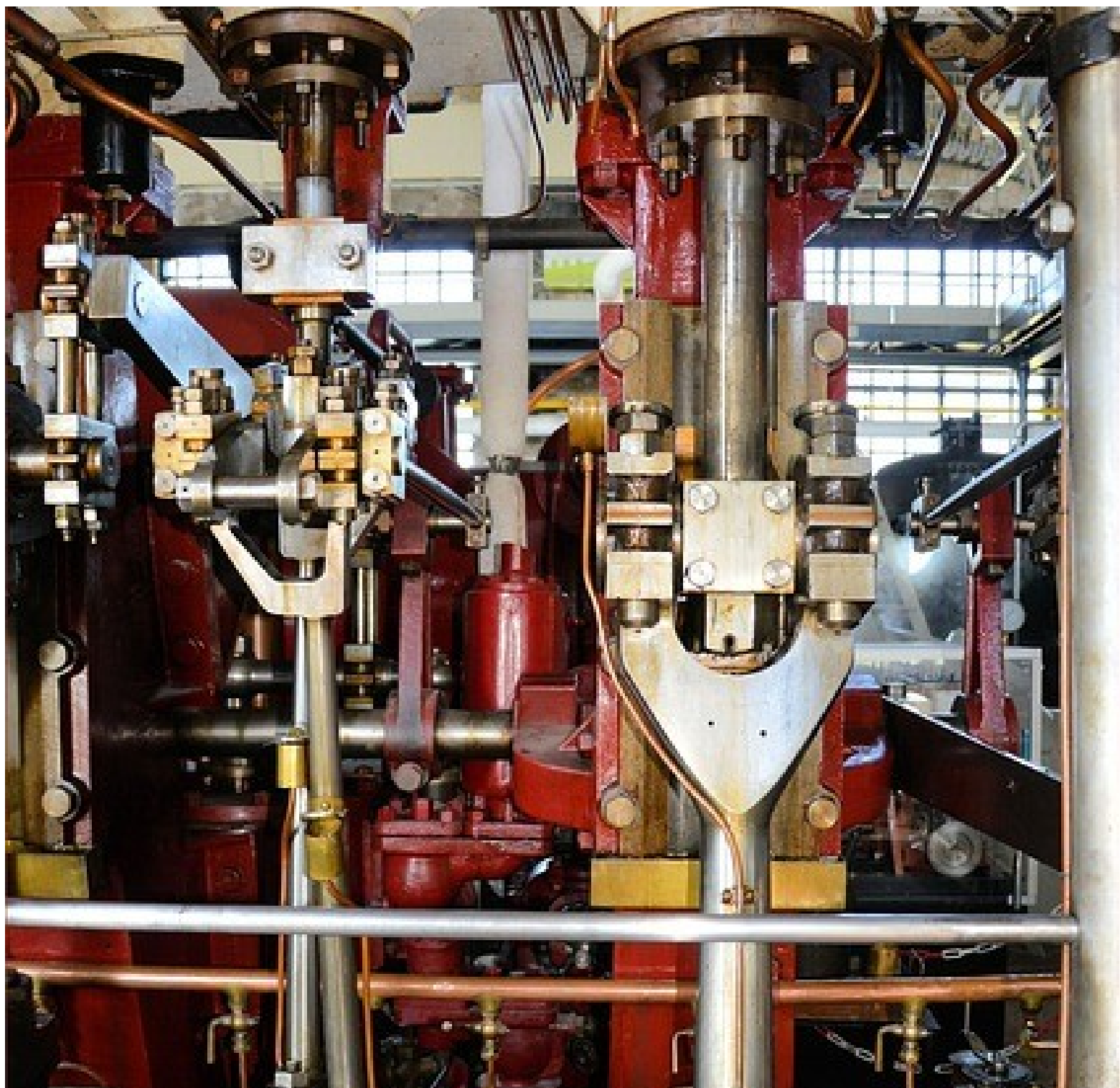


Científica

Científica: Journal of Electromechanical Engineering | vol. 27, no. 2 | July-December 2023 | Instituto Politécnico Nacional | <https://cientifica.site/>



Volumen 27 Issue 2, July-December 2023

Evaluación numérica a la fatiga de prótesis tumoral de rodilla

Numerical Fatigue Evaluation of Tumorous Knee Prosthesis

Tomas de la Mora-Ramírez; Elvis Coutiño-Moreno; Daniel Maldonado-Onofre; José Aparicio-Urbano.

Revisión del estado actual de los destiladores solares para la producción de alcohol

A Review of the Current State of Solar Stills for Alcohol Production

Donaji Melchor Quintas; Ignacio Carvajal Mariscal; Pedro Quinto Díez.

Análisis de sistema de potencia para computadora de vuelo de un nanosatélite CubeSat utilizando COTS

Analysis of Power System for Flight Computer of a CubeSat Nanosatellite

Jhonatan Fernando Eulopa-Hernandez; Hector Giovany Gallardo-Mercado; Diego Alfredo Padilla-Pérez.

Revolucionando la gestión de inventarios en una refinería en México: un caso de estudio

Revolutionizing Inventory Management in a Refinery in Mexico: a case study

Adán Acosta-Banda; Verónica Aguilar-Esteva; Ricardo Carreño Aguilera; Miguel Patiño Ortiz.

Diseño de estructuras tipo panel de abeja basadas en el caparazón de armadillo para un helicóptero ligero

Design of shell-based honeycomb structures armadillo for a light helicopter

Quirino Estrada; Dariusz Szwedowicz†; Elva Reynoso; Julio Vergara-Vázquez;
Lara Wiebe; Jesús Silva; Alejandro Rodríguez Mendez;
Abel Quezada; Luis A. Mier-Quiroga; Elvis Coutiño.

Análisis de un sistema de conducción autónoma

Analysis of an Autonomous Driving System

Zabulón Miguel **Hernández-Olivares**; Alberto Jorge **Rosales-Silva**; Armando Adrián **Miranda-González**;
Dante **Mujica-Vargas**; Ponciano Jorge **Escamilla-Ambrosio**; Jean Marie **Vianney-Kinani**; Floriberto **Ortiz-Rodríguez**.

Low-cost Data Acquisition System for Deformation Determination with Accelerometers

Sistema de adquisición de datos de bajo costo para determinación de deformaciones con acelerómetros

Daniela **Desiderio-Maya**; Orlando **Susarrey-Huerta**; Juan Carlos **Suárez-Calderón**; Iván **Rocha-Gómez**.

Implementación de una interfaz háptica en Unreal Engine y la estimación de velocidades para reducir vibraciones

Implementation of a haptic interface in Unreal Engine and the estimation of speeds to reduce vibrations

Erick Manuel **López-Ortiz**; Antonio Maximiliano **Hernández Salazar**;
Irlandi **Gutierrez-Carmona**; Juan Gabino **Díaz-Martínez**.

Modelo de reconfiguración óptima de la transmisión

Optimum Transmission Reconfiguration Model

Olivier **Tovar-Barragán**; Carlos Antonio **Becerril-Gordillo**.

SAR and Temperature Increase in a Head Model Composed of Several Tissues Produced by Two WiFi Devices Working on the 2.4 GHz Band

SAR y el incremento de temperatura en un modelo de cabeza compuesto por varios tejidos producidos
por dos dispositivos WiFi que funcionan en la banda de 2.4 GHz

Ezequiel Ignacio **Espinosa Rivas**; Roberto **Linares y Miranda**.

CIENTIFICA, year 27, issue 2 July-December 2023. Biannual Journal online published by Instituto Politécnico Nacional (Mexico) at Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Zacatenco. Av. Luis Enrique Erro S/N, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Col. Zacatenco, Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Mexico City, Tel. +52 55 57296000 ext. 54518, <https://www.cientifica.site>, email: cientifica@ipn.mx, Editor: PhD Christopher René Torres San Miguel. INDAUTOR Certificate of Reserve 04-2018-021313432600-203, ISSN 2594-2921, granted by Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsible for the last update: Cuauhtémoc Jiménez Pérez, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Av. Luis Enrique Erro S/N, Edificio 5, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Col. Zacatenco, Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Mexico City.

The responsibility of the materials published in Cientifica rests solely with their authors and their content does not necessarily reflect the criteria of the Editorial Board or the Instituto Politécnico Nacional. The total or partial reproduction of the texts hereby published is authorized as long as the complete source and the electronic address of the publications are cited, they are distributed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License, there is no fee for article processing, submission or publication.

Evaluación numérica a la fatiga de prótesis tumoral de rodilla

Numerical Fatigue Evaluation of Tumorous Knee Prosthesis

Tomas de la Mora-Ramírez¹, Elvis Coutiño-Moreno²
Daniel Maldonado-Onofre³, José Aparicio-Urbano⁴

Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, MÉXICO

¹<https://orcid.org/0000-0001-6594-2777> | tomas.delamora@tesjo.edu.mx

²<https://orcid.org/0000-0003-2455-2574> | elvis.coutino@tesjo.edu.mx

³<https://orcid.org/0000-0002-6078-2206> | daniel.maldonado@tesjo.edu.mx

⁴<https://orcid.org/0000-0001-7866-1202> | jose.aparicio@tesjo.edu.mx

Recibido 11-04-2023, aceptado 29-05-2023.

Resumen

En los últimos años, el rendimiento mecánico de polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) ha atraído una gran cantidad de interés en aplicaciones de prótesis articulares. La importancia clínica de la fatiga y las propiedades a la fractura de las piezas fabricadas con UHMWPE depende del dispositivo protésico. Los mecanismos de desgaste abrasivo y adhesivo usualmente prevalecen en los insertos acetabulares recuperados, observando que las superficies dañadas por fatiga se presentan a menudo en insertos tibiales. Por lo tanto, la resistencia al desgaste es de gran importancia en los componentes protésicos, ya que a mayores presiones de contacto de la articulación hacen que las propiedades de fatiga y fractura sean más relevantes. Se puede concluir así que las formulaciones de grado médico del UHMWPE deben representar un equilibrio entre las consideraciones de diseño, resistencia al desgaste, resistencia a la oxidación, propiedades de fatiga y a la fractura. Por lo que una de las principales consideraciones para el diseño de algún dispositivo con cargas variables es el diseño por fatiga, evitando grietas a nivel micro, macro y como consecuencia falla súbita del sistema. Provocando como consecuencia un reemplazamiento total de la pieza o en el peor de los casos catástrofes donde se involucra vidas humanas.

El objetivo de la presente investigación es proporcionar un análisis de fatiga y fractura, a través de una evaluación numérica a los bujes de material de UHMWPE utilizados en la articulación de la prótesis de rodilla. Se realizó un estudio de fatiga a la pieza buje tomando en consideración una posición en cuclillas de 130 grados de flexión del fémur con respecto a la tibia, mostrando resultados de la localización en donde inicia el daño en el buje, así como su tiempo de vida en años. Los resultados indican un ciclo de vida de 15.8 años antes de llegar a la falla del material.

Palabras clave: análisis de elemento finito, fatiga, prótesis de rodilla, UHMWPE.

Abstract

In recent years, the mechanical performance of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) has attracted a great deal of interest in joint replacement applications. The clinical significance of the fatigue and fracture properties of parts made of UHMWPE depends on the prosthetic device. Abrasive and adhesive wear mechanisms usually prevail in retrieved acetabular inserts, noting that fatigue-damaged surfaces often occur in tibial inserts. Therefore, wear resistance is of great importance in prosthetic components, as higher joint contact pressures make fatigue and fracture properties more relevant. It can thus be concluded that medical grade formulations of UHMWPE should represent a balance between design considerations, wear resistance, oxidation resistance, fatigue and fracture properties.

Therefore, one of the main considerations for the design of any device with variable loads is the design by fatigue, avoiding cracks at micro and macro level, and as a consequence sudden failure of the system. This causes a total replacement of the part or, in the worst case, a catastrophe involving human lives.

The objective of the present investigation is to provide a fatigue and fracture analysis, through a numerical evaluation to UHMWPE material bushings used in the knee prosthesis joint. A fatigue study was carried out on the bushing piece taking into consideration a squatting position of 130 degrees of flexion of the femur with respect to the tibia, showing results of the location where the damage starts in the bushing, as well as its lifetime in years. The results indicate a life cycle of 15.8 years before material failure.

Index terms: Finite Element Analysis, fatigue, knee prosthesis, UHMWPE.

I. INTRODUCCIÓN

La rotura por falla de piezas de prótesis sometidas a cargas variables implica el cambio total de la prótesis o incluso la morbilidad del paciente. El presente trabajo se enfoca a las fallas presentes en los bujes de una prótesis comercial de rodilla.

Una gran cantidad de elementos de piezas ortopédicas de prótesis y de máquinas tales como cigüeñales, ejes y resortes, son sometidos a cargas variables por lo que su comportamiento es diferente a aquellos que se someten a cargas estáticas. Los esfuerzos variables mencionados tienden a producir grietas que crecen a medida que se repiten, hasta que se produce la falla total de manera súbita. Por tanto, el diseño de elementos sometidos a cargas variables debe hacerse mediante una teoría que tenga en cuenta los factores que influyen en la aparición y desarrollo de las grietas, las cuales pueden producir la falla después de cierto número ciclos de esfuerzo. Las roturas por fatiga son especialmente peligrosas porque no suelen presentar indicios de fallo inminente, sino que se producen de modo repentino y sin observar deformaciones plásticas del conjunto, lo que a lo largo de la historia ha provocado grandes accidentes en la industria del transporte y para el caso específico fallas en prótesis ortopédicas.

Particularmente, en la posición de los bujes dentro de la prótesis tumoral reciben todos los esfuerzos de las diferentes actividades cotidianas y deben ser soportados la carga del peso del paciente, por lo que deben garantizar y soportar dichas fluctuaciones. El buje, como elemento mecánico acoplado al perno y a la rodilla debe diseñarse para soportar las cargas del sistema que involucra actividades del paciente. Por lo tanto, los bujes deben estar diseñados para soportar las fuerzas variables debido a las diferentes actividades del paciente.

II. METODOLOGÍA/DESARROLLO

La geometría considerada en el análisis corresponde a un buje que consta de material de UHMWPE colocado entre dos cavidades de la prótesis de rodilla sujeta por el perno de aleación de titanio, uno interno y uno externo (véase Fig. 1).

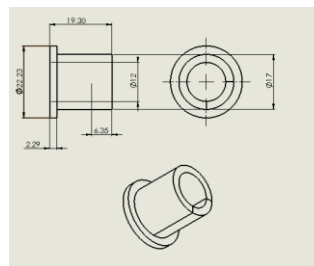


Fig. 1. Buj en estudio, dimensiones en mm, material de UHMWPE.

A. Caracterización del UHMWPE

Las curvas esfuerzo-deformación promedio de probetas de UHMWPE se obtuvieron a partir de la digitalización de diagramas esfuerzo-deformación, usando el software ORIGIN 2015. Los diagramas esfuerzo-deformación fueron resultado de ensayos de tensión experimentales realizados al material del UHMWPE (véase Fig. 2).



Fig. 2. Máquina para pruebas de Tensión a temperatura ambiente

La pruebas de tensión para el polietileno UHMWPE se realizaron bajo la norma ASTM D638, existen varios tamaños de probetas estandarizadas según la norma sin embargo la que se utilizó fue una tipo IV ya que es la más común para pruebas de polietileno, con un espesor de 3.2 mm, se realizaron cinco pruebas como indica la norma [1].

La pendiente de la parte lineal inicial de la curva Tensión-Deformación es el módulo de elasticidad o módulo de Young, el cual es una medida de la rigidez del material. Cuanto mayor sea el módulo más pequeña es la deformación elástica resultante de la aplicación de una tensión dada [2].

Se maquinaron las 5 probetas por un método de fabricación por arranque de viruta para obtener las características descritas en la norma (véase Fig. 3).



Fig. 3. Probetas para pruebas de tensión según Norma ASTM 638 [3].

Se utilizó una prótesis tumoral de rodilla, la cual fue proporcionada por la empresa BREAK FIX Trauma México, se escaneo cada uno de sus componentes para obtener la parametrización por medio de un escáner digital de la marca DAVID Vision Systems. Se utilizó un software CAD para pasar de formato STL a Solid Works V2020 versión estudiante.

Se elaboraron las piezas de la prótesis tumoral de rodilla ingresando las propiedades mecánicas de ambos materiales como son: la constante de Poisson, la densidad, el módulo de elasticidad, y el esfuerzo ultimo a la fluencia, los dos últimos fueron obtenidos de las pruebas de tensión. La Fig. 4 muestra el ensamble en explosión de los componentes de la prótesis digitalizada con escáner y la Tabla 1 muestra el nombre de cada uno de los componentes ensamblados y el material del cual están fabricadas.

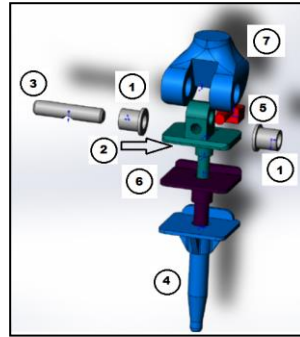


Fig. 4. Ensamble total de componentes de prótesis tumoral de rodilla.

A continuación, se da un listado en la Tabla 1 de los componentes de la prótesis tumoral de rodilla referenciado a la Fig. 4, junto con los materiales de cada uno de ellos, las piezas elaboradas con UHMWPE son el buje rotativo, la chaveta y la funda articulada.

TABLA 1
LISTADO DE PIEZAS DE COMPONENTES DE PRÓTESIS

No. pieza	Descripción	Material
1	Buje Rotativo	UHMWPE
2	Funda Articulada	Ti4Al6V
3	Perno sostén	Ti4Al6V
4	Platillo Tibial	Ti4Al6V
5	Chaveta o seguro	UHMWPE
6	Funda Articulada	UHMWPE
7	Componente femoral	Ti4Al6V

B. Caso de estudio

Se realizaron análisis estáticos durante la actividad cotidiana de ponerse en cuclillas que demanda un ángulo de 130 grados entre el fémur y la tibia [4] Se seleccionaron la actividad antes mencionadas debido al picos de fuerza que se presenta en un determinado momento de la actividad (véase Fig. 5).



Fig. 5. Condiciones de ángulo entre fémur y tibia en la posición en cuclillas.

La actividad más exigente en carga y flexión es la posición en cuclillas por lo que se realizó el cálculo de fatiga en tiempo de vida y ciclos altos. Durante la actividad el peso del cuerpo se eleva hasta 5.6 veces según los autores Mow y David [5], [6]. En ese punto tenemos un valor de carga de 3844.21 N. Esto tomando como referencia al fenotipo masculino del paciente mexicano con un peso de 70 kg y 1.75 m. Se obtiene la carga multiplicando 5.6 veces por el peso del paciente en Newton.

Tomando en consideración el valor del área transversal de la prótesis en la parte del fémur la cual es de 641.30 mm², por lo cual esfuerzo aplicado a la prótesis es de 3 MPa.

5

Para la presente investigación se han utilizado dos tipos de análisis: estáticos y de fatiga, esto se debe a que es necesario al menos un estudio estático para definir el análisis a la fatiga.

Cada buje está sometido a una carga de 961.05 N con un ángulo de aplicación de 130°, ángulo formado entre la tibia y el fémur, la carga varía de 0 a los 961.05N.

El material del buje es un polietileno de ultra alto peso molecular UHMWPE, con un esfuerzo último a la fluencia de $S_y = 24$ MPa y una resistencia a la tracción $S_u = 35$ Mpa, y una elongación del 400%.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se analizó qué secciones son las críticas en el buje. En este caso la sección crítica será aquella donde existe concentración de tensiones. Por lo tanto, la sección crítica en este caso es donde se encuentra los ángulos de 90° (véase Fig. 6).

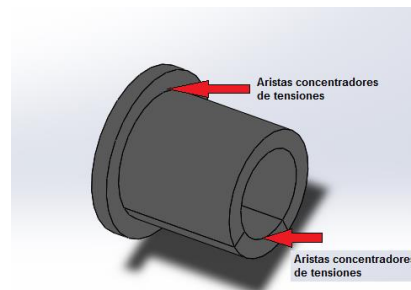


Fig. 6. Zona de concentración de esfuerzos.

Como se puede observar (véase Fig. 7), la sección donde se presenta la mayor concentración de esfuerzos es la parte interna del buje, donde se encuentra en contacto con el perno de soporte, con una tensión máxima de 12.733 MPa.

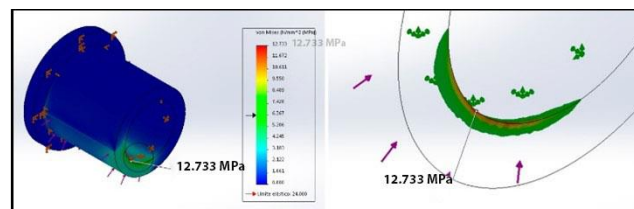


Fig. 7. Resultados de concentración de esfuerzos en el buje.

Después de haber realizado el análisis estático, el cual será la base para el estudio de referencia del análisis de fatiga. Se utilizó un análisis de fatiga de alto ciclaje de duración infinita, utilizando un valor de 106 ciclos para una vida infinita. Al obtener el límite a la fatiga, se expresa como sigue:

$$S_e = k_f k_r S'_e \quad (1)$$

6

donde:

S_e , límite a la fatiga modificado.

k_f , factor de acabado superficial.

k_r , factor de confiabilidad.

Tomando en consideración que la carga aplicada al buje es normal por lo que:

$$S'_e = 0.45 S_u \quad (2)$$

donde:

S'_e , límite a la fatiga modificado.

S_u , resistencia a la rotura del material.

Sustituyendo valores para obtener el límite a la fatiga modificado en 2:

$$S'_e = 0.45 \times 35 = 15.75 \text{ MPa}$$

Sustituyendo el valor del límite a la fatiga modificado para obtener el límite a la fatiga. El factor de acabado superficial se obtiene de la ecuación:

$$k_f = e S_{ut}^f \quad (3)$$

donde:

k_f , factor de acabado superficial.

e , factor de maquinado.

f , exponente.

S_{ut} , resistencia a la rotura de tensión.

El valor del esfuerzo último a la tensión para el UHMWPE es:

$$S_{ut} = 37 \text{ MPa}$$

De la siguiente Tabla 2 obtenemos los factores e y f , para el proceso de fabricación de maquinado [7].

TABLA 2.
VALORES DE E Y F PARA OBTENER FACTOR DE MAQUINADO.

Proceso de fabricación	Factor e	Exponente f
Arranque de viruta (Torneado)	4.51	-0.256

Sustituyendo los valores de la tabla 2 en la ecuación 3 tenemos los siguientes:

$$k_f = (4.51)(37)^{-0.265} = 1.73$$

Se tomará una confiabilidad del 99.99%, corresponde un factor de confiabilidad del $k_r = 0.70$ debido a que el material utilizado cumple con los estándares establecidos para ser utilizado en piezas biomédicas.

Sustituyendo los valores obtenidos en la ecuación 1, se obtiene el límite a la fatiga

$$S_e = (1.73)(0.70)(37) = 44.8 \text{ MPa}$$

Por lo que tenemos un valor del límite a la fatiga modificado de 44.8 MPa. El análisis a la fatiga se utilizó 106 ciclos con base a un tipo de carga que va de cero a 961.05 N.

Se muestran dos resultados principales del análisis de fatiga uno de daño y otro de vida.

Daño. Muestra el porcentaje de vida de la pieza consumido por el suceso de fatiga definido. En la Fig. 8 se puede observar que el valor máximo que se obtiene en la sección inicial del buje. Este trazado es un buen indicador para observar dónde fallará la pieza.

Vida. Es el resultado que nos da el número de ciclos en los cuales la pieza comenzara a fallar. El buje comenzara a fallar a los 989.564 ciclos en la sección del filo del contacto entre el buje y el perno donde inicia el daño.

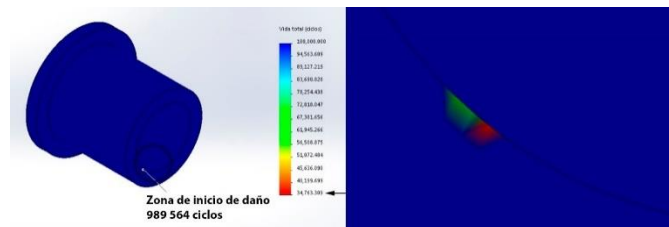


Fig. 8. Imágenes de porcentaje de daño para ubicar el comienzo de la falla por fatiga en la pieza.

Expertos urólogos, explica que no existe información que permita definir un límite normal de visitas al baño, porque la evidencia es escasa y los estudios se realizan, generalmente, en personas que ya tienen problemas.

$$\text{Tiempo de vida para cuclillas} = \frac{\text{Vida total (ciclos)}}{\frac{\text{No. de veces ir al sanitario al día}}{365 \text{ días al año}}} \quad (4)$$

TABLA 3.
RESULTADOS DE BUJES

Pieza	Esfuerzo von Mises (MPa)	Valor limite a la fatiga modificado (MPa)	Vida total ciclos	Tiempo de vida (años)
Buje	12.73	44.8	34763.30	15.8

8

El tiempo promedio de vida de sus componentes elaborados con UHMWPE, el cual es aproximado de 15 años en condiciones de implantación adecuada y uso pasivo [8], [9].

La obtención del análisis de fatiga de los bujes de la prótesis por evaluación numérica obtuvo resultados acordes a diferentes referencias bibliográficas. Se determinó la ubicación de inicio de falla, así como su tiempo de vida para organizar revisiones periódicas y evitar las fallas súbitas y así programar cirugías mayores. La herramienta de evaluación numérica está plenamente comprobable que es una ayuda en la toma de decisiones. Ya que de otra forma las pruebas de solo se podrían realizar con máquinas especiales a un alto costo y largo tiempo de pruebas.

IV. CONCLUSIONES

El buje presenta una alta concentración de esfuerzos debido a que tiene mayor área de contacto entre el buje y el perno en la posición de cuclillas.

El valor límite a la fatiga modificado del buje de UHMWPE no sobre pasa el valor de von Mises por lo que la falla no es de forma inmediata.

Se obtuvo un valor de vida de 15 años para los bujes de acuerdo con sus condiciones de acabado según el proceso de maquinado. Como el buje es de material UHMWPE y este al presentar falla por fatiga la prótesis deberá ser sustituida completamente, involucrando al paciente en una cirugía y el proceso de rehabilitación. Los años de vida de los bujes coinciden con diferentes los diferentes autores los cuales indican que la prótesis tiene un tiempo de vida de 15 años.

REFERENCIAS

- [1] S. M. Kurtz, *UHMWPE Biomaterials Handbook*, USA: Elsevier, 2016.
- [2] E. Dieter, *Metalurgia mecánica*, México: Aguilar, 2000.
- [3] I. ASTM, *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, USA: ASTM International, 2003.
- [4] A. Swanson, "The deep squat (part 1 -the good, the bad, & the not so ugly)", url: <https://www.aaronswansonpt.com/the-deep-squat-part-1-the-good-the-bad-the-not-so-ugly/>
- [5] V. C. Mow, *Basic Orthopedic Biomechanics*, New York: Reven press, 1991.
- [6] D. David, "In Vivo Tibial Force Measurement After Total Knee Arthroplasty", *Bioengineering*, pp. 37-55, 2007.
- [7] J. Hamrock, *Diseño de elementos de máquinas*, México: Mc Graw Hill, 2000.
- [8] J. C. Baena et al., "Wear Performance of UHMWPE and Reinforced UHMWPE Composites in Arthroplasty Applications", *Lubricants*, vol. 3, no. 2, pp. 413-436, 2015.
- [9] K. O. Buehler et al., "The press-fit condylar total knee system: 8- to 10-year results with a posterior cruciate-retaining design", *Arthroplasty*, vol. 15, no. 6, pp. 698-701, 2000.

Revisión del estado actual de los destiladores solares para la producción de alcohol

A Review of the Current State of Solar Stills for Alcohol Production

Donaji **Melchor Quintas**¹, Ignacio **Carvajal Mariscal**², Pedro **Quinto Díez**³

Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO

¹ <https://orcid.org/0000-0001-8645-1766> | dmelchorq2200@alumno.ipn.mx

² <https://orcid.org/0000-0003-2641-9398> | icarvajal@ipn.mx

³ <https://orcid.org/0000-0002-2669-7307> | pquintod@ipn.mx

Recibido 01-03-2023, aceptado 27-05-2023.

Resumen

La pandemia de COVID-19 condujo, entre otras cosas, a la escasez de alcohol etílico en México, principal componente del gel antibacterial. Esto principalmente se debe al repentino aumento en la demanda, pero también a la limitada producción. Para evitar que se repita este escenario es imprescindible buscar otras fuentes de abastecimiento, siendo la producción de bebidas alcohólicas, artesanal e industrial, la mejor opción. Sin embargo, es importante que la producción de alcohol sea sustentable. Una alternativa al proceso de destilación es la aplicación de energía solar, que resulta en una solución eficiente para satisfacer las necesidades actuales, además de ser amigable con el medio ambiente al no generar emisiones contaminantes y usar un recurso renovable que es gratuito. Muchas regiones del país también pueden beneficiarse de esta tecnología, México tiene bebidas autóctonas y con denominación de origen como el tequila o el mezcal. En el presente artículo se realiza una revisión profunda de la producción científica sobre los prototipos que se han desarrollado para destilar alcohol tanto en el extranjero como en México.

Palabras clave: energía solar, destilador solar, destilación, alcohol.

Abstract

The COVID-19 pandemic led, among other things, to a shortage of ethyl alcohol in Mexico, the main component of antibacterial gel. This is mainly due to the regrettable increase in demand, but also due to limited production. To prevent this scenario, it is essential to look for other sources of supply, with the production of alcoholic beverages, artisanal and industrial, being the best option. However, it is important that alcohol production is sustainable. An alternative to the distillation process is the application of solar energy, which results in an efficient solution to meet current needs, as well as being friendly to the environment by not generating polluting emissions and using a renewable resource that is free. Many regions of the country can also get worse from this technology, Mexico has native drinks and with denomination of origin such as tequila or mezcal. In this article, an in-depth review of the scientific production on the prototypes that have been developed to distill alcohol both abroad and in Mexico is carried out.

Index terms: solar energy, solar still, distillation, alcohol.

I. INTRODUCCIÓN

El elemento principal del gel antibacterial es el alcohol etílico, se produce de la fermentación de la caña de azúcar, por ejemplo. En la actualidad es indispensable que todas las instancias de gobierno, centros educativos, oficinas y, en general, cualquier tipo de edificio cuenten con alcohol en gel como medida sanitaria, además de otras precauciones para el cuidado de la salud de los usuarios; en consecuencia, se podría generar un desabasto de este producto en el país, así como en Estados Unidos.

2

Los procesos de fabricación de bebidas alcohólicas más representativas de México como el mezcal o tequila, podrían funcionar como una alternativa para el abastecimiento de alcohol. Sin embargo, es importante que la producción de alcohol sea sustentable. La destilación de alcohol utilizando energía solar es una posible solución, cada día es más notable la preocupación por el medio ambiente, el uso de tecnologías que no solo ayuden a transformar la energía y aprovecharla, si no también produzcan ahorros monetarios y ambientales.

Algunos de estos dispositivos podrían ser los destiladores solares, se realizan evaluaciones de sus estructuras para igualar los resultados entregados por un proceso convencional de destilación y poder innovar en diferentes ámbitos. El producto obtenido es el alcohol etílico, definido por su olor peculiar, de forma líquida, no posee color y se representa por: $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$. Las aplicaciones del alcohol etílico son diversas, se puede encontrar como materia prima para llevar a cabo reacciones de síntesis, en acetatos simplifica la impresión y pintado. A nivel industrial, al contener un nivel bajo de humedad se usa como componente principal para la síntesis orgánica. Su producción se genera a partir de productos vegetales, por ejemplo, plantíos de azúcar y almidón conjuntamente con la fermentación, esta genera un alcohol con una concentración de 10% v/v. Si el objetivo es generar un alcohol puro o con una concentración superior, se adicionan cantidades de energía mayores para producir la destilación, la aplicación de los destiladores solares como opción de reducir la energía sin afectar la concentración de alcohol cobra sentido. Se encuentran publicados trabajos sobre destilación solar de alcohol, se mencionarán los más relevantes a la fecha.

Namprakai y Hirunlabh [1], utilizan la metodología de Spalding [2] y Kiatsiriroat et al., [3], de esta forma logran predecir la transferencia de masa en el proceso de destilación solar de alcohol, realizaron mediciones de temperaturas en la superficie de evaporación y condensación, concentración de alcohol, al final logran modelar una correlación, que mide el flujo de transferencia de masa. Las mediciones experimentales se asemejan a los resultados previos obtenidos con el modelado, las ecuaciones permiten utilizarse para predecir flujos máxicos de alcohol presentes en el proceso. Rattanapol et al. [4] utilizan también el modelo Spalding, [2] y la ley de difusión de Fick y obtienen el rendimiento de etanol en un destilador solar tipo caseta, utilizan diferentes concentraciones de etanol-agua, miden la temperatura y con esto logran predecir el coeficiente y la conductancia de transferencia de masa en el dispositivo, otro punto clave fue la integración de aletas al destilador, el producto obtenido fue una disolución de alcohol de 10% v/v, con esta adición en las pruebas descubrieron un aumento del 15.5% en el rendimiento con respecto a un destilador normal. Teóricamente se estimó un aumento de la eficiencia de hasta 46%.

Datos más recientes se describen en el trabajo de Namprakai y Hirunlabh [5], realizan un modelado en estado transitorio para destilar etanol con energía solar y nuevamente usan como base el estudio de Spalding, [2], para calcular el rendimiento. El rendimiento promedio de 0.33 kg/h, mientras que el nivel de radiación promedio de 1.95 MJ/m²/h. Se eligieron los valores de concentración de 74, 59 y 24 % v/v y la concentración de etanol de 50, 30 y 10% v/v. Un dato relevante es que hay una correlación lineal entre los promedios de radiación solar diaria con el rendimiento diario obtenido. Concluyen que para concentraciones mayores al 80% v/v de etanol la radiación podría ayudar a mejorar el rendimiento del dispositivo.

Actualmente proyectos relacionados con la destilación solar de alcohol son muy escasos, por ello resulta interesante analizar los trabajos que se centran en este tema, y abre el camino para impulsar la utilización de la energía solar en aplicaciones de calentamiento de fluidos a bajas temperaturas para la fabricación de alcohol.

II. DESTILACIÓN SOLAR

Los destiladores son dispositivos que aprovechan la energía solar, reproducen los ciclos naturales de evaporación y condensación (efecto invernadero) para purificar algún líquido como agua. Al finalizar el proceso, se obtiene un producto libre de bacterias, hongos, virus, sales y otro tipo de contaminantes para el consumo humano [6]. Una de las aplicaciones es la producción de alcohol, ya sea para uso médico o para consumo en bebidas alcohólicas.

