; también es importante mencionar que se utilizó la distribución normal para el análisis de los mismos, basados en el Teorema del Límite Central, definido por Levine (2014) como: "El teorema del límite central plantea que, a medida que el tamaño de muestra, es decir, el número de valores en cada muestra, se vuelve lo suficientemente grande, la distribución muestral de la media se distribuye de manera aproximadamente normal. Esto es verdad sin importar la forma de la distribución de los valores individuales en la población" ya que el tamaño de la muestra en esta investigación supera por mucho el límite mínimo de 30 valores. Por lo tanto, la distribución normal en este estudio permite hacer inferencias correctas acerca de la población.

A continuación, se calcula el nivel sigma del proceso con el registro de la duración de las llamadas recibidas en soporte técnico en los años 2021 y 2022, donde se puede observar la media de duración de las llamadas, así como también la desviación estándar de la muestra y los límites de especificación mencionados anteriormente. Los resultados se muestran a continuación:

Figura 3
Cálculo del nivel sigma del proceso en el año 2021.

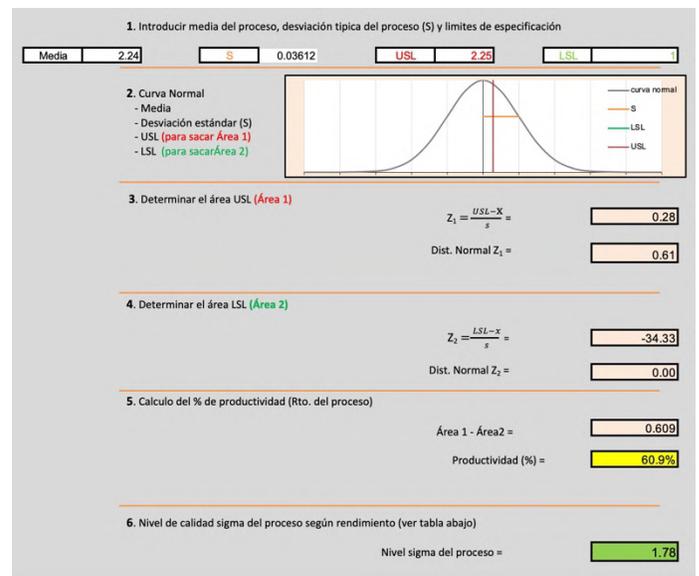
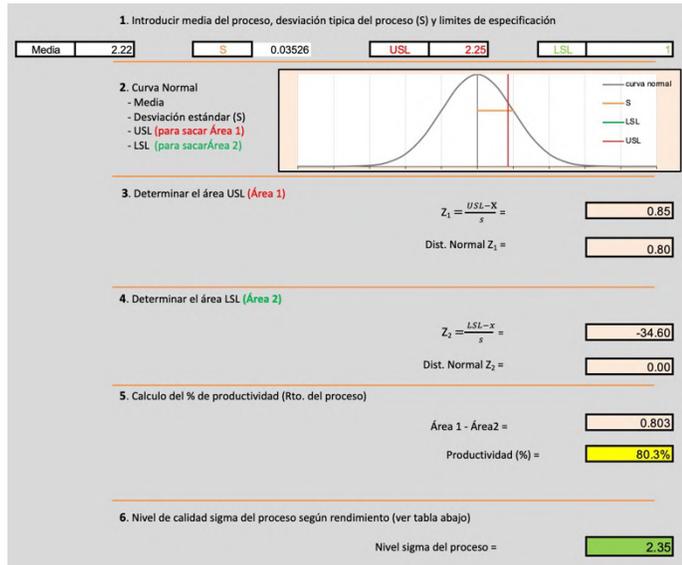


Figura 4
Cálculo del nivel sigma del proceso en el año 2022.



Como se puede observar en la figura 3 y 4, tanto el año 2021 como el 2022 poseen un nivel sigma del proceso menor a 3 sigma, lo que corrobora que el proceso es incapaz.

2.3 Analizar

La tercera etapa de la herramienta DMAIC es analizar, que consiste según Krajewski (2013) en: “Utilizar los datos de las mediciones para realizar el análisis del proceso y aplicar herramientas. Sea o no necesario un rediseño, debe establecer los procedimientos para hacer la rutina de salida deseada”.

Como se observó en la etapa anterior, tanto en el año 2021 como en el 2022 se cuenta con una productividad del 60.9% y del 80.3% respectivamente, debido a esto, se llevó a cabo el plan de mejora, realizado por el equipo de soporte técnico, tomando en cuenta el análisis del diagrama causa y efecto y de flujo actual del proceso, llegando a los siguientes acuerdos:

Figura 5
Plan de mejora.

- Realizar capacitaciones al menos dos veces al año a los ingenieros de aplicación.
- Actualizar la base de datos de clientes y distribuidores semanalmente.
- Analizar los resultados obtenidos en la encuesta de satisfacción al cliente.
- Incorporar un nuevo sistema de registro de casos más eficiente.
- Crear instrucciones de trabajo del procedimiento a llevar a cabo al recibir una solicitud de soporte técnico.

2.4 Mejorar

La cuarta etapa, mejorar, consiste según (Chase, 2014) en: “Identificar los medios para eliminar las causas de los defectos, confirmar las variables clave y cuantificar sus efectos en las características cruciales para la calidad, identificar los márgenes máximos de aceptación de las variables clave y un sistema para medir las desviaciones de dichas variables y modificar los procesos para mantenerse dentro de los límites apropiados.”

Para poder disminuir el tiempo de respuesta a los clientes, que es la variable a considerar en todo el proceso, el equipo de soporte técnico realizó una matriz de posibles soluciones la cual ayudará a seleccionar la mejor de ellas. El equipo determinó los criterios de evaluación mediante la técnica de lluvia de ideas y se describen a continuación:

Tabla 1
Criterios de evaluación.

Criterio	Peso	Descripción
El ingeniero responde duda del cliente (variable numérica continua: tiempo)	80%	Criterio clave para la factibilidad de la mejora.
El ingeniero genera un caso de soporte técnico en la base de datos (variable numérica continua: tiempo)	20%	Criterio secundario para la factibilidad de la mejora.

En seguida se determinaron las propuestas de solución que permiten cumplir con el objetivo principal:

Tabla 2
Propuestas de solución.

Propuesta	Descripción
Crear instrucciones de trabajo del procedimiento a llevar a cabo al recibir una solicitud de soporte técnico.	Esta propuesta implica diseñar una serie de pasos a desarrollar por los ingenieros de aplicación, es decir, estandarizar el procedimiento al recibir una llamada telefónica.
Incorporar un nuevo sistema de registro de casos más eficientes.	Esta propuesta implica una inversión para la empresa, pues es necesaria la adquisición de un nuevo sistema de registro de casos de soporte.

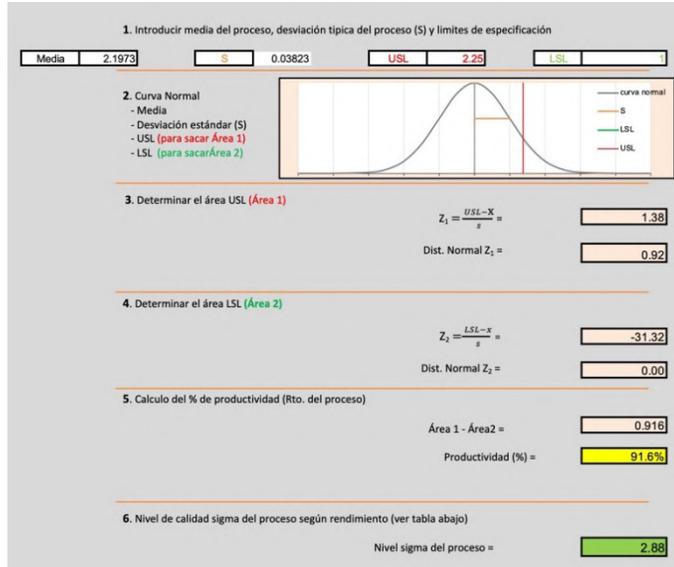
El equipo de soporte técnico analiza la correlación entre el tiempo que tardan en responder un caso y la inexistencia de instrucciones de trabajo de procedimientos, tomando ésta mejora como la solución más viable para efficientar el proceso y no solo limitar dicha mejora al tiempo de respuesta vía telefónica, sino a las otras dos formas de atención: página web y correo electrónico.

Luego de cuatro meses de la aprobación e implementación de la mejora, se realiza un nuevo análisis, calculando el nivel sigma del proceso actual, usando el registro de las llamadas de enero a abril del año 2023.

Los resultados se muestran en la figura 6, donde se puede observar el aumento en el nivel sigma del proceso en comparación con los años anteriores y por ende también un aumento en el porcentaje de la productividad.

Con la implementación de la mejora se tiene un nivel sigma de 2.88 y un porcentaje de productividad del 91.6%, lo que conlleva a concluir que dicha implementación ha disminuído el tiempo de respuesta vía telefónica a solicitudes de soporte técnico.

Figura 6
Cálculo del nivel sigma del proceso con la implementación de la mejora.



2.5 Controlar

La última etapa de la metodología DMAIC, controlar, consiste según Krajewski (2013) en: “Monitorear el proceso para asegurarse de que se mantienen los altos niveles de desempeño”

En ésta etapa se realizaron gráficas de control para monitorear el estado del proceso con la implementación de la mejora. A continuación se muestran las gráficas de control de los meses de marzo y abril.

Figura 7
Gráfica de control del mes de marzo.

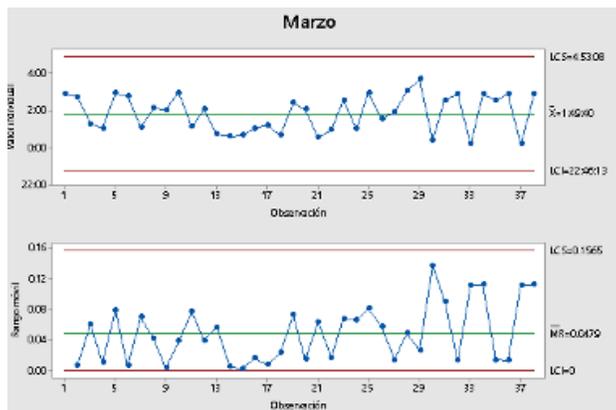
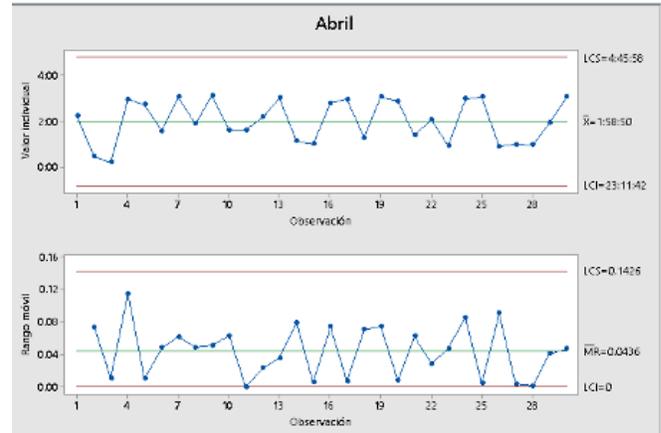


Figura 8
Gráfica de control del mes de abril.



Como se puede observar, en las figuras 7 y 8, el proceso está en control, lo que permite corroborar que la implementación de la mejora sigue dando resultados favorables en la variable tiempo de respuesta.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mediante la aplicación de la metodología Seis Sigma, se logró el objetivo de disminuir el tiempo de respuesta vía telefónica a clientes y distribuidores de la empresa desarrolladora de software para equipos de medición y por ende el impacto en la mejora continua de la misma, que Gutiérrez (2010) lo corrobora de la siguiente manera: “La mejora continua es consecuencia de una forma ordenada de administrar y mejorar los procesos, identificando causas o restricciones, estableciendo nuevas ideas y proyectos de mejora, llevando a cabo planes, estudiando y aprendiendo de los resultados obtenidos y estandarizando los efectos positivos para proyectar y controlar el nuevo nivel de desempeño”

Antes del desarrollo de la metodología, se tenía un nivel sigma de 1.78 y 2.35 para los años 2021 y 2022 respectivamente, lo cual demostraba que el proceso era incapaz, después del diseño, aprobación e implementación de la mejora se llegó a un nivel sigma de 2.88, es decir un 91.6% de productividad, lo cual trajo consigo un aumento de casos atendidos, ya que se disminuyó el tiempo de respuesta a las solicitudes de soporte técnico y por ende se ratificó el compromiso que posee la empresa con sus clientes y distribuidores.

Se sugiere que se realice un análisis de las otras dos formas de atención al cliente para lograr que el soporte técnico en general siga brindando un servicio de calidad y a la vez sea eficiente y eficaz, no dejando pasar por alto que la última era de la mercadotecnia es la de la relación con los clientes en la cual las compañías descubren, conocen y generan las necesidades del consumidor, satisfacen sus expectativas y las sobrepasan. Aunque pareciera una situación muy simple de llevar a cabo, se sabe que no es así, Stanton (2007) opina que: “Las relaciones perdurables están basadas en la confianza y el compromiso mutuo, requieren de mucho tiempo y esfuerzo para crearse y mantenerse.”

IV. CONCLUSIONES

La metodología Seis Sigma es una herramienta fundamental para cualquier empresa que busca brindar productos y servicios de calidad, uno de los puntos clave de su filosofía central es correlacionar los requisitos de los clientes y los objetivos estratégicos generales de la empresa; además aumenta la importancia de la estadística para mejorar la calidad, ya que coadyuva en tomar mejores decisiones mediante la comprensión de las fuentes de variación y el descubrimiento de patrones y relaciones en los datos de negocios (Kazmier, 2006)

La aplicación de la metodología Seis Sigma no solo incide en la calidad de servicios y productos, sino también en la consolidación e la implementación de las normas ISO 9000 pues ayuda a la administración de recursos y propicia recursos para la capacitación del capital humano.

En la investigación presentada se pueden observar los beneficios de la implementación de la metodología, no solo en la satisfacción del cliente sino también en el desarrollo de las actividades propias de la empresa y por ende en el factor económico de la misma.

V. AGRADECIMIENTOS

Se hace extensivo el agradecimiento al Tecnológico Nacional de México campus Instituto Tecnológico Superior de San Pedro de las Colonias, así como también a la empresa Polyworks México por permitir la colaboración para la realización de la presente investigación.

VI. REFERENCIAS

- Koontz H. y Wehrich H. (2004). *Administración. Una perspectiva global*. McGraw-Hill Interamericana Editores.
- Evans J.R. y Lindsay W.M (2005). *Administración y control de la calidad*. Thompson Editores.
- Gutiérrez Pullido H. (2004). *Control estadístico de calidad y seis sigma*. McGraw-Hill Interamericana Editores.
- Montgomery, D. (2007). *Control estadístico de la calidad*. Editorial Limusa.
- Krajewski, J.; Ritzman, B. y Malhotra, M. (2013) *Administración de operaciones. Procesos y cadena de suministro*. Pearson Educación de México.
- Chase, R. B. y Jacobs, F. R. (2014). *Administración de operaciones. Producción y cadena de suministros*. McGraw-Hill Interamericana Editores.
- Gutiérrez Pulido, H. (2010). *Calidad total y productividad*. McGraw-Hill Interamericana Editores.
- Stanton, W., Etzel, M. y Walker, B. (2007). *Fundamentos de marketing*. McGraw-Hill Interamericana Editores.
- Kazmier, Ph.D., Leonard, J. (2006). *Estadística aplicada a administración y economía*. McGraw-Hill Interamericana Editores.
- Camisón, C., Cruz, S. y González, T. (2006). *Gestión de la calidad: conceptos, enfoques, modelos y sistemas*. Pearson Educación S. A.
- Polyworks (23 de mayo de 2023). Polyworksmexico. <https://www.polyworksmexico.com>

Diseño, fabricación e implementación de tarjeta didáctica de entrenamiento para plataforma ESP32 aplicada en cursos de programación

Machado-Díaz, E¹; Flores-Prince, C. U.¹; Coto-Fuentes, H¹

Datos de Adscripción:

¹Tecnológico Nacional de México (TecNM): Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, División de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Av. Tecnológico No. 1555 Sur Periférico Gómez - Lerdo Km. 14.5, Ciudad Lerdo, Durango; México. C.P. 35150.
eduardo.md@itslerdo.edu.mx

Resumen - El ESP32 es un microcontrolador de bajo costo y alto rendimiento que se ha convertido en una de las opciones más populares para proyectos de Internet de las cosas (IoT) y dispositivos embebidos debido a su versatilidad, conectividad, potencia de procesamiento y bajo consumo. Así como su facilidad para desarrollar aplicaciones utilizando lenguajes de programación conocidos como C++ y Python.

Derivado de lo anterior, es necesaria la capacitación profesional en este tipo de plataformas que sea entendible y de fácil acceso para aquellas personas que tienen conocimientos básicos en las áreas de electrónica y programación en general.

En el presente proyecto se plantea el diseño, fabricación y validación de una tarjeta entrenadora para ESP32, así como su implementación en un taller de formación profesional para su posible aplicación en cursos de diferentes materias relacionadas con la automatización.

La placa entrenadora cuenta con elementos comunes para el aprendizaje del diseño de sistemas a base de microcontroladores como lo son: diodos emisores de luz, botones pulsadores en diferentes configuraciones, bocina piezoeléctrica, conexión para dispositivos de comunicación I2C y sensores para adquisición de datos analógicos y digitales.

Con lo anterior, se planeó e impartió un curso - taller piloto de programación brindado a docentes relacionados con las áreas de electrónica, automatización y programación, esto como validación del uso para el que fue diseñada la tarjeta entrenadora. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, teniendo una buena aceptación durante el procedimiento de evaluación del curso - taller.

Palabras Clave – Entrenadora, ESP32, Microcontrolador, Programación, Tarjeta

Abstract - The ESP32 is a low-cost, high-performance microcontroller that has become one of the most popular choices for The Internet of Things (IoT) projects and embedded devices due to its versatility, connectivity, processing power, and low power consumption. Additionally, it offers ease of application development using well-known programming languages such as C++ and Python.

Based on the aforementioned advantages, there is the need for professional training on these platforms that is understandable and easily accessible for individuals with basic knowledge in electronics and programming fields.

This project aims to design, manufacture, and validate an ESP32 development board, as well as its implementation in a professional training workshop for potential use in courses related to automation and various other subjects.

The development board includes common elements for learning microcontroller-based system design, such as light-emitting diodes, push buttons in different configurations, a piezoelectric buzzer, an I2C communication interface, and sensors for acquiring analog and digital data.

Based on these considerations, a pilot programming course and workshop were planned and conducted for educators in the fields of electronics, automation, and programming. This was done to validate the intended use of the development board. The results obtained were satisfactory, and the course and workshop were well-received during the evaluation process.

Keywords – Board, ESP32, Microcontroller, Programming, Trainer.

I. INTRODUCCIÓN

Este artículo se centra en el desarrollo de una tarjeta de entrenamiento específicamente diseñada para microcontroladores ESP32, con el objetivo de promover la educación superior mediante el aprendizaje práctico. La tarjeta de entrenamiento proporciona un entorno de desarrollo completo y accesible, que permite a los estudiantes experimentar y explorar las capacidades del ESP32 de una manera estructurada y guiada.

1.1 Microcontroladores

Los microcontroladores son dispositivos electrónicos altamente integrados que combinan una unidad de procesamiento central (CPU), memoria, periféricos de entrada/salida y otros componentes en un solo chip. Estos chips están diseñados para ejecutar instrucciones específicas y controlar el funcionamiento de sistemas y dispositivos electrónicos (Valdés & Pallas Areny, 2007).

La principal característica de los microcontroladores es su capacidad para realizar tareas de control y procesamiento en tiempo real. Son utilizados en una amplia gama de aplicaciones donde se requiere un control preciso y eficiente. Algunas de las aplicaciones más importantes de los microcontroladores son las siguientes (Usategui, 2003):

- **Automatización industrial:** Los microcontroladores son ampliamente utilizados en la automatización industrial para controlar y supervisar procesos. Se utilizan en sistemas de control de motores, controladores de temperatura, sistemas de iluminación, sistemas de seguridad, entre otros.
- **Electrónica de consumo:** Los microcontroladores están presentes en numerosos dispositivos electrónicos de consumo, como electrodomésticos, equipos de audio y video, sistemas de navegación GPS, relojes digitales, juguetes electrónicos y muchos más. Permiten el control y la interacción con estos dispositivos.
- **Automoción:** En la industria automotriz, los microcontroladores se utilizan para controlar una amplia variedad de sistemas, como el control del motor, sistemas de seguridad, sistemas de entretenimiento y navegación, sistemas de control de tracción, sistemas de frenado antibloqueo (ABS) y muchos otros sistemas de control en el vehículo.
- **Telecomunicaciones:** Los microcontroladores se encuentran en dispositivos de telecomunicaciones como routers, módems, teléfonos móviles, sistemas de comunicación por satélite y otros dispositivos de red. Ayudan a gestionar y controlar la comunicación y el procesamiento de datos en estos sistemas.
- **Sistemas embebidos:** Los microcontroladores son la columna vertebral de los sistemas embebidos, que se encuentran en una amplia gama de aplicaciones, como sistemas de control de dispositivos médicos, sistemas de control de vuelo en aeronaves, sistemas de seguridad, dispositivos de control de acceso y sistemas de control de iluminación en edificios.

Estas son solo algunas de las aplicaciones más comunes de los microcontroladores. Su versatilidad y capacidad de control los convierten en componentes fundamentales en la electrónica moderna, y su uso continúa expandiéndose a medida que la tecnología avanza y se desarrollan nuevas aplicaciones (Martínez, 2006).

1.2 Microcontrolador ESP32

El ESP32® es un microcontrolador de bajo costo y bajo consumo de energía desarrollado por Espressif System®. Se basa en una arquitectura de 32 bits y cuenta con un núcleo de procesador Xtensa LX6® de doble núcleo que puede funcionar a una velocidad de reloj de hasta 240 MHz.

El microcontrolador incluye una amplia variedad de interfaces de comunicación, como Wi-Fi, Bluetooth, Bluetooth de baja energía (BLE), UART, SPI, I2C, I2S, PWM y ADC. Además, tiene una memoria RAM de hasta 520 KB y una memoria flash de hasta 16 MB. Su conectividad Wi-Fi 802.11 b/g/n permite la comunicación inalámbrica con redes locales y acceso a Internet, mientras que la integración de Bluetooth y BLE le permite conectarse con dispositivos móviles y otros dispositivos habilitados para Bluetooth (Pravalika, 2019).

El ESP32 destaca por su bajo consumo de energía, su seguridad incorporada con encriptación AES, RSA, ECC, SHA y funciones de cifrado, y su capacidad de procesamiento para manejar tareas complejas y ejecutar múltiples hilos. Es ampliamente utilizado en aplicaciones IoT, como sensores,

sistemas de automatización del hogar, entre otros. (Babiuch, 2019).

1.3 Importancia de los microcontroladores en la educación

En la era actual, la educación superior está experimentando una transformación significativa, donde el énfasis se está desplazando gradualmente de un enfoque teórico tradicional hacia una educación práctica y basada en proyectos. En este contexto, los microcontroladores han demostrado ser herramientas poderosas que facilitan la integración entre la teoría y la práctica, permitiendo a los estudiantes adquirir habilidades y conocimientos de manera más efectiva (Niño Vega, Martínez Díaz, & Fernández Morales, 2017).

Uno de los microcontroladores más populares y versátiles en la actualidad es el ESP32, ampliamente utilizado en aplicaciones de IoT (Internet de las cosas), robótica y sistemas embebidos.

La importancia de este tipo de dispositivos en la educación superior radica en varios aspectos clave. En primer lugar, los microcontroladores ESP32 son asequibles y ampliamente disponibles, lo que reduce las barreras económicas para su adquisición y permite a las instituciones educativas integrar los fácilmente en sus programas académicos. Además, el ESP32 cuenta con una amplia comunidad de desarrolladores y una gran cantidad de recursos educativos en línea, lo que facilita el acceso a información y la colaboración en proyectos (Domínguez Mínguez, 2020).

En segundo lugar, el aprendizaje práctico utilizando microcontroladores fomenta el pensamiento crítico y la resolución de problemas de manera tangible. Los estudiantes pueden enfrentarse a desafíos reales, implementar soluciones prácticas y observar los resultados en tiempo real. Esto no solo mejora su comprensión teórica, sino que también desarrolla habilidades prácticas relevantes para su futura carrera profesional (Padilla & Jaén Martínez, 2018).

En tercer lugar, la tarjeta de entrenamiento para microcontroladores ESP32 proporciona un entorno seguro y controlado para experimentar. Los estudiantes pueden realizar pruebas, depurar programas y explorar diferentes configuraciones sin el riesgo de dañar equipos costosos o componentes delicados. Esta facilidad de uso y flexibilidad inherente a la tarjeta de entrenamiento brinda a los estudiantes la confianza necesaria para adentrarse en la electrónica y la programación de microcontroladores (Guevara Vásquez, 2022).

1.4 Tarjetas de entrenamiento de microcontroladores

Las tarjetas entrenadoras para microcontroladores desempeñan un papel importante en el desarrollo y la implementación de proyectos basados en estos dispositivos. Estas tarjetas proporcionan un entorno de desarrollo listo para usar que incluye todas las conexiones y componentes necesarios, lo que permite un acceso rápido al hardware y facilita el prototipado rápido.

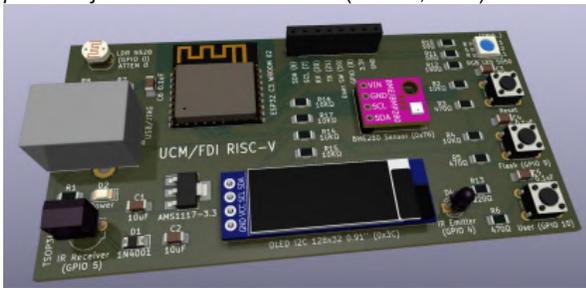
La versatilidad y escalabilidad de las tarjetas entrenadoras permiten adaptar el hardware a diferentes aplicaciones y expandir sus capacidades según sea necesario. Además, estas tarjetas suelen integrarse con herramientas de desarrollo populares, simplificando el proceso de programación y acelerando el tiempo de comercialización.

Este tipo de dispositivos son herramientas valiosas que agilizan el desarrollo de proyectos, brindan soporte y facilitan la implementación de soluciones basadas en microcontroladores.

Existen proyectos enfocados en la realización de este tipo de tarjetas, enfocadas en aplicaciones particulares. Ejemplo de ello se puede ver en el trabajo realizado por (Fabero, 2022), donde se realizó una tarjeta con elementos principales utilizando tecnología de montaje superficial. Se hace énfasis en que se aplica para diversas materias. Sin embargo, no tiene un enfoque particular. Así mismo, solamente es el hardware sin un curso, también el hecho de que esté fabricado en montaje superficial dificulta su fabricación con la tecnología común en las universidades y su mantenimiento preventivo y correctivo. En la Figura 1, se muestra la placa diseñada.

Figura 1

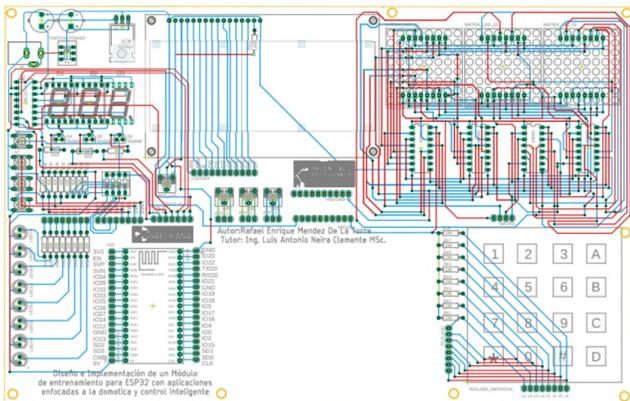
Ejemplo de tarjeta entrenadora diseñada (Fabero, 2022).



Otro ejemplo es el diseñado por (Méndez de la Torre, 2022), el cual tiene como objetivo el diseño e implementación de un módulo de entrenamiento utilizando el procesador ESP32 para aplicaciones enfocadas a la Domótica, derivado de las necesidades de los laboratorios de microcontroladores para realizar prácticas de una forma más fácil para los alumnos. Creando la PCB y una interfaz visual para su control. La Figura 2 muestra el diseño creado por Méndez

Figura 2

Diseño de tarjeta PCB creado por Méndez.



El proyecto anteriormente citado, presenta una propuesta difícil de elaborar con herramientas convencionales, ya que está creada a dos caras de la tarjeta PCB y tiene elementos poco comunes para tarjetas de entrenamiento como lo son las matrices de LED. Se puede observar también que el tamaño de

las pistas de conexión es pequeño, dificultando su elaboración con los métodos tradicionales de fabricación utilizado en la mayoría de los institutos de estudios superiores o medio superior.

Derivado de lo anteriormente descrito, se procedió al diseño de una tarjeta entrenadora para ESP32 que fuera aplicable en cursos de microcontroladores, que sea de fácil fabricación y mantenimiento y que contuviera los dispositivos más utilizados en los cursos mencionados.

II. PARTE TÉCNICA

2.1 Especificaciones de diseño de la tarjeta

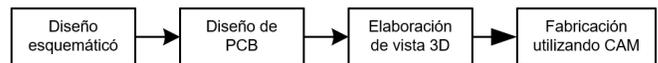
La tarjeta entrenadora se diseñó en base a las características que se mencionan a continuación:

- Fácil fabricación: Que fuera realizable mediante procesos de transferencia térmica o maquinado CNC con la finalidad de que fuera replicable en caso de requerir más cantidad.
- Elementos comunes: Utilizar dispositivos que sean de fácil adquisición dentro de la región (Comarca Lagunera, México) así como de soldar y de uso común en prácticas de microcontroladores a diferentes niveles.
- Tamaño reducido: Tener dimensiones máximas de 10x10cm para su almacenaje y transporte entre los estudiantes y docentes que hagan uso de ella.

La elaboración del proyecto de la tarjeta puede dividirse en 4 etapas principales que se muestran en el diagrama de flujo de la Figura 3.

Figura 3

Ejemplo de tarjeta entrenadora diseñado por Fabero.

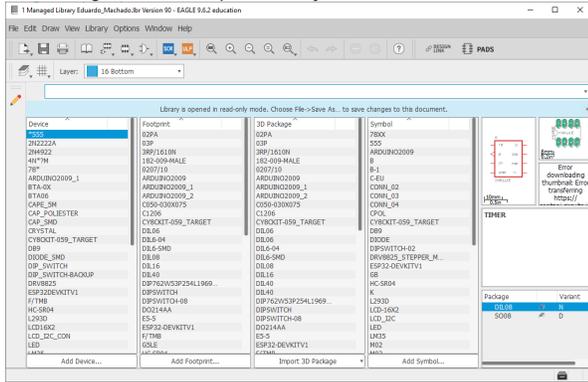


Cada una de las fases fue realizada utilizando software especializado. En este caso la suite Fusion 360® de Autodesk® mediante una licencia educativa.

2.2 Diseño de diagrama esquemático.

Para el diseño esquemático se utilizó el software de Eagle® en su versión 9.6.2 con la licencia educativa. En este punto es importante recalcar que se crearon las librerías de todos los componentes a utilizar para que estuvieran acordes con aquellos que fueron usados en el montaje. Es decir, se diseñaron los símbolos, los footprint (huellas de PCB) y se les adjuntó un diseño CAD en 3D (este último tomado de páginas de uso libre como lo es GrabCAD). En la Figura 4 se muestra la librería diseñada.

Figura 4
Librería de Eagle Diseñada para la tarjeta entrenadora



Una vez creadas las librerías, se procedió a la conexión de los circuitos de acuerdo a los elementos elegidos que enlistan a continuación.

- 6 diodos LED de diferentes colores
- 2 botones pulsadores en configuración Pull – Up.
- Conexión para dispositivos I2C.
- Zumbador pasivo.
- Conexiones macho multipropósito.
- Potenciómetro de precisión (TRIMPOT).
- Sensor de temperatura LM35.
- Sensor ultrasónico HC-SR04.