En los procesos que se requieren para aumentar la temperatura del fluido de estudio y convertirlo en vapor se requiere de materiales que permitan la atracción de la energía solar al destilador. La radiación infrarroja es absorbida por alguna superficie de color oscuro. El colector debe estar aislado térmicamente por la base con el fin de contener las pérdidas por conducción y convección de calor. Cuando el fluido se calienta se produce la evaporación, posteriormente fluye sobre la cubierta de vidrio o algún otro material colocado sobre el evaporador con una inclinación y distancia adecuadas [6].

Los elementos de un destilador son:

- Colector solar. Donde se coloca el fluido de trabajo, debe ser de materiales con buena absorción térmica, pero también anti corrosivo. Deberá soportar altas temperaturas.
- Evaporador. Se presenta este fenómeno en la superficie del fluido.
- Cámara de aire. Es el espacio entre el fluido y la cubierta (condensador), contiene aire que servirá como medio de transporte a las moléculas del fluido que subirán por difusión molecular.
- Condensador. Debe tener una temperatura menor a la del destilador. Su eficiencia está relacionada con el área que tiene, es importante que se encuentre ventilado, con esto se asegura una temperatura baja adecuada.
- Recolección del condensado. Se debe recolectar el producto de forma que no se contamine y no se vuelva a evaporar.

III. TIPOS DE DESTILADORES

Destilador de Tipo Caseta

Dispositivo compuesto de una bandeja que sostiene al fluido a destilar, está cubierta por un techo de dos aguas que cumple una doble función, como efecto invernadero y condensador. Su construcción, operación y mantenimiento es muy fácil, por lo mismo, resulta menos eficiente que los más complejos.

En la siguiente figura se detalla un corte isométrico de un colector tipo caseta, usado para obtener agua potable para el consumo de una familia pequeña. El vidrio tiene un espesor de 3mm, el cuerpo del destilador está construido de lámina de hierro galvanizada. La espuma de poliestireno es la que comúnmente se usa como aislante. Para llenarlo se usa un flotador normal para tinaco.

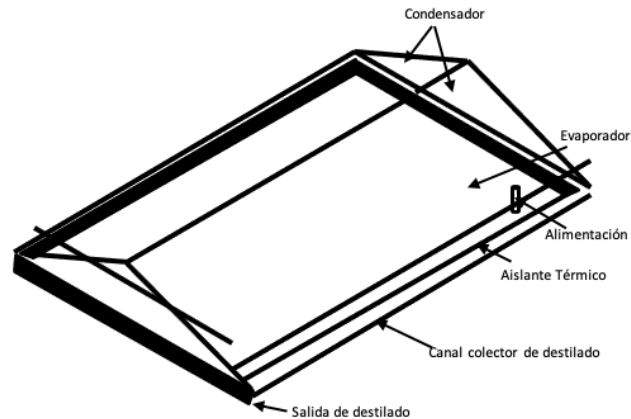


Fig. 1. Esquema de un destilador de caseta.

Meukam et al. [7] presentan un estudio experimental de dos alambiques solares, un modelo de un solo compartimento y otro dispositivo con dos compartimentos. Un estudio experimental de la inclinación óptima muestra que un ángulo de 16 grados asegura una buena transmisión de la radiación solar dentro del alambique, al tiempo que evita que las gotas del destilado caigan en la cubeta. En el prototipo que utiliza dos compartimentos, el vidrio del compartimento descubierto es una cubierta transparente con una parte de la condensación sucediendo sobre él, mientras que el otro compartimento, también de vidrio, está cubierto con un material no transparente, que da sombra al sol; se usa solo como un condensador. Se ha observado que la destilación de una solución inicial de alcohol al 38% produce un producto que contiene 48% de alcohol cuando se usa el modelo de una sola tapa, mientras que en las mismas condiciones climáticas la solución con dos compartimentos da un destilado de alcohol del 71%.

Destilador de Tipo Escalera

En la Fig. 2 se muestra este dispositivo que está compuesto de diferentes charolas colocadas en forma de cascada a diferentes niveles y unidas por un panel vertical formando una escalera. Se nota claramente que el área disponible para absorber la energía solar es mayor a que si solo se tuviera una bandeja.

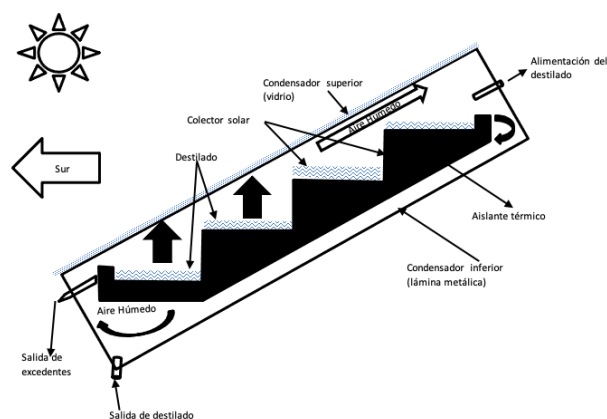


Fig. 2. Corte esquemático de un destilador solar de escalera.

Destilador con Colector Solar Auxiliar

Es una combinación de una bandeja que contiene el agua caliente con un destilador solar de tipo caseta. Se combina el principio de un destilador convencional, con el extra de área que se tiene para absorber energía solar, y además el área extra no pierde las bondades de la transferencia de calor conforme se evapora el agua de la bandeja ni por el vapor que se condensa en la cubierta. Se muestra un ejemplo en la figura 3.

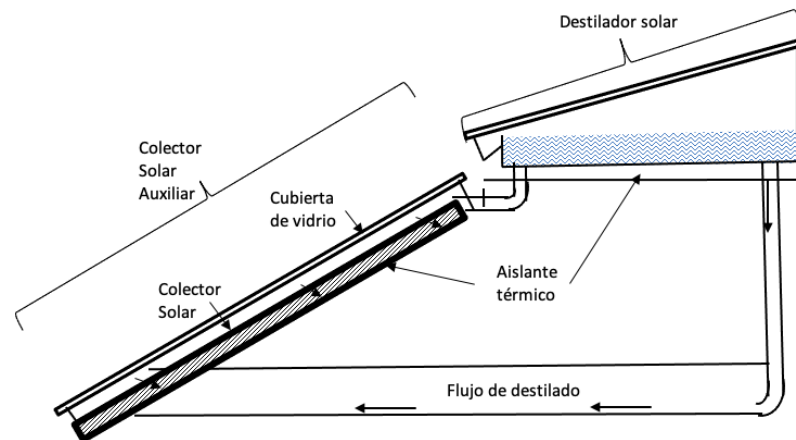


Fig. 3. Diagrama de un destilador con colector auxiliar.

Destilador de Múltiple Efecto

En la Fig. 4 se observa un colector de efecto múltiple. Funciona con diferentes bandejas, cada una a distinta temperatura, de manera que el flujo de calor pasa del destilador a la bandeja más caliente y es entonces donde ocurre la evaporación del fluido.

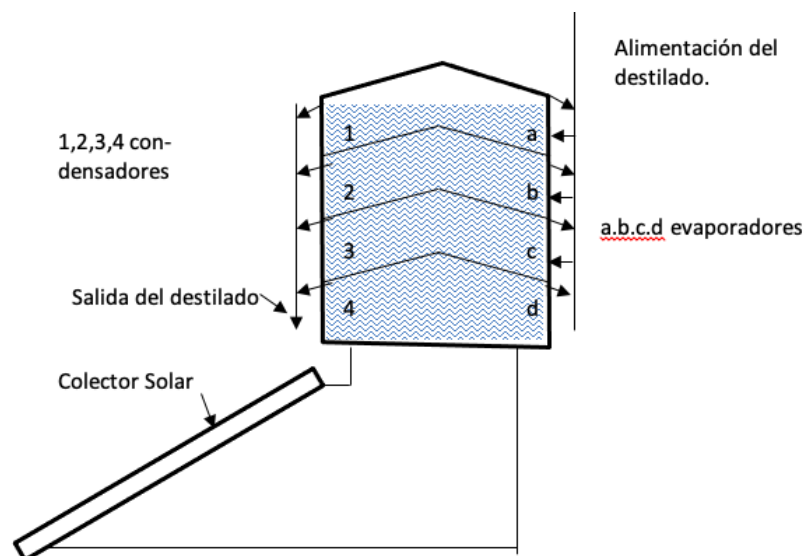


Fig. 4. Destilador solar de múltiple efecto.

Destilador Solar Cilíndrico Parabólico

Este dispositivo es más común ya que cubre una amplia gama de aplicaciones. Son destiladores solares con foco lineal, su principio consiste en procesar la radiación solar directa y entregarla en energía térmica, se logra por el incremento de la temperatura del fluido de trabajo, como máximo se han alcanzado temperaturas de 400 °C. Entran en la categoría de colectores solares de media temperatura [8].

6

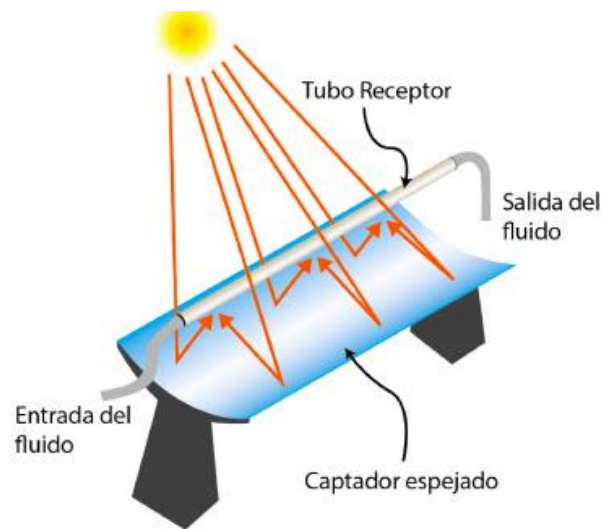


Fig. 5. Esquema de un destilador cilíndrico parabólico.

Cruz Martínez et al. [9] propusieron un dispositivo de tipo cilíndrico parabólico con el fin de fabricar mezcal. Su metodología consiste en diseñar el prototipo con técnicas de manufactura asistida por computadora CAM para construir la estructura y garantizar una geometría parabólica. Los materiales que utilizan son altamente selectivos, como una placa de acrílico acabado espejo como superficie reflexiva. Concluyen que es factible la construcción de estos dispositivos para el uso en la industria mezcalera. Gran parte de las investigaciones destacan al destilador de agua, y como se mencionó anteriormente, el grado de evaporación varía ligeramente, pero es fundamental tomar en cuenta este parámetro, ya que es el que definirá la calidad del destilado.

Destilador Solar Esférico

Bernard y Barrera se enfocaron en resolver el tema de la luz que reflejan las gotas de agua que se condensan en la superficie del vidrio que actúa como condensador en el destilador convencional. Muy similar al que forma parte del destilador de caseta. El cambio está en el condensador, que tiene la forma de un domo esférico o semiesférico, construido comúnmente de acrílico, en la parte más alta contiene un motor eléctrico con el propósito de hacer rotar un elemento limpiador parecido a los parabrisas de los coches. Este efecto logra que las gotas de agua que se condensan bajen de manera forzada y se mejore la absorción de energía solar.



Fig. 6. Destilador solar esférico.

Otros autores utilizaron colectores planos, como Jorapur et al. [10] su experimento se llevó a cabo de forma exitosa para destilar alcohol. El área que usaron fue de 38 m^2 , el diseño consistió en acoplar este dispositivo a una planta de destilación a escala con una capacidad de 1.8 l/h del 95% v/v de etanol. Los datos recopilados en este sistema durante 4000 horas de funcionamiento muestran que en promedio la insolación diaria fue de $6 \text{ kWh/m}^2 \text{ día}$. La tasa media de producción de etanol específico fue de $0,63 \text{ l/m}^2 \text{ al día}$ y la carga solar anual fue del 65%. Se desarrolló una correlación entre las tasas de producción de alcohol y la carga solar para diferentes niveles de insolación. Sin embargo, el costo del sistema de placa plana para la producción de alcohol fue muy alto. También Vargas-B et al. [11], examinan las dimensiones, los caudales volumétricos y las capacidades térmicas de una destilación de etanol con un sistema que aprovecha la energía solar como energía primaria. Se aplica un riguroso análisis de equilibrio termodinámico para obtener el diseño crítico. Se realiza un análisis para estudiar su efecto en el diseño del destilador solar. Detalles técnicos importantes, como la configuración del sistema de destilación solar, el tamaño de las columnas de destilación, el servicio térmico del hervidor, el consumo de energía por unidad de masa de producto destilado, fracción solar y área colectora, entre otros, son evaluados y presentados como una guía para los diseñadores. La metodología desarrollada se utiliza para diseñar el sistema solar de destilación de etanol y puede ser extendido a otras ubicaciones geográficas, condiciones climáticas y parámetros operacionales.

IV. RENDIMIENTO TÉRMICO

Para evaluar los cambios que se le hagan a un dispositivo es importante este concepto, para comparar dos colectores que han sido diseñados de formas diferentes. También se le conoce como eficiencia térmica, se define como el cociente entre el calor necesario para evaporar el volumen de agua que se obtiene como destilado y el calor que recibe del Sol, ambos tomados en un periodo de tiempo dado que suele ser un día. Se puede interpretar a la eficiencia térmica como una medida de la fracción de calor que realmente se usa en el proceso evaporación condensación. Si se tiene un valor de 1.00 significa que toda la energía solar se aprovecha en dicho proceso, 0.50 significa que sólo la mitad se emplea para destilar y la demás se pierde al ambiente. Otro parámetro utilizado para realizar una comparativa del funcionamiento de los destiladores es la productividad, se define como el volumen de destilado que puede producir un destilador por cada metro cuadrado de colector-evaporador y por cada día de operación. Puede medirse de forma mensual o más, y se usa un promedio durante el número de días de ese periodo [12].

En resumen, en la Tabla 1 se realiza una comparativa de prototipos construidos hasta el momento.

Autor	Año	Artículo	Tipo de Destilador	Objetivo	Tem Máx	Eficiencia η	Materiales	Instrumentos utilizados	Producto Obtenido	País
Meukam et al. [7]	2004	Experimental optimization of a solar still: application to alcohol distillation	De caseta	Comparar dos destiladores, de 1 y 2 compartimientos.	76	1675 ml concentración alcohol (ca) 45%	Madera y vidrio.	Piranómetro	koutoukou	Egipto
Cruz Martínez et al. [9]	2013	Propuesta de un prototipo de concentrador solar para la destilación de mezcal en la región mixteca oaxaqueña	Cilíndrico Parabólico	El proceso de diseño y manufactura de un prototipo de concentrador solar del tipo parabólico.	102	Ca 40%	MDF, acero al carbón, hierro.	Termómetro, Manómetro, Medidor de flujo y Medidor de flujo de vapor.	Mezcal	México
Jorapur et al. [10]	1991	Alcohol distillation by solar energy	Colector Solar plano.	Uso de energía solar para destilar alcohol.	62	1800 ml ca 95%	Aluminio, tubería de cobre.	Termómetro, Manómetro, Medidor de flujo	Etanol.	India
Vargas-B et al. [11]	2013	Thermal analysis of a solar distillation system for ethanol-water solutions	Colector Solar plano.	Análisis termodinámico del destilador para etanol.	150	4850 ml ca 95%	Tubos evacuados	Termómetro, Manómetro, Medidor de flujo	Etanol.	México
Chávez Sánchez S. [13]	2020	Destilación de alcohol etílico empelando energía solar	Tipo Caseta	análisis del proceso de destilación solar de la mezcla de agua desionizada con alcohol etílico al 70%,	90	Alcohol Etílico al 70%	Vidrio y Aluminio	Refractor, Piranómetro	Alcohol Etílico al 70%	México
Ascencio San Pedro D.E. [14]	2022	Destilador solar de alambique De cobre con agua como fluido De trabajo para la producción de mezcal.	Cilíndrico Parabólico		90	Ca 40%	Cobre	Termómetro, Manómetro, Medidor de flujo	Mezcal	México

V. CONCLUSIONES

La destilación solar de alcohol es un campo poco explorado en México que presenta un amplio potencial por el impacto en ahorros que puede generar, además de la reducción de emisiones al no depender del uso de combustibles convencionales (leña, por ejemplo). La finalidad de la presente revisión bibliográfica fue evidenciar la falta de investigación en el uso de destiladores solares para la producción de alcohol, y en particular, surge la necesidad de aplicar energía solar al proceso de producción del mezcal, el cual se ha generado de una técnica tradicional artesanal, que puede llegarse a acoplar con el uso de energía termo solar sin que ello represente un impacto negativo al proceso.

Después de la crisis sanitaria por COVID se hizo evidente el uso de procesos independientes para la producción de alcohol, de esta forma resulta natural acoplar un sistema de destilación solar que no requiere combustible, el recurso solar está disponible en prácticamente todo el territorio nacional, con niveles promedio de entre 4.5-6 kWh/m², además de que los retornos de inversión al utilizar tecnología renovable han bajado en los últimos años debido a la disminución del costo de los materiales con los que están diseñados. Otro problema preocupante en la última década es el incremento de los contaminantes emitidos a la atmósfera, al utilizar el recurso solar, disminuimos los impactos negativos al planeta.

Aparte de su uso en gel antibacterial, existe una amplia variedad de aplicaciones que indirectamente utilizan el alcohol etílico como materia prima, tales son: productos químicos intermedios y disolventes en las industrias de textiles, colorantes, productos químicos, detergentes, perfumes, alimentos, bebidas, cosméticos, pinturas y barnices.

REFERENCIAS

- [1] P. Namprakai, "Ethyl Alcohol Distillation in a Basin Solar Still", *Renewable Energy*, pp. 169-175, 1997.
- [2] P. Spalding, *Convective Mass Transfer*, Londres: Edward Arnold, 1993.
- [3] T. Kiatsiriroat, "Prediction of Mass Transfer in Solar Still", *Energy*, vol. 11, pp. 881-886, 1986.
- [4] P. Rattanapol, "The Thermal Performance of an Ethanol Solar Still with fin plate to Increase Productivity", *Renewable Energy*, vol. 54, pp. 227-234, 2013.
- [5] P. Namprakai, J. Hirunlabh, "Theoretical and Experimental Studies of an Ethanol basin Solar Still", *Energy*, vol. 32, p. 2376-2384, 2007.
- [6] A. Rojas, *Diseño de un destilador solar destinado a la potabilización de agua de lluvia*, CDMX: Tesis para obtener el grado de Ingeniero Mecánico, IPN, 2015.
- [7] P. Meukama, "Experimental optimization of a solar still: application to alcohol distillation", *Chemical Engineering and Processing*, vol. 43, pp. 1569-1577, 2004.
- [8] C. Paredes, *Diseño de captador solar cilíndrico parabólico para aplicaciones rurales en Paraguay*, Tesis/Ingeniero Técnico de Minas, Especialidad en Recursos Energéticos, Combustibles y Explosivos. Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Minas.: Departamento de Física Aplicada a los Recursos Naturales.
- [9] M. Cruz Martinez, "Propuesta de un prototipo de concentrador solar para la destilación de mezcal en la región mixteca oaxaqueña", *Temas de Ciencia y Tecnología*, vol. 16, n° 49, pp. 45-53, 2013.
- [10] R. Jorapur, "Alcohol Distillation by Solar Energy", *ISES Solar World Congress Proceedings*, pp. 772-777., 1991.
- [11] P. Vargas, "Thermal analysis of a solar distillation system for ethanol-water Solutions", *Renewable Sustainable Energy*, vol. 5, pp. 234-240, 2013.
- [12] J. Hermosillo Villalobos, *Destilación Solar*, Guadalajara: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, 1989.
- [13] S. Chavez Sanchez, "Destilación de alcohol etílico empleando energía solar", *Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química*, pp. 136-145., 2020.
- [14] D. Ascencio San Pedro, "Destilador solar de alambique De cobre con agua como fluido De trabajo para la producción de mezcal", *Revista de Energías Renovables*, n° 45, pp. 21-26, 2022.

Análisis de sistema de potencia para computadora de vuelo de un nanosatélite CubeSat utilizando COTS

Analysis of Power System for Flight Computer of a CubeSat Nanosatellite

Jhonatan Fernando **Eulopa-Hernandez**¹, Hector Giovany **Gallardo-Mercado**², Diego Alfredo **Padilla-Pérez**³

Instituto Politécnico Nacional, Centro de Desarrollo Aeroespacial, MÉXICO

¹<https://orcid.org/0000-0002-5948-0622> | jeulopah@ipn.mx

²hgallardom1800@alumno.ipn.mx

³<https://orcid.org/0000-0001-9120-1200> | dpadillap@ipn.mx

Recibido 14-02-2023, aceptado 31-05-2023.

Resumen

Los dispositivos CubeSats se concibieron con uno de los objetivos de proporcionar a los estudiantes experiencias en el diseño, construcción y pruebas aeroespaciales a escalas reducidas. Debido a esto, los CubeSats poseen ventajas competitivas en comparación con otros satélites; enfatizando el costo, flexibilidad y uso de productos comerciales listos para utilizar (COTS).

Asimismo, la placa de potencia de estos dispositivos juega un papel crucial en el sistema de energía, ya que se encarga de distribuir la energía eléctrica para cada uno de los componentes del satélite, de manera segura y eficiente.

No obstante, el uso de electrónicos no diseñados para misiones espaciales suele comprometer el rendimiento y confiabilidad de nuestro dispositivo. Por tanto, el análisis de la placa PCB es de suma importancia para garantizar el correcto funcionamiento del CubeSat, salvaguardando su integridad y los subsistemas dependientes.

Este documento plantea el análisis de una placa de potencia para la computadora de vuelo, empleando sistemas redundantes, de control y registro de fallos, así como el uso de componentes COTS para su implementación, adaptación y alcance en cualquier entorno industrial, educativo y comercial; con la finalidad de redituar mayormente el funcionamiento del dispositivo.

Palabras clave: nanosatélite, telecomunicaciones, subsistema de potencia, COTS, CubeSat.

Abstract

CubeSats devices were conceived with the goal of providing students with experiences in small-scale aerospace design, construction, and testing. Because of this, CubeSats have competitive advantages compared to other satellites; emphasizing the cost, flexibility, and use of commercial off-the-shelf (COTS) products.

Likewise, the power board of these devices plays a crucial role in the power system, since it is responsible for distributing electrical power to each of the satellite components, safely and efficiently.

However, the use of electronics not designed for space missions often compromises the performance and reliability of our device. Therefore, the analysis of the PCB board is of the utmost importance to guarantee the correct operation of the CubeSat, safeguarding its integrity and the dependent subsystems.

This document proposes the analysis of a power board for the flight computer, using redundant, control and fault recording systems, as well as the use of COTS components for its implementation, adaptation and scope in any industrial, educational and commercial environment; in order to improve the performance of the device.

Index terms: nanosatellite, telecommunications, power subsystem, COTS, CubeSat.

I. INTRODUCCIÓN

Los circuitos impresos son ahora un elemento extremadamente importante en cualquier sector, estos se utilizan principalmente para crear una conexión entre componentes electrónicos como resistencias, sistemas integrados y conectores [1]. Hoy en día, la estandarización de la electrónica ha llevado al uso exitoso de estas placas debido a sus grandes funcionalidades [2], [3]; sin embargo, el comportamiento de las resistencias mecánicas, dinámicas y el comportamiento vibratorio, no han sido estudiados y difundidos ampliamente. Por ende, las placas de circuito impreso tienden a fallar por aspectos de esta índole, seleccionando distintas propiedades físicas, eléctricas y térmicas en función de la aplicación y su eficiencia durante el desarrollo de pruebas de control.

Entre los circuitos impresos estandarizados más utilizados en este campo, se encuentran la placa base y la placa de batería PyCubed. Esta plataforma de código abierto, totalmente programable en lenguaje Python, se utiliza para nanosatélites CubeSat de 1U, permitiendo comunicarse con los diversos subsistemas del CubeSat, como el sistema de energía, las radios y los sensores, y realizar tareas como telemetría, comando y control. El concepto de diseño modular de la placa de circuito impreso (PCB) PyCubed permite al diseñador mantener flexibilidad en el diseño y, al mismo tiempo, tener un diseño de hardware y software seguro dentro del entorno de GitHub, simplificando el principio para el desarrollo de estos dispositivos [4], [5].

Si bien estos modelos comerciales poseen ventajas de mercado competitivas en cuanto al costo de armado y diseño de software libre, la parte estructural de la placa muestra deficiencias ante comportamientos vibratorios. Para abordar las deficiencias generadas entre el modelo experimental y el modelo numérico, algunos autores proponen una caracterización mecánica completa (dinámica y estática) de la placa desprovista de componentes. Sin embargo, estos valores no son considerados suficientes para comprender el panorama completo del funcionamiento experimental, pues no consideran los aportes internos de la PCB ni los componentes, realizando simulaciones numéricas que difieren considerablemente de la realidad [6].

Por lo tanto, este artículo abordará la creación, modelado e implementación de una placa PCB para el sistema de energía eléctrica (EPS, por sus siglas en inglés) para un CubeSat, considerando las normativas aplicables para el trazado de rutas y la colocación de componentes reglamentados para la regulación de potencia.

II. HARDWARE EN CONTEXTO

A. CubeSat basados en Arduino

Arduino se basa en una serie de microcontroladores, que son pequeños dispositivos electrónicos programables. Estos microcontroladores están conectados a una placa de desarrollo, que a su vez se conecta a una computadora a través de un cable USB. El usuario puede escribir y cargar programas en el microcontrolador utilizando un entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino o utilizando editores de código compatibles.

El Arduino y la electrónica asociada son útiles para la automatización de una amplia gama de proyectos [7], la popularidad de esta plataforma de hardware libre y de código abierto se debe a su facilidad de uso y accesibilidad para personas sin conocimientos previos.

Este producto COTS de código abierto, tiene una aplicación potencial para nanosatélites contruidos por estudiantes, aficionados e investigadores [8], un popular microcontrolador programable en C/C++ a través del puerto USB.

Dentro de algunos prototipos de CubeSat implementados en Arduino podemos encontrar el ArduSat [9], en referencia a los tres CubeSats de una unidad que se lanzaron en 2013 y 2014. Estos dispositivos albergaban cámaras y sensores IMU para medir y transmitir la orientación con base en el campo magnético de la Tierra,

aceleración lineal de un objeto en los 3 ejes y rotación angular de un objeto; así como sensores de presión, temperatura y luminosidad [10]. Los ArduSats abrieron un panorama más completo de las aplicaciones de los microcontroladores COTS de código abierto, demostrando que si bien, Arduino es apto para proyectos básicos principiantes se puede extrapolar a proyectos avanzados.

En el contexto de CubeSats educativos, la popularidad del dispositivo Arduino y sus licencias de hardware y software abierto permiten que exista una gran cantidad de recursos (ejemplos, tutoriales, proyectos básicos) disponibles en Internet, lo que lo hace aún más flexible para personas que incursionan recientemente dentro del desarrollo de proyectos de ingeniería.

Los productos COTS si bien, mantienen bajo el costo y flexibilidad de los CubeSats, comprometen la fiabilidad y rendimiento del dispositivo al no ser componentes diseñados específicamente para utilizarlos dentro de la rama espacial. Por tanto, es necesario someter nuestro CubeSat a diversas pruebas que corroboren el funcionamiento correcto de los sensores y los componentes electrónicos.

B. CubeSat basado en microcontroladores

Los microcontroladores son un componente fundamental en los CubeSats, ya que proporcionan la capacidad de controlar y monitorear diferentes aspectos del satélite. Los microcontroladores se utilizan para controlar los sistemas de propulsión, la orientación y la posición del satélite, así como recopilar y transmitir datos a la Tierra.

Existen muchos microcontroladores diferentes disponibles para uso en CubeSat, y la elección del microcontrolador adecuado dependerá de las necesidades específicas del proyecto. Algunos de los microcontroladores más comunes utilizados en CubeSat incluyen el AVR de Atmel, el PIC de Microchip y el MSP430 de Texas Instruments.

En diversas ocasiones, se utiliza más de un microcontrolador por placa, asegurando la recopilación de datos y autonomía de cada una de ellas, uno configurado como el PIC principal y otro PIC de reinicio habilitado como perro guardián [11].

III. ESTRUCTURAS DEL SISTEMA DE POTENCIA

Un sistema de potencia de CubeSat es un conjunto de componentes y dispositivos que se utilizan para proporcionar energía eléctrica al CubeSat, sus sistemas y equipos. Los sistemas de potencia de CubeSat deben ser muy compactos y ligeros para cumplir con los requisitos de tamaño y peso de los CubeSat, y deben ser capaces de proporcionar energía suficiente para alimentar el CubeSat durante su operación.

El Sol, al ser la principal fuente de energía en el espacio, es aprovechado en medida por el uso de paneles fotovoltaicos en colaboración con baterías de alta eficiencia para proporcionar energía continua al sistema. Asimismo, los sistemas de potencia de CubeSat suelen incluir fuentes de energía de respaldo, como baterías, o sistemas de energía a gas, dispositivos de control y distribución de energía, como reguladores de voltaje y circuitos de protección [12]. También pueden incluir dispositivos de almacenamiento de energía secundarios, como capacitores o baterías adicionales, que se utilizan para proporcionar energía de respaldo en caso de fallas en la alimentación principal [13].

El sistema de energía eléctrica EPS es el responsable de gestionar la generación, almacenamiento, regulación y distribución de la energía eléctrica dentro del satélite [14].

En el sistema de potencia se pueden encontrar diferentes arquitecturas o estructuras, tales como la estructura TDE (DET, por sus siglas en inglés), regulación de control y potencia (PPT, Peak Power Tracking) y la TED (Transmisión Directa de Energía), se muestra en la Fig. 1.



Fig. 1. Arquitectura TED.

Es notorio que en esta arquitectura se reducen las pérdidas de potencia, al permitir el flujo de energía de manera directa. No obstante, sería necesario que todos los componentes trabajaran bajo el mismo voltaje, limitando el uso de componentes con mayor o menor consumo.

Para ello (véase Fig. 2), se hace uso de la arquitectura PPT en conjunto con el MPPT (Maximum Power Peak Tracking), obteniendo así la máxima potencia entre el balance de voltaje e intensidad de forma para la máxima eficiencia del sistema y teniendo un mayor control en la regulación de potencia.



Fig. 2. Arquitectura PPT.

IV. ESTADOS DEL SISTEMA

Aplicando metodologías de diseño de bajo consumo, se ha optado por la incorporación de circuitos de conmutación tipo MOSFET N Low Side, los cuales regulen el polo GND de alimentación de los dispositivos, permitiendo así reducir la energía del sistema cuando los dispositivos no sean parte de los dispositivos activos en el estado de operación correspondiente [15].

En la Fig. 3, se muestran los estados y principales estados de operación estimados para el control del sistema.



Fig. 3. Estados y dispositivos principales de cada estado de operación.

Se propone la utilización de un sistema basado en un microcontrolador de bajo consumo, entre las opciones se propone la utilización de un microcontrolador de la familia PIC24JG o un microcontrolador de la familia ESP32, partiendo de los conceptos de los sistemas embebidos, se realizará la creación de protocolos fácilmente incorporables en lenguaje C, lo que permite una escalabilidad del proyecto para futuras mejoras.

A fines prácticos del diseño, se maneja el microcontrolador ESP32 debido a ser un microcontrolador con 3 modos de bajo consumo, tener periféricos integrados de reloj en tiempo real (Real Time Clock Calendar RTCC) y contar de igual forma con periféricos de control de caída en su alimentación VLD, periféricos de fácil escritura de memoria ROM (Parallel Master-Port), 12 pines de lectura analógica, pines de comunicación digital, capacidad de implementación de un sistema de tipo RTOS, así como presentar un sistema de interrupciones por prioridades. Cabe mencionar, que este conjunto de periféricos especiales se encuentra también dentro de la familia STM32L, sin embargo, se utilizará el microcontrolador mencionado a razón de ser un microcontrolador de 32 bits con certificación de Hardware tipo B [16].

V. POTENCIA

Para cada uno de estos estados se identificaron dispositivos principales que se encuentran en estado activo. A partir de la hoja de datos de cada dispositivo, se realizó la comparación energética de cada estado para determinar la demanda energética máxima nominal del sistema.

Extrapolando la información de la hoja de datos correspondiente para cada estado, podemos determinar que el estado con mayor demanda energética corresponderá estado de regulación de potencia.

Se destaca que en el modo de reposo la unidad de mayor consumo de corriente es el oscilador de tipo MEMS, el cual es un doble oscilador, uno secundario de 32.768 kHz y el oscilador rápido de 24 MHz. Si bien, la demanda de corriente mencionada corresponde a ambos osciladores activados, el microcontrolador solo requiere el uso del oscilador secundario en modo de reposo, por lo que se requiere medir el comportamiento del oscilador para determinar la corriente real demandada.

A. Paneles solares

Las celdas solares convencionales convierten la energía solar en energía eléctrica por el efecto fotovoltaico existente en la unión semiconductor-semiconductor. El semiconductor más utilizado en este tipo de celdas es el Si monocristalino que realiza dos procesos simultáneamente: absorción de luz y separación de carga

fotogenerada. Estos paneles están fabricados a partir de cristales de silicio puro, que se cortan y pulen para formar células solares individuales y requieren un equipo de producción sofisticado para controlar la calidad del material, lo que aumenta el costo en comparación con una celda policristalina [17].

Los paneles solares monocristalinos tienen una eficiencia de conversión de luz a energía típicamente entre el 15% y el 20%, mientras que los paneles policristalinos tienen una eficiencia de conversión típicamente entre el 10% y el 15%, lo que significa que pueden generar más energía eléctrica por unidad de área [18]. Asimismo, estos paneles son más resistentes a la degradación por el tiempo y a la exposición con el medio ambiente; tienen un rendimiento mejorado en condiciones de baja luz en áreas con menor luz solar disponible y una mayor eficiencia en temperaturas altas, por lo cual, son una opción más eficiente y duradera para generar energía eléctrica a largo plazo.

No obstante, con la finalidad de continuar con el objetivo de los componentes listos para usar (COTS), se seleccionaron unas celdas policristalinas de silicio (véase Fig. 4).



Fig. 4. Paneles solares modelo genérico.

No obstante, la eficiencia en la captación de energía solar depende de la posición en la que se encuentre el CubeSat [19]. Por lo tanto, se colocarán cuatro paneles solares en paralelo, colocados en los costados de la estructura del CubeSat, asegurando de esta manera que cargue en cada una de las posiciones y aumentando la potencia final en MPP.

Se observan las características principales del panel solar seleccionado (véase Tabla 1), así como los cálculos finales correspondientes para la intensidad, voltaje y potencia (véase Tabla 2).

TABLA 1
CARACTERÍSTICAS DE LOS PANELES SOLARES

	Característica	Valor
1	Dimensiones	107mm x 61mm x 2 mm
2	Peso	4.5 gr
3	Eficiencia	Hasta 15%
4	Voltaje en MPP	5.01 v
5	Intensidad en MPP	200 mA
6	Potencia en MPP	1 W

Por lo tanto,

TABLA 2
CÁLCULOS DE POTENCIA FINAL

	Característica	Valor
1	Intensidad total en MPP, I_{MPP}	$4 \times 200 \text{ mA} = 800 \text{ mA}$
2	Voltaje en MPP (Paralelo)	5.01V
3	Potencia total en MPP, P_{MPP}	$4 \times 1 \text{ W} = 4 \text{ W}$

B. Batería

Las baterías para CubeSat son pequeñas, livianas y diseñadas para proporcionar energía a los sistemas y la carga útil del satélite. Estas baterías suelen ser de iones de litio (Li-ion) o de polímero de litio (Li-poly), ya que ofrecen una alta densidad de energía y una larga vida útil. El tipo y tamaño de la batería utilizada dependerá de los requisitos de energía específicos del satélite y su misión, así como sus costos operativos y de lanzamiento, ya que operarán en un entorno hostil y durante un período prolongado [20].

Partiendo de los principios de energía se calculó una demanda energética aproximada.

$$P = V * I = 5V * 3.541 A = 17.705 W$$

Se espera que en uso activo el dispositivo pueda realizar el reconocimiento en un periodo máximo de 1 hora disponiendo únicamente de la batería.

Se propone un sistema de batería de 3.7 V para evitar las pérdidas energéticas por regulación externa y una carga energética de 5000 mAh.

$$I_{BAT} = \frac{17.705Wh}{3.7V} = 4.78 Ah \cong 5000 mAh$$

Se calcula el tiempo aproximado de duración del sistema en modo activo, únicamente los correspondientes dispositivos reguladores de voltaje, sensores y elementos de comunicación satelital.

$$t_{SLEEP MODE} = \frac{3.7 V * 5000 mAh}{3.7 V * 250 mA} = 20 h$$

Se propone entonces como fuente de alimentación del sistema. un circuito de alimentación basado en baterías de LiPo de 3.7 V a 5000 mAh, debido a su relación de energía específica, su recta de carga, así como la naturaleza de su recta de descarga, puesto que presentan una mayor robustez en su uso, permitiendo que el dispositivo pueda operar durante mayor tiempo sin necesidad de cambiar la batería por otra continuamente [12].

Las baterías LiPo son una fuente de alimentación habitual para aplicaciones de usos considerables de corriente y de valores de voltaje estándar. Presenta una gran cantidad variedad de empaquetados y valores nominales en el mercado, asegurando tener una opción económica que cumpla con la demanda energética del sistema.

Se observa la relación de descarga de cada tipo de batería, siendo la Li-ion de las más eficientes (véase Fig. 5).

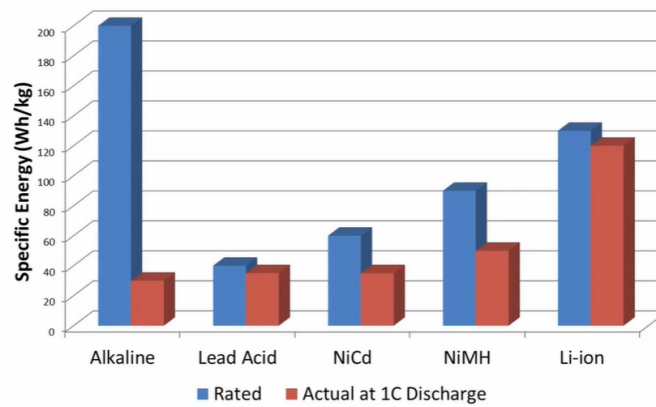


Fig. 5. Relación de descarga en relación con energía específica de distintos tipos de celda [21].

Asimismo, se observa la curva de descarga correspondiente para el tipo de batería seleccionada (véase Fig. 6).

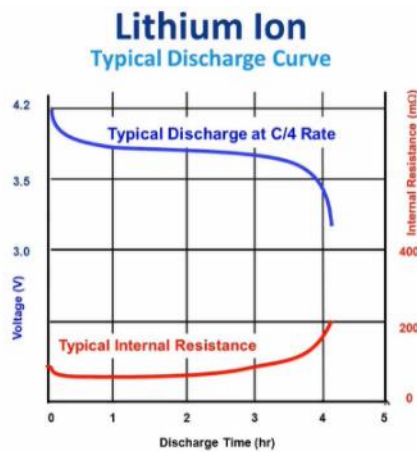


Fig. 6. Recta de descargas de baterías de tipo LiOn y de tipo LiPo [22].

Se muestra el comportamiento de la batería en función de la temperatura de contacto, observando que la batería tiene un comportamiento de descarga exponencial en cada aumento constante de temperatura, por lo cual, es necesario mantener un buen sistema de enfriamiento (véase Fig. 7).

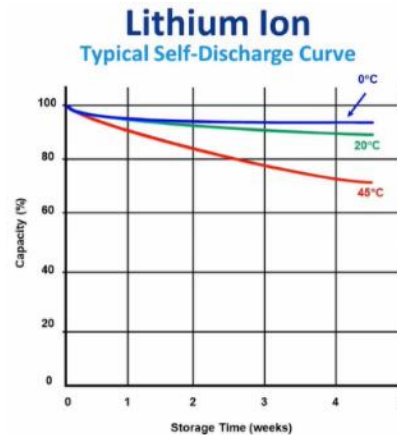


Fig. 7. Recta de descarga por temperatura [23].

C. Redundancia para mayor confiabilidad

Una práctica común para la confiabilidad en sistemas espaciales es aplicar redundancia a subsistemas críticos, como el caso de la EPS. Cuando se aplica redundancia a las unidades completas del subsistema y sus componentes, es posible utilizar conexiones cruzadas entre ellos utilizando interfaces eléctricas redundantes [24]. Para este caso en particular, se aplicaron redundancias en los reguladores primarios de voltaje correspondientes a 5V y 3.3V, asegurando correctamente el funcionamiento clave en caso de falla de algún sistema no secundario.

VI. ENVÍO DE DATOS

La recopilación del conjunto de datos EPS se realizó utilizando una antena XBee S2C PRO que lee los datos del puerto serial a 1 Hz, correspondientes al sensor ADC para la batería del satélite e indicadores de conexión de componentes. Una vez que los datos se envían de los satélites a la estación terrestre, esta lo muestra en pantalla y genera un archivo .CSV como respaldo de información (véase Fig. 8).

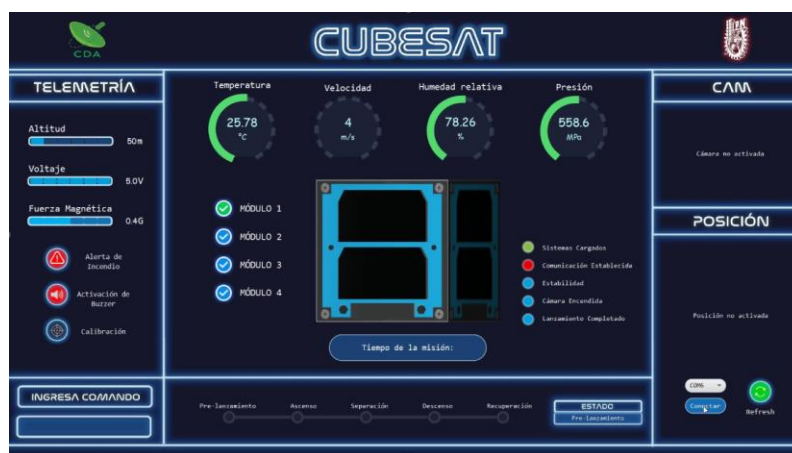


Fig. 8. Estación terrena receptora de datos.

VII. SIMULACIÓN DEL SISTEMA

Con la finalidad de comprobar el funcionamiento lógico del circuito, así como la asignación de pines correspondientes para cada entrada y salida de los componentes; se realizó una simulación de este dentro de la plataforma Wokwi, contemplando el microcontrolador seleccionado y adaptando el modelo a los elementos existentes dentro de la plataforma. De esta manera, se comprobó que la lógica de misión asignada correspondía a lo solicitado, del mismo modo, los pines colocados, así como el voltaje asignado para los componentes se fijaron correctamente (véase Fig. 9).

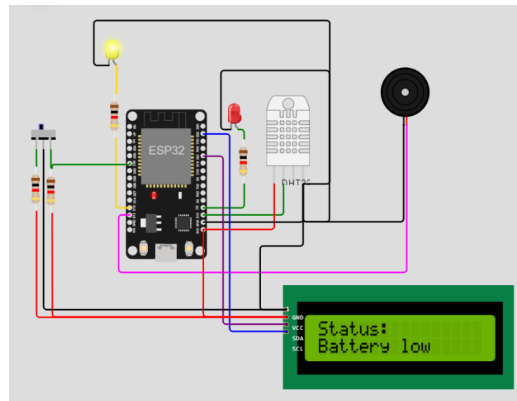


Fig. 9. Simulación realizada en Wokwi.

VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El resultado de la placa de potencia para computadora de vuelo CubeSat muestra redundancia en los sistemas de regulación de corriente seleccionados, así como lógica de misión para la conexión de celdas solares, estado de la batería mediante un ADC y conectividad entre placas, lo que la hace independiente y completamente autónoma (véase Fig. 10).

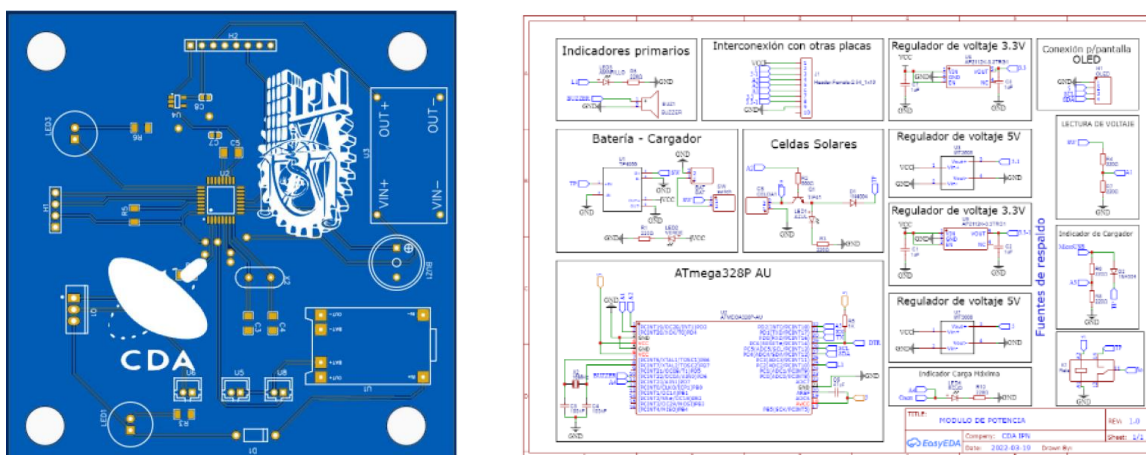


Fig. 10. Resultado placa de potencia EPS para computadora de vuelo de nanosatélite CubeSat.

IX. CONCLUSIONES

El uso de nanosatélites y sistemas remotos se ha vuelto de suma importancia con el pasar del tiempo. Asimismo, la implementación de sistemas versátiles se vuelve cada vez más vital para el desarrollo de nuevos modelos de uso común. Si bien, los CubeSat abren las puertas a países en vías de desarrollo, es necesario poder gestionar y asignar componentes accesibles para cada ambiente industrial, comercial y educativo.

La forma de implementación y diseño dependerá de las características y misión específica del satélite, sin embargo, es necesario seguir al pie de la letra las normativas que regulan el proceso de manufactura del mismo, así como las pruebas necesarias para garantizar su correcto funcionamiento.

El código abierto está reduciendo la barrera de la educación y el acceso a la tecnología en general, como el uso de Arduino o dispositivos STM para proyectos a grandes y pequeñas escalas. Este también podría ser el caso de la tecnología espacial. El CubeSat parece ser una oportunidad ideal para demostrar la versatilidad y aplicación de los componentes de listos para utilizar (COTS).

Sin embargo, el próximo gran paso en la exploración espacial no se logrará a través de la competencia pública y privada de este sector, sino más bien mediante un esfuerzo colaborativo de personas alrededor del mundo, empleando el espíritu del software y hardware libre.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen el apoyo al proyecto con registro 20221341 en el Programa Especial de Consolidación de la Secretaria de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional.

REFERENCIAS

- [1] C. Robertson, *Printed Circuit Board Designer's Reference Basics*, New Jersey, United States of America: Pearson Education, 2003.
- [2] J. Straub et al., "CubeSats and Small Satellites", *International Journal of Aerospace Engineering*, vol. 2019, doi: <https://doi.org/10.1155/2019/9451673>
- [3] J. Straub et al., "OpenOrbiter: A Low-Cost, Educational Prototype CubeSat Mission Architecture", *Machines*, vol. 1, no. 1, 2013, pp. 132, doi: <https://doi.org/10.3390/mach1010001>
- [4] G. Morettini, A. Staffa, E. Mancini, M. Dionigi, F. Cianetti, C. Braccesi, "Simplified Fe modeling of the PyCubed PCB complete with components for CubeSat missions", *Journal of Space Safety Engineering*, vol. 9, no. 3, 2022, pp. 328-340, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsse.2022.06.004>.
- [5] PyCubed, "What is a PyCubed", <https://pycubed.org/>.
- [6] BsC. Güvenç, C. C., BsC. Topcu B., and Ph.D. Tola C., "Mechanical Design And Finite Element Analysis Of A 3 Unit Cubesat Structure", *International Scientific Journal*, vol. 12, no. 5, 2018, pp. 193-196, available: <https://stumejournals.com/journals/mtm/2018/5/193>.
- [7] Joshua M. Pearce, "Economic savings for scientific free and open source technology: A review", *HardwareX*, vol. 8, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2020.e00139>.
- [8] S. Antunes, *Bulding a Space-Ready General Base Picosatellite for Any Mission*, Gravenstein Highway North, United States of America: O'Reilly, 2012.
- [9] *Small Spacecraft Technology State of the Art*, NASA/TP-2015-216648/REV1, National Aeronautics and Space Administration, USA, Dec. 2015, available: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/small_spacecraft_technology_state_of_the_art_2015_tagged.pdf.
- [10] Kenjiro S. Lay, Lingqi Li, Masataka Okutsu, High altitude balloon testing of Arduino and environmental sensors for CubeSat prototype, *HardwareX*, vol. 12, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00329>.
- [11] A. Jara, P. Lepcha, S. Kim, H. Masui, T. Yamauchi, G. Maeda, M. Cho, On-orbit electrical power system dataset of 1U CubeSat constellation, *Data in Brief*, vol. 45, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108697>.
- [12] Aung, H., Soon, J. J., Goh, S. T., Lew, J. M., & Low, K.-S. (2020). Battery Management System With State-of-Charge and Opportunistic State-of-Health for a Miniaturized Satellite. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 56, no. 4, doi: <https://doi.org/10.1109/TAES.2019.2958161>

- [13] Ian F. Akyildiz, Josep M. Jornet, Shuai Nie, A new CubeSat design with reconfigurable multi-band radios for dynamic spectrum satellite communication networks, *Ad Hoc Networks*, Volume 86, 2019, pp. 166-178, doi: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2018.12.004>.
- [14] Gonzalez-llorente, J. (2016). *Análisis de la Capacidad de Almacenamiento de las Baterías para un Satélite CubeSat 3U*.
- [15] Semiconductor Components Industries, “*Using MOSFETs in Load Switch Applications . AND9093*”, LLC, 2014. AND9093/D, available: <https://www.onsemi.cn/PowerSolutions/document/AND9093-D.PDF>.
- [16] Microchip Technology Inc., 2020, *16-Bit General Purpose Microcontrollers with 256-Kbyte Flash and 16-Kbyte RAM in Low Pin Count Packages*, available: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ESP32-Family-Data-Sheet-DS30010118E.pdf>
- [17] Alfredo Olea, Georgina Ponce, P.J Sebastian, Electron transfer via organic dyes for solar conversion, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 59, Issues 1–2, 1999, pp. 137-143, doi: [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(99\)00038-0](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(99)00038-0).
- [18] Nelly Maria Rosas-Laverde, Alina Pruna, Jesus Cembrero, Javier Orozco-Messana, Francisco Javier Manjón, Performance of graphene oxide-modified electrodeposited ZnO/Cu₂O heterojunction solar cells, *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, Volume 58, Issue 6, 2019, pp. 263-273, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2019.06.002>
- [19] Lía Hidalgo de los Santos, “Analysis of the failure modes of the energy management system of a Cubesat”, *INTEC*, available: <https://repositoriobiblioteca.intec.edu.do/handle/123456789/5683?show=full>
- [20] Aloysius F. Hepp, Prashant N. Kumta, Oleg I. Velikokhatnyi, Ryne P. Raffaele, “Silicon Anode Systems for Lithium-Ion Batteries”, *Elsevier*, 2022, pp. 457-508, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819660-1.00011-6>.
- [21] DAN HOLD, "BATTERY CHARGING FUNDAMENTALS, Battery Basics, Discharge Rate , " *Microchip University*,. 18 de Jul. de 2022, available: <https://mu.microchip.com/battery-charging-fundamentals/617408>
- [22] DAN HOLD, "BATTERY CHARGING FUNDAMENTALS, Battery Chemistries, Li-Ion," *Microchip University*,. 18 de Jul. de 2022, available: <https://mu.microchip.com/battery-charging-fundamentals/617418>
- [23] DAN HOLD, "BATTERY CHARGING FUNDAMENTALS, Charging Waveforms, Li-Ion , " *Microchip University*,. 18 de Jul. de 2022, available: <https://mu.microchip.com/battery-charging-fundamentals/617443>
- [24] J. Bouwmeester, A. Menicucci, E.K.A. Gill, “Improving CubeSat reliability: Subsystem redundancy or improved testing?”, *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 220, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108288>.

Revolucionando la gestión de inventarios en una refinería en México: un caso de estudio

Revolutionizing Inventory Management in a Refinery in Mexico: a case study

Adán Acosta-Banda^{*1}, Verónica Aguilar-Esteva², Ricardo Carreño Aguilera³, Miguel Patiño Ortiz⁴

Universidad del Istmo, OAXACA, MÉXICO; Universidad Vizcaya de las Américas, MÉXICO

¹<https://orcid.org/0000-0002-3979-9759> | adan.acosta.b@gmail.com

*autor para correspondencia

Universidad del Istmo, OAXACA, MÉXICO

²<https://orcid.org/0000-0001-6024-4769> | verodemygut@gmail.com

³<https://orcid.org/0000-0002-6240-0152> | ricardo.carreno.a@gmail.com

Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO

⁴<https://orcid.org/0000-0002-5630-8077> | mpatino2002@ipn.mx

Recibido 26-01-2023, aceptado 11-04-2023.

Resumen

En el presente documento se explica el proceso que comprende el diseño y aplicación del Sistema de Gestión de Inventarios (SGI) para la refinería “Ingeniero Antonio Dovalí Jaime” ubicada en el puerto de Salina Cruz, Oaxaca. Este proyecto tiene la finalidad de asegurar las existencias y la dotación oportuna de los Equipos de Protección Personal (EPP) para los trabajadores de la refinería, esto con el fin de contribuir en la prevención de accidentes durante los trabajos realizados dentro de ella. Se desarrolló la propuesta del diseño del sistema para controlar el abastecimiento, los préstamos y la entrega de materiales. Para ello, se evaluó la problemática mediante la metodología preexperimental, la “técnica de los 5 porqué” y la metodología de Planeación del Diseño del Sistema (PDS). Se concluye que se alcanzó una mejora significativa con la aplicación del SGI del Departamento de Auditoría, Seguridad Industrial y Salud Ocupacional (ASISO).

Palabras clave: gestión de inventarios, sistema, Pemex-Refinación, seguridad industrial.

Abstract

This document indicates the application of an inventory management system for the “Ingeniero Antonio Dovalí Jaime” refinery located in Salina Cruz, Oaxaca, in order to ensure the existence and timely delivery of personal protection equipment to the users. workers, and thus contribute to the prevention of accidents during work at the refinery. The system proposal was developed to control the timely supply, loans and delivery of materials. This was achieved in the first instance by evaluating the problem through the pre-experimental methodology and the “5 why technique”, as well as the System Layout Planning methodology (SLP). It is concluded that a significant improvement was achieved in the control and management of inventories of the Department of Audit, Industrial Safety and Occupational Health.

Index terms: inventory management, industrial safety, Pemex-Refining, system.

I. INTRODUCCIÓN

Pemex-Refinación es una empresa dedicada a la industria que procesa, transforma, transporta y distribuye hidrocarburos en donde sistemáticamente se realizan actividades de alto riesgo [1], [2]. Es por esto que, desde hace un poco más de una década de años, Pemex-Refinación se comprometió a transformar profundamente la concepción de la seguridad hasta convertirse en piedra angular de la cultura de negocios [3].

Bajo esta perspectiva, nació el programa de Seguridad, Salud y Protección Ambiental (SSPA), ahora Sistema Pemex-SSPA adoptado en todo PEMEX, implantándose la siguiente política [4], [5]:

~

“Petróleos mexicanos es una empresa eficiente y competitiva, que se distingue por el esfuerzo y el compromiso de sus trabajadores con la Seguridad, la Salud en el trabajo y la Protección Ambiental, mediante la administración de sus riesgos, el Cumplimiento Normativo con disciplina Operativa y la mejora continua”.

Para lograr este objetivo se fijaron los siguientes cinco principios:

PRINCIPIO 1. La seguridad, salud y protección ambiental son valores de la más alta prioridad para la producción, el transporte, las ventas, la calidad y los costos.

PRINCIPIO 2. Todos los incidentes y lesiones se pueden prevenir.

PRINCIPIO 3. La seguridad, salud en el trabajo y protección ambiental son responsabilidad de todos y condición de empleo.

PRINCIPIO 4. En Petróleos Mexicanos nos comprometemos a continuar con la protección y mejoramiento del medio ambiente en beneficio de la comunidad.

PRINCIPIO 5. Los trabajadores petroleros estamos convencidos de que la Seguridad, Salud en el trabajo y Protección Ambiental son en beneficio propio y nos motivan a participar en este esfuerzo.

Con base en estos cinco principios rectores surge la necesidad de diseñar y aplicar un SGI [6] en el Departamento de ASISO de la Refinería “Ing. Antonio Dovalí Jaime” en el puerto de Salina Cruz, Oaxaca. El diseño y la aplicación del sistema resultará en el establecimiento de nuevos procedimientos y la implementación de un sistema que garantice que el equipo de seguridad, así como las herramientas necesarias para la prevención de accidentes estarán disponibles en tiempo y forma. Se reforzarán las actividades encaminadas al orden, la limpieza y el compromiso laboral enfocados a la seguridad enfatizando la posibilidad de evitar accidentes [7], [8].

Las ventajas del diseño y aplicación del Sistema de Gestión de Inventarios (SGI) para la Refinería "Ingeniero Antonio Dovalí Jaime" en Salina Cruz, Oaxaca, incluyen:

1. Seguridad Mejorada: El SGI se centra en garantizar la disponibilidad oportuna de Equipos de Protección Personal (EPP), lo que contribuye a la seguridad de los trabajadores y reduce la posibilidad de accidentes en la refinería [9].
2. Optimización de Inventarios: Permite un control más eficiente del abastecimiento, préstamo y entrega de materiales, lo que conduce a una gestión más efectiva de los inventarios y la reducción de pérdidas [10].
3. Prevención de Problemas: La evaluación de la problemática a través de metodologías como la técnica de los 5 porqués y la Planeación del Diseño del Sistema (PDS) ayuda a identificar y abordar problemas potenciales de manera proactiva [11], [12].
4. Eficiencia Operativa: El SGI mejora la eficiencia en la gestión de inventarios y la disponibilidad de materiales esenciales, lo que puede aumentar la productividad y reducir el tiempo de inactividad no planificado, asociado esto con la metodología de las 5S [13].
5. Ahorro de Costos: La gestión óptima de inventarios reduce el desperdicio de materiales y evita compras innecesarias, lo que ahorra recursos financieros para la refinería.

3

6. Cumplimiento Normativo: Ayuda a garantizar el cumplimiento de regulaciones de seguridad y salud ocupacional, lo que puede evitar sanciones y multas regulatorias [14].
7. Toma de Decisiones Informadas: El SGI proporciona datos en tiempo real sobre inventarios y movimientos de materiales, lo que permite tomar decisiones informadas y estratégicas [15].
8. Mejora Continua: El enfoque en la prevención de accidentes y la mejora constante impulsa una cultura de seguridad y eficiencia en la refinería [16], [17].
9. Reducción de Riesgos Laborales: Al asegurar la disponibilidad de EPP, se minimiza el riesgo de lesiones y problemas de salud entre los trabajadores [18].
10. Satisfacción del Personal: Los trabajadores pueden desempeñar sus funciones de manera más segura y eficiente, lo que puede aumentar la satisfacción laboral y la moral [19].

En conjunto, estas ventajas demuestran cómo la implementación del SGI tiene un impacto positivo en la seguridad, la eficiencia y la rentabilidad de la refinería.

El diseño y aplicación de un Sistema de Gestión de Inventarios (SGI) en la Refinería "Ingeniero Antonio Dovalí Jaime" en Salina Cruz, Oaxaca, se justifica por las siguientes razones: la seguridad de los trabajadores es una prioridad en cualquier entorno industrial. La disponibilidad oportuna de Equipos de Protección Personal (EPP) es esencial para prevenir accidentes y lesiones en el lugar de trabajo. Referencias actualizadas en el campo de seguridad laboral, como informes de la OSHA (Administración de Seguridad y Salud Ocupacional) [20], pueden respaldar esta necesidad; la gestión eficiente de inventarios ayuda a evitar la sobrecompra o la falta de materiales críticos, lo que puede llevar a un uso más efectivo de los recursos financieros de la empresa. Investigaciones en gestión de inventarios y logística pueden proporcionar perspectivas actualizadas sobre las mejores prácticas; existen regulaciones y normativas estrictas en la industria que requieren un control adecuado de los EPP y otros materiales relacionados con la seguridad. Citas de normativas específicas y estudios sobre el cumplimiento normativo son fundamentales para respaldar esta justificación; Una gestión eficiente de inventarios puede llevar a la reducción de costos operativos al minimizar el desperdicio y las pérdidas de materiales. Investigaciones económicas actualizadas pueden respaldar esta afirmación; la metodología pre experimental, la "técnica de los 5 porqués" y la Planeación del Diseño del Sistema (PDS) [23] son enfoques respaldados por la literatura académica en la mejora continua y la eficiencia de procesos; un SGI efectivo puede mejorar la productividad al garantizar la disponibilidad de materiales esenciales cuando se necesitan. Estudios de casos y análisis de impacto pueden proporcionar ejemplos concretos; la satisfacción de los trabajadores es esencial para un ambiente de trabajo saludable y productivo. Investigaciones en psicología organizacional pueden respaldar la relación entre la disponibilidad de EPP y la satisfacción laboral y; una mejora significativa con la aplicación del SGI del Departamento de Auditoría, Seguridad Industrial y Salud Ocupacional (ASISO) debe respaldarse con datos cuantitativos y métricas relevantes.

En este documento se muestra el trabajo del diseño y aplicación de un SGI para la refinería "Ingeniero Antonio Dovalí Jaime", para ello se evaluó e implementó el sistema en la refinería localizada en Salina Cruz, Oaxaca., con el objetivo de lograr la gestión y el control adecuados de los materiales y equipos que se manejan en la refinería y que sirven en la operación de actividades catalogadas como de riesgo para Pemex-Refinación.

II. METODOLOGÍA/DESARROLLO

Para el SGI, primeramente, se utilizó la metodología del diseño denominada pre-experimental y post-prueba. Para dicho fin se utiliza la siguiente aproximación: (G: O1 –X–O2), indicando que:

G= es el área donde se almacenan todo los equipos y materiales para el trabajo.

O1= son los datos en los que se basan los costos de posesión.

X= son los tratamientos.

O2= son los datos basados en O1 con la aplicación del sistema.

Para la realización óptima del SGI se utilizó como universo poblacional todo el equipo y material del almacén de productos del departamento de ASISO de la refinería. Como muestra se identificó el material y equipo que salía diariamente con mayor frecuencia. Con respecto a la recolección de datos se utilizó la Observación Directa (OD) con el fin de identificar todos los procesos del almacenaje [7]. Ahora bien, para la evaluación del SGI también se aplicó la guía de OD para sustentar la decisión del rediseño que corresponde al almacén.

Se aplicó la metodología del Sistema de Planificación del Diseño (SPD) para la clasificación de los inventarios para mejorar la distribución de los productos almacenados [8], [9]. En último lugar, se diseñó y aplicó la implementación de las mejoras mediante el SGI que se propuso.

Con respecto a la recolección de los datos con la OD se aplicó la técnica denominada del “porqué” para determinar las causas potenciales en la gestión de los inventarios (véase Fig. 1).

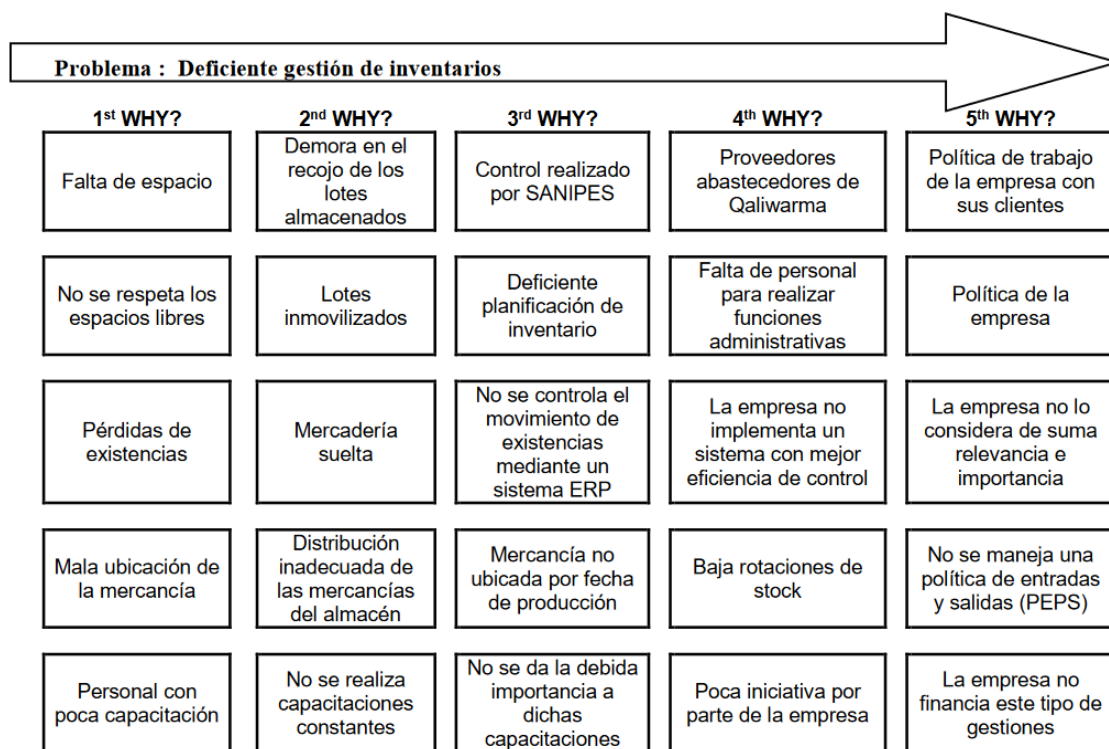


Fig. 1. Técnica denominada del “porqué” para la determinación de causas (adaptación) [9].

Una vez aplicado el desarrollo e implementado la metodología del SPD para mejorar la distribución de los materiales en el almacén se consolidó la distribución del espacio (véase Fig. 2).



Fig. 2. Layout del Departamento de Auditoría, Seguridad Industrial y Salud Ocupacional.

El diseño y aplicación del sistema de gestión para inventarios fue personalizado bajo las especificaciones y requerimientos del departamento de seguridad industrial teniendo como principales módulos los siguientes:

- Acceso al sistema
- Módulo de sesión
- Trabajadores
- Material
- Clasificación
- Respaldo
- Solicitud de materiales
- Módulo de devolución de material.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se diseñó y se implementó un SGI para la Refinería “Ingeniero Antonio Dovalí Jaime” ubicada en el puerto de Salina Cruz, Oaxaca. Para ello, se realizó la instalación y a la ejecución de PostgreSQL (véase Fig. 3) para posteriormente instalar el sistema propuesto.

6

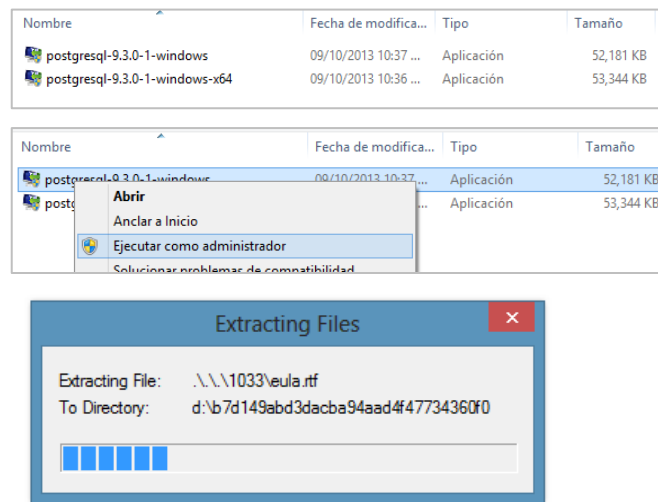


Fig. 3. Instalación del sistema.

El asistente informará que se ha instalado completamente PostgreSQL y preguntará si se desea que se instale posteriormente la aplicación StackBuilder. En este caso, se deja el check box sin seleccionar para que no se descargue e instale, posteriormente se procede a “Terminar” (véase Fig. 4).