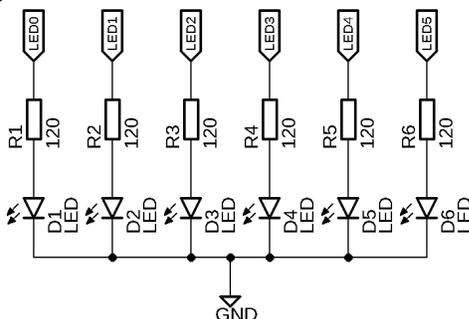
Los diodos LED se conectaron a partir del esquema de un circuito serie donde la fuente de alimentación es la salida a utilizar el microcontrolador. Se consideraron pines que estuvieran próximos unos de otros para facilitar su ruteo en el software de la PCB.

La resistencia se calculó a partir de la resolución de un circuito serie a partir de (1). Tomando como voltaje de entrada los 3.3V que brinda el ESP32 y una corriente aproximada de 20mA. El voltaje de LED se propone de 1.5V debido a que es el promedio utilizado por la mayoría de los colores.

$$R = \frac{V_{in} - V_{led}}{I_{led}} = \frac{3.3V - 1.5V}{20 \times 10^{-3}A} = 90\Omega \quad (1)$$

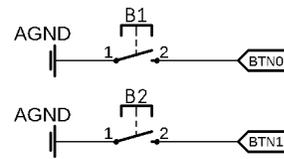
De acuerdo a los cálculos anteriores y tomando el valor más cercano y común, así como posible uso de LED de distintos colores se optó por una resistencia de 120Ω. Por lo que el circuito de los diodos LED es que se muestra en la Figura 5.

Figura 5
Diseño esquemático de conexión de LEDs



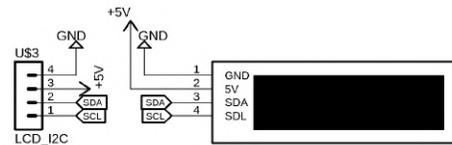
En el caso de los botones, se aprovecharon las resistencias internas de pull – up del ESP32 para hacer mejor uso del espacio en la placa. La conexión, de acuerdo al manual del fabricante es el que se muestra en la Figura 6.

Figura 6
Diseño esquemático de botones



La conexión para dispositivos I2C se colocó de forma genérica de acuerdo a la distribución de las pantallas LCD comúnmente utilizadas. Sin embargo, al ser conectores hembra pueden aplicar para cualquier dispositivo siempre que se respete el orden de los pines. El ejemplo para el uso de una pantalla se muestra en la Figura 7. En este apartado, es importante mencionar que la alimentación positiva es de 5V obtenidos del regulador de la placa, pues algunos dispositivos I2C no son compatibles en alimentación con la lógica de 3.3V.

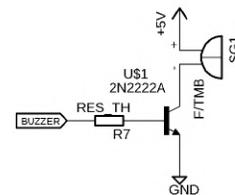
Figura 7
Diseño esquemático para conexión I2C.



Con el objetivo de hacer prácticas encaminadas al uso de temporizadores y modulación por ancho de pulso, se colocó un zumbador pasivo. La elección de un pasivo es debido a que este tipo de zumbador permite generar un sonido a una frecuencia establecida, mientras que el pasivo solamente genera una señal audible del periodo para el que está fabricado. El diagrama de conexión se presenta en la Figura 8.

Se observa la presencia de un transistor, esto ya que, si bien es posible conectar el zumbador directamente a la salida del microcontrolador, se pretendió incrementar la corriente que circulara por él para generar un sonido de mayor alcance.

Figura 8
Diseño esquemático para acondicionamiento de zumbador.



Tomando en cuenta que es necesario conectar otros dispositivos al microcontrolador ajenos a los colocados en la placa de circuito impreso, se colocaron conectores multipropósito, es decir, pueden adaptarse para la conexión de cualquier dispositivo. La distribución seleccionada es la utilizada para servomotores y que puede adaptarse para cualquier dispositivo en general. La Figura 9 presenta el ejemplo de las conexiones.

Figura 13
Reglas de diseño de distancia para circuito impreso



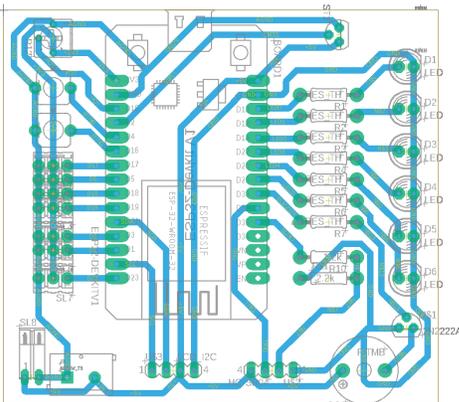
Posteriormente se colocan las reglas de ancho de pista y taladros mínimos. En base a lo anteriormente descrito del método de fabricación se establecieron los anchos de pista y taladros de la Figura 14. Es importante mencionar que este proceso se facilita en gran medida debido al diseño de las librerías propias, donde se extendió el tamaño de las huellas y los taladros, por lo que las reglas a colocar están acordes a ello.

Figura 14
Reglas de ancho de pista para el diseño PCB



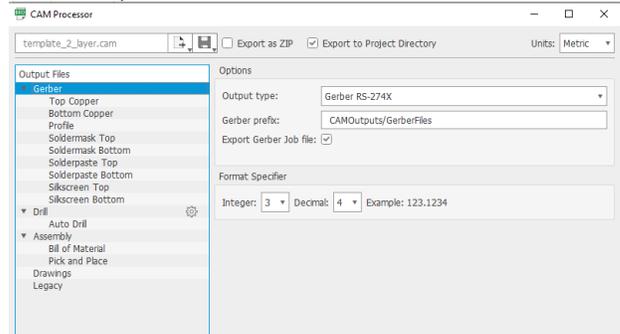
Con las reglas establecidas, se hizo el ruteo o las conexiones de los elementos. Haciendo uso de las normas básicas para diseño de circuitos impresos, las rutas fueron hechas evitando realizar ángulos de 90° pues esto genera un desgaste a largo plazo, así como señales de ruido eléctrico. El circuito diseñado es el que se muestra en la Figura 15.

Figura 15
Propuesta de diseño PCB.



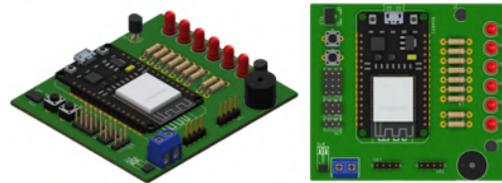
Ya con el diseño PCB realizado se optó por utilizar el método de maquinado CNC para su fabricación. Para ello, se exportaron los archivos CAM a través del software Eagle® usando la herramienta de procesador CAM que se muestra en la Figura 16. En este apartado es importante considerar el formato de exportación, así como las unidades.

Figura 16
Opciones de exportación de archivos CAM.



Como método de comprobación se procedió a realizar una visualización 3D de la placa para verificar que todos los elementos se encuentren accesibles al usuario, esto fue realizado utilizando la herramienta Fusion 360® con los modelos generados en la biblioteca. La visualización 3D se puede observar en la Figura 17.

Figura 17
Vista 3D de la placa de circuito impreso



III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Fabricación de la tarjeta entrenadora.

Con la placa terminada, se procedió a su fabricación utilizando el router CNC. Posteriormente, se montaron y soldaron los componentes obteniendo el resultado que se muestra en la Figura 18. Puede observarse que la visualización 3D generada se ve plasmada en la realidad.

Así mismo, por el método de fabricación, las pistas tienen el tamaño correcto. Sin embargo, para ahorrar tiempo de maquinado se optó por sólo maquinar el contorno de las pistas lo cual no afecta su funcionamiento, pero sí dificulta el proceso de soldadura.

Figura 18
Vista 3D de la placa de circuito impreso



3.2 Diseño del curso de aplicación de la tarjeta

Para validar la utilidad y el funcionamiento de la tarjeta entrenadora, se diseñó un curso presencial para docentes del posgrado de la maestría en Ingeniería en Mecatrónica del Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. El curso se planeó para

una duración de 30 horas de forma presencial y con participantes con conocimientos básicos de electrónica y programación.

Siguiendo las pautas anteriormente descritas se plantearon las competencias a desarrollar que se presentan a continuación.

- Conocer y adquirir los conocimientos básicos de microcontroladores ESP
- Manejar las operaciones fundamentales con variables y estructuras de datos en C++ aplicados en el lenguaje de programación Arduino.
- Aplicar dispositivos electrónicos para la solución de problemas comunes en la enseñanza de los microcontroladores.
- Desarrollar aplicaciones de comunicación inalámbrica básica utilizando diferentes tecnologías.

Así mismo, se planeó el curso con los temas que se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1
Planeación de temas y actividades de aprendizaje del curso.

Temas/Subtemas	Actividades de aprendizaje
Introducción 1. Conceptos básicos de microcontroladores 2. Introducción al ESP32 3. ESP32 utilizando el IDE de Arduino. 4. Variables y tipos de datos	<ul style="list-style-type: none"> • Examen teórico virtual en plataforma. • Estudio del material didáctico disponible. • Conexión básica del ESP32 con el IDE de Arduino.
Salidas Digitales 1. Diagramas de tiempos 2. Uso de salidas digitales y retardos 3. Secuencias 4. Ciclos y arreglos	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo de aplicaciones utilizando salidas digitales del ESP32. • Aplicación de salidas digitales en semáforos peatonales, secuencias de luces y generación de frecuencias.
Entradas digitales 1. Manejo básico de botones 2. Condicionales lógicos 3. Estructura IF 4. Secuencias condicionales	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo de aplicaciones utilizando entradas digitales del ESP32. • Aplicación de entradas digitales para condicionamiento de eventos.
Elementos de visualización 1. Pantallas de cristal líquido. 2. Display de 7 segmentos	<ul style="list-style-type: none"> • Implementación de programas utilizando elementos de visualización.
Aplicaciones 1. Medición de distancia 2. Conversor análogo - digital 3. Medición de temperatura con LM35 4. Reloj de tiempo real 5. Modulación por ancho de pulsos 6. Control de motores de D.C. 7. Conversor digital – análogo	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo de aplicaciones utilizando diversos dispositivos electrónicos. • Medición de variables analógicas (temperatura y distancia). • Desarrollo de programas utilizando reloj de tiempo real. • Aplicación del PWM en control de motores de C.D. y servomotores.
Comunicación 1. Manejo de cadenas 2. Puerto Serie 3. ESP Now 4. Bluetooth	<ul style="list-style-type: none"> • Proyecto final de comunicación de variables • Creación de aplicaciones Android utilizando App Inventor.

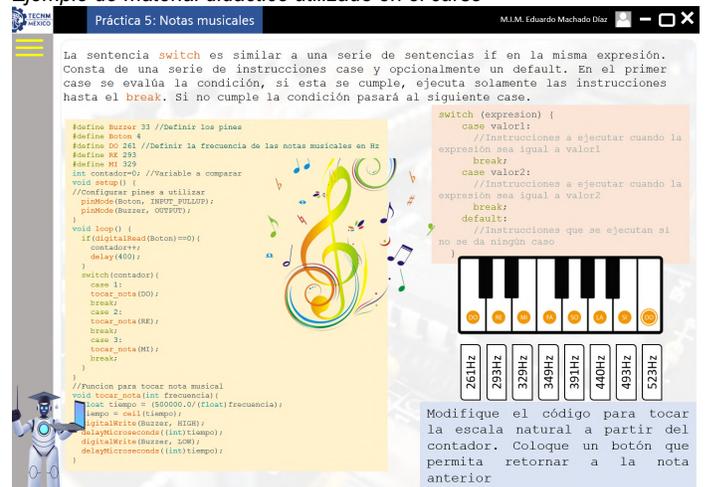
Las actividades del curso se dividieron en prácticas con la finalidad de enfocarse más en la aplicación del conocimiento, pues la teoría fue brindada por el instructor. Las clases del curso se desarrollaron a partir del diagrama de flujo que se muestra en la Figura 19.

Figura 19
Diagrama de flujo del curso propuesto.



Así mismo, el material didáctico muestra información teórica básica, código de ejemplo, estructura de las instrucciones utilizadas, así como propuestas de aplicación. Ejemplo de una diapositiva creada utilizando Microsoft Power Point® se ve en la Figura 20.

Figura 20
Ejemplo de material didáctico utilizado en el curso



3.3 Resultados de la implementación del curso.

El curso se implementó en la semana de capacitación profesional teniendo una participación de 13 docentes de las áreas de posgrado, electrónica, sistemas computacionales y sistemas automotrices. En la Figura 21 se observa la impartición del curso



Figura 21
Foto de evidencia de impartición del curso.

Se utilizaron 5 tarjetas entrenadoras, siendo los equipos de 3 personas con la finalidad de complementar los conocimientos de los integrantes y facilitar la resolución de las dudas debido al tiempo programado para el curso.

La evaluación final del curso (avalada por el departamento de desarrollo académico del Instituto) son las que se muestran en la Tabla 2

Tabla 2

Resultado de promedios de evaluación de contenido

Preguntas de evaluación de contenido	Calificación
1.-El tema del curso le pareció	10.00
2.- El programa del curso le pareció	10.00
3.- La secuencia y coherencia de los contenidos	10.00
4.- El material de apoyo y lectura	10.00
5.- El logro de objetivos propuestos se lograron	10.00
6.- Los temas tratados tienen aplicación y enriquecen el desarrollo de mi trabajo	10.00
7.- El contenido del Curso permite mejorar mis áreas de oportunidad	10.00
8.- La aplicación de los conocimientos adquiridos impactarán favorablemente en el aprendizaje de mis alumnos	10.00
9.- En general el curso me pareció	10.00
Promedio de evaluación del contenido	10.00

IV. CONCLUSIONES

El diseño y la implementación de una tarjeta entrenadora para el microcontrolador ESP32 ha demostrado ser una herramienta valiosa en la formación profesional de docentes en el campo de la electrónica y la programación.

Esta tarjeta, que incluye elementos comunes y prácticos para el aprendizaje de sistemas basados en microcontroladores, ha sido validada a través de un curso piloto dirigido a docentes de nivel superior. Los resultados obtenidos han revelado una gran aceptación por parte de los participantes, lo que resalta la relevancia y utilidad de esta herramienta en la enseñanza de cursos relacionados con la automatización y otras materias afines.

Es importante destacar que la capacitación docente continua y práctica es crucial en la actualidad, dado el rápido avance de la tecnología y la creciente demanda de habilidades en el campo de la IoT y los dispositivos embebidos. La disponibilidad de la tarjeta entrenadora proporciona una oportunidad valiosa para que los docentes adquieran conocimientos y experiencia en el uso del microcontrolador ESP32, así como en la implementación de proyectos reales.

La capacitación docente práctica fomenta el aprendizaje activo y la adquisición de habilidades concretas, lo que a su vez permite a los docentes transmitir mejor ese conocimiento a sus alumnos. Al familiarizarse con esta tarjeta entrenadora, los docentes pueden incorporar prácticas y proyectos relacionados con el ESP32 en sus cursos, brindando a los estudiantes una experiencia de aprendizaje más enriquecedora y aplicada.

La implementación de una tarjeta entrenadora para el microcontrolador ESP32 y su inclusión en cursos de formación profesional docente demuestran la importancia de la capacitación continua y práctica. Esta herramienta facilita la adquisición de habilidades en el uso de microcontroladores y la implementación de proyectos de IoT y dispositivos embebidos. Al fortalecer las capacidades de los docentes, se promueve una educación de calidad y actualizada, preparando a los estudiantes para los desafíos tecnológicos del futuro.

Con la fabricación de las tarjetas entrenadoras el Instituto Tecnológico Superior de Lerdo puede poner a disposición cursos de capacitación profesional encaminados a aplicaciones IoT utilizando el ESP32, siendo ésta una forma de promoción y obtención de convenios con el sector empresarial y educativo.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al Tecnológico Nacional de México (TecNM): Instituto Tecnológico Superior de Lerdo por las facilidades brindadas para la realización del presente trabajo.

También a las divisiones de Sistemas Automotrices, Electrónica y Posgrado por la facilidad para impartir el curso de capacitación para la validación del proyecto, así como todos los docentes involucrados. Muchas gracias por su cooperación y participación con sus propuestas de mejora.

VI. REFERENCIAS

- Babiuch, M. (2019). Using the ESP32 microcontroller for data processing. *20th International Carpathian Control Conference*.
- Domínguez Mínguez, T. (2020). *Desarrollo de aplicaciones IoT en la nube para Arduino y ESP8266*. España: Marcombo.
- Fabero, J. C. (2022). *Entrenador RISC-V*. Madrid: Universidad Complutense.
- Guevara Vásquez, J. J. (2022). *Diseño e implementación de plataforma de teleingeniería para prácticas en tiempo real de laboratorio a distancia de control de procesos industriales: aplicación en Laboratorio de Electrónica de ITCA-FEPADE Sede Central*. Salvador: ITCA Editores.
- Martínez, I. A. (2006). Aplicaciones de los microcontroladores. *Revista española de electrónica* 624, 82-83.
- Méndez de la Torre, R. E. (2022). *Diseño e Implementación de un Módulo de entrenamiento utilizando el procesador ESP32 para aplicaciones enfocadas a la Domótica*. Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- Niño Vega, J. A., Martínez Díaz, L. Y., & Fernández Morales, F. H. (2017). Entorno de aprendizaje para la enseñanza de programación en Arduino mediado por una mano robótica didáctica. *Revista Espacios*, 38.
- Padilla, D. B., & Jaén Martínez, A. (2018). Experiencia didáctica con Arduino. El aprendizaje basado en proyectos como metodología de trabajo en el aula de secundaria. *Hekademos: revista educativa digital* 25, 73-82.
- Pravalika, V. (2019). Internet of things based home monitoring and device control using Esp32. *International Journal of Recent Technology and Engineering* 8, 58-62.
- Usategui, A. (2003). *Diseño práctico de aplicaciones*. McGraw Hill.
- Valdés, F., & Pallas Areny, R. (2007). *Microcontroladores*. Barcelona: Marcombo.

Diseño de protocolo comando – parámetro mediante comunicación serie asincrónica universal aplicado al control de servomotores

Machado-Díaz, E¹; Coto-Fuentes, H¹; Alvarado-Tovar, N¹.

Datos de Adscripción:

¹Tecnológico Nacional de México (TecNM): Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, División de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Av. Tecnológico No. 1555 Sur Periférico Gómez - Lerdo Km. 14.5, Ciudad Lerdo, Durango; México. C.P. 35150.
eduardo.md@itslerdo.edu.mx

Resumen - El protocolo serie asincrónico universal (UART) es ampliamente utilizado en el diseño electrónico para la comunicación entre dispositivos, especialmente microcontroladores. Su facilidad de uso y compatibilidad con numerosos sistemas lo convierten en una opción popular. Sin embargo, su naturaleza plantea desafíos en el manejo de cadenas de caracteres y el intercambio de información.

Con el objetivo de simplificar la comunicación entre dispositivos con microcontrolador, se ha desarrollado un programa de ejemplo para la plataforma Arduino. Este programa utiliza el protocolo UART para el intercambio de información entre dos microcontroladores.

El protocolo consiste en un comando y un parámetro, lo que permite el envío y recepción de valores numéricos de manera ordenada y sencilla.

Una aplicación destacada de este programa de ejemplo es el control de servomotores. Mediante una interfaz visual, los comandos son enviados desde un dispositivo externo y recibidos por una placa Arduino. La información es procesada y utilizada para controlar múltiples servomotores. Esto proporciona una solución eficiente para el control de movimientos precisos en diversos proyectos.

La capacidad de manejar grandes cantidades de información de forma estructurada y reproducible hace que este programa de ejemplo sea una herramienta versátil para aquellos que trabajan con el protocolo UART. Además, al estar diseñado para la plataforma Arduino, puede ser fácilmente implementado en otros sistemas que utilicen este protocolo de comunicación.

El protocolo es ampliamente utilizado en el diseño electrónico y se destaca por su facilidad de uso y compatibilidad.

Palabras Clave – Comando, Comunicación, Parámetro, Serie, Servomotor

Abstract - Abstract— The Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART) serial protocol is widely used in electronic design for communication between devices, especially microcontrollers. Its ease of use and compatibility with numerous systems make it a popular choice. However, its nature poses challenges in handling character strings and exchanging information.

With the aim of simplifying communication between microcontroller devices, an example program has been developed for the Arduino platform. This program utilizes the UART protocol for information exchange between two microcontrollers.

The protocol consists of a command and a parameter, enabling the transmission and reception of numerical values in an organized and straightforward manner.

One notable application of this example program is servo motor control. Through a visual interface, commands are sent from an external device and received by an Arduino board. The information is processed and used to control multiple servo motors. This provides an efficient solution for precise motion control in various projects.

The ability to handle large amounts of structured and reproducible information makes this example program a versatile tool for those working with the UART protocol. Additionally, being designed for the Arduino platform, it can be easily implemented in other systems that use this communication protocol.

The protocol is widely used in electronic design and is distinguished by its ease of use and compatibility.

Keywords – Command, communication, parameter, Serial, Servomotor.

I. INTRODUCCIÓN

Debido al incremento en los sistemas automatizados y el desarrollo e implementación de dispositivos encaminados a la industria 4.0, cada vez es más común encontrar proyectos en los que se utilizan servomotores como el actuador principal para generar un movimiento de precisión y con cierto torque de una forma fácil y rápida, realizando el control a través de microcontroladores de bajo costo como lo pueden ser Arduino, PIC, STM, etc (Domínguez Mínguez, 2020).

En este tipo de desarrollos intervienen también protocolos de comunicación, pues los dispositivos de control deben de realizar generalmente el intercambio de información con una interfaz. Para llevar a cabo esto, se utilizan comúnmente protocolos seriales, siendo el asíncrono universal uno de los más populares. Sin embargo, al ser una comunicación simple, existen desventajas al momento de utilizarlas en el manejo de grandes cantidades de información ya que, por la naturaleza de su protocolo, el envío de datos de forma serial puede ser complicado al momento de clasificar tramas de datos, en especial si se envían muchos parámetros al mismo tiempo (Bariain, 2017).

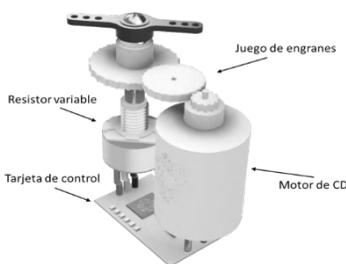
Debido a lo anterior, es de vital importancia crear formas de clasificar la información que se recibe y se transmite a través del medio de comunicación, es por ello que se propone un protocolo comando – parámetro para facilitar el control de tramas a través

de palabras reservadas que el microcontrolador es capaz de identificar y posteriormente almacenar un valor numérico relacionado a él para su uso en el programa en general.

1.1 Servomotor

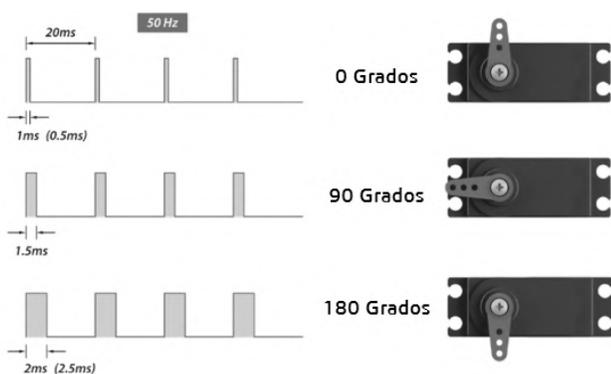
Son dispositivos de accionamiento que, mediante un sistema de control electrónico, permiten movimientos angulares de precisión. Contienen en su interior un encoder, conocido como decodificador, que convierte el movimiento mecánico (giros del eje) en pulsos digitales interpretados por un controlador de movimiento. También utilizan un driver, que en conjunto forman un circuito para comandar posición, torque y velocidad (Corona, 2014). La estructura general de un servomotor se muestra en la Figura 1.

Figura 1
Estructura interna general de un Servomotor



El control de posición angular se realiza mediante pulsos de una frecuencia constante y ancho variable, parecido a un PWM, utilizando los tiempos que se muestran en la Figura 2. Estos pulsos se generan a través de microcontroladores y de acuerdo a la duración del tiempo en alto se varía la posición general del eje del motor.

Figura 2
Pulsos para control de posición de servomotores

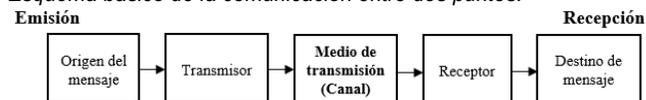


1.2 Protocolos de comunicación

Lo fundamental en cualquier tipo de comunicación es resolver el problema de cómo llevar el mensaje desde un punto A hacia un punto B sin errores o con la mínima probabilidad de ellos, esto se logra mediante la codificación del mensaje de la mejor manera posible. Este tipo de codificación recibe el nombre de medio de comunicación, que será el encargado de establecer la unión

entre los dos puntos. Un ejemplo de lo mencionado anteriormente es el que se muestra en la Figura 3. (Coto, 2008).

Figura 3
Esquema básico de la comunicación entre dos puntos.



El protocolo se define como las reglas para la transmisión de la información a través del medio de intercambio de información. Un protocolo de red de comunicación es un conjunto de reglas que gobiernan el intercambio ordenado de datos dentro del sistema para la comunicación.

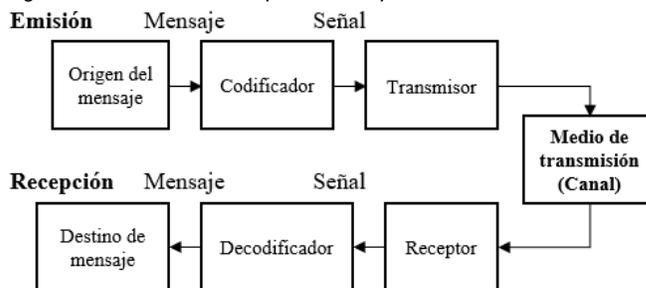
Los elementos básicos de un protocolo de comunicación son:

- Conjunto de símbolos o caracteres.
- Reglas para la secuencia y sincronización de los mensajes.
- Procedimientos para determinar cuándo se ha enviado el mensaje correctamente o se ha detectado un error

Para que exista comunicación entre ambos puntos por el canal se debe enviar la misma configuración en cada uno de ellos (Pérez, 2012).

Según Pérez, para el establecimiento de reglas es necesario identificar los siguientes puntos: Un emisor y receptor, método de comunicación acordado, idioma común (tipo de cifrado), velocidad y momento de entrega y requisitos de confirmación o acuse de recibo. Habiendo establecidos los puntos anteriores, el diagrama de la comunicación, una vez que se ha aplicado el protocolo, deberá ser similar al que se presenta en la Figura 4.

Figura 4
Diagrama de comunicación aplicando un protocolo.

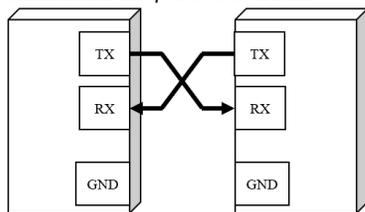


1.3 Comunicación asíncrona universal

La comunicación Transmisor – Receptor Asíncrono Universal (UART por sus siglas en inglés) define un protocolo o un conjunto de reglas que se establecen para el intercambio de datos entre dispositivos de forma serial (es decir, se envía un dato tras otro). Utiliza dos conductores entre el transmisor y el receptor para crear una comunicación bidireccional y se basa en el envío de información en forma de tramas. Así mismo, si la conexión es física, se debe de tener una referencia o tierra en las conexiones. la Figura 5, muestra un diagrama de comunicación básica en UART física (Díaz, 2009).

Figura 5

Esquema de funcionamiento del protocolo UART.



Existen diferentes tipos de comunicación UART.

- Comunicación Simplex: Los datos únicamente se envían en una sola dirección.
- Semidúplex: Existe una comunicación bidireccional pero un dispositivo a la vez.
- Full – dúplex: Ambos dispositivos transmiten simultáneamente.

La UART fue uno de los primeros protocolos de tipo serial pues se utiliza con interfaces RS-232. Sin embargo, a pesar de existir otros protocolos como el SPI, I2C o USB, sigue siendo común utilizarla para realizar comunicación entre microcontroladores por su facilidad de uso, fácil implementación y bajo coste, ya que se encuentra incrustado en la mayoría de los dispositivos de prototipado (Méndez de la Torre, 2022).

Una de las mayores ventajas que se pueden encontrar en el uso de este tipo de comunicación, es que es asíncrona, es decir que el transmisor y el receptor no comparten una señal de reloj.

1.4 Plataforma Arduino y su importancia en la actualidad

Arduino es una plataforma de desarrollo electrónico de código abierto que se ha convertido en una opción popular para implementar proyectos interactivos. Consiste en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo que facilita la programación y la interacción con diferentes dispositivos y sensores (Artero, 2013).

La versatilidad de Arduino radica en su capacidad para leer entradas de varios sensores y controlar salidas para interactuar con el mundo físico. La placa está equipada con pines de entrada/salida digitales y analógicos que se pueden programar para leer datos de sensores o enviar señales a actuadores como motores, luces y pantallas.

Una de las principales ventajas de Arduino es su simplicidad y facilidad de uso, lo que lo hace accesible tanto para principiantes como para desarrolladores experimentados. El lenguaje de programación de Arduino se basa en Wiring, una variante simplificada de C/C++, lo que facilita escribir código para controlar las funciones de la placa (Reyes Cortés, 2015).

Las placas de Arduino vienen en diferentes variantes, ofreciendo diversas características y capacidades. Además, hay una amplia biblioteca de funciones de software preconstruidas, conocidas como bibliotecas, que permiten a los usuarios intercalarse fácilmente con una amplia gama de sensores, módulos y protocolos de comunicación.

Arduino ha encontrado aplicaciones en numerosos campos, incluyendo robótica, domótica, proyectos de Internet de las Cosas (IoT), instalaciones de arte interactivo y proyectos educativos. Su precio asequible, simplicidad y amplio apoyo de la comunidad lo convierten en una opción popular tanto para aficionados, estudiantes como profesionales (López, 2016).

Este dispositivo es una versátil plataforma de desarrollo electrónico que permite a los usuarios crear proyectos interactivos mediante la programación de una placa de microcontrolador. Su facilidad de uso, amplio soporte de bibliotecas y amplia gama de aplicaciones lo convierten en una herramienta poderosa para dar vida a ideas en el mundo de la electrónica y los sistemas embebidos.

II. PARTE TÉCNICA

El protocolo de comunicación comando-parámetro que se diseñó fue implementado en la plataforma Arduino con la finalidad de verificar su funcionamiento. Sin embargo, puede ser adaptado para diferentes plataformas que contengan instrucciones similares.

2.1 Descripción general del protocolo.

Para la descripción se tomará a la placa Arduino como receptor de información, y como transmisor puede ser cualquier dispositivo que contenga el protocolo UART y sea capaz de enviar cadenas de texto.

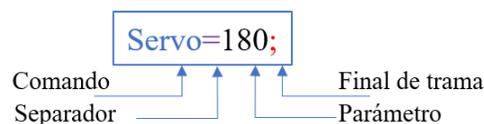
La trama principal del protocolo consta de 4 partes

- Comando: Es la palabra reservada que se encuentra programada internamente en el receptor y que será detectada por el programa para establecer si la trama es válida o no.
- Separador: Corresponde a un carácter especial (es decir, que no sea común su uso) que será el encargado de ser la división entre el comando y el valor numérico que se le va a asignar. Este carácter se define por el usuario, por lo que puede cambiarse de acuerdo a las necesidades.
- Parámetro: Es el valor numérico que se le va a asignar al comando que se ha establecido.
- Final de trama: Indica el final de la trama serial, permitiendo al receptor terminar la recepción de datos y comenzar con el análisis.

En la Figura 6, se muestra la estructura básica de la trama de forma visual, puede decirse que es una asignación de un valor numérico a una variable establecida. El ejemplo se presenta para el manejo de servomotores, donde el comando corresponde al servomotor al que quiere asignar un valor y el parámetro al valor en grados a asignar.

Figura 6

Ejemplo de estructura de control de servomotores



2.2 Descripción del algoritmo del protocolo.

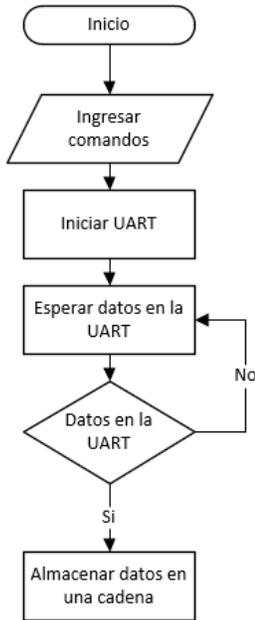
El algoritmo puede dividirse en varias etapas de acuerdo a las tareas que se realizan en cada una de ellas.

1. Primera fase: Ingreso de comandos y recepción de datos por la UART.
2. Segunda fase: Procesamiento de la cadena de caracteres.
3. Tercera fase: Identificación de comandos y almacenamiento de parámetros y toma de decisión para cada comando.

2.2.1 Primera fase

Como primer paso es necesario decidir cuáles palabras se van a establecer como parámetro, esto mediante un arreglo de 1D. Posteriormente, se realiza la configuración necesaria para el uso de la UART del microcontrolador y se espera la recepción de cualquier trama que provenga del transmisor, si existe información en el buffer esta se almacena en una cadena de texto. El diagrama de flujo de la primera fase se muestra en la Figura 7.

Figura 7
Diagrama de flujo primera fase



2.2.2 Segunda fase

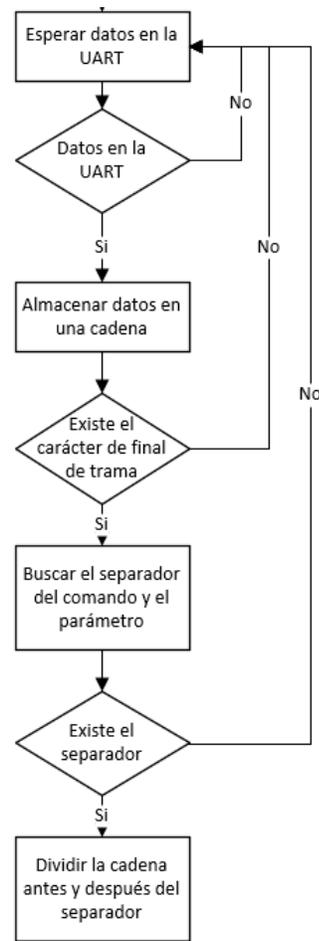
En esta fase del algoritmo es donde interviene el mayor manejo de datos, pues una vez que se tiene almacenada la cadena de texto proveniente del buffer de la UART es necesario verificar si es válida para su procesamiento. Para ello, lo primero que se busca es el carácter de final de trama establecido pues es la indicación para identificar el fin de los datos.

Enseguida, si el final de trama existe se realiza un algoritmo de búsqueda para el separador del comando y del parámetro, es importante decir que ambos caracteres pueden ser cambiados de acuerdo a las necesidades y comprensión del programador.

Una vez que se ha comprobado que el final de trama y el separador existen en la cadena que ha sido enviada por la UART, se cuentan los caracteres totales y el índice (ubicación numérica de los caracteres en la cadena) donde están ubicados el final de trama y el separador para, mediante diferencias de índices, realizar subtramas que serán almacenadas como comando y parámetro respectivamente. El algoritmo en diagrama de flujo de la segunda fase se ve en la Figura 8.

Como se muestra, si no existe en la trama la información requerida, el microcontrolador elimina la trama enviada hasta recibir alguna válida de acuerdo a los parámetros establecidos.

Figura 8
Diagrama de flujo segunda fase

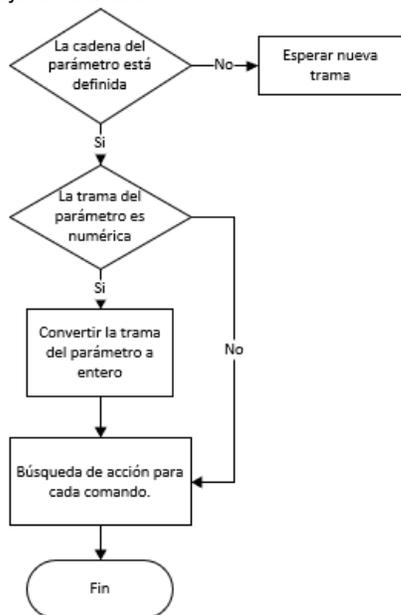


2.2.3 Tercera fase

Cuando ya se tienen divididas las cadenas de texto, éstas se almacenan en dos variables diferentes con la finalidad de realizar un procesamiento distinto para cada una de ellas. En primer lugar, se compara si la cadena recibida es igual a alguna que se ha ingresado como palabra reservada, en caso de ser verdadero, la trama almacenada como parámetro se convierte de variable tipo cadena a tipo entero y se guarda en otro tipo de dato con la finalidad de que pueda utilizarse para realizar operaciones matemáticas o utilizarlas en el código para algún otro fin.

Así mismo, no todos los comandos deben de tener un parámetro numérico, pueden existir comandos en los que solo se requiera realizar una acción determinada por lo que cualquier parámetro es válido para poder tomar una acción. En caso de que lo almacenado en la variable del comando no se encuentre dentro de la lista definida al principio del programa, la trama se deshecha y el parámetro se elimina para siguiente iteración. El resumen de la tercera parte puede verse en el diagrama flujo de la Figura 9.

Figura 9
Diagrama de flujo tercera fase



III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Declaración de variables a utilizar.

Con el algoritmo diseñado, se procedió a la implementación para la verificación y validación de su funcionamiento utilizando la plataforma Arduino.

Para comenzar, es necesario definir las variables que se van a utilizar para almacenar los datos provenientes del buffer de la UART, así como los símbolos que se van a utilizar como final de carrera y como separador o limitador. La declaración de estas variables se muestra en el Código Fuente 1.

Código Fuente 1

Declaración de variables

```

//VARIABLES PARA COMUNICACION SERIAL
String Cadena; //Variable para datos del buffer
//Variables de final de línea y separador
char final_cadena = '\n';
char delimitador = '=';
//Variable para identificación de comandos
byte NUM_CMD = 15;
boolean FLAG = 0;
int DATA[10]; //Arreglo para almacenar datos de parámetro
//DATA[0], DATA[1] DATA[2]
const String CMD[] = {"MOV1", "MOV2", "MOV3", "MOV4",
"MOV5", "MOV6", "MOV7", "HOME"};
  
```

En estas declaraciones también se encuentran dos arreglos, el primero (DATA) es de tipo entero, en él se almacenan los datos numéricos de cada uno de los parámetros. El segundo arreglo (CMD) de tipo cadena constante es en donde se colocan las palabras que estarán definidas como parámetros.

La identificación del parámetro que le corresponde a cada uno de los comandos se realiza mediante los índices del arreglo. Es

decir, el índice del comando en su arreglo, corresponde también al índice del arreglo del parámetro por lo que es fácil conocer la posición con la que se está trabajando.

Para tener una mejor comprensión y funcionalidad del programa se optó por programar las tareas de cada una de las fases en diferentes funciones de manera que posteriormente se pudiera crear una librería para su uso.

3.2 Función para detección de comandos.

Una vez que se han declarado las variables y se ha iniciado la comunicación serie se comienza con la función del Código Fuente 2 para identificar si la trama contiene un comando disponible. La función es de tipo vacío por lo que no devuelve ningún valor y únicamente se utiliza para realizar tareas determinadas

Código Fuente 2

Función de búsqueda de comandos

```

void Comando_disponible()
{
  //Se almacenan los datos recibidos en Cadena
  Cadena += Read_dato();
  //Si existe el final de trama
  if (FLAG == 1)
  {
    //Se busca si existe un comando válido
    Find_dato(Cadena);
    //Reinicia la búsqueda de final de trama
    FLAG = 0;
    //Se vacía la trama para la siguiente iteración
    Cadena = "";
  }
  delay(5);
}
  
```

En esta función intervienen otras dos funciones que permiten la búsqueda tanto del final de trama como del separador.

3.3 Función para lectura de datos de la UART.

Como se ha mencionado anteriormente, la función de búsqueda de comandos depende de otras dos funciones, la primera de ellas es la que permite realizar la lectura del buffer de la UART y saber si existe el carácter de final de trama.

La función se presenta en el Código Fuente 3 y en este caso corresponde a una función de tipo cadena, por lo que se va a retornar toda la trama que se ha leído del buffer del puerto serie. Para llevar a cabo la búsqueda se utiliza una variable auxiliar que permite almacenar las tramas temporales para ir acumulando los caracteres hasta que se tenga el final de línea. Si el final de línea existe, entonces se activa una bandera para que las demás funciones realicen las tareas determinadas.

Código Fuente 3

Función de lectura de datos.

```

String Read_dato()
{
  //Variable para subcadena
  String Serial_Dato;
  //Variable para conteo de datos en buffer
  int IncomingBytes;
  IncomingBytes = SerialBT.available();
  
```

```

//Se limpia la cadena
Serial_Dato = "";
//Existen datos en el buffer?
if (IncomingBytes > 0)
{
    //Se analiza cada uno de los caracteres
    for (int i = 1 ; i <= IncomingBytes; i++)
    {
        char c = SerialBT.read();
        //Si se detecta el final de cadena
        if (c == final_cadena)
            //Se activa la bandera
            FLAG = 1;
        //Se almacena cada caracter en una cadena
        Serial_Dato += c;
    }
}
//Se retorna la cadena completa.
return Serial_Dato;
}

```

3.4 Función para detección de comandos y acciones.

El último paso del protocolo es conocer si los comandos que se han enviado son válidos y, a partir de la validación, realizar las tareas que se requieran para el programador. En este caso, debido a que se utiliza para el control de servomotores, actualizar la posición de cada actuador que se tenga conectado. En Código Fuente 4 se presenta el código implementado.

Código Fuente 4

Función de detección de comandos

```

void Find_dato(String BUFFER)
{
    //Variable para ancho de trama
    int anchoCadena;
    //Posición del índice
    int PosIndex;
    //Cadenas para separar comando y parámetro
    String Temp_CMD;
    String Temp_Par;
    //Se pregunta el ancho total de la cadena
    anchoCadena = BUFFER.length();
    //Búsqueda del índice del separador
    PosIndex = BUFFER.indexOf(delimitador);
    //La cadena del comando es del inicio hasta el separador
    Temp_CMD = BUFFER.substring(0, PosIndex);
    //La cadena del parámetro es del separador hasta el
    final menos el final de trama
    Temp_Par = BUFFER.substring(PosIndex +1, anchoCadena-1);
    //Bucle for para búsqueda de posición del comando en el
    arreglo
    for (int i = 0; i <= NUM_CMD; i++)
    {
        //Si el comando se encuentra en el arreglo
        if (Temp_CMD.equals(CMD[i]) == 1)
        {
            //El índice del bucle indica la posición del arreglo
            switch (i)
            {
                //ACCIONES DE ACUERDO A CADA COMANDO
                case 0:
                    //Se convierte de cadena a entero el parámetro
                    DATA[i] = Temp_Par.toInt();
                    //Se puede realizar una acción adicional

```

```

Serial.println("CMD1 RECONOCIDO");
break;
    }
}
}
}
}

```

El código separa el comando del parámetro de acuerdo a la posición del separador. Posteriormente se verifica si el comando existe en el arreglo que se tiene almacenado y se guarda el índice en el que se encuentra. Si el comando es válido, se convierte la trama de tipo cadena a tipo numérico correspondiente al parámetro en la misma posición del arreglo de datos lo que permite identificar los valores de cada uno de ellos.

3.5 Control de Servomotores utilizando el protocolo.

Para la comprobación y validación del funcionamiento del protocolo se utilizó un ejemplo para el control básico de servomotores que pudiese utilizarse para el control de diversos proyectos de robótica (principal aplicación de los servomotores miniatura). Se contó con 6 servomotores conectados a la placa Arduino y el mismo número de comandos que permitían el control de posición de cada uno de ellos.

El parámetro de cada comando correspondía a un valor numérico de entre 0 a 180 que son los números de grados en que estos motores pueden realizar movimiento. En el Código Fuente 5 se muestra una función donde se utilizan los valores de datos obtenidos de los parámetros para el ajuste del movimiento de los servomotores en los rangos establecidos anteriormente.

Es importante tomar en cuenta que el ejemplo mencionado se utilizó solamente para validar que la información entre el transmisor y el receptor funcionara de forma correcta. Sin embargo, la aplicación del protocolo puede extenderse para otros fines siempre que se respeten las normas que se han descrito a lo largo del desarrollo del proyecto.

Código Fuente 5

Función para movimiento de servomotores mediante el protocolo

```

void adjustMove(int j)
{
    if (DATA[j] > 0 && valor_pos < 0)
        DATA[j] = DATA[j] + valor_pos;
    if (DATA[j] < 180 && valor_pos > 0)
        DATA[j] = DATA[j] + valor_pos;
    printData();
}

```

Para realizar la prueba se utilizaron servomotores MG995 como los que se muestra en a Figura 10 que son de los más comunes en proyectos de electrónica y micro robótica.

Figura 10

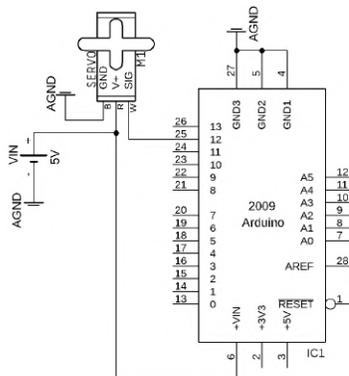
Servomotor MG995



El circuito de conexión utilizado para las pruebas se muestra en la Figura 11. Es necesario colocar una fuente de alimentación externa para el servomotor y unir la línea del común (GND) con la de la placa Arduino. Esto debido a que el servomotor consume más corriente que la entregada por las salidas digitales de la tarjeta. Así mismo, la salida digital utilizada debe de tener característica de modulación por ancho de pulso (PWM) para que pueda generarse el movimiento.

Figura 11

Circuito esquemático para control de servomotor utilizando Arduino.



El protocolo está diseñado para poder mover “n” servomotores, es decir, no se limita a uno solo. Por lo que, de ser necesario, solamente se requiere replicar el circuito para el número de actuadores a utilizar tomando en consideración las salidas PWM del Arduino.

IV. CONCLUSIONES

La comunicación serial de tipo UART es una de las más utilizadas para la transmisión de datos entre microcontroladores y otros tipos de interfaces por su facilidad de configuración e implementación en estos sistemas. Sin embargo, puede complicarse su entendimiento conforme se va incrementando el número de caracteres o números que se quieren analizar, siendo, en muchas ocasiones, el impedimento principal para su aplicación.

Si bien es posible encontrar en bibliografía y en diferentes fuentes en la red códigos de ejemplo para el manejo de grandes tramas de información, muchos de ellos se encuentran diseñados para una aplicación en particular, lo que no permite que pueda adaptarse a diferentes circunstancias que puedan darse. Así mismo, no se encuentra definido de forma escrita el algoritmo que se utilizó para el diseño, siendo complicado replicarlo en otras tareas.

El uso del algoritmo propuesto, abre un área de oportunidad para reducir el tiempo de desarrollo de programas que requieran una transmisión de datos desde la UART. De igual forma, el uso de instrucciones de librerías comunes en la mayoría de lenguajes de programación, lo vuelve versátil para su uso en diferentes plataformas haciendo cambios mínimos a la estructura básica presentada.

Como futuros trabajos, se recomienda hacer una librería

que permita sintetizar todas las funciones del algoritmo de una forma más clara y que pueda ser entendible para personas que tengan poco conocimiento en programación. Pues si bien el código se planteó de la forma más sencilla posible, su aplicación en sistemas didácticos puede dificultarse para la mayoría de personas que no cuenten con un curso básico de programación como base.

La aplicación propuesta en el control de servomotores puede darse como una introducción a propuestas de sistemas robóticos que utilicen este tipo de actuadores y que son muy comunes en proyectos didácticos de nivel media superior y superior en carreras afines a la mecatrónica. Sin embargo, también puede extenderse para la creación de sistemas de adquisición de datos al poder enviar una gran cantidad de información de diferentes variables de interés. El hecho de utilizarlo desde la UART no limita su uso a microcontroladores, pues también sistemas de automatización como PLC e inclusive programas de diseño de interfaces como MATLAB, LabVIEW, entre otros, cuentan con este protocolo por defecto

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al Tecnológico Nacional de México (TecNM): Instituto Tecnológico Superior de Lerdo por las facilidades brindadas para la realización del presente trabajo.

También a las divisiones de Sistemas Automotrices, Electrónica por su valiosa ayuda, así como al Departamento de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

VI. REFERENCIAS

- Artero, Ó. T. (2013). *ARDUINO. Curso práctico de formación*. RC libros.
- Bariain, C. (2017). *Programación de Microcontroladores PIC en lenguaje C*. México: Alfaomega.
- Corona, L. (2014). *Sensores y actuadores. Aplicaciones con Arduino*. México: Patria.
- Coto, A. (2008). *Protocolos y comunicaciones de Red*. México: Cisco Networking Academy.
- Díaz, J. M. (2009). *Microcontroladores PIC. Principios y aplicaciones*. México: ASEUC.
- Domínguez Mínguez, T. (2020). *Desarrollo de aplicaciones IoT en la nube para Arduino y ESP8266*. España: Marcombo.
- López, P. P. (2016). *Robótica y domótica básica con Arduino*. Ra-Ma Editorial.
- Méndez de la Torre, R. E. (2022). *Diseño e Implementación de un Módulo de entrenamiento utilizando el procesador ESP32 para aplicaciones enfocadas a la Domótica*. Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- Pérez, C. (2012). Plataforma embebida multipropósito para comunicación mediante protocolo MIL-STD. *CASE*, 237-242.
- Reyes Cortés, F. (2015). *ARDUINO - Aplicaciones en Robótica, Mecatrónica e Ingenierías*. México: Alfaomega.

Diseño y fabricación de cronómetro digital aplicado a carreras de vehículos impulsados por CO₂ utilizando comunicación inalámbrica.

Machado-Díaz, E¹; Serrano-Hernández, A¹; Vaquera-González, E. ¹; Román-Landeros, D.A.¹

Datos de Adscripción:

¹Tecnológico Nacional de México (TecNM): Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, División de Ingeniería en Sistemas Automotrices, Av. Tecnológico No. 1555 Sur Periférico Gómez - Lerdo Km. 14.5, Ciudad Lerdo, Durango; México. C.P. 35150.
eduardo.md@itslerdo.edu.mx

Resumen -

Las carreras de vehículos impulsados por CO₂ son concursos muy populares dentro del mundo de la enseñanza ya sea a nivel media superior o superior. Sin embargo, la elaboración de la infraestructura, en la mayoría de los casos, queda a cargo de la institución en la que se lleva a cabo el evento. Esto conlleva un número importante de problemas logísticos, pues las pistas suelen tener una extensión considerable derivando problemas al momento de su armado.

Uno de los puntos más complejos en la elaboración de este tipo de pistas es la comunicación del lanzador (que se encuentra al inicio de ella) con los sensores de final de carrera (que se encuentran al final) pues si se realiza de forma alámbrica derivaría en un gasto considerable de conductores eléctricos, así como posibles fallas en su transporte.

Derivado de lo anterior, se plantea el diseño, fabricación y programación de un cronómetro digital a través de comunicación inalámbrica utilizando el protocolo ESPNOW para la comunicación del lanzador con los sensores de final de carrera, facilitando la elaboración de las pistas para estos eventos.

El cronómetro consta tanto del diseño del accionador realizado en software especializado, el cual cuenta con la instrumentación necesaria para detectar el momento correcto cuando se da comienzo a la carrera. Posteriormente se cuenta con el display numérico encargado de visualizar el tiempo de la carrera y que se encuentra controlado por un microcontrolador mediante elementos de programación como interrupciones por temporizador y externas para mayor exactitud.

Palabras Clave – Comunicación, Cronómetro, Inalámbrica, Instrumentación, Microcontrolador.

Abstract - CO₂-powered vehicle races are very popular contests within the education world, whether at high school or university level. However, the creation of the infrastructure, in most cases, is managed for the institution where the event takes place. This entails a significant number of logistical problems, as the tracks tend to have a considerable length, resulting in issues during assembly.

One of the most complex aspects in the creation of these types of tracks is the communication between the launcher

(located at the beginning of the track) and the finish line sensors (located at the end of the track). If this communication is done via wired means, it would result in a considerable expense in electrical conductors, as well as possible transportation failures.

As a result of the above, the design, manufacture, and programming of a digital stopwatch is proposed through wireless communication using the ESPNOW protocol for communication between the launcher and the optical sensors, facilitating the creation of tracks for these events.

The stopwatch consists of both the design of the actuator made in specialized software, which has the necessary instrumentation to detect the correct moment when the race begins. Subsequently, there is a numerical display responsible for displaying the race time, which is controlled by a microcontroller, using programming elements such as timer and external interruptions for greater accuracy.

Keywords – Communication, Chronometer, Instrumentation, Microcontroller, Wireless.

I. INTRODUCCIÓN

A medida que la popularidad de las carreras de vehículos impulsados por CO₂ crece, surge la necesidad de contar con sistemas de medición precisos y confiables para evaluar el rendimiento y la velocidad de estos vehículos.

En este contexto, el presente artículo se centra en el diseño y la fabricación de un cronómetro digital específicamente diseñado para su aplicación en carreras de vehículos impulsados por CO₂. El objetivo principal es proporcionar a los competidores y espectadores una herramienta precisa y de alta tecnología para medir el tiempo y registrar los resultados de las carreras.

La propuesta se basa en la utilización de la comunicación inalámbrica como medio de transmisión de datos entre el vehículo y el cronómetro, lo que elimina la necesidad de conexiones físicas y permite una mayor flexibilidad en términos de ubicación y colocación del dispositivo de medición. Además, se busca garantizar la máxima precisión en la medición del tiempo, aprovechando los avances en tecnología digital y la implementación de algoritmos de sincronización y corrección de errores.

Este artículo presenta en detalle el proceso de diseño y fabricación del cronómetro digital, abarcando aspectos como la selección de componentes, la configuración de la comunicación inalámbrica, la implementación de algoritmos de medición de tiempo y las pruebas de funcionamiento. Se discutirán también las ventajas y desafíos asociados a la utilización de la comunicación inalámbrica en este contexto específico.

1.1 Origen de las carreras de vehículos impulsados por CO₂

Las carreras de vehículos impulsados por CO₂ tienen sus raíces en la creciente preocupación mundial por los efectos negativos de los combustibles fósiles en el medio ambiente y la necesidad de buscar alternativas más sostenibles en el ámbito del automovilismo. Estas competiciones representan un esfuerzo por impulsar la innovación y el desarrollo de tecnologías que utilicen dióxido de carbono como fuente de energía, reduciendo así las emisiones contaminantes y promoviendo la conciencia ambiental en la industria automotriz (Blyth, 2015).

El surgimiento de las carreras de vehículos impulsados por CO₂ se remonta a finales del siglo XX y principios del siglo XXI. A medida que la preocupación por el cambio climático y la necesidad de encontrar alternativas más limpias en el sector automotriz aumentaban, se comenzaron a explorar diferentes enfoques para desarrollar vehículos de carreras más sostenibles. Fue en este contexto que surgieron las primeras competiciones dedicadas exclusivamente a los vehículos impulsados por CO₂ (Jo, 2013).

Una de las competiciones pioneras en este campo fue la "Greenpower" en el Reino Unido, que se inició en la década de 1990. Greenpower desafió a los participantes, en su mayoría estudiantes de instituciones educativas, a diseñar y construir vehículos de carreras impulsados por energía eléctrica o dióxido de carbono. Estas competiciones iniciales sentaron las bases para el desarrollo de tecnologías más eficientes y limpias en el automovilismo.

Con el tiempo, las carreras de vehículos impulsados por CO₂ se han expandido a nivel global. En diferentes países se han establecido competiciones locales y nacionales, brindando una plataforma para que equipos de estudiantes, ingenieros y entusiastas demuestren su creatividad y habilidades técnicas en el diseño y fabricación de vehículos de carreras más sostenibles.

Además de las competiciones locales, también se han creado eventos internacionales que han ganado reconocimiento y prestigio en la comunidad del automovilismo. Un ejemplo destacado es la "Shell Eco-marathon", una competición que se lleva a cabo en diferentes países alrededor del mundo. La Shell Eco-marathon desafía a los equipos a construir vehículos de ultra eficiencia energética, incluidos aquellos impulsados por CO₂. Los participantes compiten para lograr la máxima eficiencia y recorrer la mayor distancia posible utilizando la menor cantidad de energía (Shell Eco-marathon., s.f.).

La evolución de las carreras de vehículos impulsados por CO₂ ha llevado a importantes avances tecnológicos en el diseño y la fabricación de vehículos más eficientes y respetuosos con el medio ambiente. Los equipos participantes han explorado diferentes enfoques, como la optimización aerodinámica, la utilización de materiales más ligeros y el desarrollo de sistemas de propulsión más eficientes, para mejorar el rendimiento de sus vehículos (Verhetsel, 2012).

Una de las competiciones más destacadas en el ámbito de los vehículos impulsados por CO₂ es la Aramco F1® Car Racing Challenge. Aramco, una compañía líder en energía y petroquímica, ha impulsado esta competencia para fomentar la innovación y el desarrollo de tecnologías más limpias en el deporte del automovilismo. El Evento se lleva a cabo en asociación con la Fórmula 1®, una de las competiciones

automovilísticas más prestigiosas y reconocidas a nivel mundial.

Esta competencia brinda a los equipos la oportunidad de diseñar y construir vehículos de carreras impulsados por CO₂ que compiten en un entorno altamente competitivo y de alto rendimiento. Un ejemplo de los vehículos utilizados en las carreras a nivel superior, y para los cuales está enfocado el presente proyecto es el que se muestra en la Figura 1.

Figura 1

Ejemplo de diseño sencillo de vehículos utilizados en competencias de estudiantes.

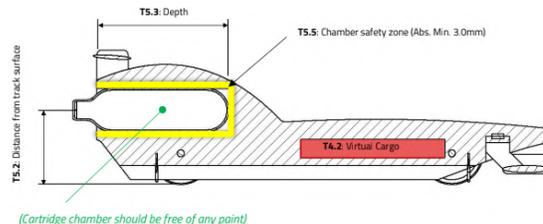


Los equipos participantes deben demostrar su habilidad para optimizar la eficiencia de los vehículos y superar los desafíos técnicos asociados con el uso del dióxido de carbono como fuente de energía. La Aramco F1® Car Racing Challenge destaca la importancia de la innovación y la sostenibilidad en el deporte del automovilismo y busca impulsar la adopción de tecnologías más limpias en esta industria (Formula 1, 2023).

Además del aspecto competitivo, las carreras de vehículos impulsados por CO₂ también han tenido un impacto significativo en la conciencia ambiental y la educación en temas de sostenibilidad. Un ejemplo de automóvil utilizado en las competencias se ve en la Figura 2.

Figura 2

Ejemplo de diseño utilizado en Aramco F1®



1.2 Carreras de vehículos impulsados por CO₂ en México.

Las carreras de vehículos impulsados por CO₂ han experimentado una notable evolución en las últimas décadas, tanto a nivel global como en México. Estas competiciones ofrecen una alternativa emocionante y sostenible a las carreras tradicionales, al utilizar dióxido de carbono como fuente de energía, reduciendo así las emisiones contaminantes y promoviendo la conciencia ambiental en el ámbito automotriz.

En México, el interés por las carreras de vehículos impulsados por CO₂ ha ido en aumento, especialmente en el ámbito educativo y de investigación. Estas competiciones se han convertido en una plataforma para que estudiantes y

profesionales de la ingeniería demuestren su creatividad, habilidades técnicas y conocimientos científicos en el diseño y fabricación de vehículos más eficientes y amigables con el medio ambiente (Orozco, 2019).

A continuación, se mencionan algunos eventos de carritos impulsados por CO₂ en México:

- **Competencia Nacional de Carros de CO₂:** Organizada por diferentes instituciones educativas y asociaciones, esta competencia reúne a equipos de estudiantes de distintos niveles educativos para diseñar, construir y competir con carritos impulsados por CO₂. El evento promueve la creatividad, el trabajo en equipo y la aplicación de conceptos científicos y tecnológicos.
- **Feria Nacional de Ciencias e Ingenierías (FENACI):** Este evento anual, enfocado en la divulgación científica y tecnológica, suele contar con una categoría dedicada a los carritos impulsados por CO₂. Los estudiantes participantes presentan sus proyectos y compiten para demostrar la eficiencia, el diseño y la innovación de sus carros.
- **Feria Internacional de Ciencias e Ingenierías (FICI):** Similar a la FENACI, la FICI es una feria de ciencia e ingeniería que se lleva a cabo a nivel internacional. En esta competencia, los estudiantes presentan proyectos científicos y tecnológicos, incluyendo carritos impulsados por CO₂, para ser evaluados por un jurado.
- **ExpoCiencias Nacional:** Como parte de ExpoCiencias, un evento anual que promueve la divulgación y el desarrollo científico en México, se suelen realizar competencias de carritos impulsados por CO₂. Los estudiantes presentan sus proyectos y participan en exhibiciones y competencias para destacar la innovación y la creatividad en la construcción de estos carros.

Además de estas competiciones, diversas universidades y centros de investigación en México organizan eventos locales y nacionales para fomentar el desarrollo de vehículos impulsados por CO₂. Estas competiciones suelen estar dirigidas a estudiantes de ingeniería y promueven la colaboración multidisciplinaria, la innovación tecnológica y la sustentabilidad.

A medida que la conciencia sobre el impacto ambiental de los vehículos convencionales continúa creciendo, se espera que las carreras de vehículos impulsados por CO₂ sigan ganando relevancia en México. Estas competiciones son una plataforma efectiva para fomentar la investigación y el desarrollo de tecnologías más limpias y eficientes en el sector automotriz, así como para promover la educación en temas relacionados con la energía renovable y la sostenibilidad.

1.3 Problemáticas de medición de tiempos.

Si bien las carreras son comunes en eventos académicos y de difusión científica, existen problemáticas en cuanto a la medición correcta de los tiempos. Es decir, se tiene que generar un sistema que permita cuantificar el tiempo que tarda el vehículo en recorrer la pista.

La presión ejercida por el CO₂ es considerable, y tomando en cuenta la aerodinámica de los vehículos, debe tener un rango de medición en el orden de los milisegundos. Así mismo se tiene que coordinar el sistema de ignición (de salida de los carritos) con la cuenta.

Se tienen antecedentes de cronómetros para diferentes eventos, se presenta el caso del proyecto realizado por (Montávez Madrigal, 2020) que diseñó e implementó un cronómetro digital utilizando una placa Raspberry Pi® para medición de tiempos en carreras de patinaje para evasión de obstáculos. El prototipo contiene como tarjeta de adquisición de datos, un Arduino Uno, al cual se le conectaron los sensores ópticos escogidos para la medición. Posteriormente, se programó una interfaz visual utilizando Python para el control de las pistas. El diseño de la interfaz desarrollada por el autor se muestra en la Figura 3.

Figura 3

Cronómetro digital con interfaz visual para pruebas de patinaje



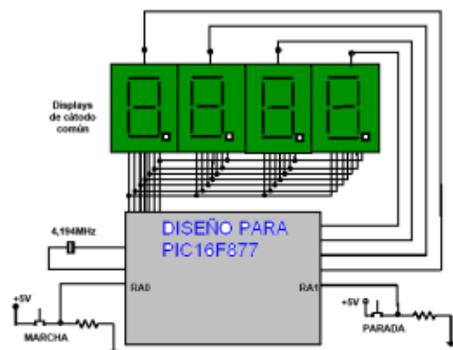
Sin embargo, el autor menciona que uno de los problemas a considerar en la implementación de este tipo de dispositivos es el cableado, pues es necesario llevar la señal de los sensores a los microcontroladores encargados de la adquisición de los datos. Lo que conlleva a limitaciones como:

- Aumento en el costo de los dispositivos.
- Problemas de conexión al momento de implementar el prototipo.
- Generación de sistemas de “conexión única” es decir, utilizar conectores que tengan una distribución establecida para evitar conexiones erróneas o accidentes al momento de conectar el cableado a los dispositivos correspondientes.
- El cableado debe de tener una tolerancia en caso de que se requiera realizar un cambio de posición de los elementos.

Todos los inconvenientes mencionados se tomaron en cuenta para la elaboración del presente proyecto.

Otro ejemplo de cronómetros, pero ahora mediante microcontrolador exclusivamente es el que fue diseñado y elaborado por (Núñez Pérez, 2011) quien propuso un cronómetro que esencialmente tiene dos componentes, uno de programación y otro de circuito; como elemento esencial en la combinación circuito-programación, se emplea un microcontrolador comercial PIC16F877.