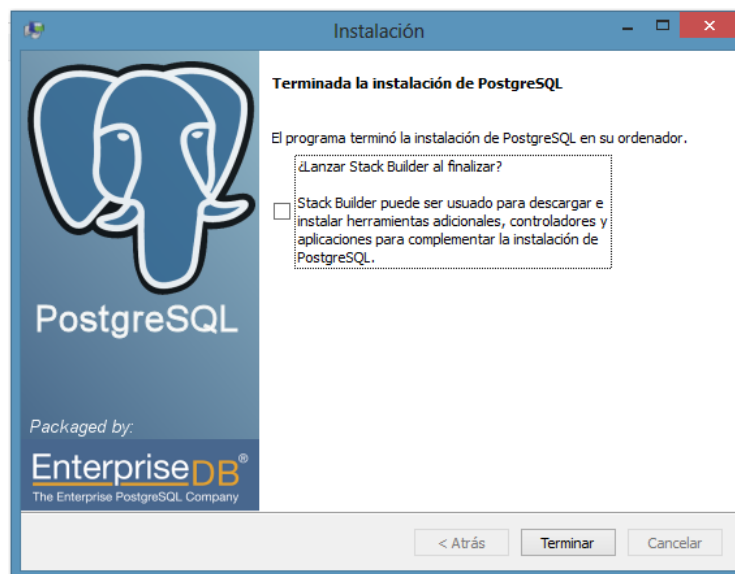


Fig. 4. Instalación terminada de PostgreSQL.

A continuación, se procede a instalar el Sistema de Gestión propuesto (SOPREM), para ello se tiene que localizar SQL, señalar la contraseña del sistema y crear la base de datos con la finalidad de iniciar la instalación del sistema denominado SOPREM (véase Fig. 5).



Fig. 5. Proceso para la instalación de SOPREM.

Posterior a la instalación del sistema de gestión se procedió a realizar un glosario de términos con la finalidad de que los usuarios se familiarizaran con el mismo y comprender la funcionalidad del mismo. En la Tabla 1 se detallan las definiciones generales utilizadas en SOPREM.

TABLA 1
DEFINICIONES GENERALES

TIPO USUARIO/MÓDULO	DESCRIPCIÓN
Usuario tipo Administrador	También deberá realizar algunos pasos de configuración durante la instalación de SOPREM en el equipo de cómputo a utilizar
Usuario tipo Bodeguero	Es un usuario con permisos restringidos, suficientes para poder realizar sus actividades diarias de la mejor manera.
Módulo Sesión	Este módulo permite gestionar las cuentas de usuario al permitir crear y modificar ambos tipos de cuentas (administrador, bodeguero).
Módulo Trabajadores	Este módulo permite registrar un nuevo trabajador en el sistema para así permitirle solicitar préstamos, permite modificar y/o eliminar los datos de uno o varios trabajadores.
Módulo Material	Este módulo permite gestionar los materiales en la bodega, tales como: registrar un nuevo material que no se encuentre en la base de datos, registrar una nueva cantidad de un material existente o modificar los datos de un material.
Módulo Clasificación	En este módulo se gestionan las clasificaciones a las que pertenecen los materiales; se permite crear, modificar o eliminar una clasificación.

8

Módulo Ubicación	En este módulo se gestionan las ubicaciones de almacenamiento para los materiales; se permite crear, modificar o eliminar una ubicación.
Módulo Respaldo	Este módulo permite crear un respaldo de la base de datos que se esté trabajando, también permite cargar un respaldo previamente generado si es necesario.
Solicitud de material	Permite crear una solicitud por trabajador, agregando uno o varios materiales.
Devolución de material	Permite el registro de los materiales devueltos de una solicitud o más realizada(s) previamente por un trabajador.
Consultas	Permite consultar el inventario actual, las solicitudes y devoluciones registradas en el sistema; además de imprimir cada una de estas consultas.

El sistema quedó configurado con los siguientes módulos:

- Acceso al sistema
- Módulo Sesión
- Módulo Trabajadores
- Módulo Material
- Módulo Clasificación
- Módulo Respaldo
- Módulo Solicitud de material
- Módulo Devolución de material
- Módulo de Consultas

En la Fig. 6 se muestra una gama del diseño de los diversos módulos que comprenden el sistema de gestión de inventarios.

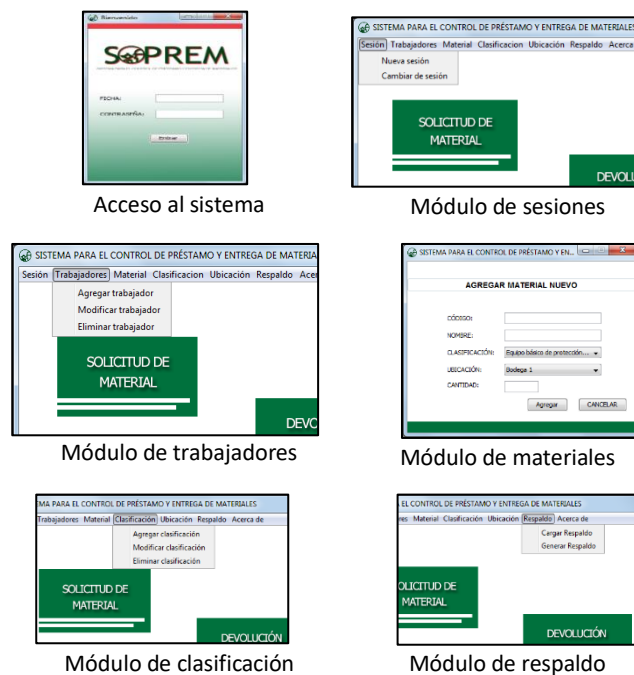


Fig. 6. Gama de los módulos del sistema.

El sistema propuesto gestiona los inventarios y consulta los inventarios con la finalidad de tener el equipo y materiales en tiempo y forma para operar diariamente en la refinería. También permite controlar las entradas y salidas de materiales. La tipología del inventario consta de: código, clasificación y ubicación, de allí se desglosa la cantidad de equipo y el encargado en el turno, esta información se visualiza en la Fig. 7.

SISTEMA PARA EL CONTROL DE PRÉSTAMO Y ENTREGA DE MATERIALES

CONSULTA DE INVENTARIO

CÓDIGO: ☒ Todos ☐ Único CLASIFICACIÓN: ☐ Todas ☒ Única UBICACIÓN: ☒ Todas ☐ Única

CÓDIGO	NOMBRE MATERIAL	CLASIFICACIÓN	UBICACIÓN	CANTIDAD ACTUAL	BODEGUERO
000000000040	Careta para soldar	Equipo para soldar	Bodega 1	50	000000
000000000033	Chamarra para soldar	Equipo para soldar	Bodega 1	50	000000
000000000043	Escudo protector facial	Equipo para soldar	Bodega 1	50	000000
000000000042	Goggles para soldar	Equipo para soldar	Bodega 1	50	000000
000000000037	Goggles para soldar	Equipo para soldar	Bodega 1	49	000000
000000000038	Micas de cristal para le...	Equipo para soldar	Bodega 1	50	000000
000000000039	Micas de cristal para sol...	Equipo para soldar	Bodega 1	50	000000
000000000035	Micas sombras (micas f...	Equipo para soldar	Bodega 1	50	000000
000000000034	Polainas	Equipo para soldar	Bodega 1	49	000000
000000000036	Porta carteras faciales	Equipo para soldar	Bodega 1	49	000000
000000000041	Vidrio rectangular para ...	Equipo para soldar	Bodega 1	50	000000

INVENTARIO

Consulta: Ubicación Fecha: 19/10/2014

CÓDIGO	MATERIAL	CLASIFICACIÓN	UBICACIÓN	CANTIDAD	BODEGUERO
000000000017	Cinturón para casco (barbiquejo elástico de caucho)	Equipo básico de protección personal	Bodega 2	50	000000
000000000018	Protección auditiva tipo copa para	Equipo básico de protección personal	Bodega 2	50	000000
000000000019	Impermeable tipo gabardina	Equipo básico de protección personal	Bodega 2	50	000000
000000000044	Respiradores orgánicos	Equipo respiratorio	Bodega 2	50	000000
000000000045	Cartucho para vapores (filtro para respiradores contra vapores)	Equipo respiratorio	Bodega 2	50	000000
000000000047	Hoja de máquina oficina	Papelaría	Bodega 2	50	000000
000000000048	Hoja de máquina oficina	Papelaría	Bodega 2	50	000000
000000000049	Permisos de trabajo paquete 10 clip	Papelaría	Bodega 2	50	000000
000000000057	Rollo de cinta para delimitar área amarilla	Otros	Bodega 2	50	000000
000000000058	Pilas Energizer 1.5v	Otros	Bodega 2	50	000000
000000000060	Linterna division 1	Otros	Bodega 2	50	000000
000000000061	Protector para lente de vidrio	Otros	Bodega 2	50	000000
000000000046	Filtro reemplazante	Equipo respiratorio	Bodega 2	37	000000
000000000056	Rollo de cinta para delimitar área roja	Otros	Bodega 2	49	000000
000000000016	Cordon sujeta lentes	Equipo básico de protección personal	Bodega 2	50	000000

Fig. 7. Registro de inventario y reporte.

IV. CONCLUSIONES

El diseño, evaluación e implementación exitosa del Sistema de Gestión de Inventarios (SGI) y el Sistema para el Control de Préstamos y Entrega de Materiales (SOPREM) en el Departamento ASISO de Pemex-Refinación representan una innovación transformadora en la administración de inventarios y la seguridad en el trabajo. Estos sistemas han mejorado la exactitud de la información, la entrega de materiales, los requerimientos de compras y la gestión de préstamos de manera notable.

La contribución de esta innovación es evidente en su alineación con el compromiso de PEMEX con la Seguridad, la Salud en el Trabajo y la Protección Ambiental (SSPA). El SGI y el SOPREM no solo mejoran

la eficiencia operativa, sino que también fortalecen la disciplina operativa y el cumplimiento normativo, elementos clave en la visión de PEMEX de ser una empresa eficiente y competitiva.

Uno de los logros más destacados de esta innovación es su capacidad para proporcionar información precisa y en tiempo real que facilita la toma de decisiones. La coordinación del Departamento de Seguridad Industrial de PEMEX ahora tiene una visión oportuna de los requerimientos de materiales y equipos, lo que permite un abastecimiento más eficiente y la reducción de pérdidas debidas a la ocupación de espacio innecesario.

10

La implementación del SGI y el SOPREM representa un hito en la búsqueda de PEMEX por mejorar la seguridad, la eficiencia y la sostenibilidad. Esta innovación no solo cumple con los objetivos del programa SSPA, sino que también posiciona a PEMEX como un líder en la gestión de inventarios y la seguridad en el sector industrial. A medida que se mantenga el compromiso con los procedimientos y la tecnología informática desarrollada, se espera que los beneficios perduren y se sigan mejorando con el tiempo.

Además de la mejora en la eficiencia operativa y el cumplimiento normativo, la implementación del SGI y el SOPREM ha tenido un impacto positivo en la cultura organizacional de Pemex-Refinación. El compromiso con la seguridad, la salud en el trabajo y la protección ambiental se ha fortalecido a medida que los trabajadores reconocen el valor de contar con Equipos de Protección Personal (EPP) de manera oportuna y la importancia de una gestión de inventarios precisa.

La información precisa y la visibilidad de los requerimientos de materiales y equipos no solo benefician a la coordinación del Departamento de Seguridad Industrial, sino que también involucran a los trabajadores en el proceso de toma de decisiones. Esta participación activa aumenta la conciencia sobre la importancia de la seguridad en el trabajo y fomenta un ambiente donde todos se sienten responsables de su propia seguridad y la de sus compañeros.

Además, el SGI y el SOPREM han brindado una plataforma escalable que permite la adaptación continua a las cambiantes necesidades de la refinería. A medida que Pemex-Refinación crece y se enfrenta a nuevos desafíos, estos sistemas pueden seguir evolucionando para satisfacer las demandas emergentes.

En conclusión, el diseño, evaluación e implementación del SGI y el SOPREM no solo representan un avance significativo en la gestión de inventarios y la seguridad en el trabajo, sino que también han contribuido a la cultura de seguridad y eficiencia en Pemex-Refinación. Estos sistemas no son solo una solución a corto plazo, sino una base sólida para el crecimiento sostenible y la mejora continua en la empresa. Su éxito demuestra el poder de la innovación tecnológica para impulsar el cambio positivo en organizaciones industriales de alto rendimiento.

REFERENCIAS

- [1] F. A. Martínez Hernández, S. Herrera Aguilar, "Pemex, su reestructuración corporativa, financiera y productiva, y los efectos de ésta sobre la balanza comercial petrolera", *El trimestre económico*, vol. 88, no. 349, 2021, pp. 143-180, doi: <https://doi.org/10.20430/ete.v88i349.1005>
- [2] N. C. González Gómez, J. R. Bastidas Urrea, "Diagnóstico de la empresa Petróleos Mexicanos (PEMEX) para conocer su estado actual y el nivel de integración aguas arriba-aguas abajo y su similitud con Ecopetrol, lo que permita evidenciar la excelencia empresarial que tiene y el nivel de competitividad a nivel mundial", Tesis, Colombia: universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 2012, url: <http://hdl.handle.net/20.500.12010/25703>
- [3] E. Ramírez Peñaloza, "Plan de Negocios 'Gasolinera Zorcúa, SA de CV'", Tesis, México: Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo, 2006, url: http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/5844
- [4] C. Guédez Mozur et al., "Los sistemas de gestión ambiental en la industria petrolera internacional", *Interciencia*, vol. 28, no. 9, 2003, pp. 528-533.
- [5] R. A. Huesca Cadena, "Análisis de riesgo en el sector 1 del Complejo procesador de gas nuevo, Pemex, centro Tabasco", Tesis, México: Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, 2018, url: <https://hdl.handle.net/20.500.12753/2448>

- [6] C. Guédez Mozur *et al.*, "Los sistemas de gestión ambiental en la industria petrolera internacional", *Interciencia*, vol. 28, no. 9, 2003, pp. 528-533.
- [7] F. P. Guzmán Galarza, A. E. Torres Ortega, "Desarrollo del sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional en base a la norma ISO 45001 para la empresa Nelisa Caterin", Tesis, Ecuador, Universidad Internacional SEK, 2018, url: <https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/3103>
- [8] A. Chacón Álvarez, "Diseño y documentación del sistema de gestión en seguridad y salud en el trabajo, para empresa contratista en obras civiles", Tesis, Colombia: Los libertadores (Fundación Universitaria), 2016, url: <http://hdl.handle.net/11371/809>
- [9] A. F. Barrera Hernández, P. A. Martínez Ortiz, "Implementación del sistema de gestión en seguridad y salud en el trabajo mediante ciclo Deming para empresas de mantenimiento CBM en pozos petroleros de Casanare 2018-2019", Tesis, Colombia: Universidad ECCI, 2019, url: <https://repositorio.ecci.edu.co/handle/001/2210>
- [10] A. S. Morán Mirabá, "Mejoramiento del despacho de GLP hacia autotankers en Petrocomercial", Tesis, Ecuador: Universidad de Guayaquil, 20003, url: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/5375>
- [11] L. C. Buitrago Pachón, J. S. Galán Vera, "Diseño de metodología para la formulación y estructuración de proyectos en el sector público, aplicando un método ágil para la dirección, gestión e innovación de proyectos", Tesis, Colombia: UNITEC, 2021, url: <https://hdl.handle.net/20.500.12962/1331>
- [12] A. L. Castellanos de Echeverría, "Diseño de un sistema logístico de planificación de inventarios para aprovisionamiento en empresas de distribución del sector de productos de consumo masivo", Tesis, El Salvador: Universidad "Francisco Gavidia" (UFG), 2012, url: <http://redicces.org.sv/jspui/handle/10972/510>
- [13] R. L. Gallo Arica, "Aplicación de la metodología 5S para incrementar la productividad del almacén del programa de complementación alimentaria en una municipalidad provincial", Tesis, Perú: Universidad César Vallejo, 2022, url: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/109234>
- [14] J. C. Zambrano Moreira, "Evaluación del sistema de gestión en seguridad y salud ocupacional de la Empresa Soluempaqués SA en base a la norma ISO 45001: 2018 y propuesta de un plan de mejora", Tesis, Ecuador: Universidad de Guayaquil, 2022, url: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/60643>
- [15] T. Bensadon, "Tecnologías 4.0 para el desarrollo y evaluación de indicadores en una empresa de servicios: su impacto en la toma de decisiones estratégicas y la servitización de la información", Tesis, Argentina: Universidad Nacional de Mar del Plata, 2022, url: <http://rinfi.fi.mdp.edu.ar/xmlui/handle/123456789/597>
- [16] B. Zapata Flores, "Propuesta de mejoras en la gestión de seguridad y salud en el trabajo en las actividades de metalmecánica del Consorcio P&D en la refinería Talara", Tesis, Perú: Universidad nNacional de Piura, 2022, url: <http://repositorio.unp.edu.pe/handle/20.500.12676/4225>
- [17] J. Roque-López, "Más allá de los sistemas de gestión de seguridad: Ambiente, Salud y Seguridad, ASS. La cultura de seguridad industrial como un elemento vital en las organizaciones de alta confiabilidad en seguridad. Lecciones internacionales de otras industrias", *Tecnología, Ciencia, Educación*, vol. 26, no. 2, 2011, pp. 103-126.
- [18] R. O. Llican Chuquimango, "Implementación de un programa de seguridad basada en el comportamiento SBC para prevenir peligros y riesgos laborales en la planta de función y refinería de estaño Minsur Pisco 2016", Tesis, Perú: Universidad Alas Peruanas, 2016, url: <https://hdl.handle.net/20.500.12990/6479>
- [19] E. Victorio Capillo, "La relación del clima organizacional y la satisfacción laboral de los trabajadores del área de operaciones de las tres principales empresas aseguradoras de Lima 2017", Tesis, Perú: Universidad San Ignacio de Loyola, 2018, url: <https://hdl.handle.net/20.500.14005/3667>
- [20] D. P. Caceres Chacon, J. K. Rojas Suarez, "Transición de la norma OSHA 18001; 2008 a la norma técnica colombiana ISO 45001; 2018 para el sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo, en la organización de transporte y servicios de Colombia 'Trasercol SAS' en San Martin, Cesar", Tesis, Colombia: Universidad Cooperativa de Colombia, 2019, url: <http://hdl.handle.net/20.500.12494/11116>
- [21] C. A. Huamán, P. J. Ruiz Gómez, E. Gutiérrez Pesantes, "Sistema de gestión de inventarios de un almacén de producto terminado para reducir los costos de posesión", *INGnosis*, vol. 3, no. 2, 2017, pp. 258-275.
- [22] W. Arcila *et al.*, "Metodología de la planeación sistemática de la distribución en planta (Systematic Layout Planning de Muther)", Colombia: Universidad Santiago de Cali, 2016, url: https://www.academia.edu/25966576/METODOLOG%C3%8DA_DE_LA_PLANEACI%C3%93N_SISTEM%C3%81TICA_DE_LA_DISTRIBUCI%C3%93N_EN_PLANTA_SYSTEMATIC_LAYOUT_PLANNING_DE_MUTHER
- [23] R. C. Aguirre Lock, "Aplicación de la metodología 5s para incrementar la productividad del área de mantenimiento de la empresa F1 Motorsport SAC", Tesis, Perú: Universidad César Vallejo, 2019, url: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/50718>

Diseño de estructuras tipo panel de abeja basadas en el caparazón de armadillo para un helicóptero ligero

Design of Shell-based Honeycomb Structures Armadillo for a Light Helicopter

Quirino Estrada¹, Dariusz Szwedowicz^{6†}, Elva Reynoso², Julio Vergara-Vázquez⁷,
Lara Wiebe³, Jesús Silva⁴, Alejandro Rodríguez Mendez⁸, Abel Quezada⁵,
Luis A. Mier-Quiroga⁹, Elvis Coutiño¹⁰

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez | Instituto de Ingeniería y Tecnología, Chihuahua, MÉXICO

¹<https://orcid.org/0000-0003-0623-3780> | quirino.estrada@uacj.mx

²<https://orcid.org/0000-0002-0729-2822> | elva.reynoso@uacj.mx

³<https://orcid.org/0000-0002-6336-0885> | lara.wiebe@uacj.mx

⁴<https://orcid.org/0000-0002-1505-500X> | jesilva@uacj.mx

⁵<https://orcid.org/0000-0002-6336-0885> | abquezad@uacj.mx

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Morelos, MÉXICO

⁶<https://orcid.org/0000-0003-0623-3780> | dariusz.sd@cenidet.tecnm.mx

Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería campus Palenque, MÉXICO

⁷<https://orcid.org/0000-0003-1524-7914> | jvergarav@ipn.mx

University of California at Berkeley, USA

⁸<https://orcid.org/0000-0002-5252-109X> | aleromende@berkeley.edu

Tecnológico Nacional de México | Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, MÉXICO

⁹<https://orcid.org/0000-0001-8290-4115> | luis.mier@tesjo.edu.mx

¹⁰<https://orcid.org/0000-0003-2455-2574> | elvis.coutino@tesjo.edu.mx

Recibido 20-01-2023, aceptado 26-04-2023.

Resumen

Actualmente la aplicación de patrones biológicos dentro del diseño de sistemas mecánicos está en incremento debido a su éxito evolutivo. En este sentido tras millones de años de evolución la naturaleza ha proveído estructuras optimizadas a los seres vivos para asegurar su supervivencia ante cambios climáticos o depredadores. A partir de lo anterior el presente artículo describe el diseño y evaluación numérica de estructuras tipo panel de abeja basadas en el caparazón de un armadillo. Las estructuras fueron construidas con aluminio 6063-T5 y evaluadas a través de pruebas de comprensión usando el software de elementos finitos Abaqus. Durante el estudio especial énfasis fue puesto en el diseño de la sección transversal de las estructuras y su efecto en la resistencia al impacto. En este sentido se diseñaron cuatro diferentes estructuras con patrones poligonales y triangulares. De acuerdo con los resultados obtenidos la estructura con base hexagonal/circular mostró un mejor desempeño en cuanto a la eficiencia de la fuerza de aplastamiento (CFE) con un valor de 0.78. Lo anterior se confirmó al obtener un valor de absorción de energía específica igual a 20.59 J/r. Finalmente, con los hallazgos encontrados se diseñó un panel de absorción de energía para un helicóptero ligero.

Palabras clave: resistencia al impacto, panel de abeja, método de elemento finito.

Abstract

Currently the application of biological patterns within the design of mechanical systems is increasing due to its evolutionary success. In this sense, after millions of years of evolution, nature has provided optimized structures for living beings to ensure their survival in the face of climatic changes or predators. Based on the above, this article describes the design and numerical evaluation of honeycomb-type structures based on the shell of an armadillo. The structures were built with 6063-T5 aluminum and evaluated through comprehension tests using Abaqus finite element software. During the study special emphasis was placed on the cross-sectional design of the structures and its effect on impact resistance. In this sense, five different structures with polygonal and triangular patterns were designed. According to the results obtained, the structure with a hexagonal/circular base showed a better performance in terms of crushing force efficiency (CFE) with a value of 0.78 - the above was confirmed by obtaining an equal specific energy absorption value. at 20.59 J/r. Finally, with the findings found, an energy absorption panel was designed for a light aircraft.

Index terms: crashworthiness, honeycomb, finite element method.

I. INTRODUCCIÓN

Los helicópteros representan uno de los tipos de aeronaves más versátiles dentro de los transportes aéreos. Sin embargo, también son susceptible a accidentes aéreos principalmente por fallas mecánicas o errores humanos durante su operación [1]. En este sentido, anualmente se reportan alrededor del mundo lesiones severas, decesos y pérdidas materiales asociadas a accidentes aéreos. En este sentido al suscitarse la abrupta caída de las aeronaves se producen lesiones en la región cervical, cabeza y extremidades en los pasajeros. Para contrarrestar tales efectos el empleo de estructuras de pared delgada tipo panal de abeja está en incremento [2], [3]. Una estructura tipo sándwich está formada por un núcleo encapsulado por dos cubiertas. Diseñados para deformarse plásticamente estas estructuras son una forma efectiva de obtener una desaceleración controlada durante una colisión. Sus principales ventajas son bajo costo, geometrías simples y efectividad para absorber energía. En este sentido diversas investigaciones numéricas [4], [5], computacionales [6], [7], [8] y teóricas [9], [10] se han desarrollado para optimizar estructuras tipo celular. Yan et al. [11] diseñaron componentes a resistencia al impacto de un avión ultraligero considerando una estructura de absorción de energía. El componente consiste de un cilindro de fibra de carbono con discontinuidades geométricas actuando como iniciadores de deformación. Tal diseño permite la absorción de energía a través de fractura del tubo a lo largo de su eje longitudinal, así como efecto de delaminación y corte. Galehdari et al. [12] diseñaron y analizaron un sistema de absorción de impacto de panal de abeja para un asiento de helicóptero. Al final de las pruebas comprobaron que el desempeño del sistema propuesto cumplió de forma satisfactoria con las regulaciones de aviación. Con el objeto de mejorar aún más su eficiencia actualmente el empleo de la biónica se está incrementando. La biónica consiste en aplicar los patrones biológicos en el diseño de estructuras ingenieriles. Lo anterior se justifica en que tras millones de años de evolución la naturaleza ha optimizado las características físicas de los organismos [13]. En este sentido Yin et al. [14] desarrollaron un análisis de optimización de estructuras jerárquicas de panal de abeja bajo carga axial. Los especímenes evaluados se diseñaron tomando como base un patrón geométrico triangular. Posteriormente se realizó el proceso de optimización a través de los modelos algoritmo genético multiobjetivo y metamodelo de Kriging. Como resultado las estructuras optimizadas mostraron un desempeño de energía específica 2.84 veces superior respecto a las estructuras panal de abeja tradicionales. Niu et al. [15] analizaron numérica y experimentalmente la capacidad de absorción de energía de paneles bioinspirados en el escarabajo Elytra. Durante el estudio se puso especial énfasis en el número y arreglo de costillas en las intersecciones de los perfiles hexagonales interno y externo. Al finalizar el análisis determinaron que las estructuras bioinspiradas mostraron una reducción significativa de la carga pico y un aumento de la resistencia a choques respecto a una estructura convencional. Por su parte Hu et al. [16] investigaron las características de absorción de energía de estructuras de panal de abeja bioinspiradas en la microestructura vascular del bambú sujetas a carga axial. El diseño de las estructuras consistió en un arreglo geométrico conformado por un círculo central el cual se unió a otros seis círculos exteriores en arreglo hexagonal. Los resultados mostraron la dependencia de las características de absorción de energía en función del diámetro del círculo central y longitud de los platos de unión. Finalmente, tal y como se ha mencionado la efectividad de las estructuras bioinspiradas tipo panal de abeja para el control de cargas dinámicas ha sido demostrada. Sin embargo, el empleo de estructuras bioinspiradas para la industria aeronáutica ha sido poco explorada. En este sentido el presente trabajo propone el diseño de estructuras bioinspiradas en el caparazón de armadillo de nueve bandas. Las estructuras fueron diseñadas considerando patrones triangulares y hexagonales. Posteriormente las estructuras fueron evaluadas a cargas axiales utilizando el software de elementos finitos Abaqus.

II. INSPIRACIÓN BIÓNICA: ARMADILLO DE NUEVE BANDAS

Millones de años de evolución proveen especialización de los seres vivos permitiendo así su supervivencia ante cambios climáticos, cambios en el régimen alimenticio y depredadores entre otros. En este sentido animales como el armadillo de nueve bandas han evolucionado para protegerse ante el ataque de depredadores. El armadillo de nueve bandas es un pequeño mamífero nativo de América caracterizado por tener un cuerpo cubierto por escamas dérmicas osificadas, dando como resultado un caparazón articulado que cubre la mayor parte de su cuerpo. La cabeza es pequeña del orden de 7 cm de largo con forma alargada, posee patas cortas pero robustas con garras curvas que facilitan el proceso de excavación de sus madrigueras. Los miembros anteriores poseen 4 dedos

mientras que los posteriores presentan 5 dedos. El caparazón del armadillo está dividido en tres regiones la región pélvica, central (bandas) y pectoral cada una con patrones poligonales y triangulares. Las escamas queratinizadas de estas regiones están unidas a través de fibras de Sharpey lo que le confiere flexibilidad al caparazón. A partir de lo anterior el armadillo puede hacer frente a las fuerzas externas provocadas por la acción de los depredadores. Considerando lo anterior el presente artículo propone el uso de estructuras de panal de abeja basadas en la forma geométrica de las escamas dérmicas del caparazón del armadillo.

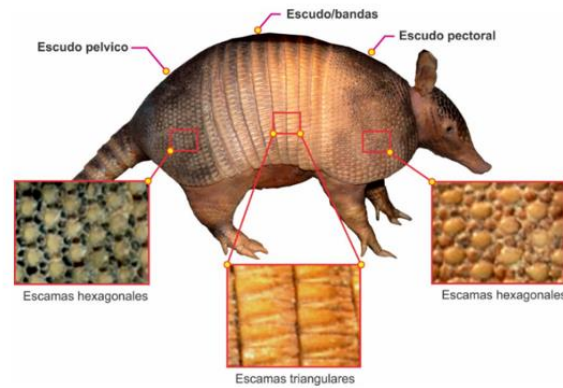


Fig. 1. Armadillo de nueve bandas y patrones de escamas en el caparazón [17].

III. VALIDACIÓN UN PRIMER MODELO DISCRETO: COMPRESIÓN DE UN PERFIL HEXAGONAL

El análisis propuesto en el presente artículo es computacional, por tanto, es necesario la validación de un primer modelo discreto para garantizar la congruencia de los resultados a obtener. El modelo discreto se desarrolló en Abaqus/Explicit y consistió en un ensayo axial de un perfil estructural de forma hexagonal denominado HS-00. Los resultados fueron comparados con los datos experimentales de [18]. El perfil tiene 32 mm de lado, longitud de 120 mm y espesor de 1.2 mm. Un perfil hexagonal es útil para la validación desde que representa la unidad básica de una estructura de panal de abeja. El perfil se modeló con elementos S4R y propiedades elastoplásticas para aluminio AA6061, con un módulo de elasticidad de 68 GPa, límite de fluencia de 71 MPa, coeficiente de Poisson de 0.33 y densidad de 2700 kg/m³. Por su parte los platos de compresión se modelaron con elementos rígidos R3D4. De acuerdo con [18] el ensayo de compresión se realizó a una velocidad cuasi estática de 0.5 mm/min. Finalmente, a partir de un análisis de sensibilidad de malla, el perfil se discretizó con un tamaño de elemento de 2.5 mm. Detalles del modelo discreto se presentan en la Fig. 2.

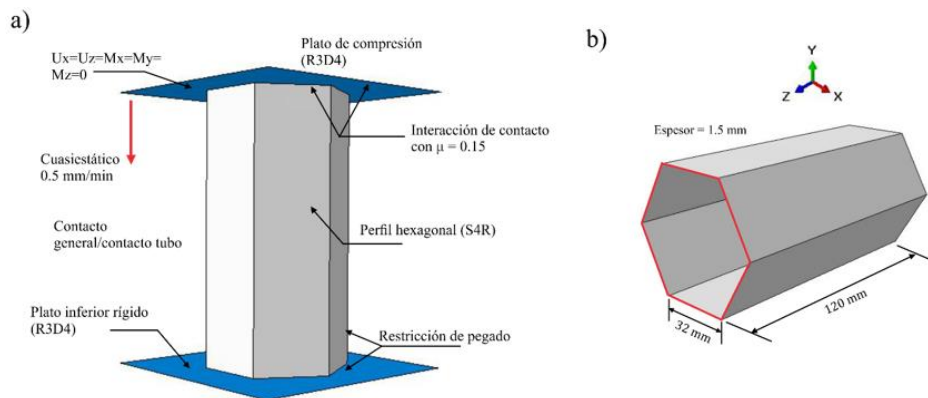


Fig. 2. a) Modelo discreto y b) geometría del perfil hexagonal HS-00.

Los resultados experimentales [18] y numéricos se muestran en la Fig. 3 y 4. La Fig. 3a muestra la comparación de la fuerza durante el proceso de compresión del perfil. Como se puede observar la curva es caracterizada por un aumento súbito de la fuerza hasta alcanzar un valor pico (P_{max}) cercano a 21 kN. Posteriormente se inicia un proceso de decaimiento con oscilación de la fuerza. Físicamente esto representa la formación de pliegues plásticos. Por su parte la Fig. 3b muestra la energía absorbida durante el proceso de deformación plástica alcanzando un valor cercano de 0.70 kJ en ambos modelos. El modo de deformación final se presenta en la Figura 4.

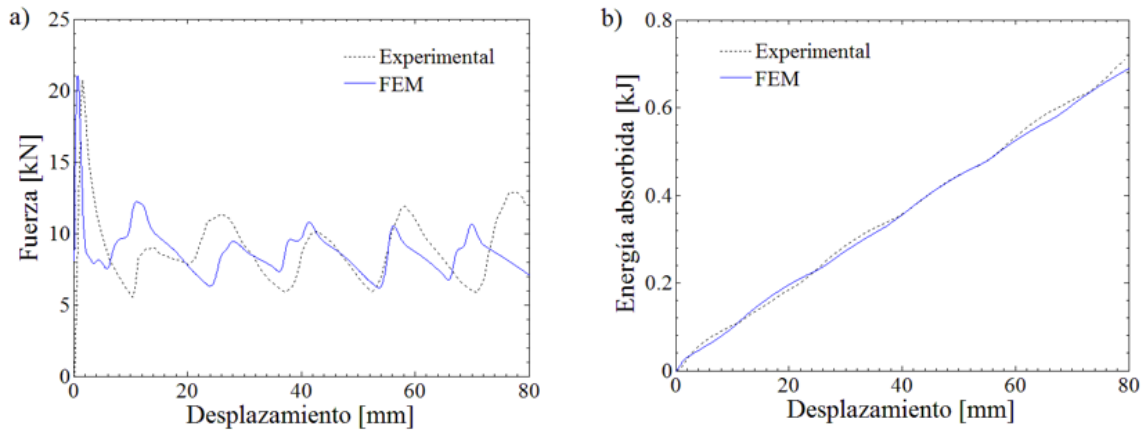


Fig. 3. a) Curva fuerza-desplazamiento y b) energía absorbida para la estructura HS-00.

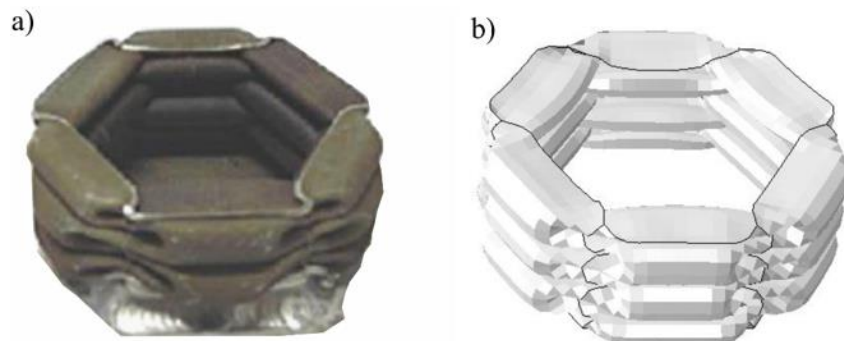
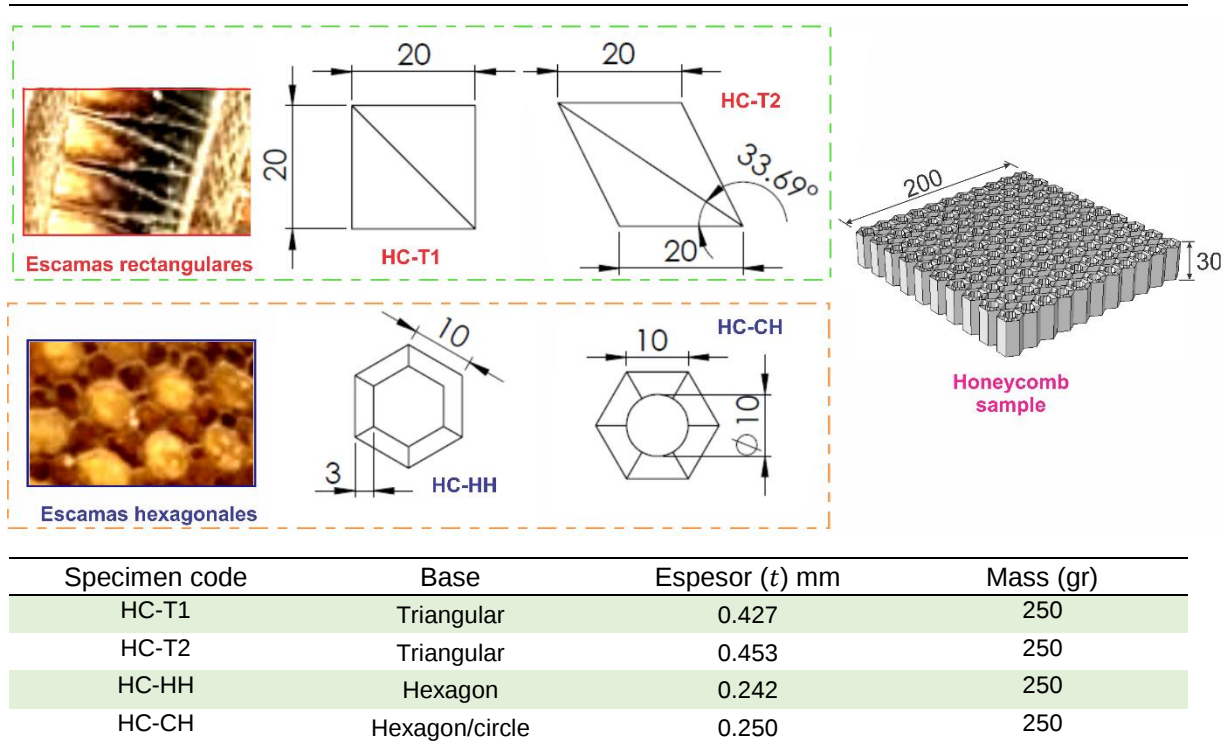


Fig. 4. Modo de deformación final para HS-00 a) experimental [17] b) numérico.

IV. ANÁLISIS NUMÉRICO DE ESTRUCTURAS BIOINSPIRADAS

El principal objetivo del presente artículo es explorar la viabilidad del diseño de estructuras panal de abeja bioinspiradas en el caparazón de armadillo. En este sentido se obtuvieron los patrones geométricos de la sección pectoral y de la región de las bandas del caparazón, las cuales ayudan a contrarrestar las cargas externas durante el ataque de depredadores. En este sentido se observa que los patrones están caracterizados por formas triangulares en la sección media y hexagonales rodeadas por pequeñas formas poligonales en la región frontal y trasera, lo cual confiere al armadillo capacidad para contrarrestar las cargas externas de los depredadores. A partir de esto se diseñaron cuatro estructuras bioinspiradas tipo panal de abeja (BTWS) cuyas dimensiones generales son $200 \times 200 \times 30$ mm, las cuales fueron evaluadas a través de una prueba de cuasi-estática de compresión. Con el objeto de realizar una comparación objetiva todas las estructuras presentan un mismo valor de masa igual 250 g. Detalles de las estructuras se presentan en la Tabla 1.

TABLA 1
DETALLES DE LAS ESTRUCTURAS BIOINSPIRADAS EN EL CAPARAZÓN DEL ARMADILLO.



V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evaluación de las estructuras panal de abeja basadas en el caparazón del armadillo (BTWS) se realizó a través de parámetros de resistencia al impacto (véase Tabla 2). Donde F es la fuerza de aplastamiento, δ es el desplazamiento y m es la masa.

TABLA 2
PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL IMPACTO.

Carga Pico [P_{max}] kN	Fuerza promedio [P_m] kN	Energía absorbida [E_a] kJ	Eficiencia de la fza de aplastamiento [CFE]	Absorción de energía específica [SEA]
Obtenido de la curva	$P_m = \frac{E_a}{\delta}$	$E_a = \int_0^{\delta} F \cdot d\delta$	$CFE = \frac{P_m}{P_{max}}$	$SEA = \frac{E_a}{m}$

RESULTADOS PARA ESTRUCTURAS PANAL DE ABEJA BIOINSPIRADAS

El comportamiento mecánico y resistencia al impacto de las estructuras tipo panal de abeja se obtuvo a través de la curva esfuerzo deformación. Tal y como se observa en la Fig. 5 las estructuras basadas en hexágonos presentaron una mayor resistencia a la deformación respecto a las estructuras triangulares alcanzando valores de hasta 450 kN. Todas las estructuras presentaron un aumento súbito de la fuerza al inicio de la compresión,

posteriormente una disminución de la misma hasta estabilizarse. Sin embargo, a partir de 10 mm de desplazamiento se observó una densificación de las estructuras lo cual incrementó nuevamente el valor de la fuerza, siendo más visible para las estructuras HC-HH y HH-CH. El menor desempeño lo presentó la estructura con base triangular irregular (HC-T2) con un valor cercano a 2.18 kN.

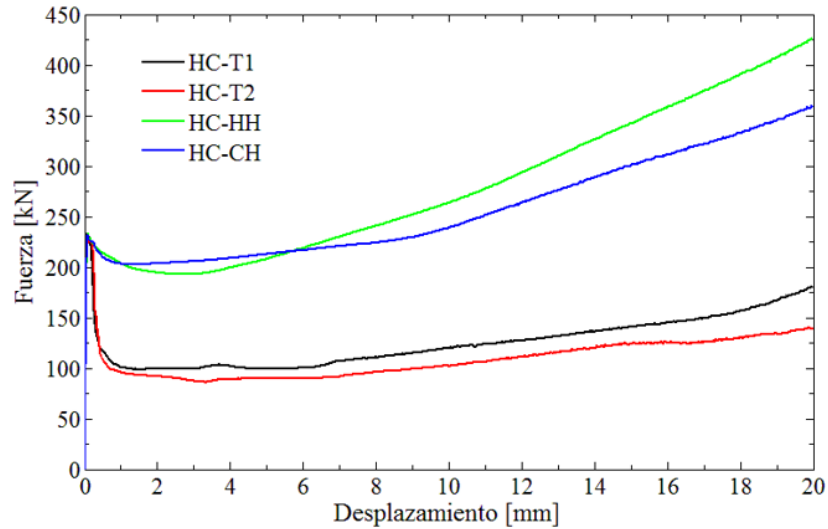


Fig. 5. Comparación de las curvas fuerza vs deformación para las estructuras panal de abeja bioinspiradas en el caparazón del armadillo.

Respecto a la energía absorbida (E_a) se calculó con la integración del área bajo la curva de las gráficas fuerza vs desplazamiento y se presenta en la Fig. 6. Tal y como se mencionó anteriormente las estructuras tipo panal de abeja con base hexagonal mostraron una mayor absorción de energía por deformación. El mejor resultado de E_a se obtuvo para la estructura con un hexágono central rodeado por trapecios más pequeños con un valor aproximado de 5.5 kJ. Tal valor indica que referida geometría contribuyó a una mejor capacidad de carga, lo cual brinda estabilidad. Por tanto, se obtuvo una mayor área bajo la curva.

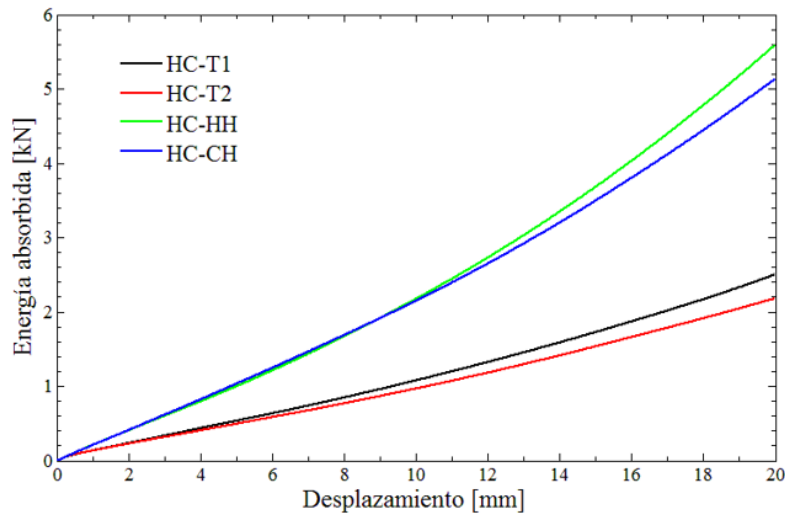


Fig. 6. Comparación de la energía absorbida (E_a) para las estructuras bioinspiradas tipo panal de abeja.

La resistencia al impacto, así como la absorción de energía depende principalmente del modo de deformación de las estructuras bioinspiradas. El modo de deformación es determinado a su vez por la rigidez de la estructura la cual es provista por la geometría de la misma. En este sentido durante la compresión de las estructuras se formaron líneas plásticas estáticas y dinámicas. El modo de deformación para las estructuras bioinspiradas se presentan en la Fig. 7 y 8. En todas las estructuras la formación de pliegues plásticos fue observada. Sin embargo, para las estructuras con base triangular (HC-T1 y HC-T2) se observó un fenómeno de pandeo, lo cual contribuyó a una menor resistencia al impacto. De igual forma el fenómeno de pandeo, provoca una menor deformación plástica desde que se forman una menor cantidad de pliegue estáticos y dinámicos. Este efecto se observa en la vista isométrica del panel HC-T2.

7

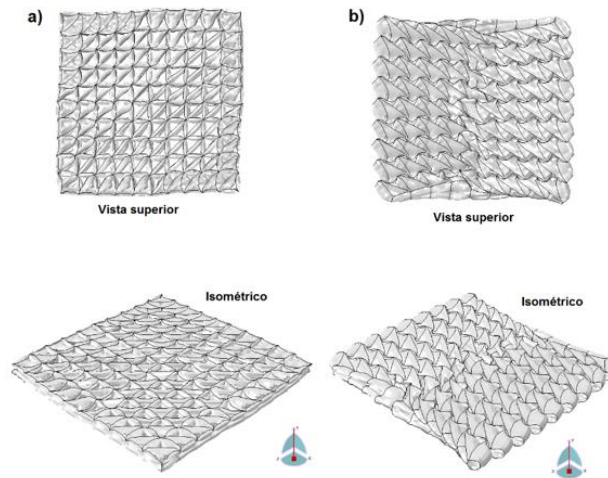


Fig. 7. Modo de deformación final donde a) HC-T1 y b) HC-T2.

El modo de deformación de las estructuras con base hexagonal HC-HH y hexagonal/circular HC-CH se presenta en la Fig. 8. En este sentido se observó una mayor deformación plástica de los paneles con una mayor interacción entre las paredes de las celdas, lo cual ayudó a incrementar su resistencia a la deformación. Al deformarse de forma aleatoria se produjo una mayor formación de pliegues plásticos lo que incrementó la absorción de energía.

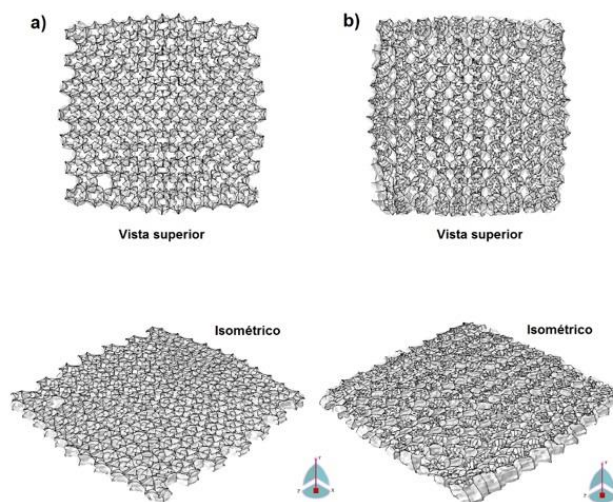


Fig. 8. Modo de deformación final donde a) HC-HH y b) HC-CH.

∞

Un resumen de los resultados calculados para las estructuras bioinspiradas tipo panal de abeja se presenta en la Tabla 3. En todos los casos las estructuras presentaron la misma masa igual 250 g. Respecto a la mayor resistencia a la compresión esta se obtuvo con la estructura hexagonal (HC-HH) cuyo valor de P_{max} fue 424.01 kN. Mientras que la menor resistencia fue calculada para la estructura bioinspirada HC-T2 con 227.31 kN. Tales comportamientos se confirmaron al analizar la carga promedio (P_m) donde las estructuras con base hexagonal tuvieron una mejora de hasta 156% respecto al valor más bajo igual a 109.10 kN. Físicamente, al realizarse la compresión, los vértices de la forma hexagonal permiten incrementar la capacidad de carga a través de una mejor distribución de esfuerzos. Considerando la energía absorbida (E_a), el menor desempeño se obtuvo con la estructura de patrón triangular irregular igual a 2.18 kJ. Tal valor indica inestabilidad de la forma geométrica triangular al momento de ser cargada, lo cual provoca el colapso prematuro de la misma. Mientras que el valor más alto fue de 5.59 kJ lo cual representó un aumento de 156.42%. El mismo comportamiento se obtuvo para la absorción de energía específica (SEA) por unidad de masa (g) en donde el valor más alto (22.36 J/g) fue para la estructura HC-HH.

TABLA 3
RESUMEN DE RESULTADOS NUMÉRICOS PARA ESTRUCTURAS BIOINSPIRADAS.

Código	Fuerza Pico P_{max} (kN)	Fuerza promedio P_m (kN)	Energía absorbida E_a (kJ)	Absorción de energía específica SEA (J/g)	Eficiencia fza de aplastamiento CFE
HC-T1	234.01	124.50	2.49	9.96	0.532
HC-T2	227.31	109.10	2.18	8.75	0.479
HC-HC	424.01	256.50	5.13	20.59	0.604
HC-HH	358.01	279.50	5.59	22.36	0.780

A pesar de que los indicadores analizados anteriormente dan cuenta del comportamiento mecánico de las estructuras analizadas, el parámetro más importante es la eficiencia de la fuerza de aplastamiento (CFE), donde un valor cercano a la unidad representa el valor óptimo. Este valor es deseable desde que físicamente ayuda a disminuir las aceleraciones bruscas al momento de las colisiones. Por tanto, la gravedad de las lesiones en los pasajeros puede ser minimizada. En este sentido las estructuras con base triangular presentaron valores bajos de CFE de entre 0.479-0.532. Esto significa que la fuerza de aplastamiento no se mantuvo durante el proceso de compresión, por lo cual no se encontró una eficiencia. Sin embargo, las estructuras HC-HC y HC-HH mostraron un mejor desempeño hasta alcanzar un valor de CFE. El valor más alto de CFE igual 0.78 se obtuvo para la estructura cuya celda es formada por un círculo central con un hexágono externo unido a través de costillas de rigidez. Tal patrón geométrico permitió una mayor resistencia a la formación de los pliegues plásticos, así como una mejor estabilidad estructural. Este valor de CFE representó una mejora de 62.83% respecto al valor más bajo. A partir de lo anterior la estructura HC-CH es ampliamente recomendada para aplicaciones de seguridad de pasajeros bajo condiciones de carga axial.

VI. APLICACIÓN: SISTEMA DE ABSORCIÓN DE ENERGÍA EN HELICÓPTERO

En esta sección se presenta el diseño alternativo de un sistema de absorción de energía para un helicóptero ultraligero de 300 kg, el cual fue diseñado a partir de los principales hallazgos del presente artículo. En este sentido se diseñó una estructura de pared delgada (HC-CH) manteniendo la misma relación de aspecto descrito en la Tabla 1. La estructura bioinspirada se colocó en la parte inferior del fuselaje de la cabina del helicóptero. Posteriormente se simuló una condición de caída de la aeronave contra el suelo con una velocidad horizontal y vertical de 36 km/h. Para todos los componentes se utilizó aluminio AA6061. Detalles del modelo discreto se presentan en la Fig. 9.

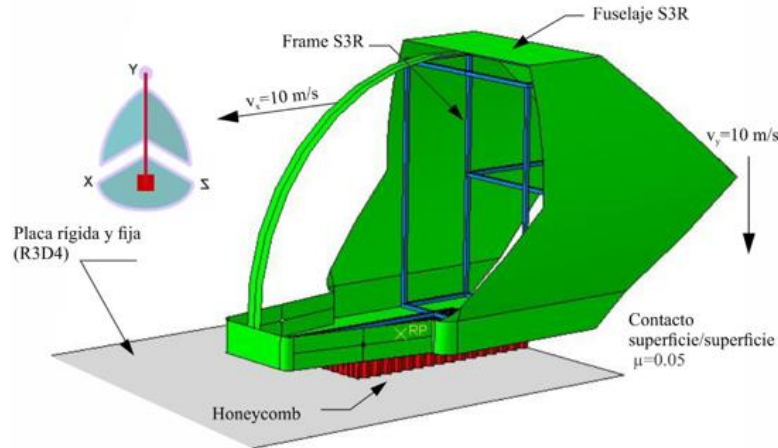


Fig. 9. Modelo discreto de la implementación de la estructura tipo panal de abeja bioinspirada en el fuselaje de un helicóptero.

El resultado obtenido para el historial de fuerza respecto al tiempo se presenta en la Fig. 10. En este sentido se observa una carga pico de 1400 kN la cual corresponde a la fuerza necesaria para romper la rigidez inicial del sistema incluyendo armazón/fuselaje y sistema panal de abeja. Posteriormente existe una disminución súbita de la fuerza, físicamente en este punto se ha alcanzado la falla de la estructura. Posteriormente se inicia el proceso de deformación por compresión de la estructura bioinspirada. En este punto se mantiene una fuerza con un valor aproximado de 1000 kN, lo cual indica la formación de pliegues plásticos estáticos y dinámicos, así como la interacción de las celdas del sistema panal de abeja. Posteriormente, la fuerza de impacto es controlada hasta disminuir gradualmente a cero en un tiempo de 2.5 ms.

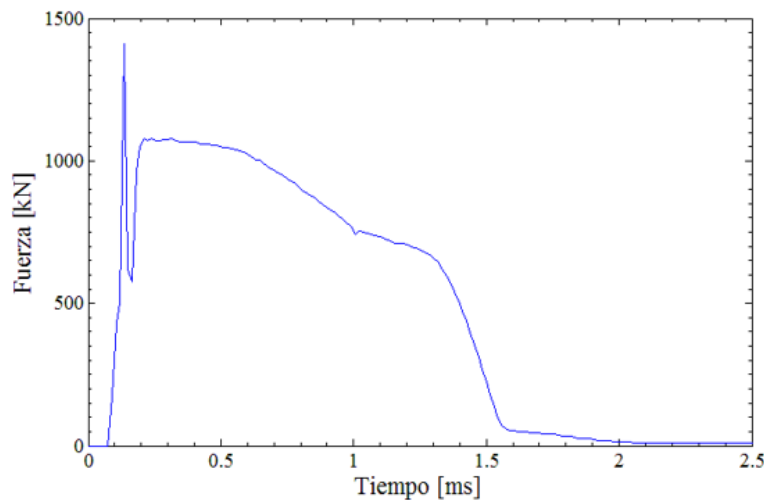


Fig. 10. Fuerza de impacto registrada para el sistema cabina/sistema de absorción de energía.

El modo de deformación tanto de la cabina, así como de la estructura bioinspirada tipo panal de abeja se presentan en la Fig. 11. En este sentido se observa que la mayor deformación plástica es sufrida por la estructura de pared delgada, lo cual se traduce como una mayor absorción de energía permitiendo reducir los daños en el

fuselaje y lesiones en los pasajeros. A partir de lo anterior se valida la efectividad del diseño bioinspirado en el caparazón de armadillo de la estructura (HC-CH).

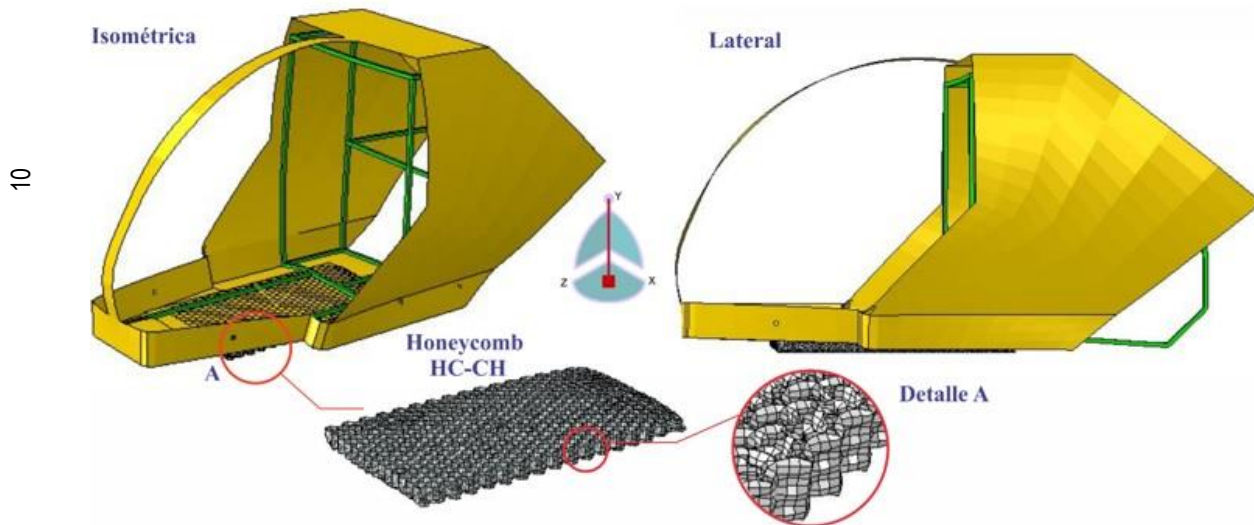


Fig. 11. Fuerza de impacto registrada para el sistema cabina/sistema de absorción de energía.

VII. CONCLUSIONES

En este artículo se analizó la factibilidad del diseño de estructuras panel de abeja basadas en el caparazón de armadillo. En este sentido se analizaron numéricamente a través de una prueba de compresión cuatro estructuras bioinspiradas (BTWS) con geometrías poligonales. A partir de los resultados numéricos se encontraron las siguientes conclusiones.

1. La resistencia al impacto de las BTWS está directamente relacionado a la geometría presentada seguido del arreglo interno de la celda, y finalmente del número de costillas de unión.
2. Las estructuras bioinspiradas en la parte central del caparazón del armadillo (bandas) tiene una menor resistencia al impacto respecto a las estructuras de pared delgada basadas en las escamas frontales y traseras del caparazón cuya geometría está basada en polígonos (hexágonos).
3. Respecto a la resistencia al impacto (P_{max}) las estructuras panel de abeja (HC-HH y HC-CB) permitieron incrementar el desempeño hasta un 87% comparado con la estructura HC-T2.
4. Respecto a la energía absorbida el mejor desempeño (5.59 kJ) se obtuvo con la estructura cuya celda está formado por hexágonos (HC-HH). Esto represento una mejora de 156.2%.
5. Finalmente, considerando que una estructura optima es aquella cuya CFE es igual a uno, el mejor desempeño lo obtuvo la estructura HC-CH con un valor de 0.78. Esto represento una mejora de 62.83%. Por tanto, esta estructura es altamente recomendada para el diseño de sistemas de absorción de energía.
6. La efectividad del sistema bioinspirado propuesto quedó validada desde que se pudo dar una aplicación real y cuya respuesta denota la efectividad para contrarrestar cargas de impacto.

REFERENCIAS

- [1] X. Yang, J. Ma, D. Wen, J. Yang, "Crashworthy design and energy absorption mechanisms for helicopter structures: A systematic literature review," *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 114, no. 100618, p. 100-618, 2020
- [2] J. Fu, Q. Liu, K. Liufu, Y. Deng, J. Fang, Q. Li, "Design of bionic-bamboo thin-walled structures for energy absorption," *Thin-Walled Struct.*, vol. 135, pp. 400–413, 2019.
- [3] P. Hao, J. Du, "Energy absorption characteristics of bio-inspired honeycomb column thin-walled structure under impact loading," *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 79, pp. 301–308, 2018.
- [4] P. Astori, M. Zanella, M. Bernardini, "Validation of numerical models of a rotorcraft crashworthy seat and subfloor," *Aerospace*, vol. 7, no. 12, p. 174, 2020.
- [5] V. F. González-Albuixech, M. Rodríguez-Millán, T. Ito, J. A. Loya, M. H. Miguélez, "Numerical analysis for design of bioinspired ceramic modular armors for ballistic protections," *Int. J. Damage Mech.*, vol. 28, no. 6, pp. 815–837, 2019
- [6] J. Paz, L. Romera, J. Díaz, "Crashworthiness optimization of aircraft hybrid energy absorbers enclosing honeycomb and foam structures," *AIAA J.*, vol. 55, no. 2, pp. 652–661, 2017.
- [7] Q. He, D. Ma, Z. Zhang, L. Yao, "Crushing analysis and crashworthiness optimization design of reinforced regular hexagon honeycomb sandwich panel," *Sci. Eng. Compos. Mater.*, vol. 23, no. 6, pp. 625–639, 2016.
- [8] K. M. Park, K. S. Min, Y. S. Roh, "Design optimization of lattice structures under compression: study of unit cell types and cell arrangements," *Materials*, vol. 15, no. 1, 97, 2022.
- [9] S. E. Sadiq, S. H. Bakhy, M. J. Jweeg, "Crashworthiness behavior of aircraft sandwich structure with honeycomb core under bending load," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 881, no. 1, p. 012046, 2020.
- [10] D. Hu, Y. Wang, B. Song, L. Dang, Z. Zhang, "Energy-absorption characteristics of a bionic honeycomb tubular nested structure inspired by bamboo under axial crushing," *Compos. B Eng.*, vol. 162, pp. 21–32, 2019.
- [11] T. Yan, J. Wang, "Crashworthy component design of an ultra-light helicopter with energy absorbing composite structure," *Procedia Eng.*, vol. 80, pp. 329–342, 2014.
- [12] S. A. Galehdari, H. Khodarahmi, "Design and analysis of a graded honeycomb shock absorber for a helicopter seat during a crash condition," *Int. J. Crashworthiness*, vol. 21, no. 3, pp. 231–241, 2016.
- [13] Q. Chen, N. M. Pugno, "Bio-mimetic mechanisms of natural hierarchical materials: a review," *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 19, pp. 3–33, 2013.
- [14] H. Yin, X. Wang, G. Wen, C. Zhang, W. Zhang, "Crashworthiness optimization of bio-inspired hierarchical honeycomb under axial loading," *Int. J. Crashworthiness*, vol. 26, no. 1, pp. 26–37, 2021.
- [15] X. Niu, F. Xu, Z. Zou, T. Fang, S. Zhang, Q. Xie, "In-plane dynamic crashing behavior and energy absorption of novel bionic honeycomb structures," *Compos. Struct.*, vol. 299, no. 116064, p. 116064, 2022.
- [16] D. Hu, Y. Wang, B. Song, L. Dang, Z. Zhang, "Energy-absorption characteristics of a bionic honeycomb tubular nested structure inspired by bamboo under axial crushing," *Compos. B Eng.*, vol. 162, pp. 21–32, 2019
- [17] J. St. John, "File: Dasypus novemcinctus (nine-banded armadillo) 1 (15543283797).jpg," Wikimedia.org. [Online]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dasypus_novemcinctus_%28nine-banded_armadillo%29_1_%2815543283797%29.jpg. [Accessed: 29-Dec-2022].
- [18] N. Qiu, Y. Gao, J. Fang, Z. Feng, G. Sun, and Q. Li, "Crashworthiness analysis and design of multi-cell hexagonal columns under multiple loading cases," *Finite Elem. Anal. Des.*, vol. 104, pp. 89–101, 2015.

Análisis de un sistema de conducción autónoma

Analysis of an Autonomous Driving System

Zabulón Miguel **Hernández-Olivares**¹, Alberto Jorge **Rosales-Silva**²,
Armando Adrián **Miranda-González**³, Dante **Mujica-Vargas**⁴,
Ponciano Jorge **Escamilla-Ambrosio**⁵, Jean Marie **Vianney-Kinani**⁶,
Floriberto **Ortiz-Rodríguez**⁷

Instituto Politécnico Nacional, México

¹<https://orcid.org/0000-0002-5694-1446> | zhernandez1500@alumno.ipn.mx

²<https://orcid.org/0000-0001-8436-3025> | arosales@ipn.mx

³<https://orcid.org/0000-0003-4673-0490> | amirandaq1100@alumno.ipn.mx

⁵<https://orcid.org/0000-0003-3772-3651> | pescamillaa@ipn.mx

⁶<https://orcid.org/0000-0001-5237-3050> | jkinani@ipn.mx

⁷flortiz@ipn.mx

Tecnológico Nacional de México, MÉXICO

⁴<https://orcid.org/0000-0001-8665-4096> | dante.mv@cenidet.tecnm.mx

Recibido 23-03-2023, aceptado 09-05-2023.

Resumen

Debido al progreso tecnológico en automatización e inteligencia artificial aplicados a la autonomía de vehículos, ha surgido una mayor relevancia en los niveles de asistencia a la conducción autónoma, como lo indica un informe del INEGI que muestra una disminución en el número de muertes en accidentes de tránsito entre 2016 y 2020 [1]. Por esta razón, el Instituto Mexicano de Transporte (IMT) se basó en lo que la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE, *Society of Automotive Engineers*) ha establecido, que es una clasificación de 6 niveles de asistencia a la conducción, que abarca desde la conducción sin automatización hasta la conducción autónoma total.

Este artículo presenta el funcionamiento de un sistema de conducción autónoma en el nivel de asistencia 3, implementado Matlab Simulink, desarrollando un escenario utilizando el motor gráfico UNREAL ENGINE, el cual incluye un entorno realista con peatones, tráfico automovilístico y diferentes diseños de pistas y carreteras. Las pruebas de funcionamiento se llevaron a cabo en este entorno simulado, utilizando un algoritmo detector de objetos llamado You Only Look Once, versión 2, el cual se encarga de detectar automóviles, peatones y señalizaciones haciendo uso de una cámara y un sensor LIDAR (Detección de Luz y Rango) para ampliar el campo de visión de forma artificial.

Palabras clave: detección automática de objetos, conducción autónoma, inteligencia artificial, LIDAR, YOLO.

Abstract

Due to the technological advance in automation and artificial intelligence applied to the autonomy of vehicles, it has caused the levels of assistance for autonomous driving to be more relevant since, according to the INEGI from 2016 to 2020 there is a sustained decrease in the number of deaths in traffic accidents. [1] That is why the Society of Automotive Engineers SAE standardized a classification where 6 levels of driving assistance are defined which includes driving without automation to total autonomous driving. [2] This article shows the operation of an autonomous driving system having an assistance level 3 carried out through Matlab Simulink, a scenario was developed by means of an UNREAL ENGINE graphic engine that had a realistic environment that shows pedestrians and car traffic as well as different track and road layouts. The performance tests were carried out in a simulated environment where an object detector algorithm called You Only Look Once in its version 2 is used. YOLO oversees detecting cars, pedestrians, and signs by means of a camera and a LIDAR sensor. (Light Detection and Range) to extend the field of vision artificially.

Index terms: artificial intelligence, autonomous driving, LIDAR, object detection algorithm, YOLO.

I. INTRODUCCIÓN

Cada día, los vehículos autónomos se vuelven más accesibles para la población, lo que demuestra que nuestro entendimiento sobre ellos se ha vuelto más evidente y la tecnología ha evolucionado al punto en el que podemos convertirnos en pasajeros de nuestros propios vehículos. Según el *IMT* [3], en México existen niveles de conducción autónoma que muestran el alcance en el que un automóvil puede asistir al conductor. Estos niveles van desde la ausencia de automatización hasta la autonomía total del vehículo. En la Tabla 1 se presentan los niveles de clasificación. El análisis del presente trabajo se enfoca en un nivel de conducción autónoma de tipo 3, que se una conducción condicionada en la que la intervención humana se reduce.

TABLA 1
NIVELES DE ASISTENCIA DE UN VEHÍCULO AUTÓNOMO SAE, IMT [2], [3]

Nivel	Concepto	Descripción
0	Sin automatización	No existe ningún tipo de automatización en el vehículo.
1	Asistencia del conductor	En este nivel ya existe algo de automatización, como lo es el control del volante o dirección.
2	Automatización parcial	El automóvil maneja sistemas como el volante y pedales, pero siempre bajo la supervisión del conductor.
3	Automatización de conducción condicional	En esta categoría entran en funcionamiento la velocidad constante, el asistente a la conducción y el aparcamiento automatizado.
4	Automatización de conducción alta	El automóvil maneja y conduce por sí mismo casi por completo exceptuando algunos entornos con climatología adversa como niebla, nieve y tormentas.
5	Automatización de conducción completa	Este sistema como menciona es una conducción completa, es el último nivel y aquí el conductor es un mero espectador ya que el vehículo hace todo el trabajo

En relación con lo mostrado en la Tabla 1, se ha observado un notable aumento en el uso de asistencia a la conducción en los últimos niveles. Este incremento puede atribuirse directamente a la aplicación de la inteligencia artificial (*IA*, *artificial intelligence*). La *IA* desempeña un papel fundamental en el progreso de los vehículos autónomos, ya que estos automóviles emplean una combinación de sensores, sistemas de percepción y algoritmos de aprendizaje automático para adquirir comprensión del entorno, tomar decisiones y controlar su movimiento de manera autónoma.

Los vehículos autónomos recolectan datos del entorno en el que se encuentran mediante diversas cámaras y sensores LIDAR. Estos dispositivos capturan información sobre objetos, peatones, señales de tráfico, carriles y cualquier otro elemento relevante en la vía. Posteriormente, la *IA* procesa y analiza estos datos con el objetivo de comprender el entorno y tomar decisiones en tiempo real.