El programa está estructurado para que el microcontrolador reciba señal de dos botones (Start o stop), procese la información, y muestre los datos en 4 displays de 7 segmentos (con punto decimal) de cátodo común. El circuito propuesto por Núñez se muestra en la Figura 4.

Figura 4*Cronómetro digital para experimentos de física.*

El proyecto contiene un display cuádruple de cátodo común. Esto, en términos de diseño, no es óptimo por la gran cantidad de conexiones y recursos que se requieren del microcontrolador. Así mismo, la placa de circuito impreso se complica en su elaboración por las interconexiones que pueden generarse entre las pistas de conexión.

1.4 Microcontrolador ESP32

El ESP32 es un microcontrolador de bajo costo y alto rendimiento que se ha vuelto muy popular en la comunidad de desarrollo de proyectos electrónicos. Con una arquitectura de doble núcleo y una velocidad de reloj de hasta 240 MHz, el ESP32 ofrece una potencia de procesamiento significativa para una amplia gama de aplicaciones (Pravalika, 2019).

Una de las cualidades más destacadas del ESP32 es su capacidad de comunicación inalámbrica. Equipado con un módulo Wi-Fi integrado, el ESP32 permite la conectividad a redes Wi-Fi, lo que facilita la comunicación y la interconexión con otros dispositivos y servicios en línea. Esto abre una amplia gama de posibilidades para aplicaciones IoT (Internet de las cosas), permitiendo al ESP32 interactuar con servicios en la nube, aplicaciones móviles y otros dispositivos inteligentes.

Además del Wi-Fi, el ESP32 también es compatible con Bluetooth, lo que amplía aún más sus capacidades de comunicación. Esto significa que el ESP32 puede conectarse y comunicarse de manera inalámbrica con dispositivos Bluetooth, como teléfonos móviles, tabletas, auriculares, altavoces y otros periféricos.

Entre las características de comunicación inalámbrica del ESP32, destaca el protocolo de comunicación ESP NOW. Este protocolo, desarrollado por Espressif Systems (la compañía detrás del ESP32), permite una comunicación directa y de baja latencia entre varios dispositivos ESP32 sin necesidad de un enrutador Wi-Fi. Esto es especialmente útil en aplicaciones de Internet de las cosas (IoT) donde se requiere una comunicación eficiente y de corto alcance entre múltiples dispositivos en una red local (Babiuch, 2019).

ESP NOW es ideal para aplicaciones como la monitorización y control de sensores distribuidos, la construcción de redes de sensores y actuadores, la comunicación entre nodos en una malla de dispositivos y muchas otras aplicaciones donde se requiere una comunicación inalámbrica simple y rápida.

II. PARTE TÉCNICA

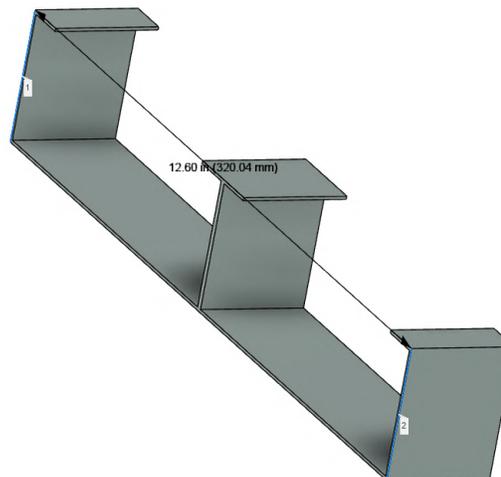
2.1 Especificaciones para el diseño del cronómetro.

El cronómetro se diseñó para un concurso de vehículos impulsados por CO₂ convocado por un instituto de educación superior con la finalidad de que los alumnos apliquen los conocimientos de diseño y apliquen técnicas de manufactura aditiva o reductiva y se interesen por la innovación y el desarrollo sustentable en su vida profesional.

En primer lugar, se debió de considerar las especificaciones técnicas que debería de tener el proyecto en general. Entre las características principales de diseño se encuentran:

- Que fuera desmontable, por motivos de transporte y almacenaje.
- Utilizar sensores ópticos que no interfieran en el recorrido de los vehículos.
- Utilizar visualización a través de display de 7 segmentos para cada carril o competidor.
- El sistema de lanzamiento debe estar vinculado inalámbricamente con los sensores de final de carrera y debe poder reiniciarse a voluntad del usuario.

Como punto de partida para las dimensiones físicas del cronómetro se debió de considerar el ancho de la pista en total, así como la tolerancia de los perfiles de aluminio. En la Figura 5 se muestran las medidas de los dos carriles unidos.

Figura 5*Cronómetro digital para experimentos de física.*

Todos los modelos realizados en el presente informe fueron diseñados utilizando el software Fusion 360® a través de la licencia educativa.

El largo total de la pista es de 20mts. En el modelo mostrado solamente se muestra una parte para facilitar el ensamble de los demás componentes.

2.2 Selección de elementos para medición.

Una de las características principales del cronómetro es que el dispositivo que va a detectar el paso de los vehículos no afecte su recorrido. Se escogió un sensor óptico reflectivo E18-d80nk como el que se muestra en la Figura 6 que tiene un rango de 3 a 80cm y su alimentación es de 5V. Se van a colocar uno en cada riel de la pista.

Figura 6
Sensor óptico E18-d80nk



Tomando en consideración los problemas que se tuvieron en los cronómetros descritos en la parte de introducción en cuanto al uso de display cuádruple sencillo, se definió que el elemento de visualización estuviera multiplexado. Para ello se utilizó módulo Tm1637 como el que se presenta en la Figura 7. Dos dígitos serán utilizados para medir los segundos, mientras los dos menos significativos las decenas de milisegundos.

Figura 7
Módulo de display TM1637

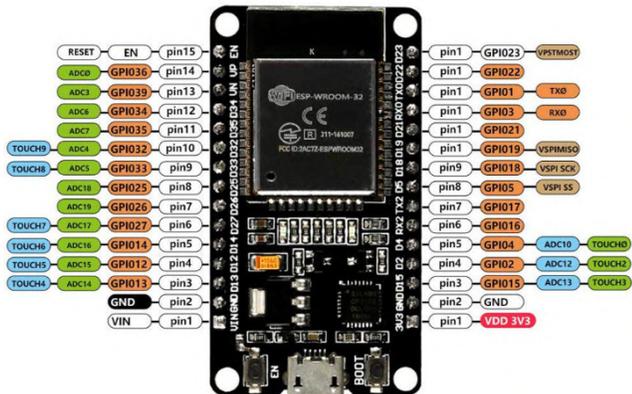


El módulo TM1637 es un dispositivo electrónico compacto y fácil de usar que se utiliza comúnmente para la visualización de dígitos en proyectos electrónicos. Este módulo se caracteriza por su interfaz simple y su comunicación a través de un bus de datos de dos cables, lo que lo hace compatible con una amplia variedad de microcontroladores.

Con el módulo TM1637, es posible mostrar información de manera clara y legible, lo que lo convierte en una opción popular para la construcción de relojes, contadores, termómetros y otros dispositivos que requieran una visualización numérica sencilla pero efectiva.

Como controlador se escogió un ESP32 en su placa DEV KIT 1 como el que se muestra en la Figura 8. Se utilizaron dos, uno para el receptor y otro para el transmisor.

Figura 8
Módulo DEVKIT1 para ESP32



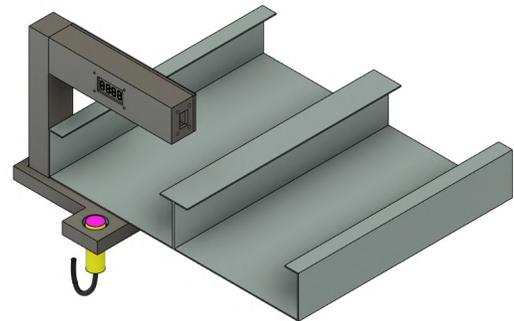
2.3 Diseño de la estructura del cronómetro.

Teniendo el modelo en 3D de la pista y sus carriles se comenzó a diseñar la estructura física del cronómetro. Así mismo, se obtuvieron los modelos del Sensor óptico y del display de 7 segmentos.

Existieron diferentes versiones de prueba para analizar su aplicación. La primera versión se muestra en la Figura 9, en ella se muestra que el sensor estaba ubicado en la parte inferior de la pista apoyado por su rosca de montaje.

El cronómetro estaba diseñado para estar atornillado a la parte lateral de la estructura mecánica del perfil de aluminio. Si bien era posible, eso limitaba la libertad de movimiento. Es decir, en caso de requerir una calibración o moverla de perfil no sería posible. El diseño se iba a utilizar en “espejo” para unir ambos cronómetros mediante tornillería en el centro.

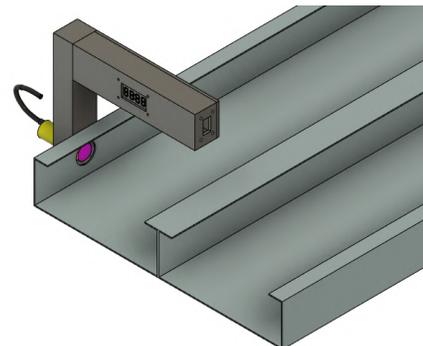
Figura 9
Primer prototipo de estructura con sensor en la base.



Si bien el diseño era funcional, era poco práctico, pues los perfiles tenían que estar alineados al momento de ser atornillados, si no los sensores se encontrarían desfasados de su horizontal. De igual forma, el ubicar el sensor fuera de los perfiles dificultaría el sistema de freno, pues los vehículos no tendrían un lugar para detenerse, saliéndose de la pista a una velocidad que podía dañarlos o ser peligroso para los asistentes al evento.

Debido a lo anterior, se creó una segunda versión de la estructura en donde el sensor se ubica en la parte lateral que es la que se presenta en la Figura 10. Si bien se soluciona el problema del frenado, se tiene la misma problemática en cuanto a la fijación del dispositivo, pues se depende aún de tornillería.

Figura 10
Segundo prototipo con el sensor en la lateral.

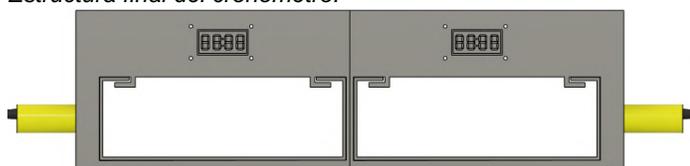


La tercer y última propuesta es la de la Figura 11, en esta, el sensor se mantiene en la lateral, pero ahora el montaje se realiza mediante presión. La estructura del cronómetro se “incrusta” en el perfil de aluminio.

En esta propuesta, se soluciona el problema de requerir tornillería y al mismo tiempo permite que el sensor sea removible de una forma más sencilla. También, al no estar completamente fijo, se puede calibrar la recta horizontal de llegada a cualquier punto del perfil. La altura del cronómetro es la máxima de los vehículos de acuerdo a la convocatoria con una tolerancia en caso de que algún carro sobrepase esta medida.

El elemento que permite que la estructura se incruste tiene tolerancia, pues realizando medidas físicas de los perfiles, éstos variaban unos de otros siendo necesario dejar un espacio que permitiera movilidad y a la vez sujeción.

Figura 11
Estructura final del cronómetro.



Para la el montaje del módulo de visualización se optó por fijarlos por tornillería, pues éstos no deberán moverse en ninguna circunstancia. Los sensores ópticos se encuentran montados en la estructura del cronómetro mediante una rosca propia de su diseño. Los métodos de montaje se ven en la Figura 12.

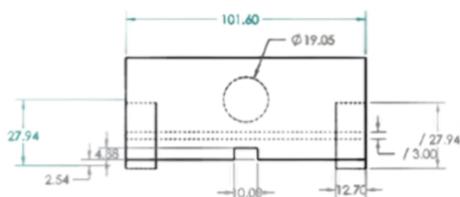
Figura 12
Diseño de ensamble para display y sensor óptico.



2.4 Diseño del sistema de arranque.

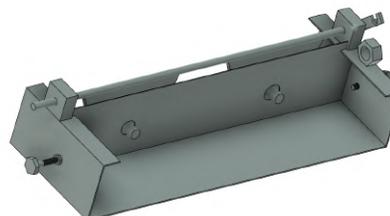
El sistema de arranque debe de realizar una perforación justo en el centro de los tanques de CO₂ del vehículo para liberar la presión del aire y hacer el movimiento. El mecanismo se realizó en base a las medidas puestas en la convocatoria del evento. Las medidas establecidas de altura para el tanque de CO₂ se muestran en la Figura 13 donde se ven las características de la parte trasera de los vehículos.

Figura 13
Vista trasera con medidas para el tanque de CO₂.



En base a lo anterior, se diseñó el mecanismo de accionamiento que se presenta en la Figura 14 que está compuesto de una placa metálica con un sistema de resortes para generar presión.

Figura 14
Diseño mecánico del accionador



El accionamiento es manual, mediante el retiro de un perno que soporta la tensión de los resortes del accionador que está conformado de dos placas metálicas que tienen un clavo cada una, colocado a la altura establecida en los vehículos. Al retirar el perno, las placas traseras caen y los clavos golpean el tanque, haciendo la perforación que libera la presión.

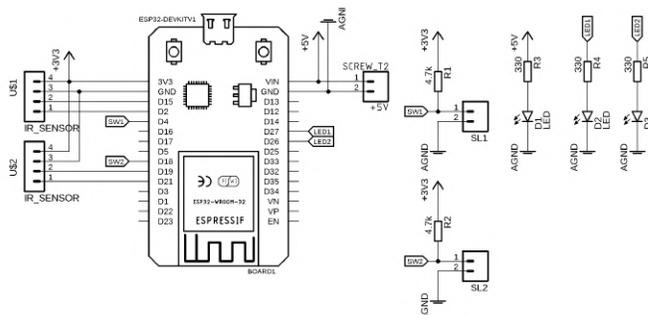
En este punto, se colocó un sensor óptico que será el encargado de detectar cuando el accionador cae, pues éste reflejará la luz del sensor, enviando la señal al display para comenzar a contar.

2.5 Diseño electrónico del cronómetro.

El diseño electrónico se puede dividir en dos partes: El circuito de arranque y el circuito de control de tiempo y detección de final de carrera.

El circuito de arranque consta de un botón pulsador que permitirá reiniciar el cronómetro y un sensor reflectivo en el mecanismo de arranque para iniciar el conteo. Utilizando el software Eagle® se diseñó el diagrama esquemático de la Figura 15.

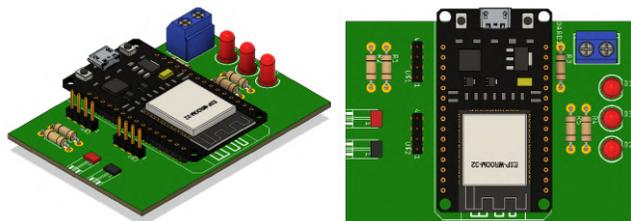
Figura 15
Diseño esquemático del circuito de arranque.



Como medida preventiva, se colocaron dos conexiones para sensor infrarrojo. Una terminal de alimentación externa en caso de requerir una fuente de alimentación diferente al USB y conexiones para botones pulsadores externos en configuración Pull Up (lógica negativa). Así como 3 diodos LED que permitan visualizar el estado del cronómetro.

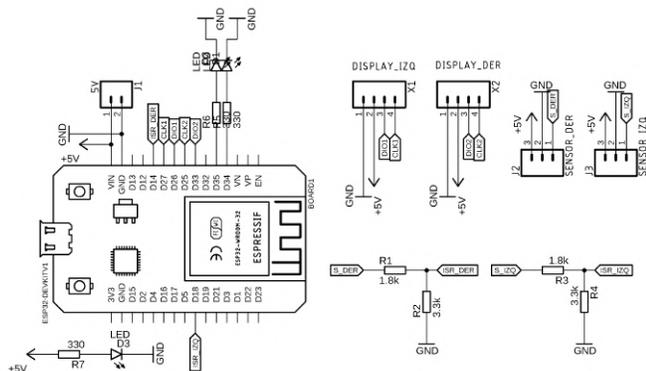
Mediante el mismo software se realizó el diseño del circuito impreso y la visualización en 3D. Esta última es de mucha importancia, pues en base a ella se va a crear la estructura donde irán montados los diferentes circuitos. La visualización del circuito en 3D se ve en la Figura 16.

Figura 16
Vista 3D del circuito impreso para el accionador



Para el circuito de medición de tiempos y final de carrera se propuso el esquemático de la Figura 17. En este circuito se colocaron borneras por tornillo con la finalidad de que los cables provenientes de los sensores, así como de los display numéricos de siete segmentos pudieran conectarse con más facilidad.

Figura 17
Diseño esquemático para el circuito del cronómetro.



Debido a que los sensores ópticos funcionan con una salida a 5V se calcularon divisores de tensión para bajar el voltaje a 3.3V que es el voltaje de trabajo del ESP32. Como indicador de alimentación se implementó un LED para identificar si el circuito se encontraba alimentado. De igual forma, un borne de conexión para una fuente de alimentación externa.

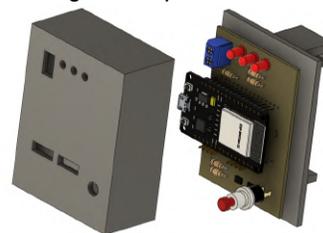
Con el circuito esquemático terminado, al igual que el circuito anterior, se diseñó la placa de circuito impreso y su vista en 3D que es la que se puede visualizar en la Figura 18.

Figura 18
Vista 3D del circuito impreso para el cronómetro y sensores



Con la finalidad de proteger los circuitos electrónicos y que no estuvieran al alcance de las personas que asistieran al evento, se diseñaron gabinetes basándose en los diseños 3D de los circuitos anteriormente descritos. En la Figura 19 se muestra el gabinete elaborado para el circuito del accionador

Figura 19
Vista 3D del diseño del gabinete para el circuito de accionamiento

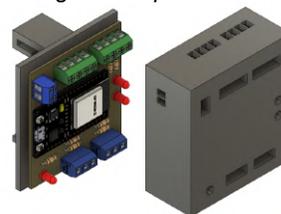


Se puede ver que el gabinete tiene una forma adecuada para ser fabricado mediante manufactura aditiva.

El gabinete se encuentra completamente sellado a presión y el riel que se incrustará en la pista se encuentra unido a través de tornillos a la placa de circuito impreso y a la base plástica. Así mismo, todos los elementos se encuentran accesibles para cualquier modificación.

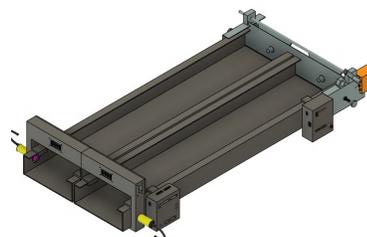
Repitiendo la operación se diseñó el gabinete para el circuito del cronómetro obteniendo la propuesta de la Figura 20.

Figura 20
Vista 3D del diseño del gabinete para el circuito de medición



Con todos los elementos diseñados, se procedió a realizar el ensamble final de los componentes en la vista 3D de la pista, dando como resultado lo presentado en la Figura 21.

Figura 21
Diseño 3D del ensamble de los elementos en la pista.



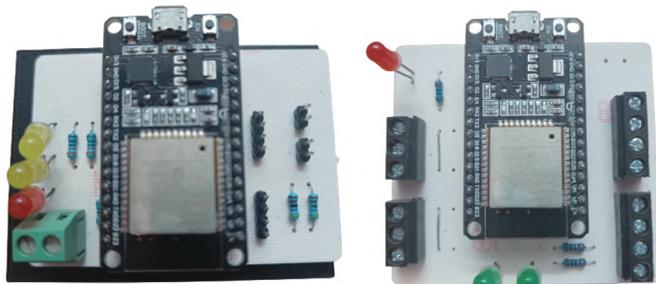
Se puede observar que todos los elementos se encuentran ensamblados de forma correcta en los perfiles de aluminio. Sin embargo, tienen tolerancias para que, al ser fabricados y colocados no tengan problemas con variaciones en las medidas de los componentes. Tener en cuenta que el tamaño total de la pista es de 20mts. Sin embargo, en el ensamble se ha acertado para una mejor visualización.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Fabricación de los elementos del cronómetro.

Para la fabricación de los circuitos impresos se usó el método de fresado CNC con la finalidad de que éstos tuvieran una mejor presentación y rendimiento. Los circuitos impresos con los componentes montados se ven en la Figura 22.

Figura 22
Circuitos impresos montados



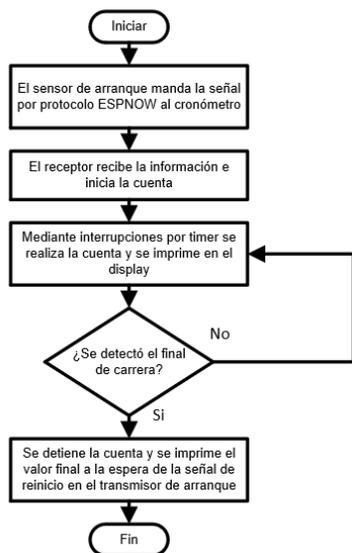
Posteriormente mediante tecnología de impresión 3D se fabricaron las estructuras del cronómetro y de los gabinetes de los circuitos electrónicos. Los elementos fabricados se ven en la Figura 23.

Figura 23
Estructuras plásticas realizadas mediante impresión 3D.



Finalmente, con los elementos fabricados se procedió a realizar la programación de la comunicación inalámbrica. En la Figura 24 se muestra el diagrama de flujo para el funcionamiento del cronómetro. Los algoritmos se programaron utilizando el IDE de Arduino.

Figura 24
Diagrama de flujo del funcionamiento del cronómetro.



Terminados todos los elementos se montaron en la pista para ser utilizados en el evento.

IV. CONCLUSIONES

El desarrollo de un cronómetro digital inalámbrico utilizando el protocolo ESPNOW para carreras de vehículos impulsados por CO₂ representa una solución innovadora y eficiente para abordar los desafíos logísticos asociados con la elaboración de la infraestructura de pistas en estos eventos. Al proporcionar una comunicación confiable sin la necesidad de cables, este sistema contribuye a reducir los problemas relacionados con el gasto de conductores eléctricos y posibles fallas durante el transporte.

Además de su funcionalidad práctica, este proyecto destaca por su enfoque en la aplicación de tecnologías de vanguardia y técnicas de diseño avanzadas. Mediante el uso de tecnología CAD-CAM-CAE y la impresión 3D, se logró diseñar y fabricar de manera precisa y eficiente los componentes del cronómetro, como el accionador y el display numérico.

Es importante destacar que este tipo de proyectos tecnológicos tienen un impacto significativo en el desarrollo de competencias profesionales en los alumnos de nivel superior. Al participar en el diseño, fabricación y programación de un producto tangible y funcional, los estudiantes adquieren habilidades prácticas en áreas como el diseño asistido por computadora, la fabricación digital y la programación de microcontroladores.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al Tecnológico Nacional de México (TecNM); Instituto Tecnológico Superior de Lerdo por las facilidades brindadas para la realización del presente trabajo.

También se agradece a la División de Sistemas Automotrices, así como todos los docentes y alumnos involucrados para la realización del proyecto. Muchas gracias por su cooperación y participación con sus propuestas de mejora.

VI. REFERENCIAS

- Babiuch, M. (2019). Using the ESP32 microcontroller for data processing. *20th International Carpathian Control Conference*.
- Blyth, W. (2015). *Green Racing: Eco-Motorsports and the Environment*. CRC Press.
- Formula 1. (20 de mayo de 2023). Obtenido de <https://corp.formula1.com/partners/aramco/>
- Jo, H. (2013). Development of a CO₂ racing car using a fuel cell powertrain. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 781-785.
- Montávez Madrigal, A. (2020). *Diseño, desarrollo y validación de un cronómetro con un ordenador de placa reducida*. España: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Núñez Pérez, B. (2011). Cronómetro digital utilizando un microcontrolador de la familia PIC16F87X para instrumentar electrónicamente los ensayos y experimentos en laboratorios de física mecánica. *Revista Colombiana de Física*.
- Orozco, F. (2019). Análisis del desempeño y emisiones de CO₂ de vehículos híbridos y convencionales en condiciones de tráfico urbano en México. *Revista de Investigación en Ciencia e Ingeniería*, 47-59.
- Pravalika, V. (2019). Internet of things based home monitoring and device control using Esp32. *International Journal of Recent Technology and Engineering* 8, 58-62.
- Shell Eco-marathon. (s.f.). Obtenido de <https://www.shell.com/energy-and-innovation/shell-ecomarathon.html>
- Verhetsel, A. (2012). The Shell Eco-marathon: A socio-technical analysis of a fuel efficiency competition. *European Transport Research Review*, 43-54.

Programación de un sistema de medición de temperatura utilizando sensor resistivo (RTD) y microcontrolador PSoC aplicado a un calorímetro didáctico.

Machado-Díaz, E¹; Martínez-Muñoz, J. C.²; Castro-Juárez, E.¹

Datos de Adscripción:

¹Tecnológico Nacional de México (TecNM): Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Subdirección de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Av. Tecnológico No. 1555 Sur Periférico Gómez - Lerdo Km. 14.5, Ciudad Lerdo, Durango; México, C.P. 35150.
eduardo.md@itslerdo.edu.mx

²Tecnológico Nacional de México (TecNM): Instituto Tecnológico de la Laguna, Departamento de Eléctrica, electrónica y Energías Renovables, Blvd. Revolución y Av. Instituto Tecnológico de La Laguna, Torreón, Coahuila; México, C.P. 27000

Resumen - Uno de los grandes problemas que surgen en la enseñanza de cualquier nivel académico es la falta de equipo para la realización de prácticas de diferentes asignaturas como el caso de física, o transferencia de calor donde es importante medir la cantidad de energía que puede ser entregada por un material, siendo necesario el uso de un calorímetro. Sin embargo, estos equipos pueden ser costosos y no tienen una forma digital de obtener o guardar las mediciones del calor absorbido o liberado por los materiales.

Es por ello, que en el presente proyecto se plantea el diseño, fabricación y programación de un calorímetro digitalizado a través de un sensor de temperatura tipo resistivo (RTD), siendo este uno de los más utilizados en la industria para este tipo de mediciones. Como sistema de adquisición de datos se utilizó un microcontrolador PSoC que permite el procesamiento de señales analógicas y sistemas de acondicionamiento de señal importantes en la realización de circuitos con RTD. Así mismo, se muestran los resultados obtenidos del sistema de medición aplicados al calorímetro diseñado y fabricado.

Con el diseño propuesto, se plantea una alternativa para las instituciones educativas y laboratorios básicos para la elaboración de prácticas sencillas en donde intervenga el consumo energético de una forma digital y en la que puedan registrarse los datos en otros sistemas para ser analizados posteriormente.

Palabras Clave – Calorímetro, Didáctico, programación, PSoC, RTD.

Abstract - One of the significant challenges encountered in education at all academic levels is the absence of equipment required to conduct practical experiments in various subjects, such as physics or heat transfer, where precise measurement of energy transfer by materials is essential, necessitating the use of a calorimeter. However, these devices can be costly and lack a digital means to obtain or store measurements of the heat absorbed or released by the materials.

Therefore, this project aims to address this issue by proposing the design, fabrication, and programming of a

digitalized calorimeter utilizing a resistive temperature sensor (RTD), which is widely employed in the industry for such measurements. A PSoC microcontroller was employed as the data acquisition system, facilitating the processing of analog signals and incorporating crucial signal conditioning systems necessary for RTD circuit implementation. Additionally, the obtained results from the measurement system applied to the designed and fabricated calorimeter are presented.

The proposed design presents an alternative for educational institutions and basic laboratories to conduct straightforward experiments involving digital energy consumption, allowing data to be recorded in other systems for subsequent analysis. This design offers a valuable solution, enabling the efficient execution of practical exercises and the accurate investigation of energy consumption, while minimizing the costs associated with acquiring conventional calorimetry equipment.

Keywords – Calorimeter, Programming, PSoC, RTD, Teaching.

I. INTRODUCCIÓN

En este proyecto se plantea el diseño, la fabricación y la programación de un calorímetro digitalizado utilizando un sensor de temperatura tipo resistivo (RTD), que es uno de los más utilizados en la industria para este tipo de mediciones. Se utilizó un microcontrolador PSoC como sistema de adquisición de datos, lo cual permite el procesamiento de señales analógicas y el acondicionamiento de señales, aspectos importantes en la implementación de circuitos con RTD. Además, se presentan los resultados obtenidos del sistema de medición aplicados al calorímetro diseñado y fabricado.

El diseño propuesto plantea una alternativa para instituciones educativas y laboratorios básicos, al ofrecer una solución para llevar a cabo prácticas sencillas donde se aborde el consumo energético de manera digital y se puedan registrar los datos en otros sistemas para su posterior análisis. Esto permitirá un enfoque más eficiente y preciso en la enseñanza de conceptos relacionados con la transferencia de calor, al mismo tiempo que se reducen los costos asociados con la adquisición de equipos tradicionales de calorimetría.

1.1 Resistencias dependientes de temperatura.

Un RTD (*Resistance Temperature Detector*), específicamente el tipo PT100, es un sensor resistivo utilizado para medir la temperatura con alta precisión. El término PT100 se refiere al material utilizado en el sensor, que consiste en un elemento de platino puro con una resistencia de 100 ohmios a 0 grados Celsius. Es ampliamente utilizado en aplicaciones industriales y

científicas debido a su estabilidad, linealidad y precisión en un amplio rango de temperatura (Areny, 2004).

El principio de funcionamiento del RTD tipo PT100 se basa en el cambio de resistencia del platino en función de la temperatura. A medida que la temperatura aumenta, la resistencia también aumenta de manera predecible y lineal. Esto permite establecer una relación matemática entre la resistencia medida y la temperatura correspondiente, lo que facilita la calibración y la conversión de la señal eléctrica en valores de temperatura.

Generalmente este tipo de resistor está construido en forma de un alambre o una película delgada de platino enrollada alrededor de un núcleo cerámico o vidrio. Un ejemplo de un RTD PT100 se muestra en la Figura 1.

Figura 1
Ejemplo de RTD PT100



Este diseño proporciona una mayor área de superficie para el intercambio de calor y mejora la sensibilidad del sensor a los cambios de temperatura. Además, el platino se utiliza debido a su estabilidad química, alta resistividad y baja resistencia a la oxidación, lo que garantiza una respuesta precisa y duradera a lo largo del tiempo.

Para medir la resistencia del elemento, se utiliza un circuito de acondicionamiento, generalmente en configuración de puente de Wheatstone, que equilibra la resistencia del RTD con resistencias conocidas. La diferencia de potencial resultante se mide y se utiliza para determinar la resistencia y, por lo tanto, la temperatura (Boylestad, 2009).

Este sensor ofrece numerosas ventajas en comparación con otros tipos de sensores de temperatura, como una alta precisión en un amplio rango de temperatura, una respuesta rápida, una buena linealidad y una excelente estabilidad a largo plazo.

1.2 Sistemas de medición de temperatura basados en RTD utilizando microcontroladores

La medición precisa de la temperatura es un aspecto fundamental en numerosas aplicaciones científicas e industriales, especialmente en el campo de la termodinámica y la calorimetría. En particular, los sistemas de medición de temperatura basados en sensores resistivos han demostrado ser altamente confiables y precisos en una amplia gama de entornos y condiciones (Pérez M., 2014).

El desarrollo de sistemas de medición de temperatura cada vez más eficientes y de fácil implementación es un área de investigación en constante evolución. En este contexto, los microcontroladores han desempeñado un papel crucial al proporcionar una plataforma versátil para la programación y el control de sistemas de medición de temperatura.

Un tipo específico de microcontrolador, el PSOC (*Programmable System-on-Chip*), ha ganado popularidad debido a su capacidad para combinar diferentes funciones y periféricos en un solo chip. Esto lo convierte en una opción atractiva para el diseño y la programación de sistemas de medición de temperatura altamente integrados (Crispi, 2007).

En el ámbito educativo, el uso de dispositivos didácticos desempeña un papel fundamental en la enseñanza de conceptos científicos y tecnológicos complejos. En el caso de la calorimetría, un calorímetro didáctico proporciona una herramienta práctica y tangible para que los estudiantes comprendan los principios fundamentales de la transferencia de calor y la medición de temperatura (Alvarado Fernández, 2019).