A. Inteligencia artificial en vehículos autónomos

La implementación de una *IA* en el ámbito de los vehículos autónomos ha dado lugar al desarrollo de algoritmos de percepción que habilitan a estos vehículos para identificar y reconocer de manera precisa y confiable los objetos presentes en su entorno. Estos algoritmos se basan en técnicas de visión por computadora y aprendizaje automático, que les permiten detectar y clasificar una amplia variedad de elementos, incluyendo peatones, vehículos, ciclistas, señales de tráfico y obstáculos.

La visión artificial es parte importante de los vehículos autónomos, ya que les proporciona información sobre su entorno y de acuerdo con el algoritmo que se tenga, toma decisiones adecuadas en tiempo real. Los algoritmos de percepción emplean modelos de aprendizaje automático entrenados con grandes conjuntos de datos que contienen información de diferentes objetos. Estos modelos aprenden patrones y características relevantes, lo que les permite reconocer y comprender el entorno en función de los datos capturados por los sensores del vehículo.

3

Una de las tareas principales de los algoritmos de percepción es generar una representación precisa del entorno del vehículo. Esto se logra mediante la creación de un modelo gráfico que está en forma de nube de puntos, que captura la posición tridimensional de los objetos detectados en relación con el vehículo. A medida que el vehículo se desplaza, estos algoritmos actualizan constantemente el modelo de percepción para adaptarse a los cambios en el entorno y garantizar una representación actualizada y precisa.

Los algoritmos de percepción se desempeñan en la seguridad y el rendimiento de los vehículos autónomos. Su capacidad para detectar y reconocer objetos con precisión permite que el vehículo tome decisiones informadas, como evitar colisiones, ajustar la velocidad o detenerse en respuesta a las señales de tráfico. A medida que la investigación y el desarrollo en el campo de la IA y los vehículos autónomos continúan avanzando, se espera que los algoritmos de percepción se vuelvan cada vez más sofisticados y precisos, permitiendo una conducción autónoma más segura y eficiente en el futuro.

B. Aprendizaje automático

El aprendizaje automático (*Machine Learning, ML*) es una disciplina que forma parte de la inteligencia artificial (IA) y se centra en el desarrollo de algoritmos y modelos que permiten a las computadoras aprender y tomar decisiones basadas en datos, sin requerir programación específica para tareas particulares.

El *ML* se fundamenta en la premisa de que las máquinas pueden aprender de manera autónoma a través de la experiencia y mejorar su desempeño en una tarea específica a medida que se les suministra más información. En lugar de seguir instrucciones explícitas, el *ML* permite que las computadoras analicen grandes volúmenes de datos y reconozcan patrones, teniendo la capacidad de realizar predicciones, tomar decisiones y llevar a cabo tareas sin necesidad de una intervención humana directa.

Dentro del *ML*, existen diversas técnicas de aprendizaje, siendo los más comunes el aprendizaje supervisado y el aprendizaje no supervisado. En el aprendizaje supervisado, se suministra a la máquina un conjunto de datos de entrenamiento que están previamente etiquetados o clasificados. La máquina utiliza esta información para aprender a realizar predicciones o clasificaciones cuando se le presentan nuevos datos. En contraste, en el aprendizaje no supervisado, la máquina se le proporciona un conjunto de datos sin etiquetas y su tarea consiste en descubrir patrones o estructuras en los datos de manera autónoma, sin la orientación de categorías predefinidas.

C. Aprendizaje profundo

El aprendizaje profundo (*Deep Learning, DL*), es una rama del *ML* que se enfoca en el entrenamiento de redes neuronales artificiales profundas para procesar datos y realizar tareas de manera automática. Está inspirado en la estructura y función del cerebro humano, específicamente en las redes neuronales biológicas.

El *DL* se basa en el uso de redes neuronales artificiales compuestas por múltiples capas de nodos interconectados, que se conocen como capas ocultas. Cada capa procesa y extrae características de los datos de entrada de manera progresiva y jerárquica. El entrenamiento de una red neuronal profunda implica la alimentación de datos de entrenamiento a través de la red y la comparación de las salidas generadas por la red

con las salidas deseadas. A través de algoritmos de optimización, como la retropropagación del error, los pesos y las conexiones de la red se ajustan gradualmente para minimizar la discrepancia entre las salidas reales y las esperadas. Este proceso de entrenamiento se repite iterativamente hasta que la red logre un nivel de rendimiento satisfactorio en la tarea específica.

D. Redes Neuronales artificiales

Las redes neuronales artificiales (*Artificial Neural Networks, ANN*), se inspiran en las redes neuronales biológicas que se encuentran en el cerebro humano. Estas redes están compuestas por elementos que imitan el comportamiento de las neuronas biológicas en sus funciones más comunes, y están organizados de manera similar a la estructura del cerebro humano.

Desde su inicio, el desarrollo de redes neuronales artificiales ha sido impulsado por la comprensión de que el cerebro humano realiza cálculos de una manera muy diferente a la de las computadoras digitales convencionales. Mientras que las computadoras son lineales y trabajan de manera secuencial, el cerebro es altamente complejo, no lineal y paralelo.

Como se muestra en la Fig.1 las redes neuronales están formadas por un conjunto de nodos conocidos como neuronas que transmiten señales entre sí, las neuronas de la red están a su vez conectadas en capas que forman la red neuronal, en la figura se ilustra una red neuronal de 3 capas que contiene 3 neuronas de entrada, 4 neuronas en la capa oculta, y 2 neuronas de salida [4].

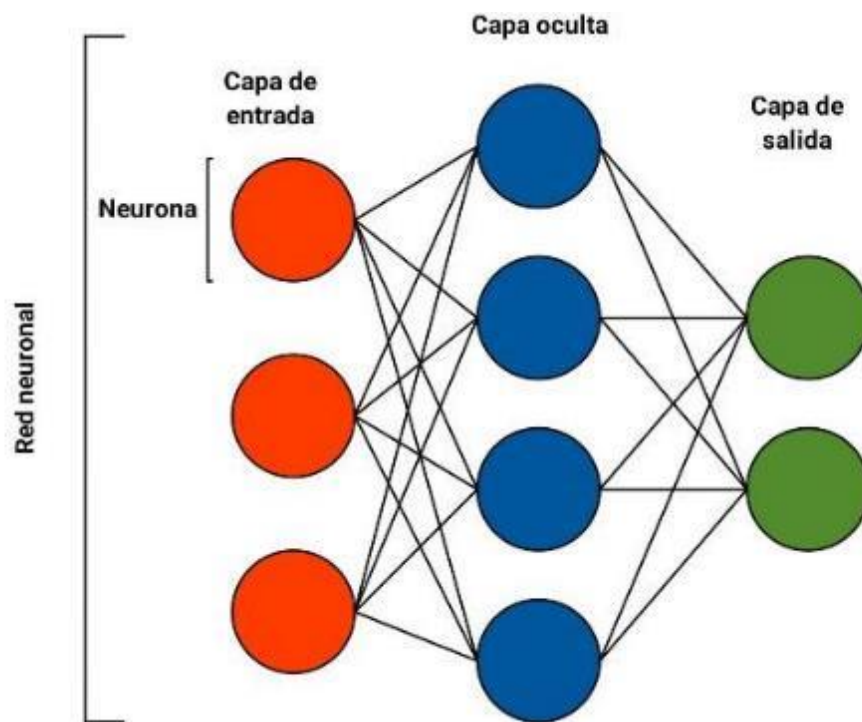


Fig. 1. Esquema general representativa de una red neuronal donde los círculos representan las neuronas y las líneas conexiones entre neuronas.

E. Detectores de objetos

Los detectores de objetos son una herramienta importante en la visión por computadora y el procesamiento de imágenes. Estos sistemas utilizan algoritmos de aprendizaje profundo para identificar y localizar objetos específicos en una imagen o video. Los detectores de objetos se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, desde el reconocimiento facial, la seguridad en el hogar hasta la detección de objetos en entornos de conducción autónoma. Estos sistemas suelen utilizar redes neuronales convolucionales (CNN, Convolutional Neural Network) para analizar y clasificar características específicas de la imagen, como bordes y formas, y luego utilizar esta información para identificar objetos y su ubicación en la imagen. Los detectores de objetos son una tecnología en constante evolución, y su precisión y capacidad de detección siguen mejorando gracias al uso de técnicas avanzadas de aprendizaje automático y al aumento de la capacidad de procesamiento de los ordenadores.

La mayoría de los algoritmos de detección de objetos emplean diversas arquitecturas de redes neuronales configuradas para abordar tareas específicas, lo que implica la necesidad de un entrenamiento previo. En este artículo, se muestra el como una red neuronal detectora de objetos llamada YOLO (You Only Look Once), la cual ha sido entrenada específicamente para la conducción autónoma [5], [6]. YOLO es uno de los múltiples detectores disponibles, y en su versión 2 utiliza una red de detección de una sola etapa, lo cual le confiere una mayor velocidad en comparación con otros detectores de objetos, como Fast R-CNN y Faster R-CNN ResNet [5]. Estos últimos utilizan un enfoque de aprendizaje profundo en dos etapas. El modelo YOLOv2 ejecuta una CNN [5], [6] en una imagen de entrada para generar predicciones de la red. Posteriormente, el detector de objetos decodifica estas predicciones y genera cuadros delimitadores para el reconocimiento de la imagen.

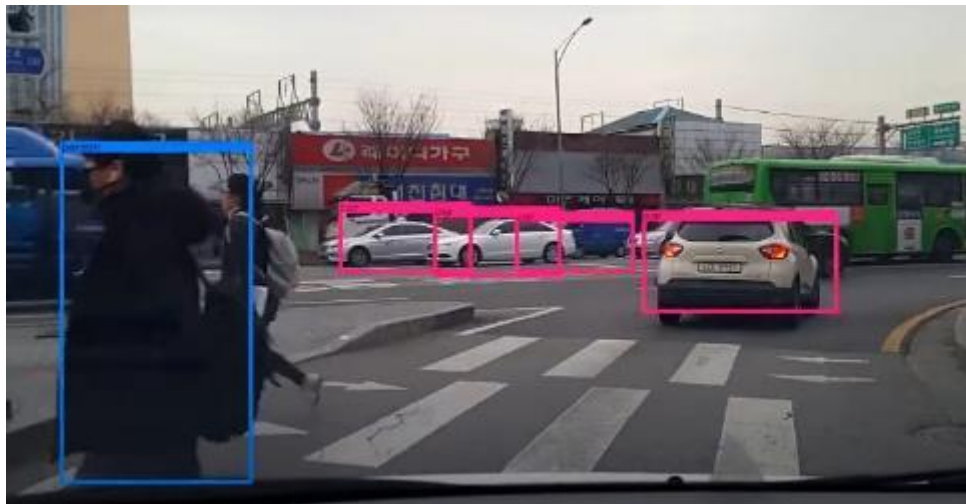


Fig. 2. Ejemplo del funcionamiento de un detector de objetos YOLOv2 en tiempo real. [6]

Como se muestra en la Tabla 2, YOLO usa la arquitectura Darknet-19 [8] que es un tipo de red neuronal convolucional CNN utilizada en el campo de la visión por computadora y el reconocimiento de objetos. Fue desarrollada por Joseph Redmon como parte del proyecto Darknet, que se enfoca en la detección de objetos en imágenes.

Darknet-19 se compone de un total de 19 capas, incluyendo capas de convolución, capas de agrupación (pooling) y capas completamente conectadas. A diferencia de otras arquitecturas populares como VGG o ResNet, Darknet-19 utiliza filtros de tamaño 3×3 en lugar de filtros más grandes, como 7×7 o 11×11. Esto

reduce el número de parámetros y, por lo tanto, disminuye la complejidad computacional de la red. La arquitectura Darknet-19 sigue el patrón general de las *CNN*, donde las capas de convolución se utilizan para extraer características a diferentes niveles de abstracción, y las capas completamente conectadas se utilizan para la clasificación final [5], [8], [9].

- Capas de convolución: Utilizan filtros de 3×3 para convolucionar la entrada y generar mapas de características. Estas capas se encargan de extraer características a diferentes niveles de abstracción.
- Capas de agrupación (pooling): Reducen la dimensionalidad de los mapas de características, preservando las características más relevantes. Se utiliza el MaxPooling, que selecciona el valor máximo de una región.
- Capa de salida: Produce las salidas finales de la red, representando las probabilidades de clasificación de diferentes clases de objetos.

TABLA 2
ARQUITECTURA YOLO [8]

Tipo	Filtro	Tamaño	Salida
Convolutacional	32	3×3	224×224
Maxpool		$2 \times 2 / 2$	112×112
Convolutacional	64	3×3	112×112
Maxpool		$2 \times 2 / 2$	56×56
Convolutacional	128	3×3	56×56
Convolutacional	64	1×1	56×56
Convolutacional	128	3×3	56×56
Maxpool		$2 \times 2 / 2$	28×28
Convolutacional	256	3×3	28×28
Convolutacional	128	1×1	28×28
Convolutacional	256	3×3	28×28
Maxpool		$2 \times 2 / 2$	14×14
Convolutacional	512	3×3	14×14
Convolutacional	256	1×1	14×14
Convolutacional	512	3×3	14×14
Convolutacional	256	1×1	14×14
Convolutacional	512	3×3	14×14
Maxpool		$2 \times 2 / 2$	7×7
Convolutacional	1024	3×3	7×7
Convolutacional	512	1×1	7×7
Convolutacional	1024	3×3	7×7
Convolutacional	512	1×1	7×7
Convolutacional	1024	3×3	7×7
Convolutacional	1000	1×1	7×7
Av gpool		Global	1000
Softmax			

F. Sensores

En la conducción autónoma se depende de sensores para detectar de objetos como lo son peatones, vehículos entre otros, esto forma una parte fundamental de los vehículos pues es la forma en cómo se tiene una visión artificial del entorno. Los vehículos autónomos usan diferentes sensores, uno de ellos es el Detector de luz y rango (Light Detection And Ranging, *LIDAR*). Un sistema *LIDAR* consiste en un transmisor que genera una

señal, con una potencia y una longitud de onda específica. La luz generada por el transmisor pasa a través de un splitter, un splitter une o divide la señal óptica según sea el caso, en esta primera parte divide la señal, una parte pasa a través de un modulador óptico para transmitirla en el espacio libre y la otra parte se dirige al receptor, donde se utilizará como referencia. Después de cruzar la óptica del receptor, la señal recibida pasa a través de un filtro óptico que suaviza el ruido para el proceso de detección, después del filtro óptico, la señal pasa a través de otro splitter que en este caso une la señal recibida del objetivo con la señal de referencia del transmisor y se entrega al detector óptico, y se convierte en una señal eléctrica para procesar la información como se ilustra en la Fig. 3 [10], [11].

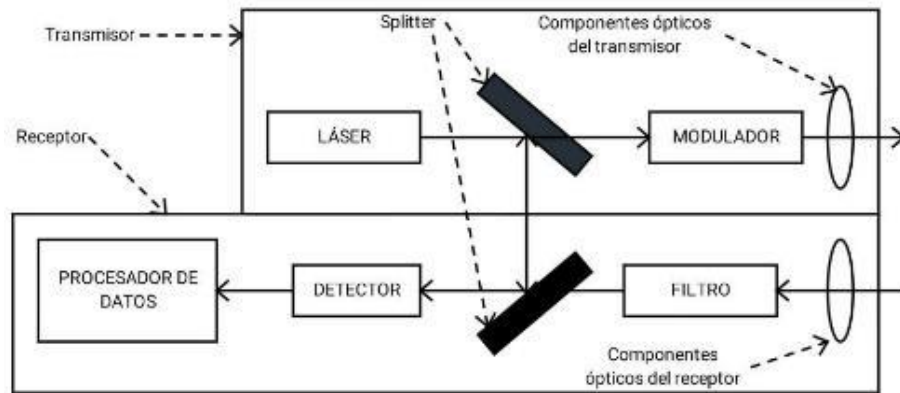


Fig. 3. Diagrama general del sensor LIDAR [10], [11].

II. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONDUCCIÓN AUTÓNOMA

A. Diagrama General

En la Fig.4 se ilustra un esquema general que representa el funcionamiento del sistema de conducción autónoma. En dicho diagrama se visualizan todos los bloques que lo conforman, que incluyen los siguiente:

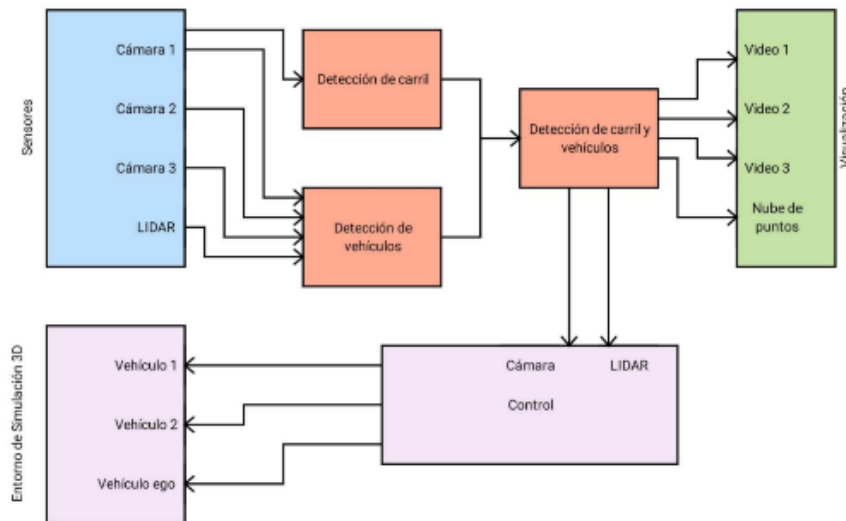


Fig. 4. Diagrama de bloques general para el funcionamiento de un vehículo autónomo.

- Entorno de simulación 3D.
- Sensores simulados.
- Bloques de detección.
- Control.
- Visualización.

B. Entorno de simulación

∞

Se presenta Unreal Engine [12] como plataforma de desarrollo para cada uno de los entornos, debido a que es uno de los motores gráficos más avanzados disponibles para la creación de videojuegos y aplicaciones interactivas en 3D. La creación de un escenario de simulación en Unreal Engine implica el uso de diversos componentes y recursos, como la configuración de niveles del entorno, la creación de objetos, la programación de eventos y la aplicación de efectos visuales, tal como se muestra en la Fig.5.

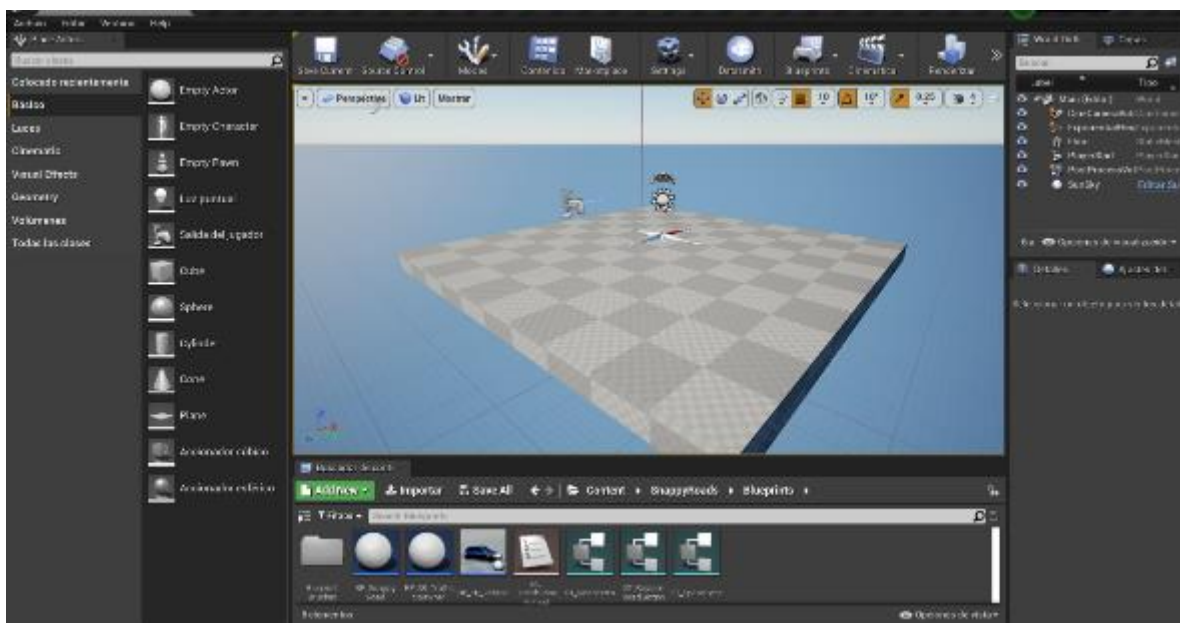


Fig. 5. Diseño en el motor grafico UNREAL ENGINE

C. Sensores simulados

Hay varias razones que respaldan el uso de un sensor *LIDAR* [7] [13] simulado en Simulink de MATLAB para un vehículo de conducción autónoma. Una de ellas es la capacidad de evaluar y desarrollar algoritmos de percepción, ya que el sensor *LIDAR* es importante en los sistemas de percepción de vehículos autónomos al proporcionar información tridimensional del entorno mediante la emisión de pulsos de luz. Al simular un sensor *LIDAR* en Simulink, es posible crear y probar algoritmos de percepción en un entorno controlado y reproducible. Esto facilita la evaluación y mejora de los algoritmos de detección y seguimiento de objetos antes de su implementación.

En la Fig.6 se muestra la simulación de una cámara utilizando Simulink en MATLAB para la conducción autónoma. Simular presenta múltiples beneficios, que incluyen la evaluación y desarrollo de algoritmos de visión, la mitigación de riesgos, el control y la reproducibilidad del entorno de prueba, y la flexibilidad en el desarrollo del sistema.

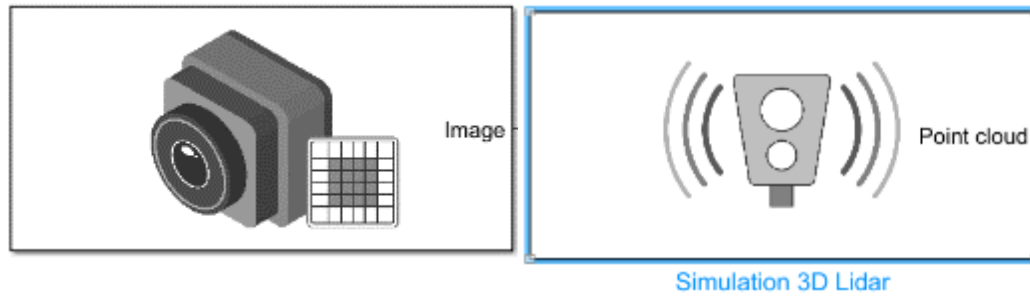


Fig. 6. Bloques del sensor LIDAR y la cámara.

D. Bloques de detección

YOLOv2 se utiliza en bloques de Simulink para la detección de vehículos y la detección de líneas debido a su alta precisión, rendimiento en tiempo real, capacidad de detectar múltiples clases de objetos. Su implementación simplificada y la posibilidad de utilizar modelos pre-entrenados donde se usa como base darknet19 que es una arquitectura de *CNN* utilizada en el campo de la visión por computadora y el aprendizaje profundo. En la Fig.7 se muestran los bloques utilizados y en cada uno se implementa YOLO v2.

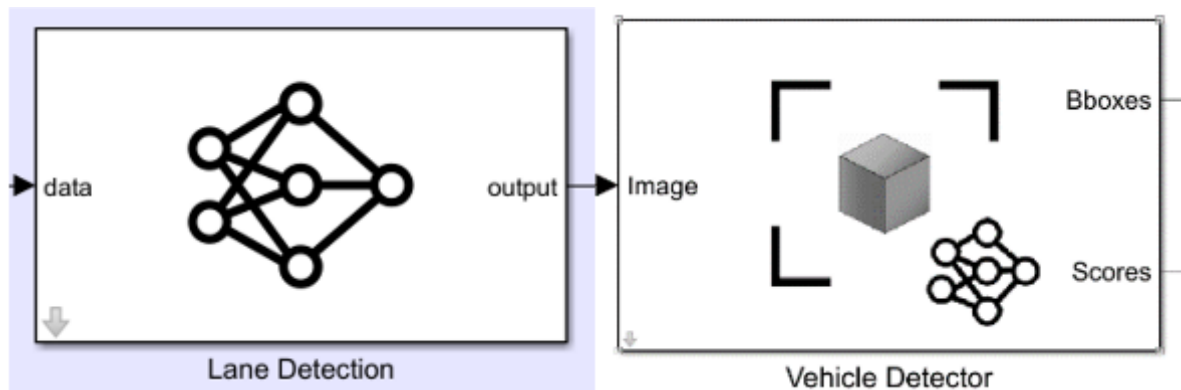


Fig. 7. Diagrama a bloques del funcionamiento de el detector de línea y de carril.

E. Control

Para el control, se emplea el modelo cinemático del bloque Ackermann como se muestra en la Fig.8, el cual consiste en un modelo de vehículo similar a un automóvil que utiliza un sistema de dirección Ackermann. Este modelo representa un vehículo con dos ejes separados por una distancia conocida como distancia entre ejes.

El estado del vehículo se define mediante un vector de cuatro elementos: $[x \ y \ \theta \ \psi]$. Este vector incluye la posición global del vehículo en términos de coordenadas x e y , la dirección del vehículo (θ) y el ángulo de giro (ψ). Es importante destacar que la dirección del vehículo y la posición x e y se refieren al centro del eje trasero. Los ángulos se expresan en radianes y las posiciones globales en metros. La entrada de dirección para el vehículo se representa como $d\psi/dt$, que indica la tasa de cambio del ángulo de giro en radianes por segundo [8]. Esto permite controlar la dirección y el movimiento del vehículo de manera precisa.

El modelo cinemático del bloque Ackermann es ampliamente utilizado en la industria automotriz y en sistemas de control de vehículos autónomos. Proporciona una representación eficaz del comportamiento del vehículo y permite realizar cálculos para el control de su movimiento en tiempo real.

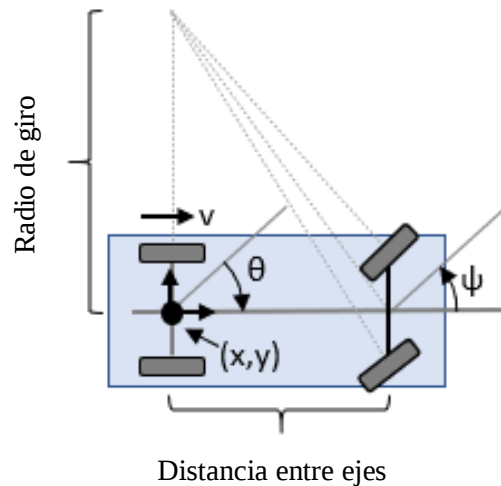


Fig. 8. Modelo cinemático de Ackermann.

Como se muestra en la Fig.9, se ocupa así también un bloque de control crucero adaptativo (ACC, Adaptive Cruise Control) que rastrea una velocidad establecida y mantiene una distancia segura de un vehículo líder al ajustar la aceleración longitudinal de un vehículo ego. El bloque calcula las acciones de control óptimas mientras satisface las restricciones de distancia, velocidad y aceleración seguras mediante el control predictivo del modelo MPC.

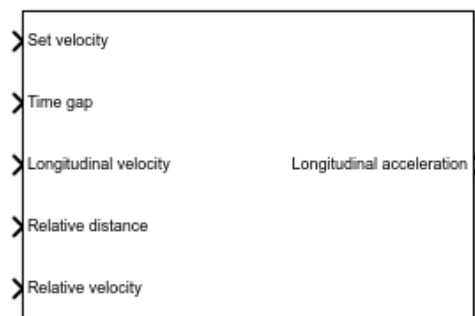


Fig. 9. Bloque del control crucero adaptativo

Un vehículo ego equipado con ACC tiene un sensor LIDAR que hace un mapeo del entorno y al vehículo precedente en el mismo carril (automóvil líder), $[D_{rel}]$. El sensor también mide la velocidad relativa del auto líder, $[V_{rel}]$. El sistema ACC opera en los siguientes dos modos:

- Control de velocidad: el vehículo ego viaja a una velocidad establecida por el conductor.
- Control de distancia: El vehículo ego mantiene una distancia segura del auto líder.

El sistema ACC decide qué modo usar en función de las mediciones del LIDAR en tiempo real. Por ejemplo, si el auto líder está demasiado cerca, el sistema ACC cambia de control de velocidad a control de espacio. De manera similar, si el auto líder está más lejos, el sistema ACC cambia de control de espacio a control de velocidad. En otras palabras, el sistema ACC hace que el vehículo ego viaje a la velocidad establecida siempre que mantenga una distancia segura, véase Fig. 10.

Si $[D_{ref} \geq D_{segura}]$, entonces el modo de control de velocidad está activo. El objetivo del control es rastrear la velocidad establecida por el controlador, $[V_{inicial}]$.

Si $[D_{ref} < D_{segura}]$, entonces el modo de control de espaciado está activo. El objetivo del control es mantener la distancia de seguridad, $[D_{segura}]$.

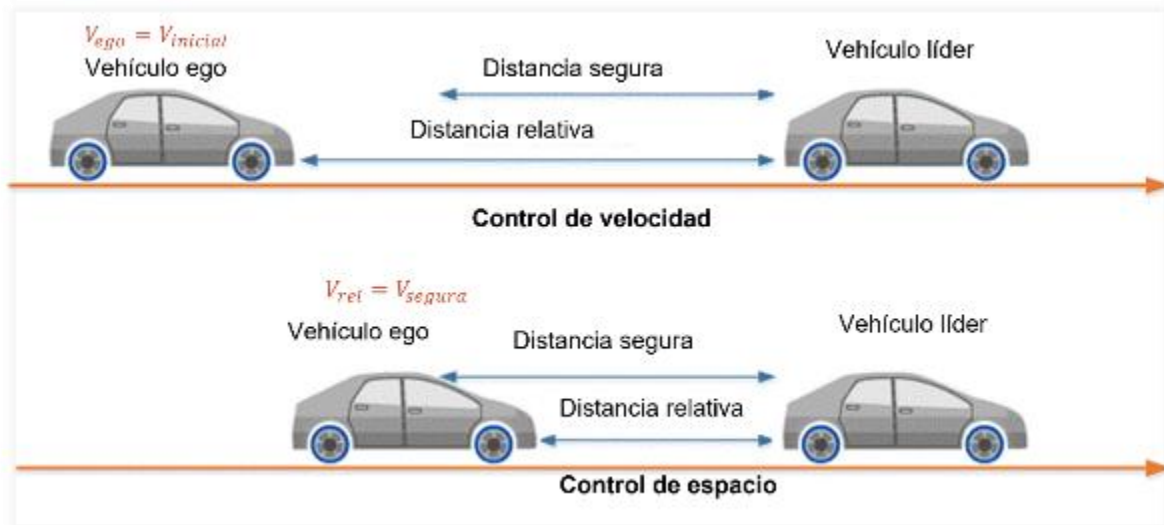


Fig. 10. Imagen gráfica del vehículo líder y el vehículo ego [13][14].

F. Visualización

Para la visualización de cada una de las cámaras se simulan 3 bloques de cámara en simulink de MATLAB teniendo una en el techo del vehículo y las otras 2 ubicadas en el lado izquierdo y derecho respectivamente como se muestra en la Fig.11.

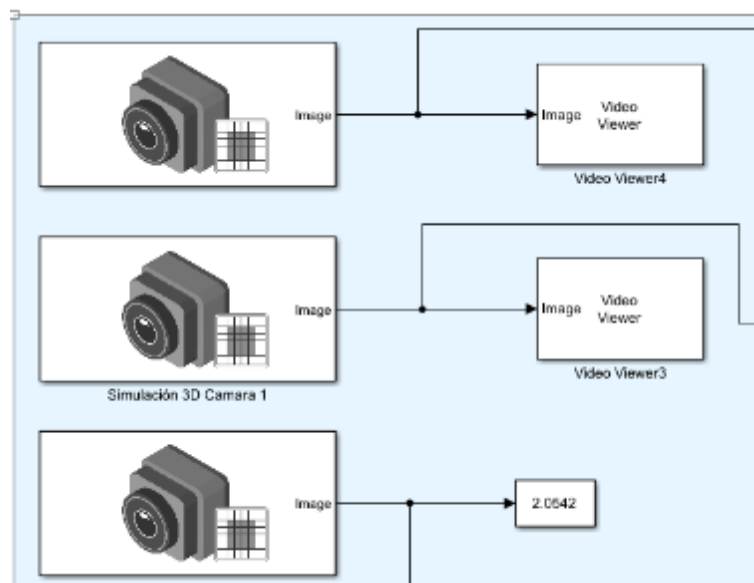


Fig. 11. Diagrama a bloques de las cámaras utilizadas.

III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

A. Escenario simulado

El motor gráfico Unreal Engine es un entorno de desarrollo utilizado para crear videojuegos en el cual también ofrece una variedad de herramientas esenciales para la construcción de simulaciones de entornos, en la Fig.12 se ilustra el escenario realizado, se agregaron señalamientos, también se realizó una pista que contara con al menos 4 carriles para tener un mayor flujo de automóviles y el detector de objetos se encargara de reconocerlos, así también se añadieron diferentes tipos de arquitecturas como lo son edificios y vegetación y para complementar el entorno simulado se agregaron algunos peatones.



Fig. 12. Creación del entorno de 4 carriles y señalamientos.

B. Aplicación se sistema de conducción autónoma en el entorno gráfico

De acuerdo con el diagrama general en la Fig.4, configurando cada uno de los bloques que conforman el vehículo autónomo en Matlab simulink, y ya hecho el escenario, la siguiente sección lo conforman los bloques haciendo uso de YOLOv2, aquí el sensor LIDAR y la cámara monocular funcionan como la visión artificial del vehículo dándonos como resultado un reconocimiento de vehículos clasificados como se observa en la Fig.13.



Fig. 13. Detección de objetos a través de la cámara con YOLOv2.

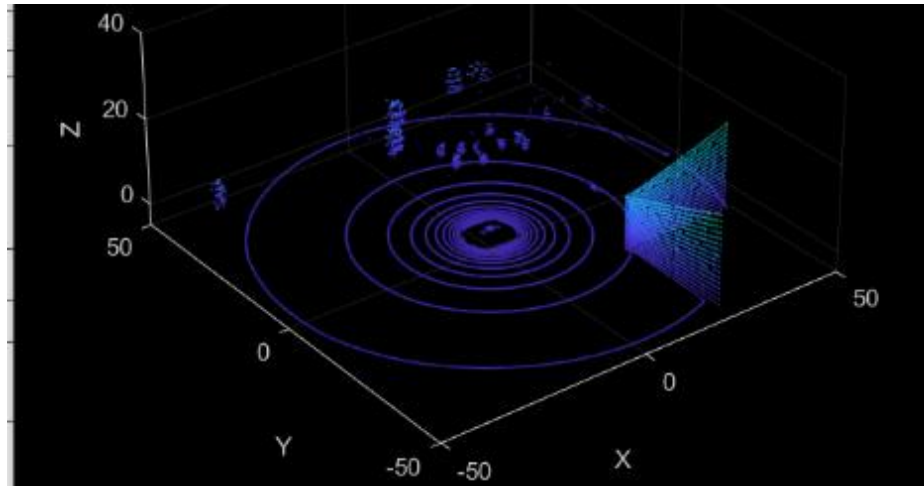


Fig. 14. Nube de puntos generada por medio de un sensor LIDAR en MATLAB.

La Fig.14 muestra una representación tridimensional de un entorno capturado por el sensor LIDAR. La nube de puntos consiste en una gran cantidad de puntos dispersos en el espacio, cada uno de los cuales representa un objeto o una parte del entorno escaneado. Los puntos varían en tamaño y densidad, creando una estructura tridimensional que refleja la geometría del entorno. La Fig. 14 muestra una vista aérea, lo que permite observar la forma y la estructura del entorno escaneado. Es posible identificar objetos tridimensionales, como paredes, árboles o cualquier otro elemento presente en el escaneo.

C. Control del vehículo

En la Fig.15 se muestra en color amarillo la parte de control del vehículo que, de acuerdo con lo capturado, nuestro control actuara conforme al objeto reconocido. La gráfica de la Fig.15 muestra nuestro vehículo autónomo de color azul y el vehículo detectado de color amarillo, el vehículo amarillo se encuentra a una velocidad constante de alrededor de 20 km/hr mientras nuestro vehículo se encuentra a 50 km/hr eso quiere decir que nos encontramos a una velocidad mayor al otro por lo que nuestro vehículo procede a reducir su velocidad hasta poder mantenerse a una velocidad menor a la del vehículo amarillo y así evitar algún tipo de siniestro.

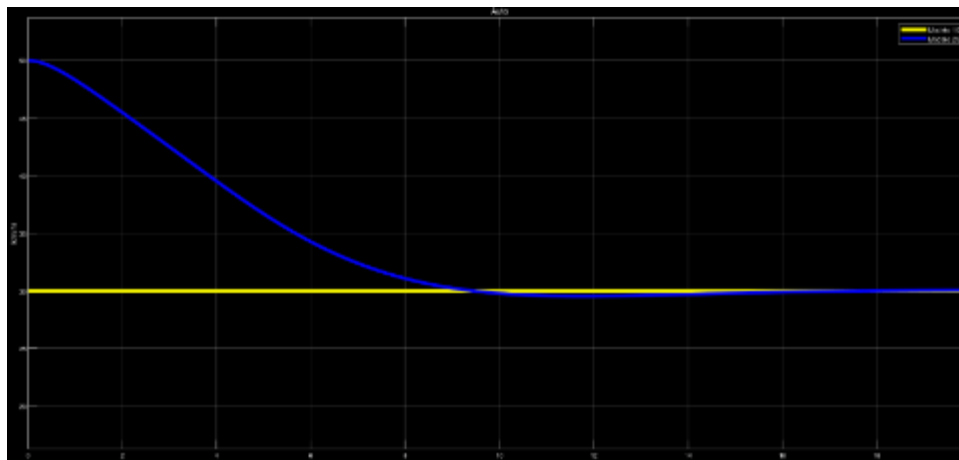


Fig. 15. Gráfica de dos vehículos en movimiento.

D. Cambio de carril

En la Fig.16 se muestra el otro resultado en el caso en el que el vehículo ego efectúa un rebase en lugar de reducir la velocidad, el objetivo principal al utilizar el control cinemático de Ackermann es controlar las ruedas delanteras del vehículo de manera que sigan una trayectoria específica mientras se realiza el cambio de carril. Durante un cambio de carril, el vehículo tiene que girar hacia el lado deseado sin desviarse o sobrepasar los límites de la vía. El control cinemático de Ackerman se encarga de calcular los ángulos de dirección necesarios para las ruedas delanteras, asegurando así que el vehículo siga una trayectoria suave y precisa.



Fig. 16. Vehículo ego en cambio de carril.

IV. CONCLUSIONES

En conclusión, utilizando un motor gráfico como Unreal Engine, se logra crear un entorno simulado de alta fidelidad que proporciona el escenario adecuado para desarrollar y probar sistemas de vehículos autónomos. En este trabajo, se analizó que al seguir el diagrama general y aprovechar las funciones de cada bloque, fue posible implementar con éxito un vehículo autónomo utilizando el algoritmo de detección de objetos YOLOv2 y la visión artificial proporcionada por el sensor LIDAR y las cámaras.

El vehículo autónomo exhibió un comportamiento deseado al evitar colisiones con otros vehículos en movimiento. Esto se logró gracias a la capacidad del vehículo para detectar y reconocer objetos utilizando el YOLOv2 para tomar decisiones en tiempo real. Al detectar la presencia de otro vehículo, el vehículo autónomo redujo su velocidad de manera apropiada, demostrando una respuesta acorde a lo esperado y garantizando la seguridad en el entorno simulado. Otro resultado logrado fue el utilizar el modelo cinemático de Ackermann para efectuar un rebase en lugar de reducir la velocidad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México por el apoyo en la realización de este trabajo de investigación.

REFERENCIAS

- [1] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), "Georreferenciación de accidentes de tránsito en zonas urbanas", 2021, url: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2021/accidentes/ACCIDENTES_2021.pdf
- [2] SAE International, "Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles J3016_202104", 2022, url: https://saemobilus.sae.org/content/j3016_202104
- [3] O. Flores, M. Fabela, D. Vázquez, R. Hernández. "Conducción autónoma: Implicaciones", *Publicación bimestral de divulgación externa/ Instituto Mexicano del Transporte*, no. 172, 2018, url: <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=462&IdBoletin=172>
- [4] X. Basogain Olabe, *Redes Neuronales artificiales y sus aplicaciones* (curso), Escuela Superior de Ingeniería de Bilbao, 2008.
- [5] J. Redmon, A. Farhadi, "YOLO9000: Better, Faster, Stronger", en 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Honolulu, HI, 21–26 de julio de 2017. IEEE, 2017.
- [6] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, A. Farhadi. "You only look once: Unified, real-time object detection", arXiv preprint Cornell University, 2015, url: <https://arxiv.org/abs/1506.02640>
- [7] D. T. Nguyen, T. N. Nguyen, H. Kim, H. J. Lee, "A High-Throughput and Power-Efficient FPGA Implementation of YOLO CNN for Object Detection," in *IEEE Transactions on Very Large-Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 27, no. 8, pp. 1861-1873, Aug. 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/TVLSI.2019.2905242>
- [8] J. Redmon. Darknet: Open-source neural networks in C, 2016, url: <http://pjreddie.com/darknet/>
- [9] "YOLO: Real-Time Object Detection". Survival Strategies for the Robot Rebellion. <https://pjreddie.com/darknet/yolov2/> (accedido el 20 de diciembre de 2022).
- [10] Y. Li, J. Ibanez-Guzman, "Lidar for Autonomous Driving: The Principles, Challenges, and Trends for Automotive Lidar and Perception Systems", *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 37, 2020.
- [11] A. Bar et al., "The Vulnerability of Semantic Segmentation Networks to Adversarial Attacks in Autonomous Driving: Enhancing Extensive Environment Sensing", *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 38, 2021.
- [12] "Unreal Engine | The most powerful real-time 3D creation tool". Unreal Engine. <https://www.unrealengine.com/en-US>
- [13] MathWorks, "Highway Lane Following- MATLAB & Simulink- MathWorks América Latina", 2023.
- [14] MathWorks, "Detect vehicles in lidar using image labels- MATLAB & simulink- mathworks américa latina", 2023.

Low-cost Data Acquisition System for Deformation Determination with Accelerometers

Sistema de adquisición de datos de bajo costo para determinación de deformaciones con acelerómetros

Daniela **Desiderio-Maya**¹, Orlando **Susarrey-Huerta**², Juan Carlos **Suárez-Calderón**³, Iván **Rocha-Gómez**⁴

Instituto Politécnico Nacional, México

¹<https://orcid.org/0000-0002-8787-8953> | danieladmaya@outlook.com

²<https://orcid.org/0000-0003-3347-6438> | osusarrey@yahoo.com

³<https://orcid.org/0000-0003-3152-3018> | jcarlos.suarez@live.com

⁴<https://orcid.org/0000-0002-9368-2762> | ivanrocha.go@gmail.com

Recibido 05-02-2023, aceptado 24-05-2023.

Resumen

En este artículo, se presenta una propuesta de sistema de adquisición de datos diseñado específicamente para evaluar la falla por fractura causada por vibración en un bracket de un arnés eléctrico en un vehículo comercial. El sistema propuesto es una solución de arquitectura abierta de bajo costo que permite la recolección, visualización y análisis exhaustivo de los datos. Los datos capturados por los acelerómetros son enviados al microcontrolador para su procesamiento y posterior análisis utilizando el software MATLAB.

Con el fin de validar el sistema propuesto, se realizaron pruebas utilizando cinco condiciones distintas en el vehículo. Se instrumentó el bracket del arnés eléctrico en la zona donde se presenta la falla por fractura, para evaluar su desempeño bajo diferentes escenarios. Además, se llevó a cabo un análisis de esfuerzos en el material del arnés, y se compararon los resultados obtenidos mediante el sistema de adquisición de datos presentado, lo cual demostró su eficacia y la obtención de resultados satisfactorios. Esta investigación representa un avance significativo en la detección y análisis de fallas por vibración en arneses eléctricos, proporcionando una herramienta útil para la validación de vehículos comerciales.

Palabras clave: sistema de adquisición de datos, acelerómetros, arquitectura abierta, vibraciones, análisis de vibraciones.

Abstract

In this article, a proposal for a data acquisition system specifically designed to evaluate fracture failure caused by vibration in an electrical harness bracket in a commercial vehicle is presented. The proposed system is a low-cost open architecture solution that allows comprehensive data collection, visualization, and analysis. The data captured by the accelerometers are sent to the microcontroller for processing and subsequent analysis using MATLAB software. In order to validate the proposed system, tests were performed using five different conditions on the vehicle. The electrical harness bracket was instrumented in the area where the fracture failure occurs to evaluate its performance under different scenarios. In addition, a stress analysis was carried out on the harness material, and the results obtained through the presented data acquisition system were compared, which demonstrated its effectiveness and the obtaining of satisfactory results. This research represents a significant advance in the detection and analysis of vibration failures in electrical harnesses, providing a useful tool for the validation of commercial vehicles.

Index terms: data acquisition system, accelerometers, open architecture, vibrations, vibration analysis.

I. INTRODUCTION

Data acquisition systems are essential in different industries because it is important to test the components and systems to know if works properly. This tool allows engineers to collect and analyze data from various sensors and sources. In the automotive industry, these systems are utilized to measure parameters such as temperature, pressure, and vibration in critical components of vehicles, including engines, suspensions, and brakes. With the increasing complexity of modern vehicles, data acquisition systems have become more sophisticated, providing more accurate and precise measurements to support engineering and design decisions. The analysis of data acquired from these systems is crucial in ensuring the safety, reliability, and performance of automotive components and systems.

In the last 15 years, data acquisition systems have been developed for applications where real-time monitoring is important, such as research [1] carried out where a monitoring and acquisition system is carried out of data applied to decentralized renewable energy plants with a USB interface. Also, with real-time monitoring, another data acquisition system applied to a production management system was carried out [2], complementing this study with a man-machine interface. On the other hand, the fact that a system consists of an open architecture allows the user to be able to add or replace components that are compatible with the system in order to create a more powerful system. Unlike those offered by corporations that are only compatible with their own equipment of the same brand. By having an open architecture, there is a decrease in system costs. An example is the one created with a [3] Raspberry Pi as a low-cost data acquisition system for human-powered vehicles, where tests on a bike as a test vehicle having performance comparable to higher priced systems.

The applications of data acquisition systems are unlimited, in order to mention one, we have [4] the prevention of failures, the predictive capacity of preventive and predictive maintenance, the improvement of the quality of the machined product, and the reduction of failure times and [5] or the one developed for obtaining.

In the analysis of deformations to find faults in systems from different fields of science, more methods have been investigated to be applied depending on the system and obtain precise results. In 2001 [6], an approximate deformation analysis and a FEM analysis for the incremental bulging of metal sheets using a spherical roll was carried out. This application was used for a machine that performs a wide range of metal forming metal sheets of complex shapes, which exemplifies that the most appropriate method of obtaining deformations is selected according to the application.

Subsequently, [7] in an investigation, more than 100 studies regarding the analysis of discontinuous deformations were reviewed, classifying the studies into 3 groups: (a) validation with respect to analytical solutions, (b) validation with respect to results of other numerical techniques, and (c) validation with respect to laboratory and field data. This data collection is important to know which methods have been used in the analysis of deformations depending on the application. There are three main techniques for strain validation: qualitative evaluation, which visually examines the runtime behavior of the simulations; semi-quantitative evaluation, which compares the numerical results of the simulations, and quantitative evaluation, where the numerical results of the simulation are evaluated in detail with respect to similar analytical, laboratory or field results. Having a previous simulation generates cost savings to detect possible failures in a system and creates security in the system. For example, one important application in this area was [8] for simulations of earthquake-induced landslides.

In recent years, the study of deformations in structures has been proposed, which has become relevant. For example, [9] the proposed investigation of the monitoring of deformation of architectural structures through three-dimensional laser scanning and the Finite Element Method, creating a model that can be applied in constructions. New methods have been developed for the measurement of deformations [10], such as the one carried out to determine the plastic deformation and the fracture behavior of polypropylene compounds, where

he proposes a measurement method of strain defining an intrinsic flow stress equation by varying strain rates in propylene compounds. For the design, the study of the deformations continues over time since it is essential to know the working limits of a component.

II. METHODOLOGY

For the design, creation, and validation of the data acquisition system, the methodology shown in Fig. 1 was followed.

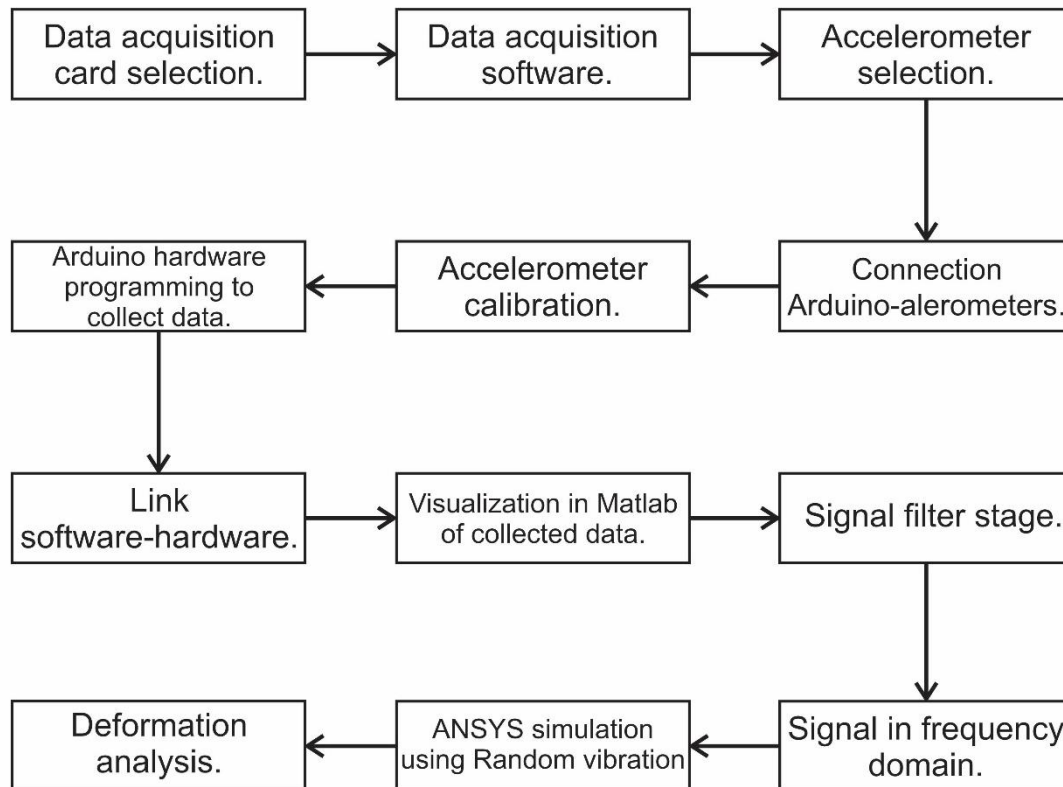


Fig. 1. Data acquisition system methodology.

For the card selection, we considered the following parameters:

Number of analog inputs: Each analog input can read one sensor, so it is important to consider the desired number of sensors when selecting a card.

Interface.

Resolution: It is represented by the number of discrete values in which an analog-to-digital converter can translate an analog signal to digital and is measured based on the number of bits that the card has. The number of bits represents the maximum number of discrete values that an analog-to-digital converter can have.

To calculate these discrete values, equation (1) is used:

$$D_V = 2^n \quad (1)$$

Where:

n : is the number of bits of resolution of the card.

D_V : Discrete values.

For voltage, resolution is described in equation (2):

$$V_R = \frac{O_R}{D_V} \quad (2)$$

Where:

V_R = Voltage Resolution [V].

O_R = Operating Range [V].

D. Sampling frequency: The sampling of analog signals has some conditions so that information losses do not occur. The sampling ratio can be defined as equation (3):

$$t = \frac{N}{F_m} \quad (3)$$

Where:

t : sampling time [s].

N : number of samples.

F_m : sampling rate [Hz].

According to Nyquist's sampling theorem, "Given a function whose energy is entirely contained in a bandwidth, if it is sampled at a frequency equal to or greater than the original function, it can be fully recovered by means of an ideal low-pass filter."

The minimum sampling frequency required to make a quality digital recording must be equal to twice the maximum frequency of the analog signal to be digitized. As expressed in equation (4):

$$F_m > 2F_{\text{máx}} \quad (4)$$

Where:

F_m = sampling frequency [Hz].

$F_{\text{máx}}$ = maximum frequency [Hz].

As illustrated in Figure 2, the yellow wave is a frequency that coincides at specific points with the original frequency (in blue) but does not represent the initial wave.

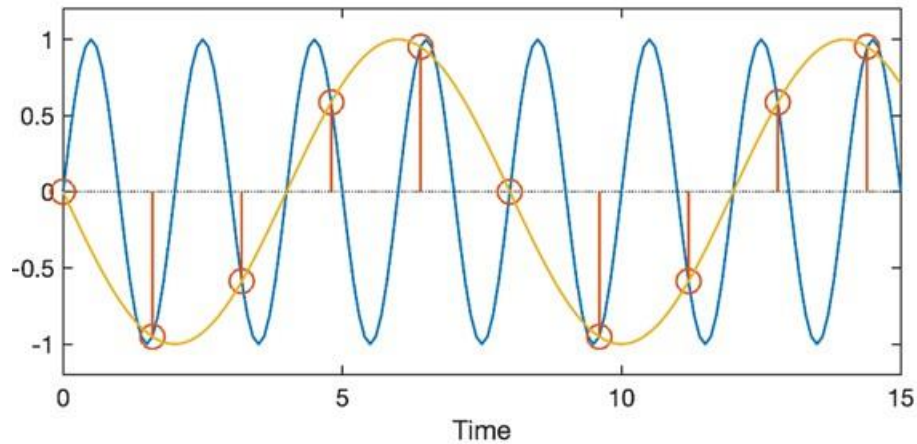


Fig. 2. Aliasing effect.

Architecture type: the architecture of a card is the relationship that it can have with the different components that make up the system in which it is interacting. This architecture can be open or closed.

An open architecture card allows you to add, modernize, and change its components, even if they are from a different manufacturer. In contrast, a closed architecture card is where the hardware manufacturer chooses the components, and they are typically not upgradable.

In accordance with the criteria for creating a data acquisition system, the parameters shown in Table 1 compare the cards.

TABLE 1
COMPARISON OF DATA ACQUISITION CARDS

Card	Number of analog inputs	Resolution[bits]	Sampling Frequency [KHz]	Type of architecture
Phidget	8	10	1	Closed
Arduino uno	6	8	10	Open
Arduino Mega	16	10	10	Open
DAQ-6008	8	12	10	Closed
Dspace	10	10	10	Closed

The selection of cards for data acquisition is the Arduino Mega card. The main factor is that it has 16 analog inputs, and in this project, 12 inputs are required because it is necessary to use 4 accelerometers, and each one of these needs 3 pins that are on the "x", "y" and "z" axes. Another important factor is the type of architecture since it is possible to integrate components from other manufacturers.

To calculate the resolution voltage, it is substituted in equation 2, considering that the Arduino Mega card has a 10-bit resolution and an operating range of 3.3 V. Obtaining what is described in the equation (5):

$$V_R = \frac{3.3 \text{ V}}{2^{10}} = 0.0032 \text{ V} \quad (5)$$

This resolution is an accurate representation of the signal generated for data acquisition.

The Nyquist sampling theorem must be fulfilled in order not to present the aliasing phenomenon. Therefore, according to the calibration of the commercial vehicle engine, a change is made in the gearbox at a maximum of 3000 rpm. The conversion from rpm to Hertz is shown in equation (6).

$$1 \text{ rpm} = \frac{1}{60} \text{ Hz} \quad (6)$$

To carry out the conversion to Hz, it is substituted in equation (6), obtaining what is shown in equation (7):

$$F_{\text{máx}} = 3000 \text{ rpm} \left(\frac{1}{60} \right) \text{ Hz} = 50 \text{ Hz} \quad (7)$$

6

According to the sampling frequency of the Arduino Mega card, the inequality of the Nyquist theorem equation (4) is satisfied, shown in equation (8):

$$10 \text{ KHz} > 100 \text{ Hz} \quad (8)$$

Fulfilling Nyquist's theorem, the Arduino mega card is the right one for data acquisition.

The accelerometer selected in this system is the ADXL335, as it has a measurement range for vibration frequencies up to 200 Hz. Considering that the range of the maximum sampling frequency is 50 Hz, the sensor can perform the measurement. The specifications of the accelerometer are shown in Table 2.

TABLE 2
DATA ACCELEROMETER

Parameter	Value
Measurement Range	1600 Hz
Sensing axes	x,y,z
0g Voltage X	1.5 V
0g Voltage Y	1.5 V
0g Voltage Z	1.5 V

The selected accelerometer, the measurement range complies with the maximum measured frequency (50Hz), in addition to using the 0 value of each axis to determine the range of values in which the measurements will be oscillating.

For data acquisition, it was carried out by means of 2 software: Arduino and Matlab ®. The Arduino software was used to perform the data acquisition and was linked to Matlab ® to graph the data obtained, while an Excel file was generated to store such data, as illustrated in Fig. 3.

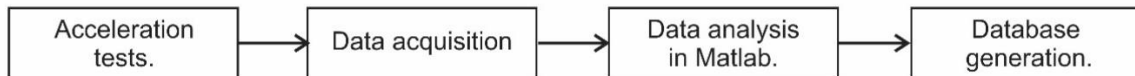


Fig. 3. Data acquisition flow chart.

III. TESTS

For the tests, the battery was instrumented with 4 accelerometers, as shown in Fig. 4, with the objective of knowing the vibrations at each strategic point close to the end where the electrical connector presents the fault.

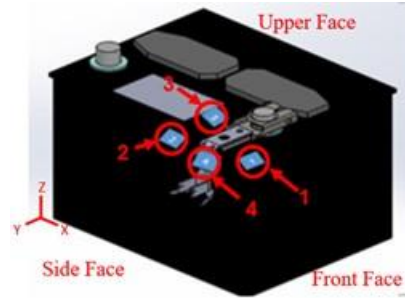


Fig. 4. Instrumented battery with accelerometers.

Table 3 describes each position of the accelerometers on the battery and the electric bracket.

TABLE 3
ACCELEROMETER'S POSITION

Accelerometer	Description
1	Front face, yz plane.
2	Side face, xz plane.
3	Upper face, xy plane.
4	Side face, bracket area where the weight of the harness is supported.

For the test cases, 5 different paths are considered with the speed that would be applied given the operating conditions. A total of 150 tests were performed, which are described in Table 4. Each type of test was replicated under the same conditions 30 times to obtain reliable measurements.

TABLE 4
TEST CONDITIONS

Test	Speed	RPM	Samples taken for each test.	Number of tests
Highway	70 km/h	3000	1024.	30
City	30 km/h	2000	1024.	30
City2	50 km/h	2500	1024.	30
Neutral	0 km/h	900	1024.	30
Cobbled road	10 km/h	1500	1024.	30

For each type of test, the average measurements were obtained, and a graph was made for each accelerometer. Fig.5 shows the graphs of the average data of the highway test.

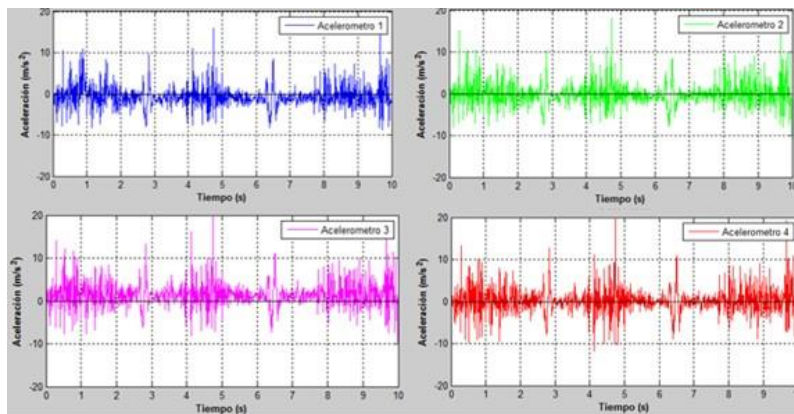


Fig. 5. Average acceleration data graphs of each accelerometer the Highway test.

For the city test, the average data obtained from the 30 tests carried out was considered and graphed, as shown in Fig. 6.

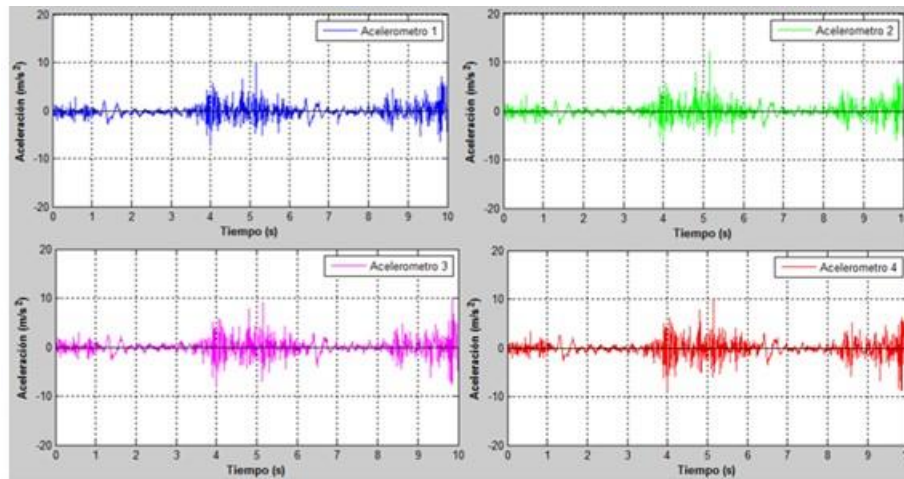


Fig. 6. Average acceleration data graphs of each accelerometer the City test.

The same procedure was carried out for the data obtained in the east of City2; the average data of the 30 tests carried out were graphed with the results shown in Fig. 7.

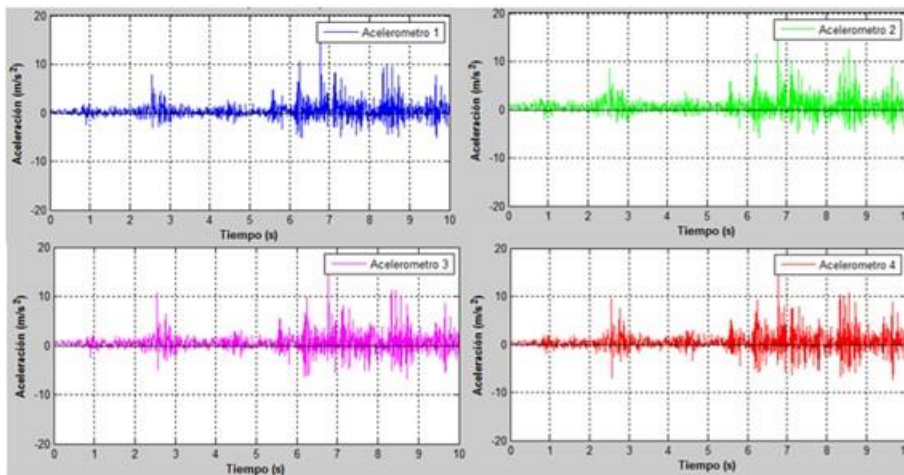


Fig. 7. Average acceleration data graphs of each accelerometer the City2 test.

The data obtained from the neutral test were averaged over the 30 tests, and the average data shown in Fig. 8 were plotted.

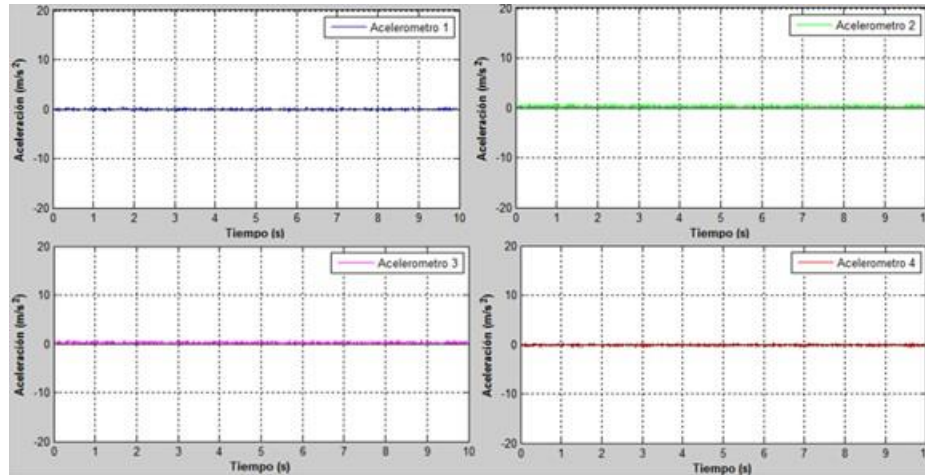


Fig. 8. Average acceleration data graphs of each accelerometer for the Neutral test.

Finally, the data of the paved road were considered, averaging the 30 tests carried out and graphed as shown in Fig. 9.

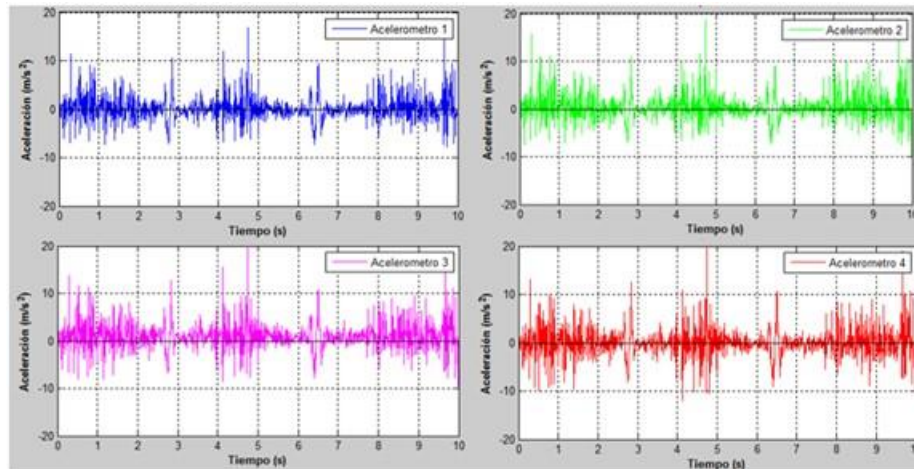


Fig. 9. Average acceleration data graphs of each accelerometer the Cobble Road test.

IV. DATA PROCESSING

For the treatment of the signal, a filter was applied since the generated signals have noise. In order not to lose information in the signal, the filter that was chosen was a digital type of Infinite Impulse Response (IIR). Since it is for a discrete signal and compared to a Finite Impulse Response (FIR) type, the former requires fewer memory locations for its realization. On the other hand, the IIR filter is more efficient in terms of computation time, and the response is of finite duration since if the input remains at zero for some consecutive periods, the output will also be zero.

When analyzing the signals with a filter, it is concluded that there is no loss of information since the eliminated peaks are abnormal values that are not repetitive in all the measurements.

Additionally, the IIR filter can exhibit sharper roll-off characteristics, making it suitable for this application that requires efficient filtering and preservation of signal features. Behind, IIR offers feedback, allowing for the creation of recursive filters that can effectively handle dynamic signals and adapt to changing conditions.

To obtain the graphs in the frequency domain and perform a modal analysis of the frequencies exhibited in the system, the Fourier Transform was applied. By computationally using the Fast Fourier Transform, it decomposes the signals into the frequencies that were present in the measurements, each with its amplitude and phase.

Within the analysis of the frequency spectrum graphs, it is found that the greatest amplitudes of all the frequencies are found in accelerometer 4. This accelerometer is in the bracket area where the weight of the harness is supported. Fig. 10 shows all the frequency domain graphs of the accelerometer 4.