Sin embargo, a pesar de la amplia disponibilidad de sensores RTD y microcontroladores PSOC, existen pocos estudios que aborden específicamente la programación de un sistema de medición de temperatura utilizando estos componentes aplicados a un calorímetro didáctico. Este vacío en la literatura científica resalta la necesidad de investigar y desarrollar un enfoque efectivo para aprovechar las capacidades de los sensores RTD y los microcontroladores PSOC en la programación de sistemas de medición de temperatura para su aplicación en un contexto didáctico.

1.3 Definición y composición de un calorímetro.

El calorímetro es un dispositivo utilizado en la medición precisa de calor, que desempeña un papel fundamental en la comprensión y aplicación de los principios de la termodinámica y la transferencia de calor. Este artículo científico tiene como objetivo proporcionar una descripción exhaustiva del calorímetro y analizar sus antecedentes en el ámbito educativo (Martínez, 2006).

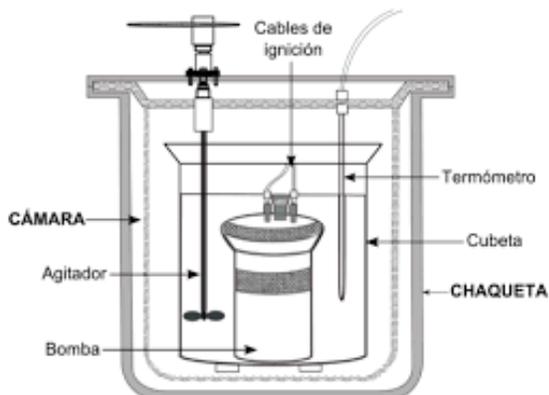
Un calorímetro es un instrumento diseñado para medir la cantidad de calor absorbido o liberado durante una reacción química, un proceso físico o un cambio de temperatura. Consiste típicamente en una cámara aislada térmicamente que contiene una muestra, un termómetro para medir cambios de temperatura y un sistema de aislamiento para minimizar las pérdidas de calor hacia el entorno. El calorímetro permite realizar mediciones precisas de calor específico, entalpía, calor de reacción y otras propiedades termo físicas de sustancias.

Existen diferentes tipos de calorímetros, como los de bomba, los adiabáticos, los de flujo constante y los de mezcla. Cada tipo tiene sus propias características y aplicaciones específicas. Los calorímetros modernos a menudo incorporan tecnologías avanzadas, como termistores, termopares y sistemas de adquisición de datos, para mejorar la precisión y facilitar el análisis de los datos obtenidos (García, 2007).

1.4 Bomba calorimétrica.

Una bomba calorimétrica es un dispositivo utilizado para medir el calor absorbido o liberado durante una reacción química o un proceso físico. Es un tipo de calorímetro que se utiliza específicamente para determinar la entalpía de una reacción, es decir, la cantidad de calor transferida durante el proceso.

La bomba calorimétrica consta de varios componentes esenciales que se muestran en la Figura 2. El elemento central es una celda de reacción, que es un recipiente cerrado donde tiene lugar la reacción química. La celda de reacción generalmente consiste en una bomba o un contenedor resistente a la presión, hecho de materiales que son químicamente inertes y térmicamente aislados para minimizar las pérdidas de calor.

Figura 2*Estructura general de una bomba calorimétrica.*

Dentro de la celda de reacción, se coloca una muestra de la sustancia o las sustancias involucradas en la reacción. Además, se añade un exceso de reactivo o reactivo limitante, dependiendo del tipo de reacción que se esté investigando.

Para controlar y medir los cambios de temperatura en la celda de reacción, se instala un termómetro sensible y preciso. Este termómetro registra los cambios de temperatura antes, durante y después de la reacción.

La bomba calorimétrica también incluye un sistema de agitación que garantiza una mezcla uniforme de los reactivos y ayuda a alcanzar la equimolaridad y la homogeneidad de la muestra.

Una vez que todos los componentes están en su lugar, se lleva a cabo la reacción química dentro de la celda de reacción. Durante la reacción, se produce un intercambio de calor entre la muestra y los reactivos. Este calor se absorbe o se libera, lo que provoca un cambio en la temperatura de la celda de reacción.

Mediante el monitoreo de los cambios de temperatura antes y después de la reacción, y teniendo en cuenta la capacidad calorífica de la celda de reacción, se puede calcular la cantidad de calor liberada o absorbida durante la reacción.

La bomba calorimétrica se utiliza en una variedad de campos, como la química, la bioquímica y la investigación farmacéutica. Es una herramienta valiosa para determinar la energía térmica involucrada en las reacciones químicas, lo que proporciona información importante sobre las propiedades termodinámicas de las sustancias y ayuda en el diseño y optimización de procesos químicos y farmacéuticos.

1.5 Calorímetros en el ámbito educativo

Los calorímetros han sido utilizados en el ámbito educativo durante décadas como herramientas didácticas para enseñar los principios fundamentales de la transferencia de calor y la termodinámica. Estos dispositivos ofrecen a los estudiantes una experiencia práctica y tangible, permitiéndoles comprender conceptos abstractos de manera más efectiva (Giraldo, 1994).

En las últimas décadas, ha habido un creciente interés en el desarrollo de calorímetros didácticos, específicamente diseñados para el entorno educativo. Estos calorímetros se caracterizan por ser seguros, fáciles de usar y de bajo costo, lo que los convierte en una herramienta accesible para profesores y estudiantes.

Los calorímetros didácticos suelen estar diseñados para realizar mediciones simples de calor, permitiendo a los

estudiantes realizar experimentos y observar de primera mano los efectos del intercambio de calor en diferentes sustancias y sistemas. Estos dispositivos proporcionan una plataforma práctica para que los estudiantes exploren conceptos como la ley de conservación de la energía, la capacidad calorífica, la transferencia de calor por conducción, convección y radiación, y la determinación de entalpías de reacción.

Además, con el avance de la tecnología, se han desarrollado simuladores y softwares interactivos que permiten a los estudiantes realizar experimentos virtuales utilizando calorímetros virtuales. Estas herramientas proporcionan una experiencia práctica similar a la de un laboratorio real, pero con la ventaja de permitir una mayor flexibilidad y repetición de experimentos.

1.6 Dispositivos PSoC

La palabra PSoC es un acrónimo de "Programmable System on Chip" y se refiere a dispositivos fabricados por la empresa Infineon. Estos dispositivos son microcontroladores que se destacan por su capacidad de integrar módulos tanto analógicos como digitales en un solo chip, lo que les confiere una característica distintiva y atractiva. Además, ofrecen la posibilidad de reconfigurar dinámicamente las entradas y salidas de estos módulos (Ashby, 2005). Esta flexibilidad en la estructura de los componentes electrónicos facilita el desarrollo de sistemas electrónicos embebidos.

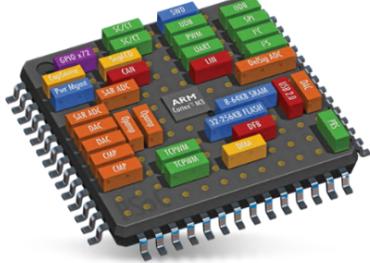
Los dispositivos PSoC contienen diferentes áreas principales que les otorgan versatilidad para adaptarse a diversas aplicaciones. Estos microcontroladores cuentan con bloques digitales y analógicos que pueden configurarse y adaptarse según las tareas que se deseen realizar. Las cuatro áreas principales que componen un microcontrolador PSoC son: el núcleo, el sistema digital, el sistema analógico y los recursos del sistema.

La versatilidad y el rendimiento del microcontrolador PSoC varían dependiendo de la versión utilizada. Para el presente proyecto, se empleó la familia PSOC 5, específicamente la tarjeta de desarrollo CY8CKIT-059 PSoC 5 LP, como se muestra en la Figura 3. Esta selección se hizo en función de las necesidades y requisitos del proyecto, aprovechando las prestaciones ofrecidas por esta versión del microcontrolador.

Figura 3*Tarjeta CY8CKIT-059.*

Las prestaciones generales en forma gráfica de este dispositivo se presentan en la Figura 4, internamente cuenta con un gran número de entradas y salidas digitales de propósito general, así como sistemas de comunicación UART, relojes internos, procesadores analógicos y bloques digitales (Kitagawa, 2021).

Figura 4
Configuración interna del microcontrolador PSOC 5

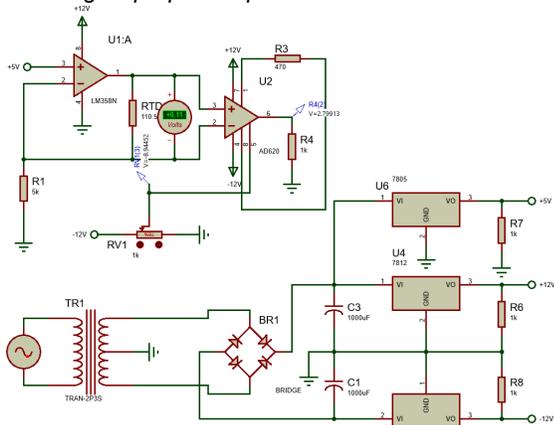


II. PARTE TÉCNICA

2.1 Propuesta de diseño con microcontroladores PIC.

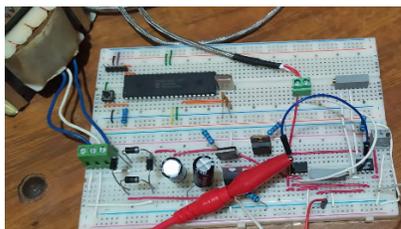
Como primer sistema de medición de temperatura se desarrolló un sistema en base a un amplificador de instrumentación INA114 y amplificadores operacionales. Se agregó una fuente de alimentación regulable para que los valores de los amplificadores operacionales estuvieran calibrados y no existieran variaciones considerables que afectaran las lecturas. El esquemático propuesto se presenta en la Figura 5.

Figura 5
Circuito analógico propuesto para microcontrolador PIC.



Con el circuito esquemático se procedió a montarlo en la tablilla de prototipo. Sin embargo, los resultados no fueron satisfactorios debido a que las lecturas eran muy inestables y la sensibilidad del sistema se veía muy afectada a perturbaciones. Por lo que, para la aplicación propuesta, no era viable. En la Figura 6 se puede ver el montaje en físico del circuito.

Figura 6
Montaje de circuito analógico propuesto con PIC18F4550



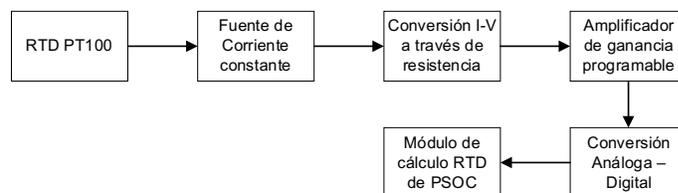
2.2 Circuito de medición utilizando PSOC.

Utilizando como referencia los diagramas analógicos usados en el circuito con microcontroladores PIC. Se implementó un acondicionamiento de señal en la plataforma PSOC 5 a través de su módulo de procesamiento analógico.

El sistema de acondicionamiento de señal se puede resumir en el diagrama de la Figura 7. En primer lugar, se conecta el RTD a una fuente de corriente constante para generar una diferencia de potencial equivalente. Posteriormente, se realiza una amplificación de ese voltaje utilizando los amplificadores de ganancia programable del módulo analógico.

Una vez que se tiene ya el voltaje necesario, se procede a realizar la conversión análoga a digital a través de los conversores.

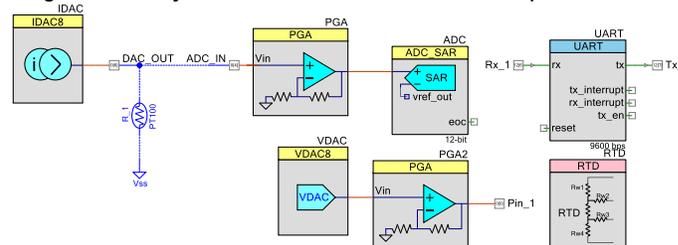
Figura 7
Diagrama de flujo del circuito de medición de temperatura.



A diferencia del circuito con PIC, la placa PSOC contiene ya todos los recursos anteriormente descritos, evitando la conexión de elementos externos a la placa y dando la posibilidad de configurarlos dependiendo de las necesidades que se presenten. El diagrama esquemático de los recursos analógicos y digitales que resuelven el diagrama de flujo es el que se presenta en la Figura 8.

De igual forma, se colocó un módulo UART que será el encargado de enviar los datos por protocolo serie utilizando el conversor FTDI – USB incluido en el microcontrolador para la comunicación con la computadora y que la temperatura pueda ser monitoreada en una interfaz con esta característica.

Figura 8
Diagrama de flujo del circuito de medición de temperatura.

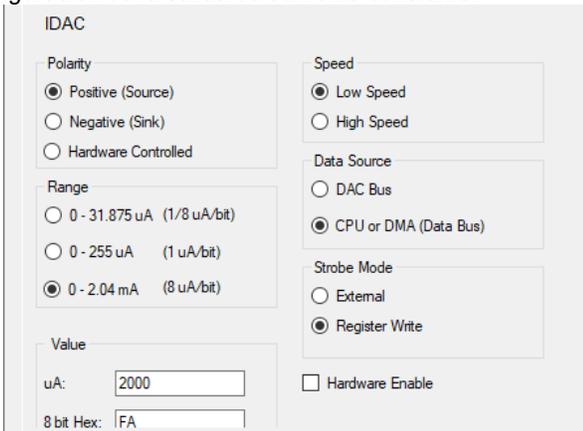


2.3 Configuraciones de bloques del diseño.

A través de los recursos internos, se procedió a configurar la fuente de corriente constante que, para este modelo en particular, es de 8 bits. En la Figura 9 se muestra la ventana de configuración para la fuente de corriente constante.

Se colocó una polaridad positiva, baja velocidad y una configuración de rango de 0 a 2.04mA, con un valor constante de 2mA. Esto es muy importante, pues es necesario tomar en cuenta que el sensor sigue siendo una resistencia que, al circular una corriente por él, la potencia será disipada en forma de calor, pudiendo afectar las mediciones. Por ello, se optó por que circulara una corriente pequeña.

Figura 9
Configuración de la salida de corriente constante.



Con la fuente de corriente configurada, se conecta el PT100 al PSOC para generar la diferencia de potencial. Este es el único elemento externo en la parte de acondicionamiento de señal.

El siguiente elemento a configurar es el Amplificador de Ganancia programable (PGA) que es el encargado de aumentar el nivel de tensión para que las lecturas tengan mejor sensibilidad. La ventana de configuración utilizada para este elemento se muestra en la Figura 10.



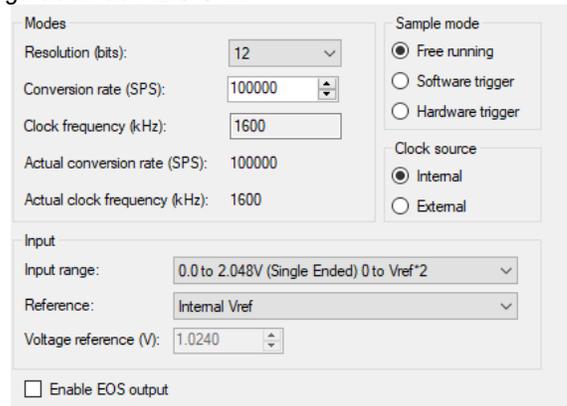
Figura 10
Configuración del amplificador de ganancia programable

Se estableció una ganancia de 4, ya que los niveles de voltajes provenientes del conversor son muy pequeños. También se utilizó un alto consumo de potencia y la alimentación interna como referencia de voltaje.

La curva que se muestra es la atenuación del amplificador en función de la ganancia y el voltaje de salida obtenido. Para esta aplicación, no tiene un impacto considerable, pues los niveles leídos no llegan a ser tan altos para generar una atenuación que cree perturbaciones en el sistema.

Ya que se tienen los elementos analógicos acondicionados y con los niveles requeridos, se hace la conversión análoga a digital utilizando el módulo ADC SAR (conversor de aproximaciones sucesivas) con la configuración que se ve en la Figura 11. Estas configuraciones pueden variarse en función de la sensibilidad que se quiera manejar en las conversiones, así como la velocidad de muestreo y la resolución.

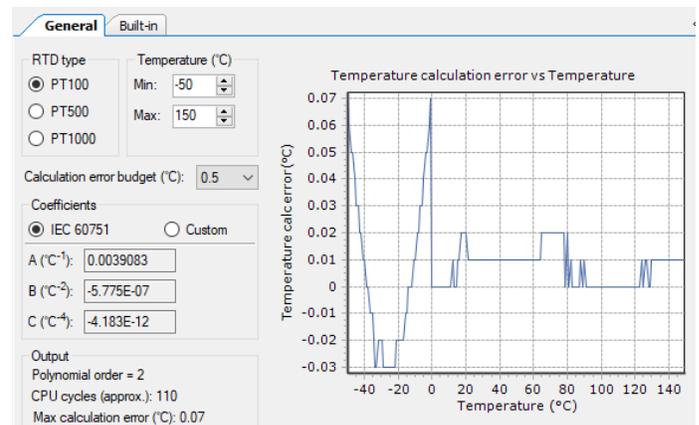
Figura 11
Configuración del ADC SAR



Se tiene un rango de muestras por segundo de 100,000 así como una frecuencia de reloj de 1600kHz. Debido a los niveles bajos de tensión se tiene un rango de entrada de voltaje de 0 – 2.048V con la finalidad de obtener una mejor sensibilidad, pues el conversor trabaja con una resolución de 12 bits. La referencia de voltaje se coloca interna para evitar la necesidad de un circuito de fuente regulable externo.

El último elemento a configurar es la herramienta RTD del PSOC. Este bloque permite realizar el cálculo de la temperatura a partir de la resistencia que se le coloque. Para este proyecto se utilizaron los parámetros que se muestran en la Figura 12.

Figura 12
Configuración del bloque de RTD



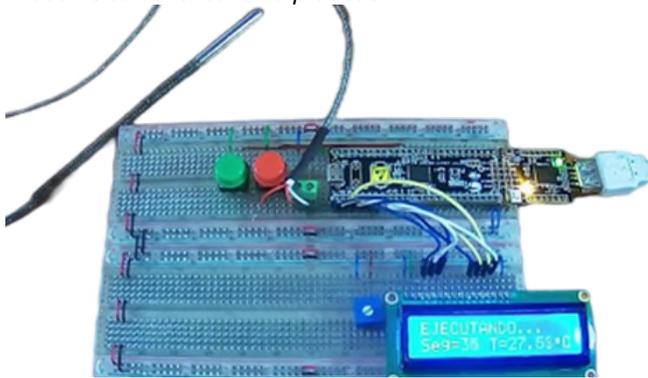
La configuración utilizada es para un PT100, con un rango de temperatura de -50 a 150°C y se utiliza un error permisible de 0.5°C. Los coeficientes son los establecidos por la norma IEC y se muestran como las variables A, B, C.

En el gráfico se puede observar la predicción de error en función de la temperatura que se está midiendo. También, se colocan cuántos ciclos máquina le llevarán al dispositivo realizar todos los cálculos, esto en caso de que se requieran aplicaciones donde el tiempo de muestreo sea determinante.

2.4 Implementación del circuito para pruebas.

Se realizaron las pruebas del sistema utilizando una tablilla de prototipos y una pantalla LCD 16x2 para la visualización de los datos. El circuito armado se presenta en la Figura 13.

Figura 13
Armado físico del circuito de pruebas.



Como se puede observar, los elementos externos son casi nulos comparados con el circuito con microcontrolador PIC, lo que facilita su montaje, así como disminuir la probabilidad de falla.

Para la realización de pruebas se colocaron 2 botones, el primero corresponde al inicio de la prueba de calor y el segundo para reiniciar el sistema para una segunda prueba.

Si bien, se tienen las configuraciones de los bloques, éstos solamente corresponden a la configuración de hardware. Para el software se realiza la programación utilizando lenguaje C en la plataforma PSoC Creator. El programa utilizado es el que se presenta en el Código Fuente 1. Que permite la transmisión de los datos de la temperatura mediante el puerto Serial.

Código Fuente 1
Programa para medición de temperatura.

```
#include "project.h"
#include "stdio.h"

int16 adato;
int32 uV;
int32 DTemp;
int32 DRes=0;

float Res;
float temp;
float mV;

char Data_String[30];
int i;

int main(void)
{
    CyGlobalIntEnable; /* Enable global interrupts. */

    UART_Start();
    IDAC_Start();
    PGA_Start();
    PGA2_Start();
    VDAC_Start();
    ADC_Start();
    ADC_StartConvert();
    ADC_IsEndConversion(ADC_WAIT_FOR_RESULT);

    for(;;)
    {
        DRes =0;
```

```
        for(i=0;i<20;i++)
        {
            adato = ADC_GetResult16();
            uV = ADC_CountsTo_uVolts(adato);
            uV = uV/8;
            DRes = DRes+uV;

            CyDelay(5);
        }
        DRes = DRes/20;
        DTemp = RTD_GetTemperature(DRes);
        mV = DRes/1000.0;
        temp = (float)DTemp/100.0;

        sprintf(Data_String, "RTD=%.2f\|tT=%.2f\r\n",mV,temp);
        UART_PutString(Data_String);
    }
}
```

Habiendo realizado las pruebas con el circuito y el código anterior, se verificó que las mediciones estuvieran correctas siendo satisfactorio el diseño.

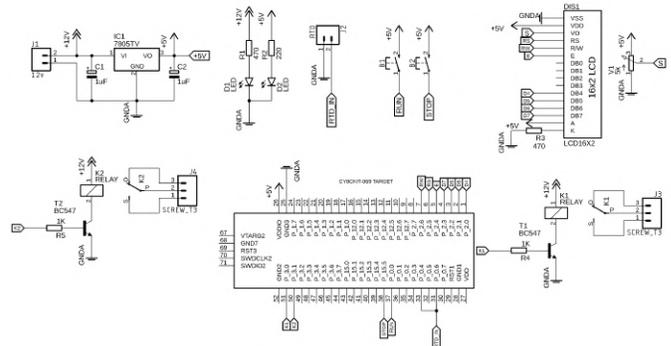
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Circuito para control de temperatura y actuadores del calorímetro.

Para realizar el control de temperatura del calorímetro fue necesario agregar circuitos externos para el control de la etapa de potencia. Es decir, el control del motor que hace que el líquido en el interior gire, los relevadores encargados de la chispa de ignición, así como los botones de inicio y reinicio de las pruebas. Los circuitos implementados para estos elementos son los que se muestran en la Figura 14.

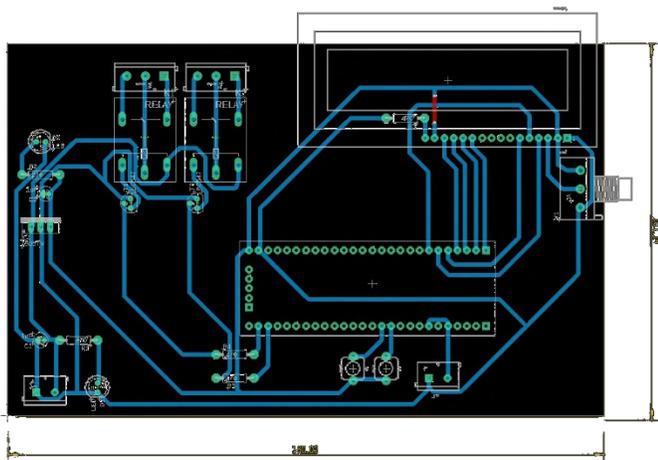
Los interruptores están conectados en configuración Pull – Down (lógica positiva) hacia las entradas del microcontrolador. Para el motor y la bobina que genera la chispa, se utilizaron transistores de potencia, pues la corriente entregada por las salidas del PSoC no son suficientes para su correcto funcionamiento.

Figura 14
Circuitos propuestos para elementos externo.



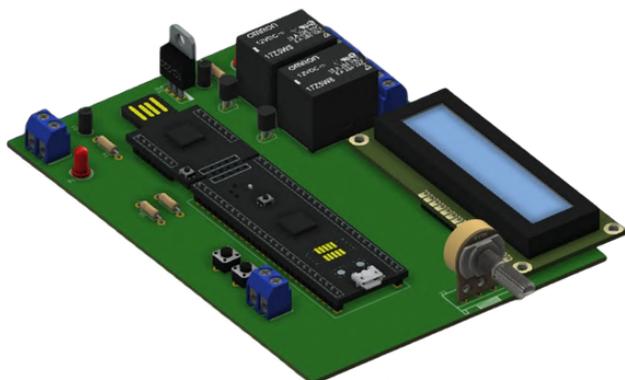
Partiendo del esquemático anterior, se procedió a diseñar la placa de circuito impreso. Para esto se utilizó el software Eagle© con la licencia educativa. El diseño PCB se presenta en la Figura 15

Figura 15
Diseño del PCB para el control de temperatura y accionamiento.



Utilizando la suite Fusion 360® se obtuvo la vista en 3D que se ve en la Figura 16 para verificar que todos los elementos colocados estuvieran en una posición accesible para el usuario final del controlador.

Figura 16
Visualización del PCB en 3D utilizando Fusion 360®.



Se puede visualizar que todos los elementos se encuentran accesibles para el usuario y las conexiones a los dispositivos externos (RTD, motores y relevadores) están disponible mediante borneras de sujeción con tornillo para evitar que existan falsos contactos o que los cables se muevan de su lugar, permitiendo al circuito montarse y transportarse con más facilidad.

Para la elaboración del circuito impreso se utilizó el método de transferencia térmica y reducción de cobre a través de cloruro férrico.

Posteriormente se realizó el montaje de los componentes en el lugar indicado y tomando como guía el diseño PCB y la visualización en 3D generada para evitar errores al momento de hacer las soldaduras.

La placa terminada y montada se presenta en la Figura 17, en ella se puede comprobar que los diseños realizados en el software ajustan en los componentes propuestos para la tarjeta.

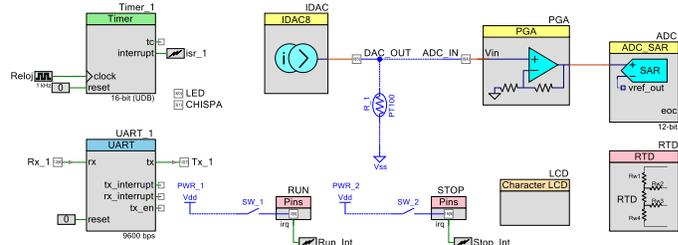
Figura 17
Tarjeta montada con los componentes.



3.2 Programación final del PSoC y montaje en la estructura mecánica

Derivado de las pruebas realizadas previamente se implementó la programación de bloques analógicos y digitales que se ve en la Figura 18.

Figura 18
Diagrama de bloques final del sistema de medición.



A diferencia del presentado previamente, se añadieron bloques de temporización, debido a que las pruebas con el calorímetro deben de estar cronometradas de acuerdo a parámetros establecidos. También se agregó el bloque de pantalla LCD e interrupciones externas por hardware para los botones de inicio y de reinicio.

Una vez teniendo todos los elementos de hardware y software comprobados y en funcionamiento, se montó la tarjeta en la estructura mecánica del calorímetro. El montaje final se ve en la Figura 19.

Figura 19
Montaje de la tarjeta en el calorímetro.



Se realizaron pruebas de funcionamiento de todo el sistema del calorímetro obteniendo resultados satisfactorios y que permiten realizar prácticas sencillas de transferencia de calor y

similares. Los resultados de las pruebas se presentan en la Figura 20.

Figura 20

Resultados de las pruebas de medición.



IV. CONCLUSIONES

En conclusión, la programación de un sistema de medición de temperatura utilizando un sensor resistivo (RTD) y un microcontrolador PSOC aplicado a un calorímetro didáctico demuestra la importancia de generar dispositivos de pruebas dentro de las instituciones educativas y su impacto significativo en el proceso de enseñanza-aprendizaje.

La implementación de este sistema permite a los estudiantes adquirir un conocimiento más profundo sobre los principios fundamentales de la medición de temperatura, la transferencia de calor y la termodinámica. A través de la programación del microcontrolador PSOC y la integración del sensor RTD, se logra una medición precisa y confiable de la temperatura en el calorímetro didáctico.

La disponibilidad de dispositivos de pruebas dentro de las instituciones educativas fomenta un enfoque práctico en la enseñanza de conceptos científicos y técnicos. Los estudiantes tienen la oportunidad de experimentar y observar directamente los fenómenos relacionados con la medición de temperatura, lo cual fortalece su comprensión teórica y promueve el desarrollo de habilidades prácticas.

Además, la programación de sistemas electrónicos y la integración de sensores en dispositivos didácticos proporciona a los estudiantes una experiencia de aprendizaje enriquecedora y aplicable a situaciones reales. Les permite enfrentarse a desafíos tecnológicos y desarrollar habilidades de resolución de problemas, trabajo en equipo y pensamiento crítico.

En resumen, la programación de un sistema de medición de temperatura utilizando un sensor resistivo (RTD) y un microcontrolador PSOC aplicado a un calorímetro didáctico destaca la importancia de generar dispositivos de pruebas dentro de las instituciones educativas. Su incorporación en el currículo educativo contribuye a formar estudiantes con un enfoque científico y tecnológico sólido, preparados para enfrentar los desafíos del mundo actual.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al Tecnológico Nacional de México (TecNM); Instituto Tecnológico Superior de Lerdo y el Instituto Tecnológico de la Laguna por las facilidades brindadas para la realización del presente trabajo.

Así mismo a las divisiones a las cuales los autores se encuentran adscritos por brindar el tiempo y el equipo usado en la realización del prototipo, así como en su aplicación.

VI. REFERENCIAS

- Alvarado Fernández, D. A. (2019). *Diseño e Implementación de una Tarjeta Electrónica de Expansión Modular Basado en PSOC para el Desarrollo de Aplicaciones de Sistemas Embebidos*. Universidad Privada de Tacna.
- Areny, R. (2004). *Sensores y acondicionadores de señal*. México : Marcombo.
- Ashby, R. (2005). *Designer's guide to the Cypress PSOC*. Newnes.
- Boylestad, R. (2009). *Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. México: Pearson Educación.
- Crispi, A. (2007). Sistemas Programables en un Chip (PSoC) y sus potencialidades para la instrumentación. *Revista Clepsidra* 3.4, 13-20.
- García, V. (2007). Construcción de un Calorímetro para la Determinación de Entalpías de Inmersión. *Información tecnológica*, 59-70.
- Giraldo, L. (1994). Construcción de un calorímetro isoperibólico de inmersión de precisión. *Revista Colombiana de Química* 23.1, 1-14.
- Kitagawa, A. (2021). A Study of Programmable System on Chip (PSoC). *Journal of Physics: Conference Serie*, 1899(1).
- Martínez, L. R. (2006). Calorimetría y análisis térmico. *Laboratorio de Termofísica* 1, 111.
- Pérez, M. (2014). *Instrumentación Electrónica*. España: Paraninfo.

Control no lineal basado en lógica difusa de un convertidor multinivel de capacitor flotante para aplicaciones de energía solar fotovoltaica

Vidaña-Aldaba, K.G.¹; Lara-Cardoso, J.²; Hernández-Flores, C.¹; Arjona-López, M. A.¹

Datos de Adscripción:

¹ División de Estudios de Posgrado e Investigación, TNM Instituto Tecnológico de La Laguna, Blvd. Revolución y Av. Instituto Tecnológico de La Laguna, C.P. 27000, Torreón, Coahuila, México.

² Tecnológico Nacional de México Campus Lerdo, Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Av. Tecnológico No. 1555 Sur, Periférico Gómez - Lerdo Km. 14.5, C.P. 35150, Lerdo, Durango, México.

Resumen - Este artículo propone una estrategia no lineal basada en lógica difusa para el control de un convertidor trifásico multinivel de capacitores flotantes (C3MCF) para aplicaciones de energía fotovoltaica. Este C3MCF no sólo permite realizar la sincronización con la red eléctrica, sino que también se comporta como un filtro activo para compensar los armónicos generados por la carga no lineal conectada al sistema. Los dos lazos internos de corriente y el lazo externo de voltaje del bus de CD (corriente directa) involucrados se regulan en el marco de referencia rotatorio dq . A fin de conmutar los doce interruptores de potencia que componen la topología estudiada de tres niveles de capacitores flotantes (3N-CF) una técnica MAP (modulación del ancho del pulso) multiportadora es aplicada. La validación de la estrategia de control y del sistema completo de electrónica de potencia ha sido llevado a cabo mediante simulaciones en Matlab-SimPowerSystems. Los resultados obtenidos demuestran que el controlador de lógica difusa propuesto permite alcanzar un desempeño superior para integrar la energía fotovoltaica generada a la red eléctrica. Además, ésta representa una técnica prometedora ya que logra una muy baja distorsión armónica de la corriente de la red, una nula potencia reactiva y una respuesta con gran dinámica.

Palabras Clave - Capacitor Flotante, Control No Lineal, Convertidor Multinivel, Energía Fotovoltaica, Lógica Difusa.

Abstract - This paper proposes a nonlinear strategy based on fuzzy logic for controlling a three-phase flying capacitor multilevel converter (3PFCC) for photovoltaic energy applications. This 3PFCC not only allows to perform the synchronization with the grid, but also behaves as an active filter to compensate the harmonics generated by the nonlinear load connected to the system. The involved two inner current loops and the DC (direct current) bus voltage outer loop are regulated in the dq rotating reference frame. In order to commutate the twelve power switches that compose the studied three-level flying capacitor (3L-FC) topology, a multicarrier PWM (pulse width modulation) technique is applied. The validation of the control strategy and the full power electronics system has been carried out by means of simulations in Matlab-SimPowerSystems. The obtained results demonstrate that the proposed fuzzy logic controller allows achieving a superior performance for integrating the generated photovoltaic energy into the grid.

Furthermore, this represents a promising technique since it achieves a very low harmonic distortion of the grid current, a zero reactive power and a response with high-dynamics.

Keywords - Flying Capacitor, Fuzzy Logic, Multilevel Converter, Nonlinear Control, Photovoltaic Energy.

I. INTRODUCCIÓN

Los convertidores multinivel han despertado un enorme interés en aplicaciones de energía renovable debido al requerimiento de integrar a la red la energía generada y a la necesidad de compensar los efectos negativos de las cargas no lineales alimentadas. Algunas de las ventajas de estos convertidores son: una forma de onda de salida con menos distorsión, estados de conmutación redundantes, un voltaje en modo común más pequeño, un menor índice de distorsión en la corriente, entre otros (Bana et al., 2019). Existen tres principales topologías de convertidores multinivel: de diodos enclavados, de puente H en cascada y de capacitores flotantes (Swamy & Venkatesan, 2019).

El convertidor trifásico multinivel de capacitores flotantes (C3MCF) representa una topología óptima para llevar a cabo tareas de sincronización con la red y de filtrado activo (Tuyen & Fujita, 2015). El lazo externo de control del C3MCF regula el voltaje del bus de CD. Para llevar a cabo esta regulación se han propuesto distintos controladores, i.e., clásicos, adaptativos y suaves. Estos últimos presentan un control de lógica difusa tipo PD (proporcional-derivativo) con acción integral que regula el bus de CD con una gran dinámica y cero error incluso ante perturbaciones repentinas (Jantzen, 1998). Por otro lado, el control no lineal de la corriente trifásica, también se puede realizar en el marco de referencia síncrono, rotatorio o dq . Esta técnica tiene la ventaja de una respuesta más rápida que los métodos basados en el dominio de la frecuencia (Rahmani et al., 2010).

Mendalek et al. (2003) propusieron una técnica de control no lineal para un filtro activo paralelo (shunt). Posteriormente, Rahmani et al. (2010) en base a las funciones de transferencia del modelo demostraron experimentalmente su funcionamiento, obteniendo resultados de gran desempeño. Por otro lado, Kumar et al. (2022), desarrollaron un filtro activo shunt basado en un algoritmo de optimización de enjambre de partículas. P. S. Kumar y Mahajan (2009) presentaron un trabajo de simulación de técnicas de control suave, de lógica difusa, de redes neuronales y de algoritmos genéticos para regular el voltaje del bus de CD, mientras que Tan et al. (2018) utilizaron para este mismo propósito una técnica de redes neuronales difusas, probabilísticas y recurrentes con funciones de membresía asimétricas. Chavan et al. (2018) y Ahmed et al. (2018) propusieron un algoritmo de lógica difusa en el marco de referencia dq para regular el voltaje del bus de CD, y además filtrar los armónicos de baja frecuencia en la corriente de la red.

En el presente artículo se desarrolla el control de un convertidor multinivel de capacitores flotantes (C3MCF) y se propone llevar a cabo tanto el control de voltaje del bus de CD como el filtrado de los armónicos de corriente mediante una técnica de lógica difusa, con la finalidad de utilizarse en aplicaciones fotovoltaicas e integrar la energía generada a la red eléctrica. La principal contribución de este trabajo es el control propuesto que permite obtener resultados muy satisfactorios al reducir la distorsión armónica total de la corriente de la red a valores mínimos.

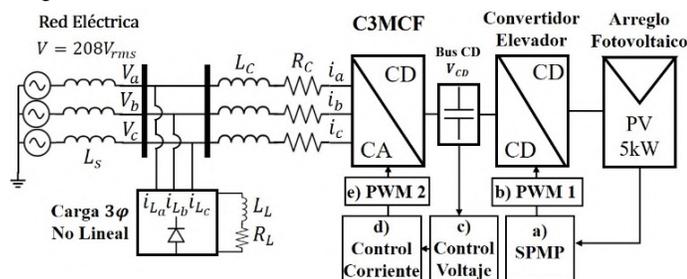
Este artículo se organiza de la siguiente manera: en la sección II, se describe cada uno de los componentes del sistema de conversión de energía fotovoltaica estudiado, así como las técnicas control propuestas para el seguimiento del punto de máxima potencia, la regulación del voltaje del bus y la compensación de los armónicos de corriente. Posteriormente, en la sección III, se muestran los resultados obtenidos en Matlab-SimPowerSystems. Finalmente, la sección IV presenta las conclusiones.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

El modelo de simulación implementado en Matlab-SimPowerSystems es un sistema fotovoltaico interconectado a una red eléctrica trifásica de 208 V_{rms} a través del C3MCF, como se muestra en la Figura 1. Este modelo se compone de lo siguiente: arreglo fotovoltaico de 5 kW, convertidor elevador CD-CD, C3MCF y red eléctrica, así como del algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (SPMP), el control de voltaje, el control de corriente y la técnica de modulación PWM.

Figura 1

Diagrama del sistema fotovoltaico interconectado a la red eléctrica.



A. Arreglo Fotovoltaico

El modelo del panel fotovoltaico utilizado en el sistema es el SUNTECH STP240-20. El arreglo fotovoltaico simulado consiste de 11 de estos módulos conectados en serie y dos filas paralelas, de manera que la máxima potencia P_{MPP} que puede generar es de 5,282W.

La Tabla 1 presenta las principales características de este módulo base en condiciones estándar de prueba (STC - *standard test conditions*).

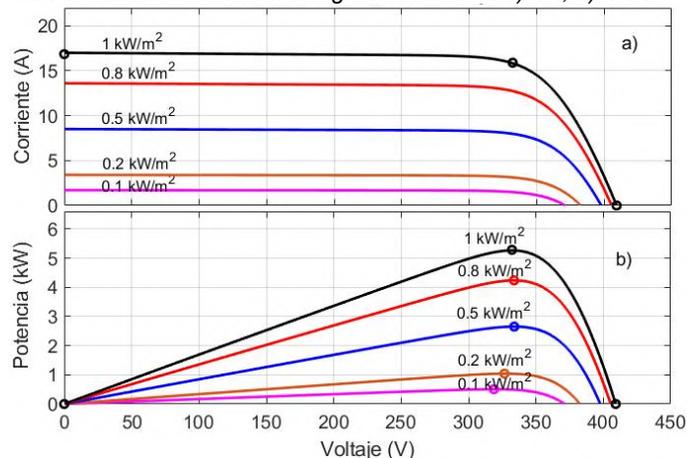
Tabla 1

Características de panel fotovoltaico SUNTECH STP240-20.

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
P_{MP}	Máxima potencia	240.09	W
V_{OC}	Voltaje de circuito abierto	37.2	V
V_{MP}	Voltaje en el punto de máxima potencia	30.2	
I_{SC}	Corriente de corto circuito	8.43	A
I_{MP}	Corriente en el punto de máxima potencia	7.95	

Figura 2

Curvas características del arreglo fotovoltaico: a) V-I, b) V-P.



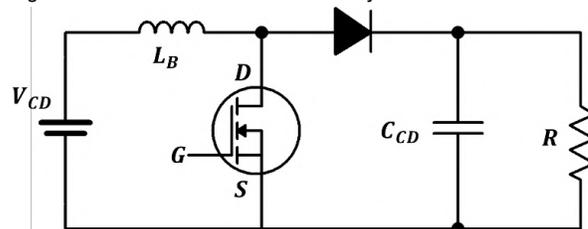
En la Figura 2, se muestran las curvas características V-I y V-P del arreglo fotovoltaico estudiado de aproximadamente 5kW, bajo condiciones de temperatura constante ($T = 25^{\circ}C$) e irradiancia solar variante ($E = \{100\ 200\ 500\ 800\ 1000\} W/m^2$). Estas curvas son de gran utilidad para poder aplicar el algoritmo SPMP.

B. Convertidor Elevador

El convertidor elevador (Boost) que se muestra en la Figura 3, transforma el voltaje de la fuente de CD de entrada en un voltaje de CD mayor a la salida. El principio de operación del convertidor elevador se basa en los dos estados del interruptor de potencia:

Figura 3

Topología del convertidor elevador de voltaje.



- Cuando el interruptor se cierra, el inductor L_B almacena energía proveniente de la fuente de CD, mientras que el capacitor C_{CD} , alimenta la carga R .
- Cuando el interruptor se abre, la corriente del inductor fluye a través del diodo y carga el capacitor C_{CD} . Para fines prácticos y de simulación, se asume que el capacitor C_{CD} es lo suficientemente grande que asegura un voltaje de salida constante.

El voltaje de salida V_o depende del ciclo de trabajo D (duty cycle) de la señal PWM que se envíe a la compuerta G del transistor MOSFET (*metal-oxide-semiconductor field-effect transistor* - transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor). El voltaje V_o está dado por:

$$V_o = \frac{1}{1 - D} V_i \quad (1)$$

donde V_i es el voltaje de entrada. De acuerdo con (1), dado que D varía de 0 a 1, V_o siempre es igual o mayor que V_i .

C. Algoritmo de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia Basado en Lógica Difusa

En este trabajo, el controlador de lógica difusa se ha diseñado para seguir con alta precisión el punto de máxima potencia del sistema fotovoltaico de 5kW. Las entradas propuestas para este controlador son el error E y la diferencia de error ΔE:

$$E(n) = \frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{P(n) - P(n-1)}{V(n) - V(n-1)} \quad (3)$$

$$\Delta E(n) = \frac{\Delta P}{\Delta V} = E(n) - E(n-1) \quad (4)$$

donde P y V son la potencia y el voltaje del arreglo fotovoltaico, respectivamente. La salida del controlador es por conocimiento del sistema, el cambio ΔD en el ciclo de trabajo del convertidor elevador, el cual se suma a un valor de ciclo de trabajo inicial.

La Figura 4 muestra las funciones membresía correspondientes a las entradas E y ΔE, así como a la salida ΔD. Para las entradas se utilizaron únicamente tres niveles difusos: Negativo (N), Cero (ZE) y Positivo (P). Mientras que, para la salida se utilizaron 9 niveles difusos: Negativo Grande (NB), Negativo Mediano (NM), Negativo Pequeño (NS), Negativo (N), Cero (ZE), Positivo (P), Positivo Pequeño (PS), Positivo Mediano (PM) y Positivo Grande (PB).

En la Tabla 2, se muestra el conjunto de reglas necesarias para realizar el control.

Figura 4
Funciones membresía. a) Error E. b) Cambio en el Error ΔE. c) Cambio en el ciclo de trabajo ΔD.

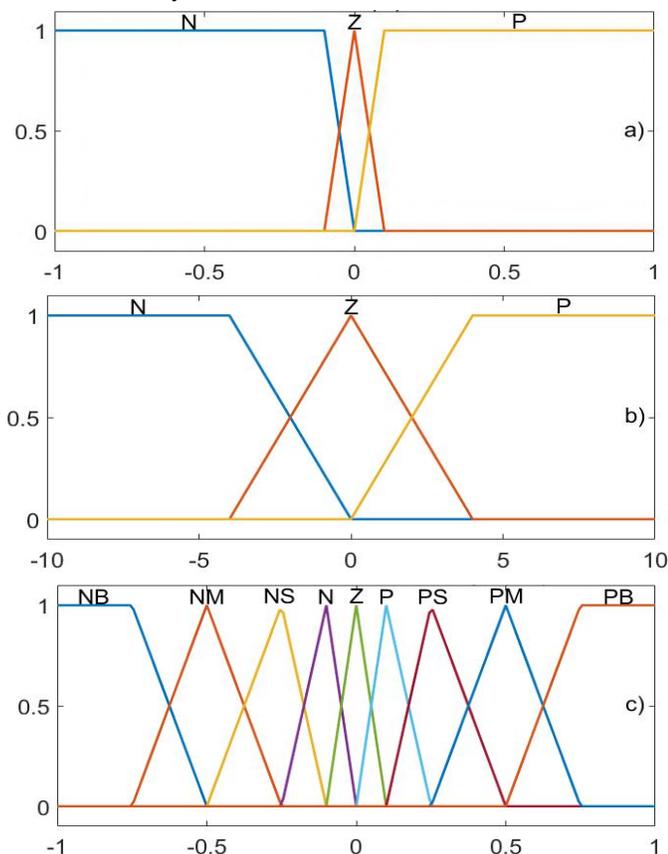


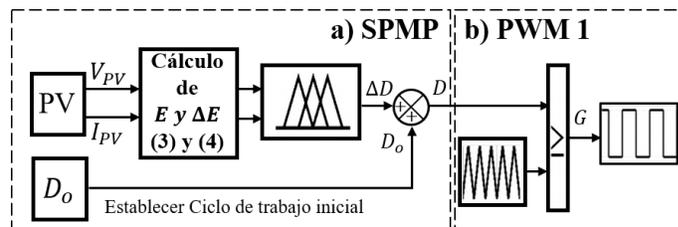
Tabla 2

Conjunto de reglas difusas del algoritmo SPMP basado en lógica difusa.

E	ΔE		
	N	Z	P
N	PB	PM	PS
Z	P	Z	N
P	NS	NM	NB

La Figura 5 muestra el diagrama a bloques de la técnica propuesta para llevar a cabo el seguimiento del punto de máxima potencia. Primero, se mide el voltaje y la corriente del panel fotovoltaico, después se calculan (3) y (4), y finalmente se aplica el algoritmo de lógica difusa. Este algoritmo consiste en establecer un ciclo de trabajo inicial D₀, en este caso igual a 0.5, y a partir de este valor, el controlador de lógica difusa decide el incremento o decremento del ciclo de trabajo, para así extraer la máxima potencia del arreglo (Vidaña et al. 2022). También se observa el bloque de la modulación PWM encargada de enviar la señal de apertura y cierre a la compuerta del MOSFET mostrado en la Figura 3.

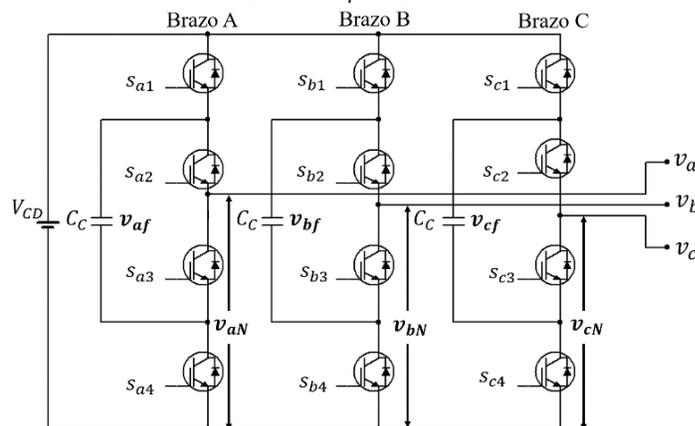
Figura 5
Diagrama de bloques del algoritmo SPMP y su modulación PWM.



D. Convertidor Trifásico Multinivel de Capacitores Flotantes

La Figura 6 muestra el C3MCF estudiado. Su topología se denomina de capacitores flotantes debido a que sus terminales no se conectan directamente con la fuente de voltaje del bus, sino a través de los interruptores. La principal característica de esta configuración es su redundancia para generar determinados niveles, teniendo así una alta flexibilidad para mantener la carga en los capacitores (Ramírez et al., 2018). Este C3MCF consiste de 3 brazos con 4 interruptores cada uno, i.e., dos interruptores en la parte superior (s_{x1}, s_{x2}) y dos en la parte inferior (s_{x3}, s_{x4}),

Figura 6
Convertidor trifásico multinivel de capacitores flotantes.



donde el subíndice x representa una de las tres fases, i.e., a, b o c. Es importante notar que los pares de interruptores s_{x1} y s_{x4} son complementarios, al igual que lo son s_{x2} y s_{x3} . Idealmente, en este convertidor, los capacitores flotantes mantienen un voltaje de la mitad del voltaje del bus de CD, i.e., $v_{af} = v_{bf} = v_{cf} = V_{CD}/2$.

En la Tabla 3, se muestran los estados de conmutación y los voltajes de salida de cada uno de los 3 brazos del C3MCF.

Tabla 3

Estados de conmutación y voltaje de salida del C3MCF.

Vector de Conmutación	Señales de Conmutación				Voltaje de Salida
	s_{x1}	s_{x2}	s_{x3}	s_{x4}	
[V3]	1	1	0	0	V_{CD}
[V2]	1	0	1	0	$V_{CD} - v_{xf}$
[V1]	0	1	0	1	v_{xf}
[V0]	0	0	1	1	0

En el marco de referencia abc , el voltaje de salida del C3MCF en términos del voltaje del bus V_{CD} , los voltajes de los capacitores flotantes V_{xf} y de los estados de conmutación s_x se expresa como:

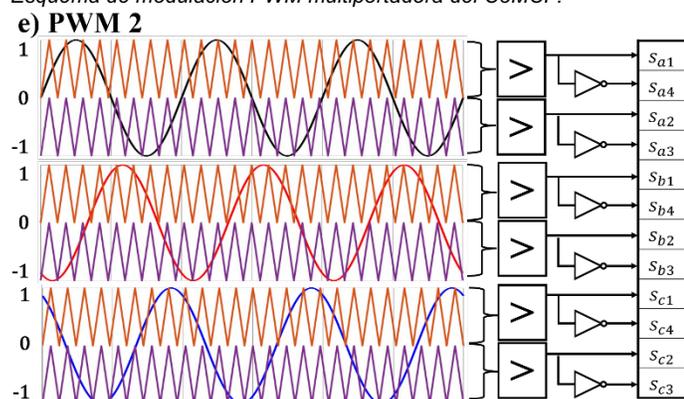
$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = V_{CD} \begin{bmatrix} s_{a1} \\ s_{b1} \\ s_{c1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{af} & 0 & 0 \\ 0 & v_{bf} & 0 \\ 0 & 0 & v_{cf} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{a1} - s_{a2} \\ s_{b1} - s_{b2} \\ s_{c1} - s_{c2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Los cuatro vectores de conmutación de cada fase dan origen a 64 posibles combinaciones para los estados de conmutación del C3MCF (Yaramasu & Wu, 2017).

En la Figura 7, se muestra el esquema de la modulación PWM multiportadora utilizada en el C3MCF, la cual está incluida en el bloque "e" de la Figura 1. Nótese que el par de interruptores inferiores de cada brazo es complementario a su respectivo par de interruptores superiores.

Figura 7

Esquema de modulación PWM multiportadora del C3MCF.

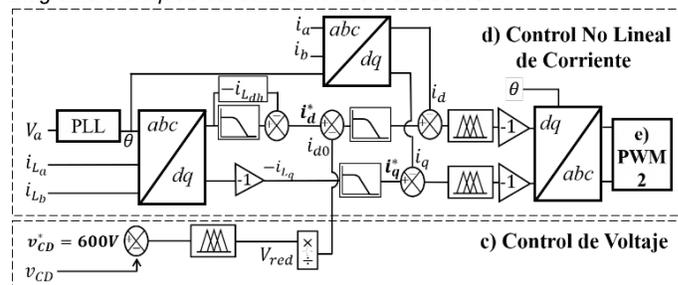


E. Filtrado Activo y Control No Lineal del C3MCF

La Figura 8 muestra la estructura propuesta del control no lineal en lazo cerrado del C3MCF. Obsérvese las variables involucradas en la regulación tanto de voltaje como de corriente, así como en el filtrado activo de los armónicos de la corriente de la red. Estos bloques de control c), d) y e) también se observan en el diagrama general de la Figura 1.

Figura 8

Diagrama a bloques del control no lineal del C3MCF.



A continuación, se describe su funcionamiento. Primero, se regula el voltaje del bus de CD a 600V mediante uno de los controladores propuestos de lógica difusa. Después se identifica el ángulo θ de la red mediante un PLL (*phase locked loop* - lazo enganchado en fase). Obsérvese que las transformadas de Park (abc - dq - abc) se calculan con esta fase y con dos de las 3 señales del sistema trifásico, el cual se asume equilibrado o balanceado. A la corriente i_d resultante se le aplica un filtro pasa bajas para poder identificar la componente fundamental de la corriente, y posteriormente poder excluirla para así obtener la referencia i_d^* del controlador difuso conteniendo únicamente la corriente de distorsión que se desea filtrar. Finalmente, las salidas obtenidas se envían a los controladores difusos de corriente propuestos, obteniendo las referencias de voltaje del convertidor y generando las 12 señales PWM conforme a la modulación mostrada en la Figura 7.

F. Controlador Difuso para la Regulación del Bus de Voltaje

La Figura 9 ilustra el lazo de control externo implementado para regular el voltaje del bus de CD, donde G_e , G_{Ce} , G_{Ie} y G_u son las ganancias del error, del cambio en el error, de la integral del error y de la salida, respectivamente. Para este propósito se aplica un controlador de lógica difusa normalizado, el cual se caracteriza por lograr un buen desempeño. Para eliminar el error de la señal de referencia, este controlador debe considerar los siguientes aspectos importantes:

- I. Que el universo de las entradas sea lo suficientemente grande para mantenerse dentro de los límites y así no saturar la entrada.
- II. Que las funciones de salida sean triangulares y simétricas en sus picos.
- III. Que las reglas, al utilizar el método "and", aseguren la integridad, i.e., lo entero, de todos los términos.

De esta manera, la superficie de control es un plano diagonal, generando una función de transferencia a la cual simplemente se

Figura 9

Lazo de control del voltaje del bus de CD con lógica difusa.

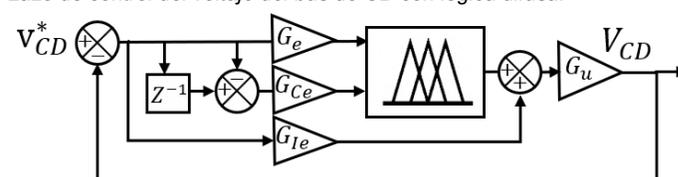
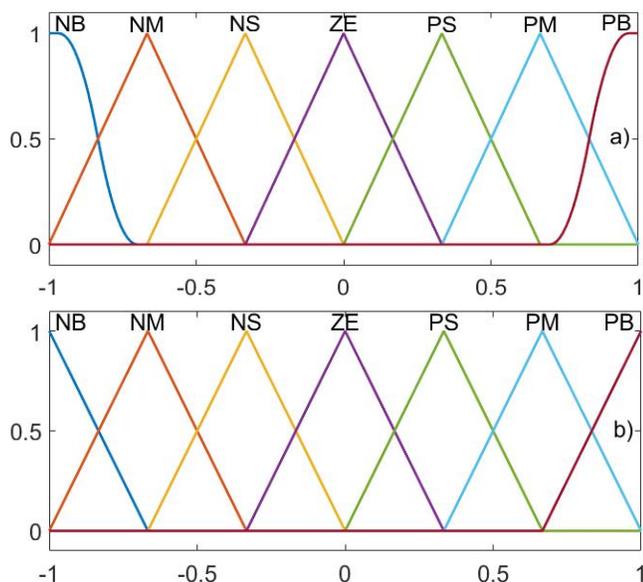


Figura 10

Funciones de membresía del controlador de voltaje/corriente del C3MCF basado en lógica difusa (Figuras 8, 9 y 11). a) Error (E) y Cambio en el error (CE), b) Salida del controlador (U).



le ajustan las ganancias como a un controlador clásico, asegurando así la estabilidad en el lazo cerrado de control.

En la Figura 10, se muestran las funciones de membresía (FM) de las entradas y de la salida del controlador difuso propuesto. Estas FM son simétricas y están normalizadas en un rango de [-1 1]. Las FM de las entradas cuentan con funciones tipo Forma-Z y Forma-S en sus extremos para así abarcar todo el universo de las entradas.

La Tabla 4 ilustra el conjunto de reglas difusas del controlador propuesto.

Tabla 4

Conjunto de reglas del controlador propuesto basado en lógica difusa.

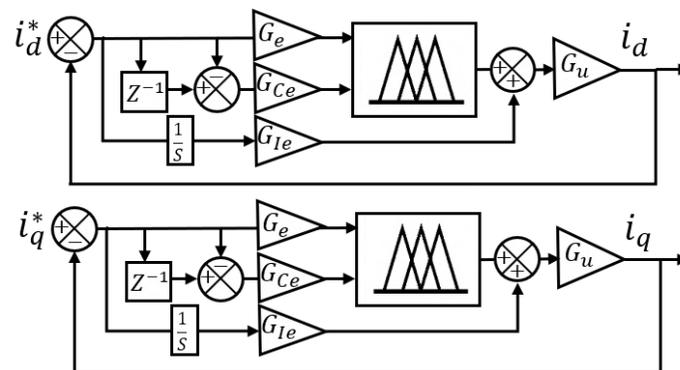
E	CE						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

G. Controladores Difusos para la Regulación de Corriente y la Compensación de Armónicos de la Red

La Figura 11 ilustra el diagrama a bloques del control de la corriente en el marco de referencia dq. El lazo interno de control se encarga de filtrar la corriente armónica generada por la carga no lineal. Para realizar la compensación se utiliza un controlador de lógica difusa con acción integral. El procedimiento para obtener las referencias de corriente i_d^* e i_q^* se detalló anteriormente en la subsección II.E, haciendo referencia al diagrama de la Figura 8. Puesto que en la señal de entrada del controlador se encuentran las componentes armónicas, el propósito del controlador es lograr que el error sea a igual a cero, obteniendo así una corriente senoidal libre de distorsión.

Figura 11

Lazo de control de corrientes i_d e i_q con lógica difusa.



Es importante remarcar que las funciones de membresía utilizadas son las mismas de la Figura 10 junto con las mismas reglas difusas de la Tabla 4, pero con diferentes ganancias G_e , G_{Ce} , G_{Ie} y G_u de acuerdo a la Tabla 5.

Tabla 5

Ganancias de los controladores difusos de voltaje y corriente.

Símbolo	Descripción	Ganancias del Controlador	
		Voltaje	Corriente
G_e	Error	1×10^{-2}	1×10^{-3}
G_{Ce}	Cambio en el error	1×10^{-3}	1×10^{-5}
G_{Ie}	Integral del error	1	1×10^2
G_u	Salida del controlador	2×10^4	5×10^6

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados de simulación obtenidos en Matlab-SimPowerSystems.

La Tabla 6 muestra los parámetros del modelo simulado, el cual se ilustró previamente en la Figura 1.

Durante los 5 segundos de simulación suceden eventos importantes. En $t = 0.5s$, comienza el filtrado activo de armónicos, mientras que en $t = 1s$ inicia la transferencia hacia la carga y la red de la energía proveniente del arreglo fotovoltaico, y finalmente en $t = 4s$, ésta termina.

La Tabla 7 describe el perfil trapezoidal utilizado en la variación de irradiancia solar.

La Figura 12 muestra las potencias activa P, reactiva Q y aparente S del sistema. Obsérvese como es mucho mejor el desempeño del algoritmo SPMP de lógica difusa (LD) propuesto

Tabla 6

Parámetros del modelo de simulación.

Símbolo	Descripción	Valor	Unidad
C_{CD}	Capacitor del bus de CD	4	
C_B	Capacitor de entrada del Boost	0.0001	mF
C_C	Capacitores flotantes del convertidor	4	
L_B	Inductor del Boost	100	
L_C	Inductores de acoplamiento	4	
L_S	Inductor de la red eléctrica	0.1	mH
L_L	Inductor de la carga RL	10	
R_L	Resistor de la carga RL	40	Ω
V_{RED}	Voltaje de la red eléctrica	208	V_{rms}
f_B	Frecuencia de conmutación del Boost	5	kHz
f_C	Frecuencia de conmutación del C3MCF	10	

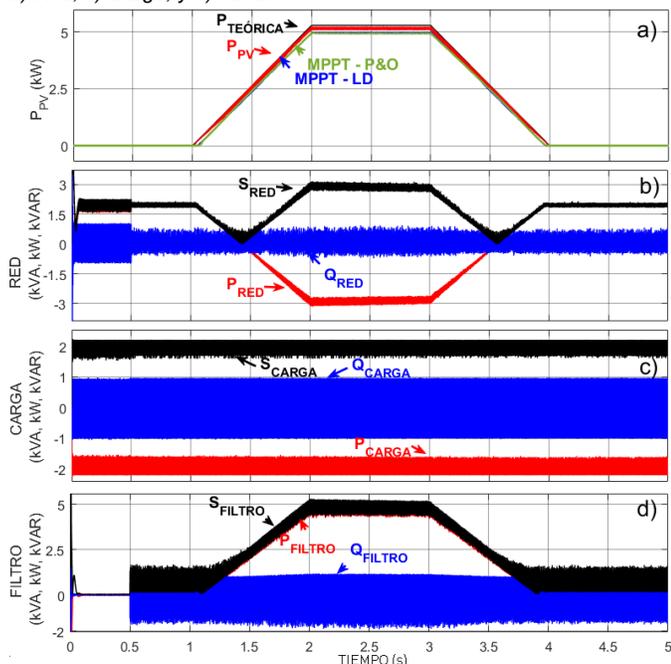
Tabla 7

Variación de irradiancia solar del arreglo fotovoltaico de 5kW.

Tiempo (s)	0	1	2	3	4	5
Irradiancia Solar (W/m^2)	0	0	1000	1000	0	0

Figura 12

Potencias aparente, activa y reactiva del sistema: a) Arreglo fotovoltaico, b) Red, c) Carga, y d) Filtro.



en comparación con el clásico de perturbación y observación (P&O), logrando siempre extraer una mayor potencia del arreglo fotovoltaico durante la variación de irradiancia.

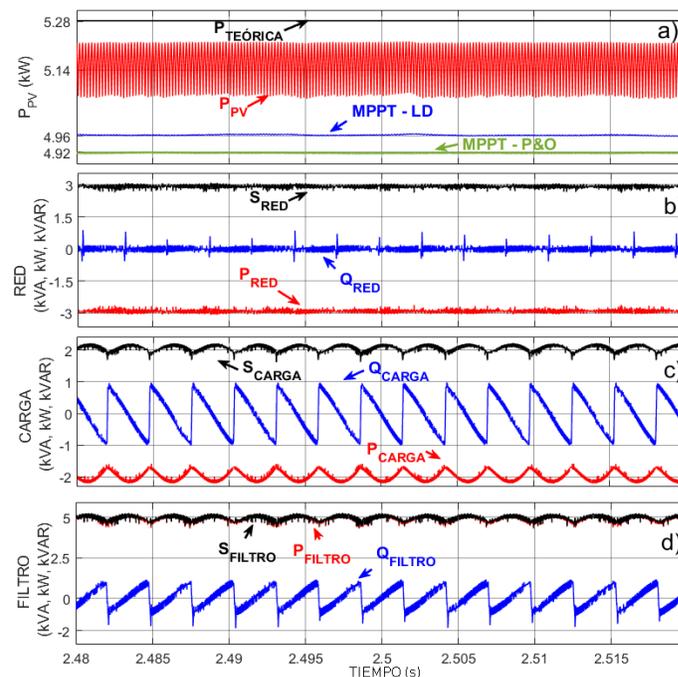
Obsérvese que entre $t = 1s$ y $t = 4s$, el controlador LD sigue con una mejor precisión el punto de máxima potencia. De los resultados b), c) y d) de la Figura 12, se deduce lo siguiente:

- Entre $t = 0s$ y $t = 1s$, las potencias activas, reactivas y aparentes de la red y la carga son iguales pues el arreglo fotovoltaico aún no produce energía. Posteriormente, de $t = 1s$ a $t = 1.5s$, la irradiancia solar comienza a aumentar por lo que el arreglo fotovoltaico empieza a producir energía, y así la potencia activa de la red disminuye, hasta llegar incluso a un valor negativo, lo que significa que el arreglo fotovoltaico ya produce más energía de la requiere la carga, y el exceso se está enviando hacia la red eléctrica.
- En todo momento, desde $t = 0s$ hasta $t = 5s$, las potencias aparente, activa y reactiva de la carga se mantienen constantes, pues siempre consumen la potencia requerida sin importar de que sistema provenga.
- El algoritmo de filtrado activo se habilita a partir de $t = 0.5s$. Por lo tanto, obsérvese como la potencia reactiva de la red se reduce a cero, pues la potencia reactiva que consume la carga ahora la provee el filtro a través del C3MCF.

La Figura 13 muestra las mismas señales de la Figura 12, pero con un acercamiento alrededor del instante $t = 2.5s$, cuando la

Figura 13

Acercamiento en $t = 2.5s$ de las potencias de la Figura 12 para una irradiancia solar de $1 kW/m^2$: a) Arreglo fotovoltaico, b) Red, c) Carga, d) Filtro.



irradiancia solar es máxima al igual que lo es la potencia producida por el arreglo fotovoltaico. Nótese que la potencia teórica es de 5,280W y la potencia promedio P_{PV} generada por el arreglo fotovoltaico es de 5,145W. Mientras que las potencias P_{LD} y P_{PO} extraídas con los algoritmos LD y P&O son de 4,960W y 4,920W, respectivamente.

La Tabla 8 muestra la eficiencia alcanzada por ambos algoritmos SPMP bajo la máxima irradiancia solar de $1 kW/m^2$.

Tabla 8

Porcentaje de eficiencia de los algoritmos SPMP.

Lógica Difusa (LD)	Perturbación y Observación (P&O)
96.40%	95.62%

En la Figura 14, se muestran los resultados del control del voltaje del bus de CD y de la compensación de la corriente de la red, así como las corrientes de la carga y del filtro, antes y después de la activación del algoritmo de filtrado activo, la cual ocurre en el instante $t = 0.5s$.

Obsérvese que el voltaje del bus de CD antes de iniciar el filtrado se encuentra exactamente traslapado con el valor de referencia de 600V, por lo que tiene un error de cero. Justo después de que se habilita el filtro activo, el voltaje del bus oscila alrededor de la referencia con un error de tan solo $\pm 0.05V$. Además, el voltaje trifásico de la red es correctamente el de un sistema balanceado. Antes de que comience el filtrado activo, la corriente de la red tiene la misma forma que la corriente de la carga no lineal, pues aún no se comienza a compensar la distorsión que ésta genera. Inmediatamente después de su activación, las corrientes trifásicas se vuelven senoidales. Nótese también como los voltajes y las corrientes de la red están

Figura 14

Voltajes y corrientes antes y después de la activación del filtro activo: a) Voltaje del bus de CD, b) Voltaje de la red, c) Corriente de la red, d) Corriente de la carga no lineal, y e) Corriente del filtro activo.

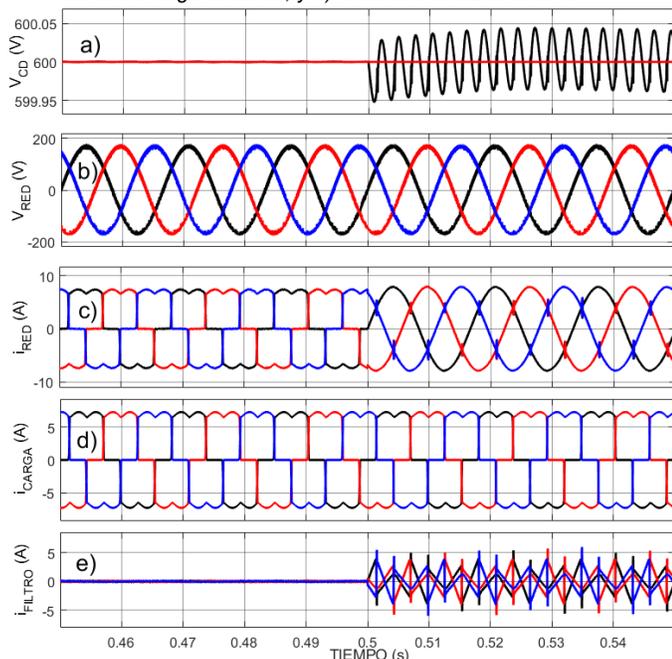
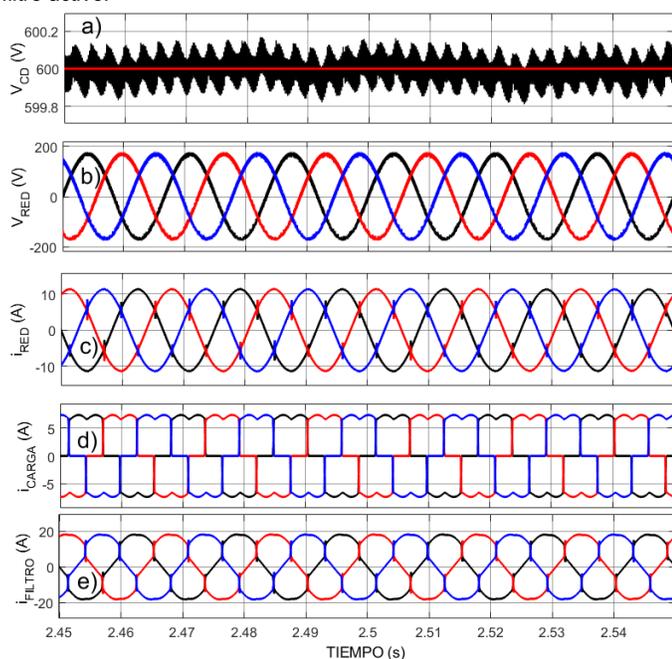


Figura 15

Voltajes y corrientes en el instante $t = 2.5s$ bajo la irradiancia solar máxima de 1 kW/m^2 : a) Voltaje del bus de CD, b) Voltaje de la red, c) Corriente de la red, d) Corriente de la carga no lineal, y e) Corriente del filtro activo.

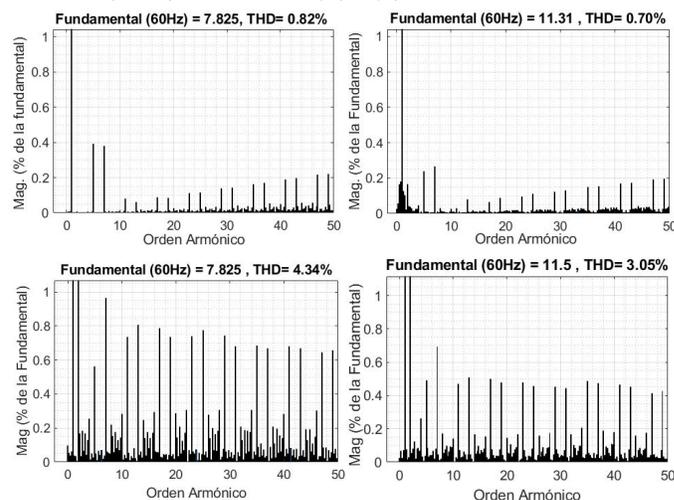


perfectamente en fase.

En la Figura 15, se muestran las mismas señales de la Figura 14, pero con un acercamiento en $t = 2.5s$. Es posible observar que en la regulación del voltaje del bus de CD hay un error de

Figura 16

Espectros armónicos de i_{RED} en (izquierda) $t = 0.5s$ (derecha) $t = 2.5s$ utilizando: (arriba) Control difuso y (abajo) Control PI.



$\pm 0.2V$, mientras que ahora la corriente de la red se encuentra desfasada 180° con respecto al voltaje de la red, debido a que en este momento el arreglo fotovoltaico está transfiriendo parte de su energía generada hacia la red eléctrica.

En la Figura 16 se muestran los resultados obtenidos del análisis espectral armónico de la corriente de la red en $t = 0.5s$ y $t = 2.5s$, tanto con el control no lineal propuesto basado en lógica difusa como con el control clásico PI (proporcional-integral). Observe que el análisis en frecuencia se realiza hasta el armónico 50vo, i.e., 3kHz. Es importante resaltar como el controlador de lógica difusa es capaz de reducir la THD (*total harmonic distortion* - distorsión armónica total) incluso por debajo de 1%. Aun cuando ambos controladores cumplen satisfactoriamente con el estándar *IEEE 519* al lograr una distorsión inferior al 5%, el desempeño del controlador propuesto es claramente muy superior al del controlador clásico.

IV. CONCLUSIONES

Este artículo presentó el control no lineal basado en lógica difusa de un convertidor trifásico multinivel de capacitor flotante para aplicaciones fotovoltaicas. El sistema propuesto además de ser capaz de integrar a la red eléctrica la energía producida por el arreglo fotovoltaico también funciona como filtro activo para compensar los armónicos de la corriente de la red.

Los resultados obtenidos en Matlab-SimPowerSystems demuestran que el control no lineal de lógica difusa propuesto tiene un mejor desempeño que el control clásico PI, ya que fue capaz de reducir el THD por debajo de 1%. Además, el algoritmo de seguimiento LD también tuvo un desempeño superior al de la técnica clásica P&O, pues logró extraer una mayor potencia durante la variación de irradiancia solar, alcanzando notablemente una eficiencia superior al 96%.

Los controladores propuestos de lógica difusa tienen un gran potencial en las aplicaciones de energía fotovoltaica pues permiten extraer más potencia de los arreglos, tienen una alta dinámica ante variaciones de irradiancia y temperatura, y mejoran considerablemente la calidad de la energía de la red, logrando corrientes con una muy baja distorsión.

V. AGRADECIMIENTOS

K. G. Vidaña-Aldaba agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico otorgado en el marco del "Programa de Becas Nacionales para Estudios de Posgrado" con número de solicitud 2022-000002-01NACF-00971.

Los autores también agradecen al TecNM, al Instituto Tecnológico de La Laguna y al Instituto Tecnológico Superior de Lerdo por el apoyo económico recibido para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

VI. REFERENCIAS

- Ahmed, K. A. N., Reddy, K. C. O., & Bhakre, P. (2018). *Fuzzy Based Active Filter For Power Quality Mitigation*. IEEE International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCA), 1-6. <https://doi.org/10.1109/icscan.2018.8541247>
- Bana, P. R., Panda, K. P., Naayagi, R. T., Siano, P., & Panda, G. (2019). Recently Developed Reduced Switch Multilevel Inverter for Renewable Energy Integration and Drives Application: Topologies, Comprehensive Analysis and Comparative Evaluation. *IEEE Access*, 7, 54888-54909. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2913447>.
- Chavan, U. M., Thorat, A. R., & Bhosale, S. S. (2018). *Shunt Active Filter for Harmonic Compensation Using Fuzzy Logic Technique*. International Conference on Current Trends towards Converging Technologies (ICCTC), 1-6 <https://doi.org/10.1109/icctc.2018.8550962>.
- Jantzen, J. (1998). *Tuning of fuzzy PID controllers*. Technical University of Denmark.
- Kumar, P. S., & Mahajan, A. V. (2009). Soft Computing Techniques for the Control of an Active Power Filter. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(1), 452-461. <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2008.2005881>.
- Kumar, R., Bansal, H. O., Gautam, A. R., Mahela, O. P., & Khan, B. (2022). Experimental Investigations on Particle Swarm Optimization Based Control Algorithm for Shunt Active Power Filter to Enhance Electric Power Quality. *IEEE Access*, 10, 54878-54890. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3176732>.
- Mendalek, N., Al-Haddad, K., Fnaiech, F., & Dessaint, L. (2003). Nonlinear control technique to enhance dynamic performance of a shunt active power filter. *IEE proceedings*, 150(4), 373. <https://doi.org/10.1049/ip-epa:20030488>.
- Rahmani, S., Mendalek, N., & Al-Haddad, K. (2010). Experimental Design of a Nonlinear Control Technique for Three-Phase Shunt Active Power Filter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(10), 3364-3375. <https://doi.org/10.1109/tie.2009.2038945>.
- Ramirez, F., Tapia, H. J. C. L., & Vazquez, N. (2018). Estrategia de Control para Inversor Multinivel con Capacitores Flotantes. *Pistas Educativas*, 35(108). <http://www.itc.mx/ojs/index.php/pistas/article/download/1408/1218>.
- Swamy, D. M., & Venkatesan, M. (2019). *Three Phase Multi-Level Inverter Topologies and Modulation Techniques: A Short review*. 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT), 305-311. <https://doi.org/10.1109/icict46008.2019.8993140>.
- Tan, K., Lin, F., & Chen, J. (2018). DC-Link Voltage Regulation Using RPFNN-AMF for Three-Phase Active Power Filter. *IEEE Access*, 6, 37454-37463. <https://doi.org/10.1109/access.2018.2851250>.
- Tuyen, N. D., & Fujita, G. (2015). PV-Active Power Filter Combination Supplies Power to Nonlinear Load and Compensates Utility Current. *IEEE power and energy technology systems journal*, 2(1), 32-42. <https://doi.org/10.1109/jpets.2015.2404355>.
- Vidaña, K. G., Lara, J., Hernandez, C., & Arjona, M. A. (2022). Diseño y evaluación de un controlador de lógica difusa para la extracción de la máxima potencia de un sistema fotovoltaico de 10kW interconectado a la red. *Revista Ciencia, Ingeniería y Desarrollo Tec Lerdo*, 1(8), 2448-623X. <http://revistacid.itslerdo.edu.mx/coninci2022/CID-060.pdf>.
- Yaramasu, V., & Wu, B. (2017). *Model Predictive Control of Wind Energy Conversion Systems*.

Estudio comparativo de las plataformas SimPowerSystems de Matlab y Twin Builder de ANSYS para el modelado y control de un convertidor trifásico Back-to-Back NPC de 3 niveles

Triana-González, D. G.¹; Lara-Cardoso, J.²; Hernández-Flores, C.¹; Arjona-López, M. A.¹

Datos de Adscripción:

¹ División de Estudios de Posgrado e Investigación, TNM Instituto Tecnológico de La Laguna, Blvd. Revolución y Av. Instituto Tecnológico de La Laguna, C.P. 27000, Torreón, Coahuila, México.

² Tecnológico Nacional de México Campus Lerdo, Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Av. Tecnológico No. 1555 Sur, Periférico Gómez - Lerdo Km. 14.5, C.P. 35150, Lerdo, Durango, México.

Resumen – Este artículo presenta un estudio comparativo de *SimPowerSystems* y *Twin Builder* para modelar y controlar un convertidor trifásico de 3 niveles (3N) con una topología B2B (*Back-to-Back* - Espalda con Espalda) NPC (*Neutral Point Clamped* - Conectado al Punto Neutro). Este convertidor es muy utilizado en los sistemas de conversión de energía eólica para llevar a cabo tareas de control y de regulación del flujo bidireccional de potencia. Por lo que es importante seleccionar la plataforma más viable en que ellos se modelarán y simularán. *Twin Builder* es capaz de simular sistemas multifísica muy complejos, pero su modelado tan detallado hace demasiado lentas las simulaciones y requiere un mayor poder de cómputo. Por el contrario, *SimPowerSystems* es más transparente en sus librerías y cuenta con más información de soporte. La simplificación de sus modelos permite simularlos en menos tiempo y con una mayor facilidad, pero a costa de una menor precisión. A partir de pruebas exhaustivas se llevó a cabo un estudio cuantitativo y cualitativo de las ventajas e inconvenientes de ambas plataformas. Éstas se validaron y evaluaron al regular la potencia activa y reactiva de las fuentes de las redes trifásicas conectadas a cada lado del convertidor, así como para mantener constante el voltaje del bus de CD (Corriente Directa). El control del convertidor multinivel B2B NPC se realizó en el marco de referencia síncrono dq . Los resultados obtenidos y el análisis de las características de las plataformas muestran que la mejor solución es una co-simulación del sistema con ambos programas, sumando así las fortalezas de cada uno y contrarrestando sus limitantes.

Palabras Clave – Convertidor Espalda con Espalda, *SimPowerSystems* de MATLAB, Topología Multinivel NPC, *Twin Builder* de ANSYS.

Abstract – This article presents a comparative study of *SimPowerSystems* and *Twin Builder* to model and control a three-phase 3-level converter with a B2B NPC topology. This converter is widely used in wind energy conversion systems to carry out control and regulation tasks of the bidirectional power flow. Hence, it is important to select the most suitable platform in which they will be modeled and simulated. *Twin Builder* is capable of simulating very complex multiphysics systems, but its highly detailed modeling makes simulations too slow and requires a higher computing power. In contrast, *SimPowerSystems* is more transparent in its libraries and it has more support information. The simplification of their models allows them to be simulated in less time and with

greater ease, but at the cost of lower precision. From exhaustive tests, a quantitative and qualitative study of the advantages and inconvenients of both platforms is presented. These were validated and evaluated when regulating the active and reactive power of the three-phase grid sources connected to each side of the converter, as well as to keep constant the DC (Direct Current) bus voltage. The control of the B2B NPC multilevel converter was performed in the synchronous reference frame dq . The obtained results and the analysis of the characteristics of the platforms show that the best solution is a co-simulation of the system with both programs, thus adding the strengths of each one and counteracting their limitations.

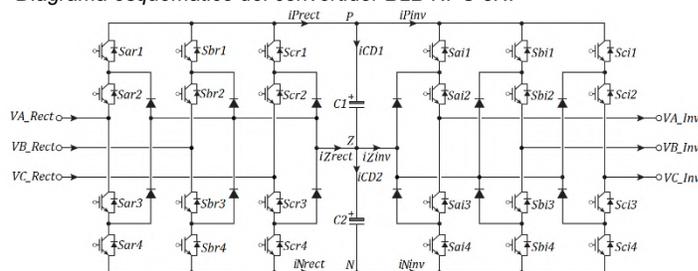
Keywords - ANSYS *Twin Builder*, *Back-to-Back Converter*, MATLAB *SimPowerSystems*, NPC Multilevel Topology.

I. INTRODUCCIÓN

El convertidor electrónico de potencia con topología B2B tiene las ventajas de contar con un único bus de CD, además de permitir un flujo bidireccional de energía y poder alcanzar una baja distorsión armónica en la corriente alterna (CA) de entrada (Zhang, 2008). El convertidor B2B NPC 3N es el convertidor más utilizado en aplicaciones de media y alta potencia por su superioridad en la reducción armónicos (Xu, 2020).

En la Figura 1 se muestra el diagrama esquemático del convertidor B2B NPC de 3 niveles.

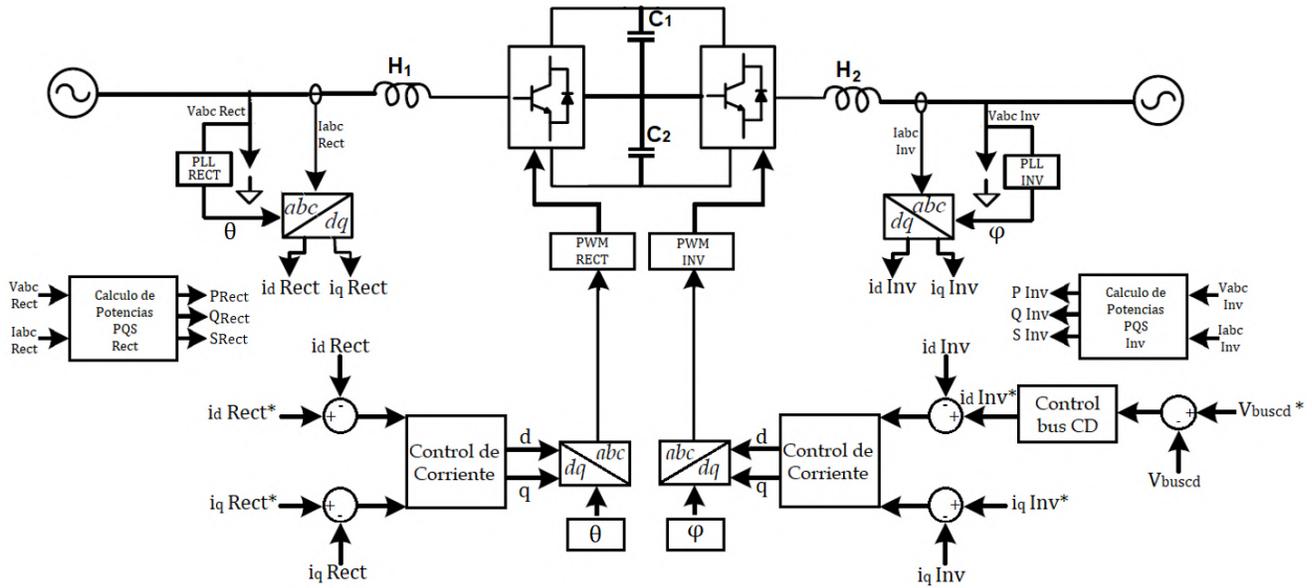
Figura 1
Diagrama esquemático del convertidor B2B NPC 3N.



El convertidor B2B NPC 3N se utiliza en aplicaciones de energía renovable por las ventajas que tiene respecto los convertidores de dos niveles, e.g., la capacidad de trabajar con voltajes y potencias más elevadas, así como superar los altos estándares relacionados con la calidad de la energía de la red (Bueno, 2008). Además, con esta configuración es posible controlar la potencia reactiva a ambos lados del convertidor (Li, 2012). Sin embargo, también tiene las desventajas de presentar el fenómeno desbalance de voltaje en sus capacitores y de contar con un alto número de componentes, así como de requerir técnicas control y modulación más complejas (Portillo, 2006).

Figura 2

Diagrama del convertidor B2B NPC 3N con su sistema de control.



La ventaja de un convertidor B2B de 3 niveles sobre un B2B de 5 niveles es un menor número de componentes (Zhang, 2018). Por lo tanto, la configuración B2B NPC 3N es muy utilizada en aplicaciones de energía eólica (Li, 2018).

Las herramientas de *SimPowerSystems* de MATLAB y *Twin Builder* de ANSYS son plataformas de simulación que permiten diseñar, probar, evaluar y diagnosticar una variedad muy amplia de sistemas, e.g., electrónicos, eléctricos y mecatrónicos.

Twin Builder se utiliza en aplicaciones donde existe una sólida integración de componentes, como motores, sensores y actuadores con sus controles electrónicos. También permite simular las interacciones entre estos componentes pues su flujo de diseño incorpora análisis térmico y mecánico para evaluar por ejemplo estrategias de enfriamiento, y analizar efectos mecánicos críticos como ruido, vibración y dureza de los componentes. Con esta plataforma es posible por ejemplo predecir el rendimiento térmico, así como limitar el ruido acústico, la vibración y las pérdidas en los generadores eléctricos (Bashir, 2022), (Biancolini, 2020).

SimPowerSystems ofrece una amplia librería de componentes que permiten modelar y simular sistemas complejos. Además, incluye modelos ya preprogramados de convertidores, motores y sistemas completos de energía renovable, lo que simplifica el trabajo para lograr simular los modelos propios. También permite evaluar sistemas de transmisión eléctrica y analizar la generación, la conversión y el consumo de energía en una red eléctrica (Simscape Electrical, 2023).

Así, el objetivo de este trabajo de investigación es realizar un estudio comparativo de estas dos plataformas para modelar y controlar un convertidor B2B NPC 3N mediante la técnica de control vectorial (Beg, 2016).

El presente artículo se organiza de la siguiente manera: en la sección II se describe el convertidor B2B NPC 3N y su implementación en ambas plataformas. En la sección III se muestran y discuten los resultados obtenidos en ambos programas. Finalmente, en la sección IV se presentan las conclusiones.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

En la Figura 2, se muestra el esquema general del convertidor B2B NPC 3N junto con el sistema de control empleado en la simulación para realizar el estudio comparativo. Este convertidor está compuesto de 24 IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor* - Transistor Bipolar de Computura Aislada), 12 diodos conectados al punto neutro, y 2 capacitores en el bus de CD.

En el diagrama se observa como el convertidor está conectado mediante inductores de acoplamiento a dos redes eléctricas: una del lado del rectificador y la otra del lado del inversor (Samanes, 2020). También se identifican los bloques de control de las corrientes en el marco de referencia *dq*. En el lado inversor se realiza el control del bus de CD mediante una técnica de modulación PWM (*Pulse Width Modulation* - Modulación de Ancho del Pulso) aplicada a los interruptores IGBT.

Para llevar a cabo el estudio comparativo, se implementó en ambas plataformas el circuito completo mostrado en la Figura 2, incluyendo el convertidor, las redes y el control, así como el cálculo de las potencias activa, reactiva y aparente. Tanto *SimPowerSystems* de MATLAB como *Twin Builder* de ANSYS cuentan con componentes y bloques similares para modelar el convertidor.

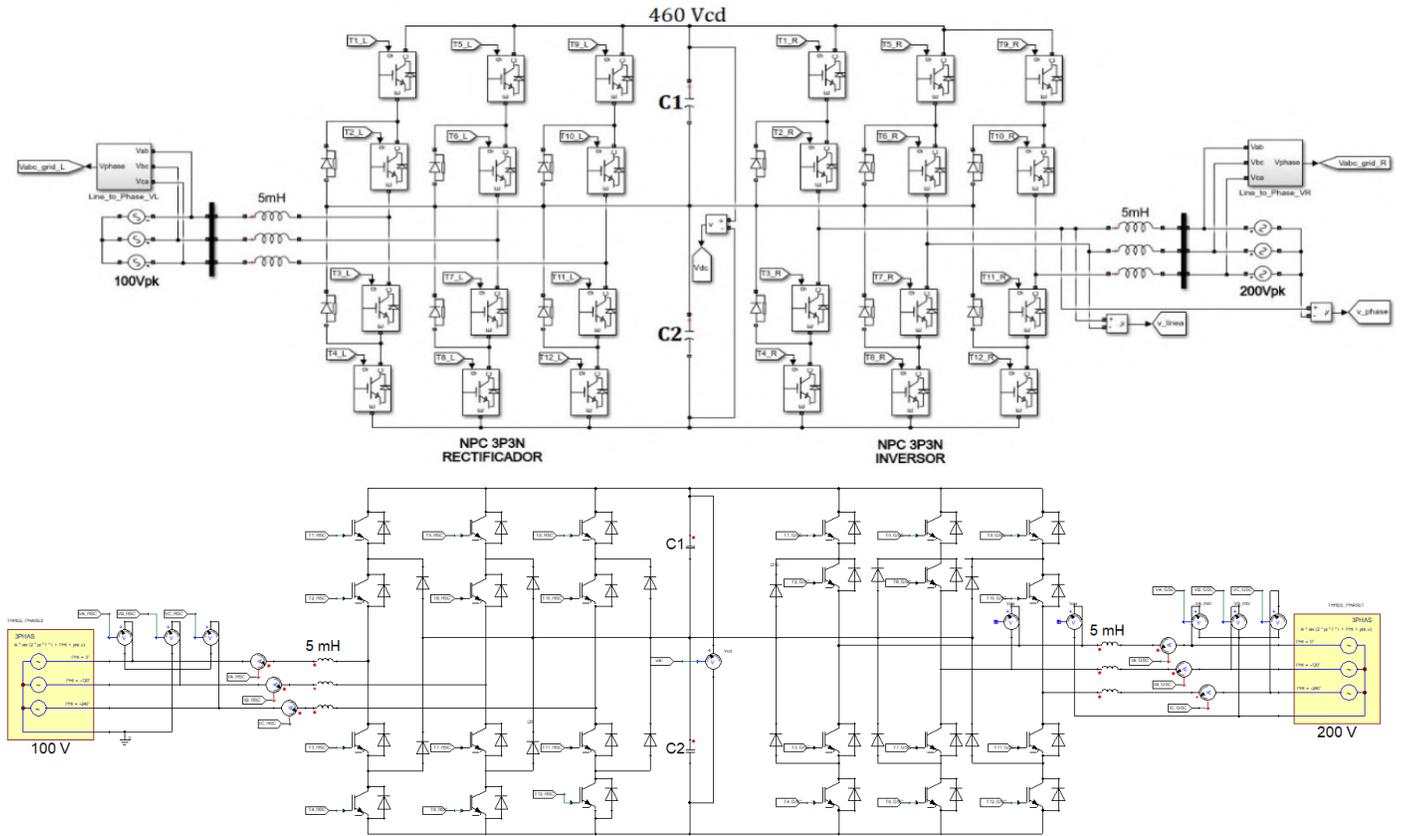
En el lado del rectificador las corrientes de referencia se fijaron a 10 A en *d* y 0 A en *q*. Del lado del inversor, la referencia de corriente en *q* también se fijó a 0 A, mientras que la referencia en *d* la proporciona la salida del controlador que regula el voltaje del bus de CD a una referencia de 460 V.

Los voltajes de CA a las salidas del rectificador y del inversor se obtienen de (1) y (2), respectivamente (Yamasu, 2017):

$$\begin{bmatrix} V_{a_{rect}} \\ V_{b_{rect}} \\ V_{c_{rect}} \end{bmatrix} = V_{C1} \begin{bmatrix} S_{ar1} \\ S_{br1} \\ S_{cr1} \end{bmatrix} + V_{C2} \begin{bmatrix} S_{ar2} \\ S_{br2} \\ S_{cr2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} V_{a_{inv}} \\ V_{b_{inv}} \\ V_{c_{inv}} \end{bmatrix} = V_{C1} \begin{bmatrix} S_{ai1} \\ S_{bi1} \\ S_{ci1} \end{bmatrix} + V_{C2} \begin{bmatrix} S_{ai2} \\ S_{bi2} \\ S_{ci2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Figura 3
Circuito del convertidor B2B NPC 3N: (Arriba) SimPowerSystems, (Abajo) Twin Builder.



En la Figura 3 se muestran los convertidores B2B NPC 3N simulados en *SimPowerSystems* y en *Twin Builder*. Obsérvese como ambos lados en cada convertidor comparten el mismo bus de CD. La corriente i_Z (neutro) de los capacitores de división y las corrientes i_P (positivo) e i_N (negativo) en el bus de CD mostradas en la Figura 1 se obtienen en términos de las corrientes i_{abc} de cada red y de los estados S de conmutación del convertidor como (Yaramasu, 2017):

$$\begin{bmatrix} i_{P_{rect}} \\ i_{Z_{rect}} \\ i_{N_{rect}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{ar1}S_{ar2} & S_{br1}S_{br2} & S_{cr1}S_{cr2} \\ S_{ar2}S_{ar3} & S_{br2}S_{br3} & S_{cr2}S_{cr3} \\ S_{ar3}S_{ar4} & S_{br3}S_{br4} & S_{cr3}S_{cr4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{a_{rect}} \\ i_{b_{rect}} \\ i_{c_{rect}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_{P_{inv}} \\ i_{Z_{inv}} \\ i_{N_{inv}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{ai1}S_{ai2} & S_{bi1}S_{bi2} & S_{ci1}S_{ci2} \\ S_{ai2}S_{ai3} & S_{bi2}S_{bi3} & S_{ci2}S_{ci3} \\ S_{ai3}S_{ai4} & S_{bi3}S_{bi4} & S_{ci3}S_{ci4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{a_{inv}} \\ i_{b_{inv}} \\ i_{c_{inv}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Tabla 1
Parámetros de simulación.

Parámetro	Valor	Unidad
Tamaño de paso de la simulación	1	μs
Frecuencia de la red	60	Hz
Frecuencia de conmutación	10800	Hz
Voltaje del bus de CD	460	V
Voltaje de la red CA - lado rectificador	100	V
Voltaje de la red CA - lado inversor	200	V
Inductancias	5	mH
Capacitores del bus de CD	4	mF

A partir de (3) se derivan las corrientes del lado del rectificador, mientras que con (4) se obtienen las corrientes del lado del inversor.

A cada lado del convertidor B2B NPC 3N se conectó una fuente trifásica, la cual tiene un voltaje de 100 V en el lado rectificador y de 200 V en el lado inversor.

En la Tabla 1 se muestran los parámetros con los cuales se realizó la simulación del sistema en ambas plataformas.

Las Figuras 4 y 5 muestran los esquemas de control de las corrientes dq tanto en el lado rectificador como en el lado inversor.

Figura 4
Control lado rectificador: (Arriba) SimPowerSystems, (Abajo) Twin Builder.

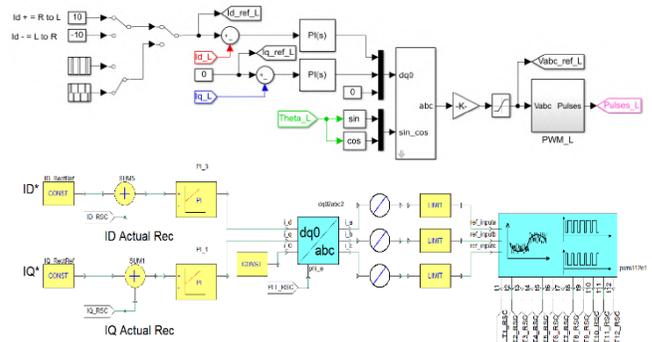
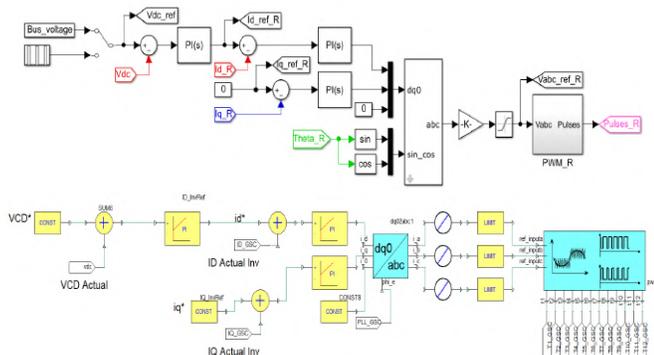


Figura 5
Control lado inversor. (Arriba) SimPowerSystems, (Abajo) Twin Builder.



Los controladores PI (proporcional-integral) utilizados tienen como propósito reducir a cero en estado permanente el error $e(t)$ entre el valor de referencia y el valor medido. La ecuación de este controlador lineal se expresa como (Mazzone, 2002):

$$y(t) = k_p \cdot e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt \quad (5)$$

donde k_p y k_i son las ganancias proporcional e integral, respectivamente.

Los PLL (*Phase Locked Loop* - Lazo Enganchado en Fase) son utilizados en los modelos de simulación para identificar la fase de las redes eléctricas (Naderi, 2020).

La Figura 6 muestra el diagrama del PLL utilizado en ambas plataformas, mientras que la Tabla 2 presenta las ganancias de todos controladores PI incluidos en el sistema. Los controladores de corriente en d y q son iguales para cada lado del convertidor.

La Tabla 3 muestra los estados de conmutación del convertidor B2B NPC de 3 niveles. Obsérvese que hay 27 diferentes combinaciones, las cuales generan 18 distintos vectores de voltaje de salida. Los valores 0, 1 y 2 en la secuencia

Figura 6
Esquema del PLL utilizado en el sistema: (Arriba) SimPowerSystems, (Abajo) Twin Builder.

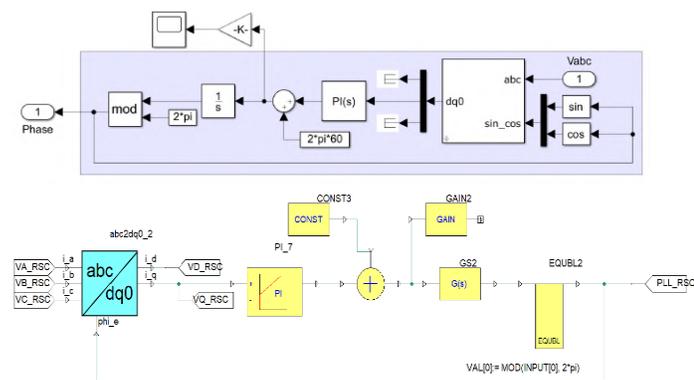


Tabla 2
Ganancias de los controladores implementados.

Parámetro	Símbolo	k_p	k_i
PI de corriente del rectificador	PI_Rect	200	800
PI de corriente del inversor	PI_Inv	50	200
PI de voltaje del bus de CD	PI_Vcd	1	40
PI del PLL del rectificador	PI_PLL_Rect	10	5
PI del PLL del inversor	PI_PLL_Inv	10	5

Tabla 3
Estados de conmutación del convertidor B2B NPC de 3 niveles.

#	Vector de Voltaje	Secuencia de Conmutación			Interrupidores Superiores					
		S_a	S_b	S_c	$S_{a,1}$	$S_{a,2}$	$S_{b,1}$	$S_{b,2}$	$S_{c,1}$	$S_{c,2}$
1	V_0	[0 0 0]	0	0	0	0	0	0	0	0
2	V_0	[1 1 1]	0	1	0	1	0	1	0	1
3	V_0	[2 2 2]	1	1	1	1	1	1	1	1
4	V_1	[1 0 0]	0	1	0	0	0	0	0	0
5	V_1	[2 1 1]	1	1	0	1	0	1	0	1
6	V_2	[1 1 0]	0	1	0	1	0	1	0	0
7	V_2	[2 2 1]	1	1	1	1	0	1	0	1
8	V_3	[0 1 0]	0	0	0	1	0	0	0	0
9	V_3	[1 2 1]	0	1	1	1	1	0	1	1
10	V_4	[0 1 1]	0	0	0	1	0	1	0	1
11	V_4	[1 2 2]	0	1	1	1	1	1	1	1
12	V_5	[0 0 1]	0	0	0	0	0	0	0	1
13	V_5	[1 1 2]	0	1	0	1	1	1	1	1
14	V_6	[1 0 1]	0	1	0	0	0	0	0	1
15	V_6	[2 1 2]	1	1	0	1	1	1	1	1
16	V_7	[2 0 0]	1	1	1	0	0	0	0	0
17	V_8	[2 1 0]	1	1	0	1	0	0	0	0
18	V_9	[2 2 0]	1	1	1	1	0	0	0	0
19	V_{10}	[1 2 0]	0	1	1	1	0	0	0	0
20	V_{11}	[0 2 0]	0	0	1	1	0	0	0	0
21	V_{12}	[0 2 1]	0	0	1	1	0	1	0	1
22	V_{13}	[0 2 2]	0	0	1	1	1	1	1	1
23	V_{14}	[0 1 2]	0	0	0	1	1	1	1	1
24	V_{15}	[0 0 2]	0	0	0	0	0	1	1	1
25	V_{16}	[1 0 2]	0	1	0	0	0	1	1	1
26	V_{17}	[2 0 2]	1	1	0	0	0	1	1	1
27	V_{18}	[2 0 1]	1	1	0	0	0	0	1	1

de conmutación significan la conexión de cada una de las fases de salida ya sea con la terminal negativa (N), neutra (Z) o positiva (P) del bus de CD del convertidor (Yaramasu, 2017).

En la Figura 7 se muestra la configuración en SimPowerSystems de los bloques utilizados para implementar esta estrategia de modulación PWM en el convertidor B2B NPC 3N, y así controlar la apertura y cierre de sus interruptores IGBT. Para Twin Builder se utilizó el modelo PWM incluido en la librería, el cual está desarrollado en HDL (*Hardware Description Language* - Lenguaje de Descripción de Equipo Físico).

La Figura 8 muestra los parámetros de configuración utilizados para modelar los IGBTs en ambas plataformas.

Figura 7
Estrategia de modulación PWM del convertidor B2B NPC 3N.

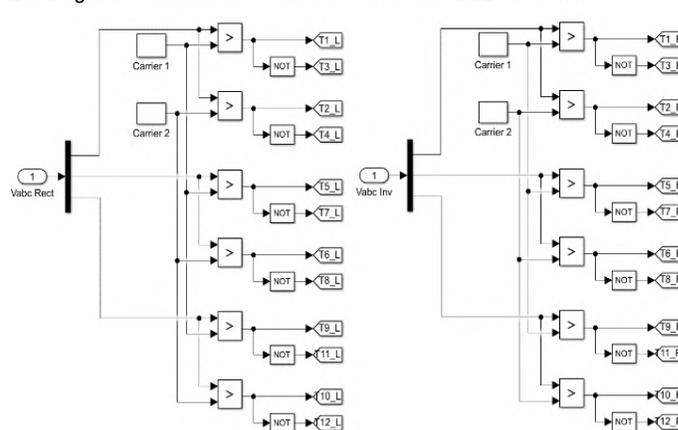
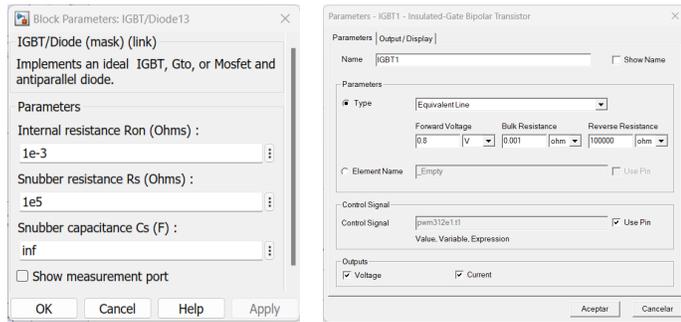


Figura 8
Parámetros del IGBT: (Izquierda) SimPowerSystems, (Derecha) Twin Builder.



III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las simulaciones en *SimPowerSystems* se llevaron a cabo en la versión 2018a de MATLAB, mientras que las de *Twin Builder* se realizaron en la versión 2022R2 de ANSYS. Ambos programas se ejecutaron en una computadora basada en el sistema operativo Windows, con un procesador Intel Core i5-11400H a 2.70GHz y una memoria RAM de 16 GB.

La Figura 9 presenta los voltajes obtenidos del sistema simulado en ambas plataformas. Obsérvese como las señales de voltaje de las tres fases ABC correctamente corresponden a las de un sistema equilibrado.

Las corrientes de salida obtenidas en ambos lados del convertidor se muestran en la Figura 10. Obsérvese como los voltajes y las corrientes del lado rectificador están fuera de fase lo que significa que su red está recibiendo potencia, mientras que del lado inversor están en fase, y por lo tanto su red está proporcionando potencia. Es importante notar como las curvas obtenidas en ambas plataformas son prácticamente iguales.

Figura 9
Voltajes ABC obtenidos del lado rectificador y del lado inversor: (Arriba) SimPowerSystems, (Abajo) Twin Builder.

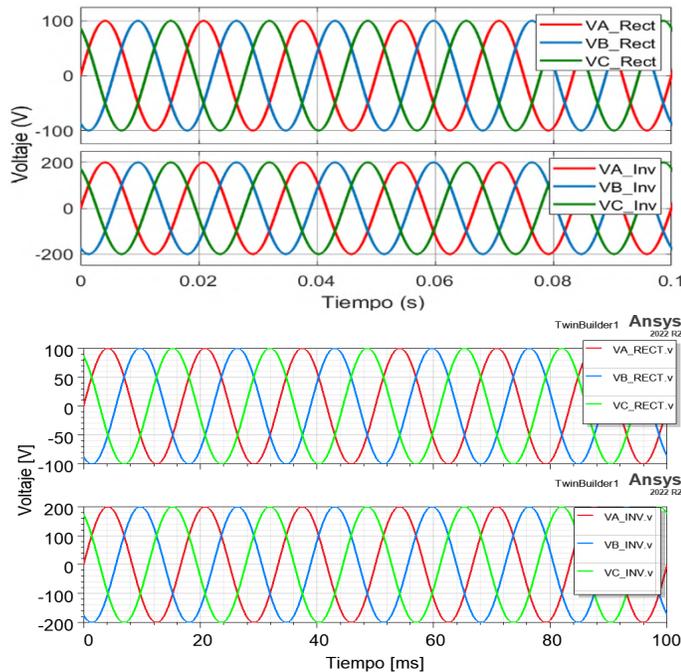
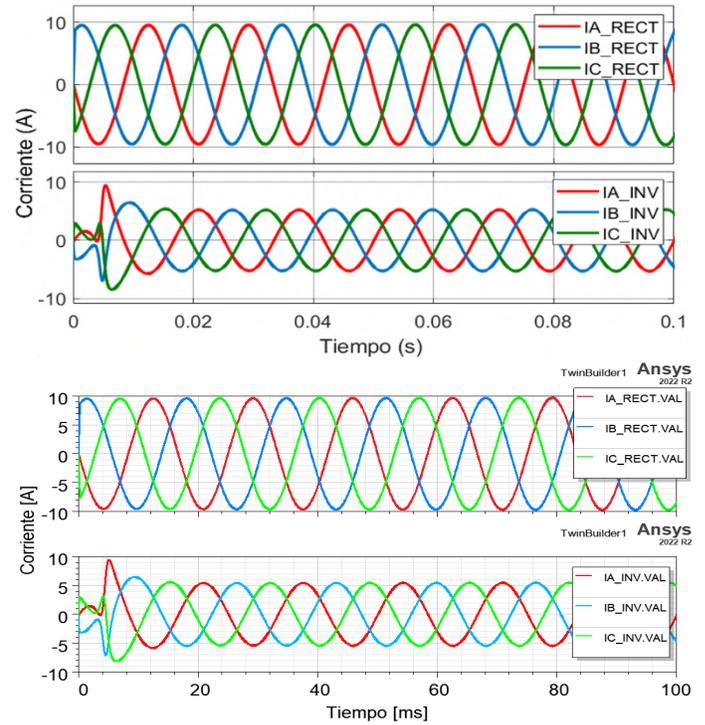


Figura 10
Corrientes ABC obtenidas del lado rectificador y del lado inversor: (Arriba) SimPowerSystems, (Abajo) Twin Builder.



El control de ambos lados del convertidor se realizó en el marco de referencia síncrono dq . Por lo tanto, las corrientes ABC fueron convertidas a valores constantes mediante la transformada de Clarke/Park, obteniendo así los resultados mostrados en la Figura 11. Nótese que el símbolo de asterisco en las variables representa una referencia o valor deseado. A partir de las curvas

Figura 11
Corrientes dq del lado rectificador y del lado inversor: (Arriba) SimPowerSystems, (Abajo) Twin Builder.

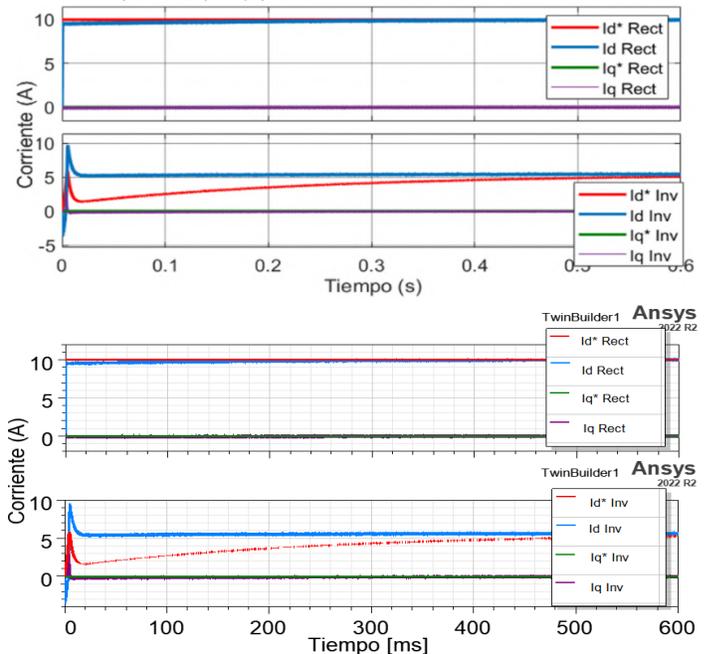


Figura 12
Voltaje en el bus de CD del convertidor B2B NPC 3N: (Arriba) SimPowerSystems, (Abajo) Twin Builder.

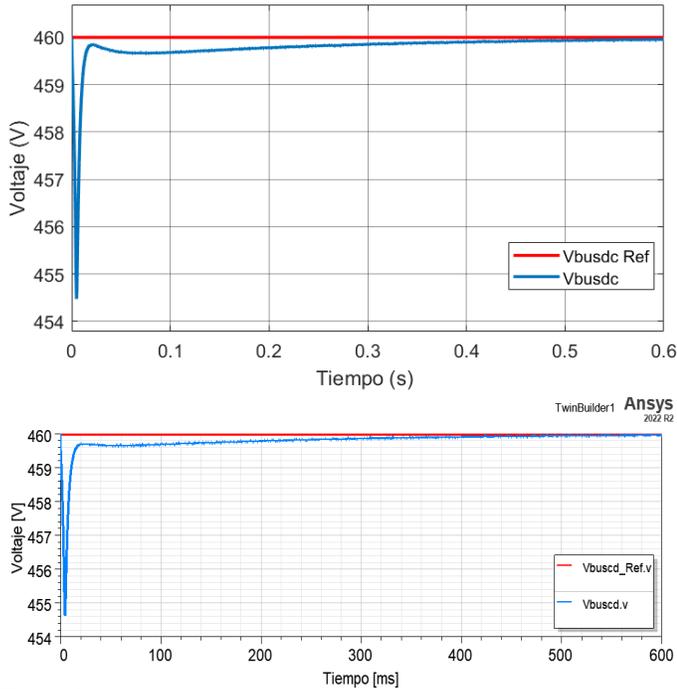
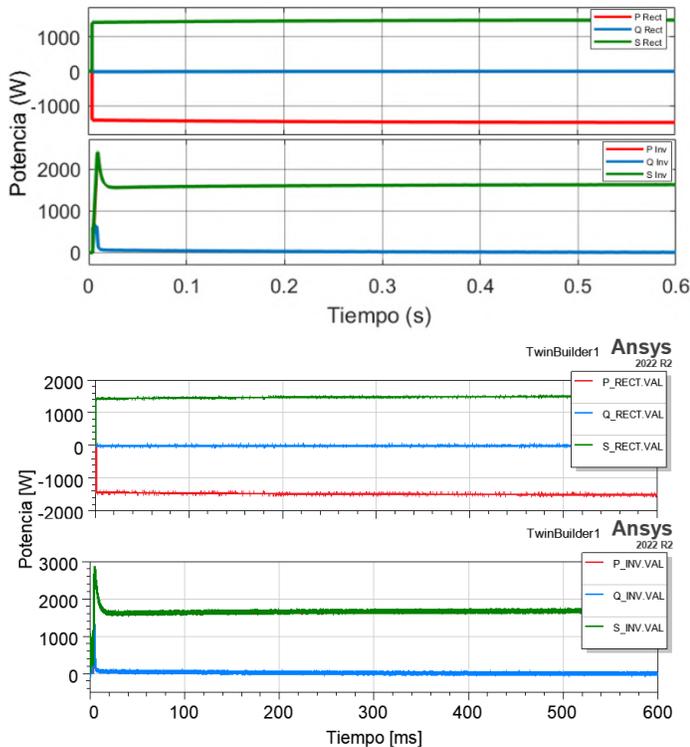


Figura 13
Potencias activa P, reactiva Q y aparente S del lado rectificador y del lado inversor: (Arriba) SimPowerSystems, (Abajo) Twin Builder.



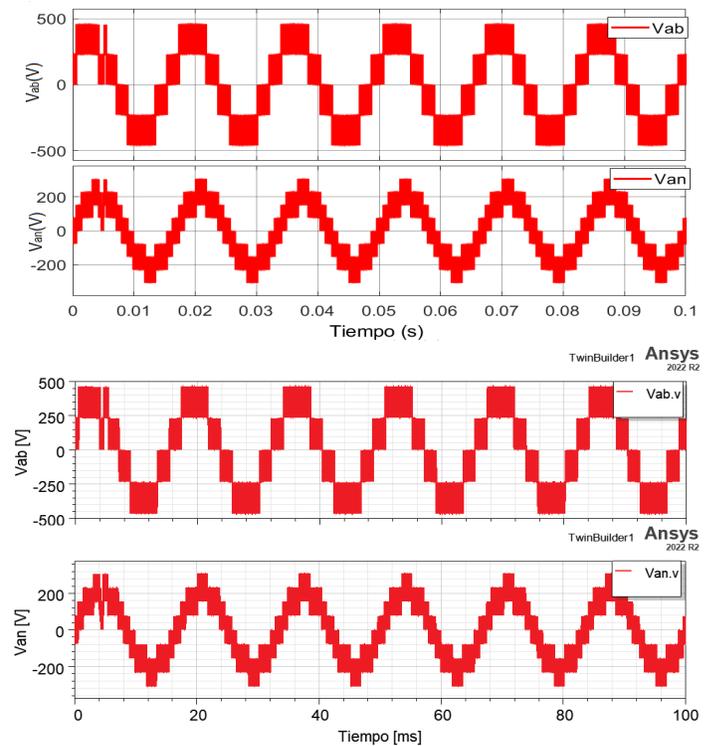
de corriente dq obtenidas en ambas plataformas de simulación se verifica cómo el control se lleva a cabo de forma correcta pues el valor medido sigue rápidamente a la referencia, y en estado permanente prácticamente se traslapan.

De manera similar, en la Figura 12 se muestran las curvas obtenidas para el control del voltaje del bus de CD. Obsérvese como los resultados en las dos plataformas son exactamente los mismos, y los voltajes convergen en estado estable a los 460V de referencia.

En la Figura 13, se muestran las potencias activa P, reactiva Q y aparente S, tanto del lado rectificador como del lado inversor. Es notable observar cómo los resultados de *SimPowerSystems* y *Twin Builder* también son iguales.

Finalmente, en la Figura 14, se comparan los voltajes de salida del convertidor B2B NPC 3N. Obsérvese como el voltaje de línea tiene 5 niveles, mientras que el voltaje de fase tiene 9 niveles. Los demás voltajes V_{bc} , V_{ca} , V_{bn} y V_{cn} del sistema trifásico se han omitido para así tener una mejor apreciación de las curvas sin que haya traslape de las mismas. Nótese también que los resultados arrojados por ambas plataformas son los mismos. Sin embargo, la diferencia radica en el tiempo requerido para obtenerlos pues *SimPowerSystems* tiene una mayor rapidez de simulación derivado de la menor complejidad de su modelo, en cambio *Twin Builder* tarda mucho más debido a que el sistema simulado se modela con un mayor detalle.

Figura 14
Voltajes de línea (5 niveles) y de fase (9 niveles) del convertidor B2B NPC 3N: (Arriba) SimPowerSystems, (Abajo) Twin Builder.



La Tabla 4 presenta los tiempos de ejecución de ambas plataformas para simular el modelo completo de la Figura 2 que incluye el convertidor B2B NPC 3N de la Figura 3.

Tabla 4
Tiempo de ejecución de la simulación en ambas plataformas.

Programa	Duración	Unidad
SimPowerSystems de MATLAB	24.11	s
Twin Builder de ANSYS	139.2	

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el estudio comparativo de las plataformas *SimPowerSystems* de MATLAB y *Twin Builder* de ANSYS para el modelado y el control de un convertidor trifásico B2B NPC de 3 Niveles.

Los resultados obtenidos de ambas plataformas fueron prácticamente los mismos. Respecto al tiempo de ejecución de las simulaciones, *SimPowerSystems* fue casi 6 veces más rápido que *Twin Builder*. Sin embargo, a diferencia de *SimPowerSystems*, *Twin Builder* aún tiene la capacidad de poder modelar incluso la parte térmica del convertidor, lo que permitiría estudiarlo como un sistema multifísica con mucho más detalle.

Por otro lado, la curva de aprendizaje del programa *SimPowerSystems* es mucho más corta que la de *Twin Builder*, ya que existe una amplia comunidad de usuarios que lo utilizan, y, por lo tanto, hay un mayor soporte y acceso a información y a ejemplos. Aunque también hay comunidades y foros de usuarios de *Twin Builder*, éstos no son tan comunes y detallados como los de *SimPowerSystems*.

Referente al costo anual del mantenimiento de las licencias, *Twin Builder* es menos caro pues ronda los \$3000 pesos, mientras que el de *SimPowerSystems* es de \$9000 pesos, el cual ya incluye el pago por MATLAB y Simulink.

En base al estudio cualitativa y cuantitativo realizado, se puede concluir que la mejor solución para el modelado y control de los convertidores de potencia es una co-simulación con ambas plataformas, para así explotar las fortalezas de cada una y obtener resultados detallados en menos tiempo.

V. AGRADECIMIENTOS

D. G. Triana-González agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico otorgado en el marco del "Programa de Becas Nacionales para Estudios de Posgrado" con número de solicitud 2021-000001-01NACF-03068.

Los autores también agradecen al TecNM, al Instituto Tecnológico de La Laguna y al Instituto Tecnológico Superior de Lerdo por el apoyo económico recibido para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

VI. REFERENCIAS

- Bashir, I., & Bhat, A. H. (2022). Design and Performance Evaluation of Switched Reluctance Motor using ANSYS Electronics Desktop. 2022 1st International Conference on Sustainable Technology for Power and Energy Systems (STPES). DOI:10.1109/stpes54845.2022.10006469
- Beg, N., Rahmoun, A., Armstorfer, A., Rosin, A., & Biechl, H. (2016). Determination methods for controller parameters of back-to-back converters in electric power grids. 2016 Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ). DOI:10.1109/pq.2016.7724106
- Biancolini, M.E., & Cella, U. (2020). Flexible Engineering Toward Green Aircraft. Springer eBooks. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-36514-1>
- Bueno, E., Cobreces, S., Rodriguez, F. V., Hernandez, A. C., & Espinosa, F. (2008). Design of a Back-to-Back NPC Converter Interface for Wind Turbines With Squirrel-Cage Induction Generator. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(3), 932–945. DOI:10.1109/tec.2008.918651
- Li, S., Haskew, T. A., Williams, K. A., & Swatloski, R. P. (2012). Control of DFIG Wind Turbine With Direct-Current Vector Control Configuration. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 3(1), 1–11. DOI:10.1109/tste.2011.2167001
- Li, X., Yuan, S., Zhang, D., Bai, C., Huibiao, Y., Hao, Z., & Xu, J. (2018). The Simplified Model of Back-To-Back PWM Converter. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. DOI:10.1088/1757-899x/452/4/042030
- Mazzone, V. (2002). Controladores PID. [Archivo PDF] <https://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf>
- Naderi, M., Khayat, Y., Shafiee, Q., Dragicevic, T., Bevrani, H., & Blaabjerg, F. (2020). Interconnected Autonomous ac Microgrids via Back-to-Back Converters—Part II: Stability Analysis. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(11), 11801–11812. DOI:10.1109/tpel.2020.2986695
- Portillo, R., Prats, M., Leon, J. I., Sanchez, J. G., Carrasco, J. M., De Teresa Galván, E., & Franquelo, L. G. (2006). Modeling Strategy for Back-to-Back Three-Level Converters Applied to High-Power Wind Turbines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(5), 1483–1491. DOI:10.1109/tie.2006.882025
- Samanes, J., Gubia, E., Juankorena, X., & Gironés, C. R. (2020). Common-Mode and Phase-to-Ground Voltage Reduction in Back-to-Back Power Converters With Discontinuous PWM. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(9), 7499–7508. DOI:10.1109/tie.2019.2942553
- Simscape Electrical. (2023). [Comentario en foro en línea] <https://la.mathworks.com/products/simscape-electrical.html>
- Xu, X., Zheng, Z., Wang, K., Yang, B., & Li, Y. (2020). A Comprehensive Study of Common Mode Voltage Reduction and Neutral Point Potential Balance for a Back-to-Back Three-Level NPC Converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(8), 7910–7920. DOI:10.1109/tpel.2019.2961385
- Yaramasu, V., & Wu, B. (2017). Model Predictive Control of Wind Energy Conversion Systems. IEEE PRESS. WILEY.
- Yingchao, Z., Zhengming, Z., Ting, L., Yongchang, Z., & Liqiang, Y. (2008). A novel control scheme for three-level NPC back-to-back converter. 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. DOI:10.1109/vppc.2008.4677437
- Zhang, Z., Li, Z., Kazmierkowski, M. P., Rodriguez, J., & Kennel, R. (2018). Robust Predictive Control of Three-Level NPC Back-to-Back Power Converter PMSG Wind Turbine Systems With Revised Predictions. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(11), 9588–9598. DOI:10.1109/tpel.2018.2796093

ÍNDICE DE AUTORES



A

Aguirre Mejía Elena Tzetzángary	29
Alvarado Tovar, Noé	7, 14, 105
Álvarez Macías Carlos	62
Álvarez Mejía César	1
Arjona López Marco Antonio	128, 136
Arteaga Chávez Mariana	1

C

Cabrera Morelos Víctor Manuel	75
Carreón Pulido Víctor Hugo	29
Carrera Barraza, Brenda	50, 56, 69
Carrera Barraza, Manuel de Jesús	69, 50
Castro Juárez Ernesto II	84, 120
Cháirez Acosta Luvianka Ivonett	56
Chiw Gramillo Esmeralda Daniela	56
Cisneros Romero Marijo	36
Coto Fuentes Hesner	36, 42, 97, 105

F

Flores Luévanos	22
María Guadalupe	22
Flores Prince Carlos Uriel	97

G

González Vargas Luis Amado	7, 14
----------------------------	-------

H

Hernández Flores Concepción	128, 136
Huerta Valenzuela Francisco	7, 14

L

Lara Cardoso, Jorge	128, 136
Loera Palomo Rodrigo	62, 75
López Ramírez Varinia	1
López Carrasco Marissa Ivett	62

M

Machado Díaz Eduardo	84, 7, 14, 97, 105, 112, 120
Magallanes Armendáriz Jesús Francisco	56
Martínez Muñoz José Carlos	120
Martínez Rodríguez Ulises	91
Meraz Salazar Erika Alejandra	29
Moreno Núñez Elda	22

N

Núñez Cabral Juan Carlos	50
--------------------------	----

O

Ochoa Corona Yisvi Saray	91
Olvera Avila José Cruz	42

P

Padilla Silva Andrea Fernanda	7
Parada Morado Lilia	29
Pinales Valdez Edgar Guadalupe	69, 50

R

Ramírez Castro Hector	75
Ramírez Zárata Alberto	29
Ramos Ochoa Oscar Fabián	91

Remigio Lopez Zaira Keren	91
Rodríguez Campos Francisco Eduardo	29
Rodríguez Lozano Karla Verónica	22
Rodríguez Luévanos Yasmin Lizeth	84
Rojas López Iris Antonia	56
Román Landeros Diego Alberto	112
Ruiz Arroyo Idalia	91

S

Sellschopp Sánchez Francisco Sergio	62
Serrano Hernández Arturo	99

T

Torres Astorga Gerardo Alfonso	14
Triana González Diana Guadalupe	136

V

Valdez Diaz José Manuel	69
Valenzuela Romero Jesús Adolfo	36
Vaquera González Efrain	112
Vidaña Aldaba Karol Gabriel	128



Para mayor información, duda o comentario, estamos a su
disposición en los siguientes medios:

Correo electrónico:

revistacid@itslerdo.edu.mx

Dirección:

Revista “Ciencia, Ingeniería y Desarrollo Tec Lerdo”

Instituto Tecnológico Superior de Lerdo

Edificio “F”, planta alta

Avenida Tecnológico No. 1555 Sur

Periférico Gómez-Lerdo Km. 14.5

C. P. 35150. Ciudad Lerdo, Durango. México

Teléfonos:

+52 (871) 7-25-23-71, 7-25-57-79, y 7-25-58-02. (extensión 134)

Enlaces:

<https://www.lerdo.tecnm.mx/>

<http://revistacid.itslerdo.edu.mx/>



LA REVISTA “CIENCIA INGENIERÍA Y DESARROLLO TECNOLÓGICO” ES UNA REVISTA ANUAL DE DIFUSIÓN ELECTRÓNICA, QUE TIENE COMO PROPÓSITO, DIFUNDIR LA PRODUCCIÓN CIENTÍFICA, TECNOLÓGICA, Y DE CONOCIMIENTO; EN LOS ÁMBITOS: ACADÉMICO, CIENTÍFICO, TECNOLÓGICO E INDUSTRIAL. QUE REPRESENTA UNA CONTRIBUCIÓN PARA EL DESARROLLO DE LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA.

www.lerdo.tecnm.mx

<http://revistacid.itslerdo.edu.mx/>

revistacid@itslerdo.edu.mx



VOLUMEN: 1. NÚMERO: 9. AÑO: 2023



GOBIERNO DE
MÉXICO



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