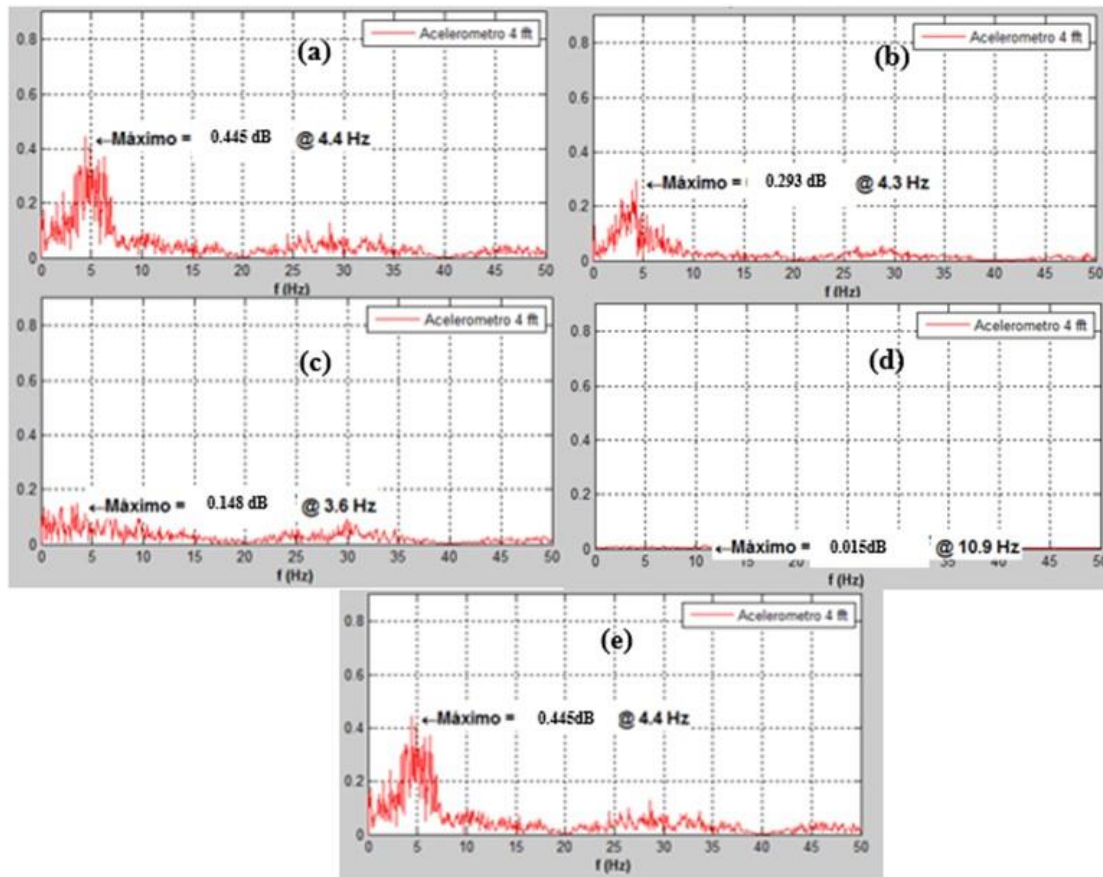


Fig. 10. Graphs in the frequency domain of the accelerometer 4 of the tests: (a) Highway, (b) City, (c) City2, (d) Neutral, and (e) Cobbled Road.

The overall spectral content of the signal has the highest density at distributed frequencies of 1-12 Hz in all tests. Table 5 shows the maximum values obtained in the frequency domain graphs in each test, with the lowest frequencies presenting the maximum values.

TABLE 5
MAXIMUM VALUES

Test	Frequency [Hz]	Amplitude [dB]
Highway.	4.4	0.445
City.	4.3	0.293
City2.	3.6	0.148
Neutral.	10.9	0.015
Cobbled Road.	4.4	0.445

11

V. EXPERIMENTAL ANALYSIS

To find out if the part of the electrical support of the battery is failing due to vibrations, the part was subjected to an analysis in ANSYS called Random Vibrations to find out the equivalent stress with the processed data from the frequency domain of the tests: Highway, City, City2, Neutral and Cobbled Road.

Random vibration analysis is used to evaluate stresses and deformations in a system that is subjected to vibrations. This approach [11] is based on the study of random vibrations, that is, at unpredictable frequencies that do not repeat themselves. It is applied in real-world situations where the vibrations do not follow a pattern. Randomness becomes a fundamental characteristic of the excitation or input of this analysis. To carry out this analysis, it is carried out with the mode superposition method.

The mode superposition method is a technique used in structural analysis to determine the dynamic response of a system by combining individual vibration modes. To obtain this, it is broken down into fundamental vibration modes, and the response of each mode is considered separately. When obtaining the response of each mode, they are superimposed to calculate the total response of the system.

For the mathematical modeling of the mode superposition method, the equation of motion is considered and can be expressed as:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (9)$$

Where:

- $[M]$ = structural mass matrix
- $[C]$ = structural damping matrix
- $[K]$ = structural stiffness matrix
- $\{\ddot{u}(t)\}$ = nodal acceleration vector
- $\{\dot{u}(t)\}$ = nodal velocity vector
- $\{u(t)\}$ = nodal displacement vector
- $\{F\}$ = the time – varying load vector

Often, the matrix form is obtained from the discretization of a physical problem using the finite element method. If N denotes the number of degrees of freedom, the matrices have the size NxN.

A prerequisite for a mode superposition is to calculate the eigenfrequencies and the shapes of the corresponding modes. Using the eigenvalue equation, we have:

$$(-\omega^2 M + K)u = 0, u \neq 0 \quad (10)$$

Where:

ω = natural frequency

A small number n of the eigenfrequencies is calculated. The result of this calculation is a set of natural frequencies (ω_i) with corresponding (u_i) mode shapes, where i ranges from 1 to n . where the eigenmodes are orthogonal with respect to the mass and stiffness matrices. This means that:

$$u_i^T M u_j = 0, i \neq j \quad (11)$$

12

And:

$$u_i^T K u_j = 0, i \neq j \quad (12)$$

The orthogonality relation can be described as:

$$U^T M U = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & m_2 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & m_n \end{bmatrix} = \mu \quad (13)$$

Where:

m_n = eigen modes

The diagonal elements are called modal masses. The values of the modal masses depend on the normalization of the eigenmodes. This normalization is arbitrary since the mode only represents a shape, and the amplitude has no physical meaning. Therefore, mass matrix normalization is performed. Where the eigenmodes are scaled so that each $m_i = 1$, giving:

$$U^T M U = I \quad (14)$$

Where:

I = Identity matrix

The corresponding orthogonality relation for the stiffness matrix is:

$$U^T K U = \begin{bmatrix} m_1 \omega_1^2 & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & m_2 \omega_2^2 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & m_n \omega_n^2 \end{bmatrix} = \Omega \quad (15)$$

Using mass matrix normalization, the diagonal matrix consists of the natural angular frequencies squared. The basic approach to mode superposition is that the displacement can be written as a linear combination of the eigenmodes:

$$u(t) \approx \sum_{i=1}^n q_i(t) u_i \quad (16)$$

Where:

$q_i = \text{modal amplitudes}$

If all the eigenmodes of the system were used, this would be an exact relationship rather than an approximate one. Since the eigenmodes are orthogonal, they form a complete basis, and the expression is simply a coordinate change from the physical nodal variables to the modal amplitudes. When only a small number of eigenmodes are used, the mode overlap can be viewed as a projection of the displacements in the subspace spanned by the chosen eigenmodes.

13

The mathematical approach represents the method of superposition of modes, which is part of the analysis of random vibrations. When the total eigenmodes of the system are used, the equation becomes an exact relation. This is because the eigenmodes, being orthogonal, form a complete base, which allows a precise representation of the vibrational response. In this case, it implies a change of coordinates of the physical nodal variables to the corresponding modal amplitudes. Mainly, the most significant eigenmodes are used. In this scenario, the superposition of modes is interpreted as a projection of the displacements in the subspace defined by the selected eigenmodes. This approximation allows us to represent the response of the system in a more precise way without losing essential information about the vibration characteristics.

The vibration modes of the components were obtained to know their natural frequencies. These eigenmodes represent characteristic patterns of vibration of the system. For each eigenmode, a modal amplitude indicating the magnitude of vibration associated with that mode is determined. Modal amplitudes are important in modal analysis because they allow us to understand how vibration is distributed in the system and what are the predominant directions of motion. Table 6 shows the modes of vibration.

TABLE 6
 COMPONENT NATURAL FREQUENCIES

Mode	Natural Frequency [Hz]
1	2.7
2	4.4
3	7.1
4	18.3
5	26.8

Random vibration analysis is used to evaluate deformations, stresses, or displacements, which are based on the normal distribution. This is characterized by being symmetrical and having a bell shape. Like the one shown in Figure 11.

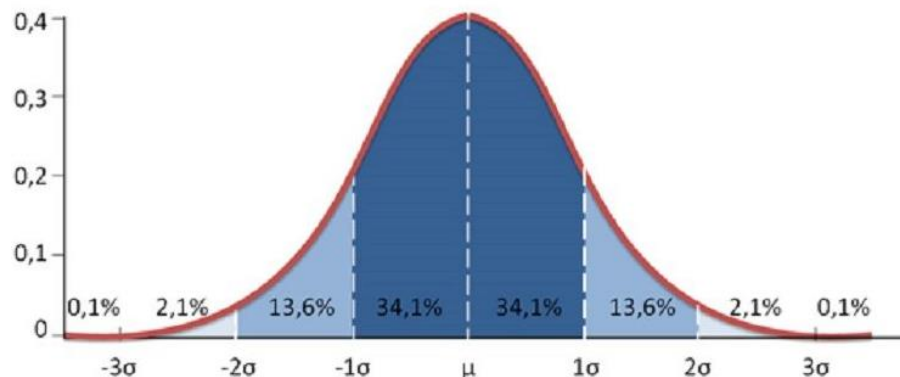


Fig. 11. Gaussian bell.

It is defined [12] by two parameters: the mean, which determines the center of the distribution, and the standard deviation, which indicates the dispersion of the data around the mean. The standard deviation is denoted by σ , between -1σ to 1σ represent 68.2% of the data, between -2σ to 2σ 95.4% and between -3σ to 3σ 99.7%.

14

To obtain the equivalent stress the standard deviation value of 2 sigma was selected. This choice implies a probability of 95.45% that the deformation will reach that maximum value or lower. In addition, it allows the identification of the specific area of the component where this deformation would occur.

To find out if the material of the electrical harness bracket, the equivalent stress to which the part is subjected due to vibrations, does not exceed the elastic limit of the material and the maximum resistance to tension, Table 7 shows the mechanical properties of cold-rolled 1020 steel.

TABLE 7
MECHANICAL PROPERTIES OF COLD-ROLLED 1020 STEEL

Parameter	Value
SAE Number	1020
Elastic Limit to Tension	455MPa
Maximum Resistance to Tension	469MPa
Brinell Hardness	131

Once the yield strength of 455 MPa is reached, 1020 steel begins to undergo plastic deformation. This means that the deformation becomes permanent even after the applied stress is removed. In this region, the strain continues to increase with a relatively minor increase in stress.

As the stress increases further, a peak point called the maximum tensile strength is reached. At this point, the material gets its maximum strength and begins to weaken gradually.

After reaching maximum strength, the strain increases rapidly, and the material eventually fails at a point known as the fracture point. At this point, the deformation becomes uncontrollable, and the material breaks.

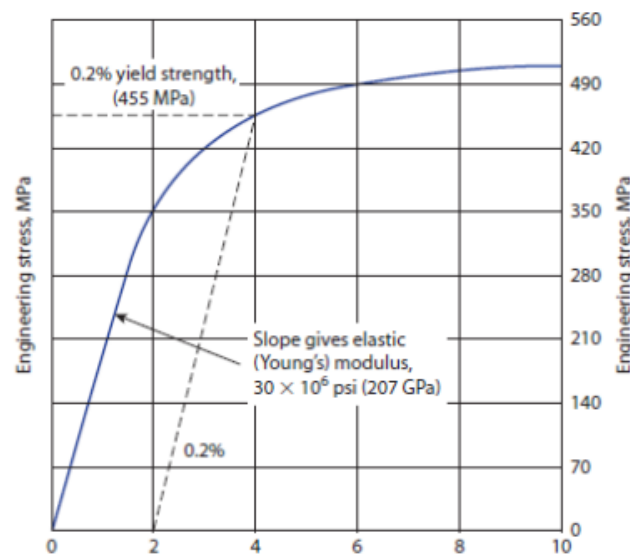


Fig. 12. Stress-strain curve of 1020 steel.

According to the calculation of the equivalent stress carried out in ANSYS, the test that presented the highest comparable stress is the Highway test. In Figure 13, it is observed that the greatest equivalent stress is 1446.7 MPa. This value exceeds both the elastic limit of the material, which is 455 MPa and the maximum tensile strength of 469 MPa. The failure zone coincides with the actual fracture of the part. This information is important as it indicates that the component has experienced a significant load that has exceeded both its yield strength and ultimate strength.

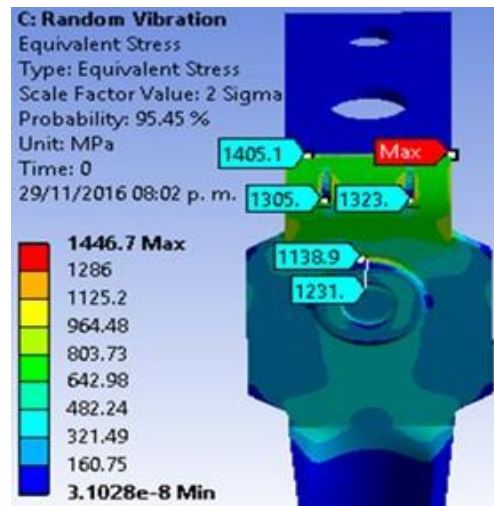


Fig. 13. Equivalent stress calculation in ANSYS with data from the Highway test.

This implies that the component has undergone a permanent deformation and has reached a critical point of load that has led to its fracture. Equivalent stress analysis provides a detailed understanding of the component's load capacity and strength, which is essential for the design and evaluation of its performance under service conditions. Therefore, it is concluded that the Highway test has exerted excessive stress on the component, exceeding its resistance limits and causing its fracture. This information is valuable in identifying design weaknesses and taking corrective action to prevent future failures in similar applications.

VI. CONCLUSIONS

Based on the analysis carried out, it is concluded that the vibration mode with natural frequency 2 of the component coincides with the highest amplitude recorded in all the tests carried out in the frequency domain graphs, which is 4.4 Hz. This finding is significant, as it indicates that the component is experiencing a resonance effect at that specific frequency. Resonance occurs when the excitation frequency approaches or coincides with the natural frequency of vibration of the system. In this case, the coincidence between the natural frequency of vibration mode 2 and the highest amplitude in the graphs suggests that the component is being subjected to an excitation close to its resonant natural frequency. The resonance effect can have detrimental consequences, as it can amplify vibrations and stresses in the component, leading to fracture. The match between the resonant frequency and the maximum measured amplitude indicates that the component is experiencing high levels of vibration at that specific frequency, compromising its structural integrity.

Analysis of the frequency spectrum plots revealed that the spectrum density is concentrated between the frequencies of 1 and 12 Hz in all tests. This suggests that these frequencies are close to the natural frequency of the vehicle, which could be generating resonance and, therefore, the fracture of the part. Based on the

deformation data, it can be concluded that the connector fails due to the vibrations to which it is subjected and fatigue in the arched area of the bent plate, aligning with the failure observed in the actual component.

To avoid damage, it is recommended to make modifications to the structural characteristics of the component. These modifications may include adjustments to its stiffness or mass, with the goal of altering its natural frequency. By performing calculations and simulations, it is possible to determine the necessary changes in component design or material to shift its natural frequency out of the excitation range.

16

In addition, other preventive measures can be considered, such as the addition of damping elements to dissipate vibrational energy and reduce the amplitude of vibrations. These elements can be damping materials or vibration-dissipating devices so that these frequencies do not affect the component.

In this project, the operation of the data acquisition system was also validated, which can be applied with other types of sensors to measure different magnitudes by changing the Arduino base program for the calibration of the sensor that needs to be added.

REFERENCES

- [1] S. C. S. Jucá, P. C. M. Carvalho, F. T. Brito, "A low-cost concept for data acquisition systems applied to decentralized renewable energy plants," *Sensors (Basel)*, vol. 11, no. 1, pp. 743-756, 2011.
- [2] S. Lee, S. J. Nam, J. K. Lee, "Real-time data acquisition system and HMI for MES," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 26, no. 8, pp. 2381-2388, 2012.
- [3] M. Ambrož, "Raspberry Pi as a low-cost data acquisition system for human-powered vehicles," *Measurement (Lond.)*, vol. 100, pp. 7-18, 2017.
- [4] F. J. Maseda, I. López, I. Martija, P. Alkorta, A. J. Garrido, I. Garrido, "Sensors data analysis in supervisory control and data acquisition (SCADA) systems to foresee failures with an undetermined origin," *Sensors (Basel)*, vol. 21, no. 8, 2021.
- [5] D. A. dos Santos, A. M. de Souza Soares, W. L. M. Tupinambá, "Development of a portable data acquisition system for extensometry," *Exp. Tech.*, vol. 46, no. 4, pp. 723-730, 2022.
- [6] H. Iseki, "An approximate deformation analysis and FEM analysis for the incremental bulging of sheet metal using a spherical roller," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 111, no. 1-3, pp. 150-154, 2001.
- [7] M. M. MacLaughlin, D. M. Doolin, "Review of validation of the discontinuous deformation analysis (DDA) method," *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, vol. 30, no. 4, pp. 271-305, 2006.
- [8] J. H. Wu, "Seismic landslide simulations in discontinuous deformation analysis," *Comput. Geotech.*, vol. 37, no. 5, pp. 594-601, 2010.
- [9] H. Yang, X. Xu, I. Neumann, "An automatic finite element modelling for deformation analysis of composite structures," *Compos. Struct.*, vol. 212, pp. 434-438, 2019.
- [10] M. Kim, T. Y. Park, S. Hong, "Experimental determination of the plastic deformation and fracture behavior of polypropylene composites under various strain rates," *Polym. Test.*, vol. 93, no. 107010, 2021.
- [11] A. K. Chopra, *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering USA*: Prentice Hall, 2012.
- [12] J. L. Devore, *Modern Mathematical Statistics with Applications*, USA: Springer, 2012

Implementación de una interfaz háptica en Unreal Engine y la estimación de velocidades para reducir vibraciones

Implementation of a haptic interface in Unreal Engine and the estimation of speeds to reduce vibrations

Erick Manuel **López-Ortiz**¹, Antonio Maximiliano **Hernández Salazar**²
Irandi **Gutierrez-Carmona**³ Juan Gabino **Díaz-Martínez**⁴

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, MÉXICO

¹<https://orcid.org/0000-0002-3297-0381> | a01552622@tec.mx

²<https://orcid.org/0009-0001-9037-019X> | a01412441@tec.mx

³<https://orcid.org/0000-0002-0869-7418> | irandi_gutierrez@tec.mx

⁴<https://orcid.org/0009-0007-8693-0784> | juan.diaz@tec.mx

Recibido 22-07-2023, aceptado 01-12-2023.

Resumen

Este trabajo aborda la implementación de una interfaz háptica en Unreal Engine en conjunto con un robot de un grado de libertad. Unreal Engine es un potente motor gratuito de renderizado y simulación en el que se desarrolló un gemelo digital capaz de interactuar con una plataforma física mediante una comunicación bidireccional de posición y torque para seguimiento de trayectoria y reflejo de fuerzas. Se condujeron diferentes experimentos para validar la integración tecnológica ante distintas condiciones de operación. El resultado fue una plataforma de bajo costo, con una sensación háptica aceptable, y un entorno digital para visualizar, analizar y comprender la tecnología de gemelos digitales y los desafíos que se enfrentan. Se validaron además distintas estrategias para estimar la velocidad y reducir significativamente las vibraciones en el sistema producto de retardos en la comunicación, pues estas afectan negativamente la precisión y la calidad de la interacción robótica.

Palabras clave: interfaz háptica, derivadores, tiempos de muestreo, Unreal Engine, plataforma experimental.

Abstract

This work addresses the implementation of a haptic interface in Unreal Engine in conjunction with a one-degree-of-freedom robot. Unreal Engine is a powerful free rendering and simulation engine in which a digital twin was developed capable of interacting with a physical platform through bidirectional communication of position and torque for trajectory tracking and force reflection. Different experiments were conducted to validate the technological integration under different operating conditions. The result was a low-cost platform with an acceptable haptic feel and a digital environment to visualize, analyze, and understand digital twin technology and the challenges faced. Several different methods were also tested to figure out how fast and significantly to lower the system's vibrations caused by communication delays, which are bad for the accuracy and quality of the robotic interaction.

Index terms: haptic interface, derivators, sampling times, Unreal Engine, experimental platform.

I. INTRODUCCIÓN

En el campo de la ingeniería y la simulación, los gemelos digitales se han convertido en una herramienta fundamental para comprender, analizar y optimizar el rendimiento de sistemas complejos [1]. Un gemelo digital es una réplica precisa de un objeto, proceso o sistema físico, que permite simular su comportamiento en tiempo real. Estos modelos digitales son cada vez más utilizados en diversas industrias, como la automotriz [2], aeroespacial [3], energética [4], manufacturera [5], interacción en el metaverso [6], entender el funcionamiento de ciudades inteligentes [7], así como para mejorar la toma de decisiones, predecir el rendimiento y reducir costos y tiempos de desarrollo.

Para desarrollar gemelos digitales efectivos y realistas, se requiere una plataforma de software que permita la creación, visualización y simulación de entornos digitales complejos [8]. En este sentido, Unreal Engine, desarrollado por Epic Games, ha emergido, siendo una plataforma gratuita, como una de las opciones más destacadas y poderosas para la construcción de gemelos digitales [9], [10]. Además, cuando se busca incorporar un componente físico real a la simulación, como un robot, Unreal Engine también ofrece soluciones integradas para una mayor interacción y precisión, pudiendo incluso importar modelos de programas de dibujo especializado como lo es SolidWorks. Además, es importante recordar que existen diferentes propuestas de arquitecturas de hardware y software de implementaciones de gemelos digitales [11], [12], [13]; pero con el uso de Unreal Engine pretendemos mantener la arquitectura de hardware y software de este proyecto con un bajo nivel de complejidad, a un costo económico asequible para laboratorios poco equipados, pero con un alto potencial de escalabilidad. Finalmente, es necesario precisar que esta propuesta se puede clasificar como una plataforma de monitoreo y el primero de 3 niveles de desarrollo para gemelos digitales [14], siendo Unreal Engine suficiente para el desarrollo tecnológico propuesto.

Unreal Engine es un motor de creación de videojuegos que ha evolucionado para convertirse en una solución completa y versátil para la creación de entornos digitales interactivos de alta calidad [15], [16]. Su amplia gama de características y herramientas lo hace ideal para la construcción de gemelos digitales inmersivos y precisos, con una capacidad de replicar entornos físicos reales que ha sido incluso considerada para el futuro del entrenamiento de cirugías en medicina [17]. Entre las características más destacadas se encuentran: renderización fotorrealista, física avanzada, simulación de materiales y efectos visuales de última generación.

Además de sus capacidades gráficas, Unreal Engine ofrece una interfaz de programación (API, *Application Programming Interface* por sus siglas en inglés) flexible y extensible que permite la integración de modelos matemáticos y algoritmos de simulación complejos. Esto proporciona a los desarrolladores la capacidad de crear modelos digitales altamente precisos y adaptados a las necesidades específicas de cada aplicación. Al mismo tiempo, si se desea combinar el gemelo digital con un robot físico, Unreal Engine ofrece soporte para controladores de hardware y protocolos de comunicación, lo que facilita la conexión y el control del robot en tiempo real.

En este artículo, exploraremos el uso de Unreal Engine en la construcción de gemelos digitales, incluyendo la incorporación de un robot físico. Analizaremos sus capacidades, la forma de estimar parámetros como velocidad y aceleración en el robot físico [18], enfocándonos en mostrar la forma de implementación. Cabe recalcar que en la literatura se han desarrollado algunos observadores para estimar parámetros internos y externos de los sistemas mecánicos [19] o limitaciones en la comunicación por el ancho de banda [20], pero en este artículo no discutimos estas estrategias. Asimismo, discutiremos los desafíos, como las oscilaciones que pueden ocurrir durante la operación del sistema [21], y consideraciones importantes al utilizar esta poderosa plataforma de software en combinación con un robot físico.

En resumen, el uso de Unreal Engine en gemelos digitales, junto con la incorporación de un robot físico, ofrece una solución sólida y flexible para la simulación y visualización de sistemas complejos. Su combinación de capacidades gráficas avanzadas, física realista, una API extensible y soporte para controladores de hardware, lo convierte en una elección viable y eficiente para desarrollar gemelos digitales precisos y altamente funcionales en entornos que involucran la interacción entre lo digital y lo físico.

El artículo se compone de la siguiente manera: en la sección II se aborda la construcción de la plataforma experimental, en la sección III se presentan las ecuaciones de movimiento, en la sección IV la estrategia de control empleada, en la sección V la forma en que fueron estimados los parámetros del sistema, en la sección VI se enuncian los resultados experimentales y se brinda un enlace a los archivos generados, y en las secciones VII y VIII se escriben la discusión y conclusiones respectivamente.

II. PLATAFORMA EXPERIMENTAL

En esta sección se describe la plataforma física operada mediante un motor de corriente directa, y un brazo mecánico (véase Fig. 1), así como una interfaz desarrollada en Unreal Engine (véase Fig. 2). Las características de hardware y software del equipo empleado en este experimento son:

- Computadora de escritorio con
 - Sistema operativo Windows 10
 - Unreal Engine 5
 - 8 GB de memoria RAM.
 - Tarjeta de video Nvidia de 8 GB.
 - Disco duro de estado sólido de 1TB
- Motor de engranaje sin escobillas GIM4305 DC, velocidad de engranaje de 53mm, 10:1, 300rpm.
- Módulo Mcp2515 para la interfaz entre un Bus CAN (*Controller Area Network* por sus siglas en inglés) y SPI (*Serial Peripheral Interface* por sus siglas en inglés) para comunicación Arduino-Motor.
- Arduino NANO.
- Un brazo robótico impreso en plástico PLA (*Poliácido Láctico*) con una longitud de 20 cm y un peso aproximado de 80 g, se puede observar en la Fig. 1 los detalles del diseño mecánico.

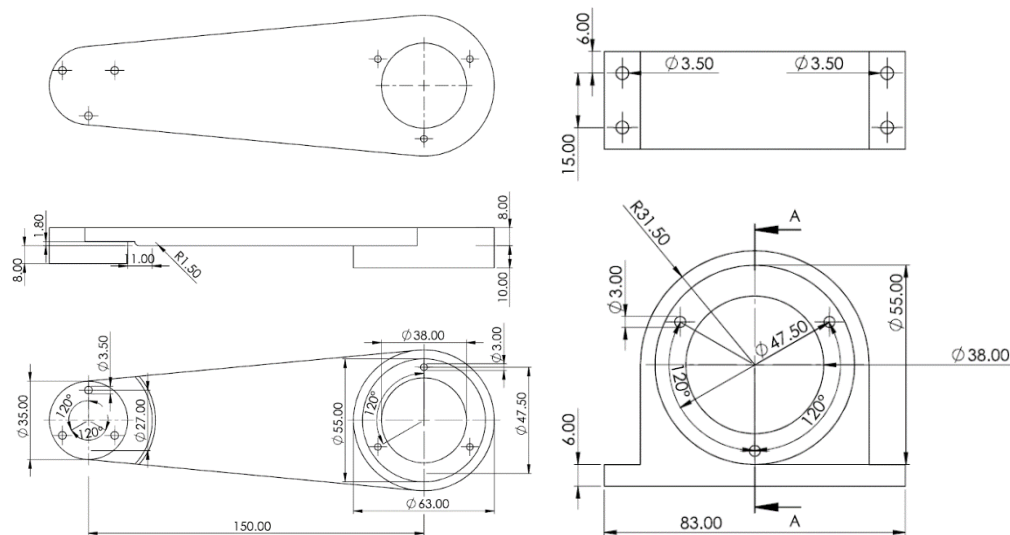


Fig. 1. Diseño mecánico del brazo robótico

III. DINÁMICA DEL SISTEMA

Ahora bien, la dinámica del sistema real es dictada por las leyes físicas y actuada mediante la corriente eléctrica en el motor, en el otro sistema, el digital, se programó la ecuación dinámica de movimiento (1) para lograr un comportamiento similar al de un péndulo simple, en esta ecuación de movimiento:

$$J\ddot{q}_d(t) + mgl \sin q_d(t) + c\dot{q}_d(t) = u_d(t) \quad (1)$$

4

la variable $J \in \mathbb{R}$ es la inercia de la barra, $m \in \mathbb{R}$ la masa total, $g \in \mathbb{R}$ la constante de gravedad, $l \in \mathbb{R}$ la distancia del pivote al centro de masa de la barra, $c \in \mathbb{R}$ el coeficiente de fricción, $u \in \mathbb{R}$ la acción de control o torque aplicado al pivote, y $q_d \in \mathbb{R}$ la posición angular del sistema digital de la barra medida con respecto al punto de equilibrio inferior (siendo $\dot{q}_d$ y $\ddot{q}_d$ la primera y segunda derivada de la posición del sistema digital).

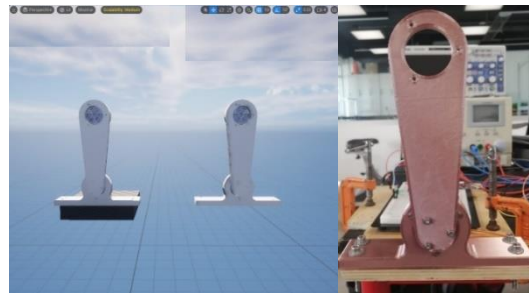


Fig. 2. a) Prototipo digital en Unreal Engine; b) Plataforma física experimental.

El diagrama de conexiones eléctricas y el flujo de información se muestran en la Fig.3. La lógica de operación es la siguiente:

1. En la plataforma de Unreal Engine se simula el comportamiento de un péndulo simple. Se recibe una señal de posición de referencia del Arduino, proveniente del motor físico, con la cual se calcula el torque implementado al sistema digital.
2. El Arduino recibe la posición de referencia de la plataforma Unreal Engine, y la lectura de posición del motor, lo que le permite calcular y enviar el torque necesario al sistema físico.

Es importante observar que mientras que las variables de posición, velocidad y aceleración del sistema digital son medibles en todo instante, la velocidad y aceleración del sistema físico solo pueden ser estimadas a partir de las mediciones del codificador rotacional del motor (encoder).

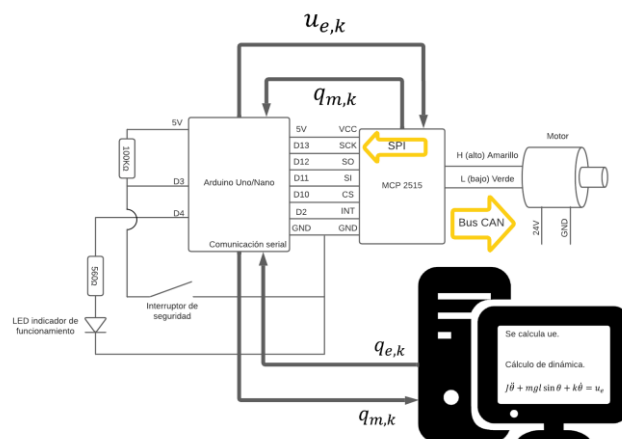


Fig. 3. Diagrama de conexión y comunicación entre los distintos componentes.

En la Fig. 4 se muestra la plataforma experimental cableada y los componentes empleados en la instrumentación. El motor fue seleccionado por tener un alto torque, y un controlador que integrado facilitó su instrumentación. El Arduino Nano cuenta con el suficiente poder de cómputo, así como puertos de comunicación *i2C*, así como *SPI*, para comunicación con el motor y con Unreal Engine. Finalmente, el módulo MCP2515 es un recurso necesario para poder comunicar el controlador del motor con el Arduino.

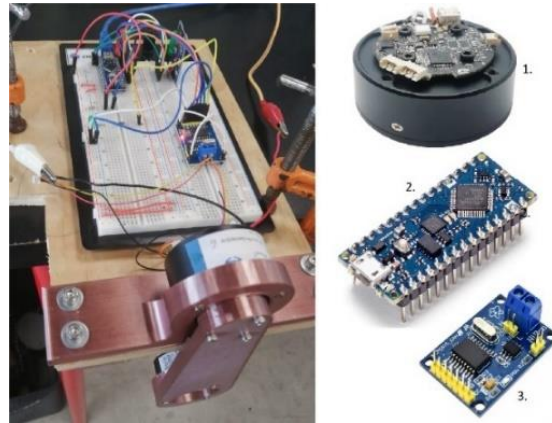


Fig. 4. a) Conexión física de componentes; b) Módulos: 1. Motor GIM4305, 2. Arduino NANO, 3. Módulo CAN BUS-SPI Mcp251.

Nota: La plataforma digital consta de dos modelos 3D del mismo péndulo (véase Fig. 2a), uno para verificar la integridad de datos recibidos (movimiento cinemático) y el otro para responder a sus propias ecuaciones diferenciales y a la estrategia de control para una sensación háptica (movimiento dinámico).

IV. ESTRATEGIA DE CONTROL

Es usual pensar en los sistemas hápticos en términos de dos tareas, seguimiento de posición y transparencia [19]. Mientras que la primera tarea es relativamente simple y requiere de una correcta sintonización de las ganancias de los controladores [20], la segunda tarea es un poco más compleja y requiere de la estimación de fuerzas externas para establecer estrategias de compensación y anular el efecto de fuerzas [21].

En esta sección presentaremos la estrategia de control empleada para el seguimiento de posición, la cual consiste en colocar un control proporcional (*P*) a la diferencia entre la plataforma física y digital, que emula un resorte entre ambos sistemas cuya rigidez depende de la ganancia de la acción de control, además de considerar un término de fricción viscosa para eliminar las oscilaciones del sistema mecánico el cual puede ocurrir por varias razones, entre las que destacan: retardos en la comunicación, pérdida de datos, errores numéricos en la simulación, así como fuerzas de restitución en el sistema mecánico. Entonces, se hace necesario presentar una estrategia para la correcta estimación de velocidad a partir de la medición de la posición de los motores con el uso de codificadores rotacional.

Además, la acción de control no busca solo un seguimiento de trayectorias bidireccional, sino que busca reproducir las fuerzas que el gemelo está experimentado. Una acción de control proporcional, aunque simple tiene un significado mecánico claro, esto es, un resorte con cierta rigidez que conecta ambos sistemas. Implementar alguna otra estrategia de control como una acción proporcional-integral (*PI*) o una acción proporcional-integral-derivativo (*PID*) podría causar pérdida en la sensación háptica. Mientras que la acción derivativa se puede interpretar como la conexión de un amortiguador generando una sensación viscosa entre ambos sistemas, la acción integral pudiera provocar, que al aumentar o disminuir la integral numérica del error,

se perciba un efecto de cambio de rigidez en ambos mecanismos. Experimentalmente los mejores resultados se observaron con la estrategia de control más simple, esto es la acción proporcional.

A. Ecuación controladores

Tanto el control $u_d \in \mathbb{R}$ para el sistema digital, como el control $u_f \in \mathbb{R}$ para el sistema físico tienen la siguiente estructura:

$$u_f(t) = K_1(q_d(t) - q_f(t)) - K_2\dot{q}_f(t) \quad (2)$$

$$u_d(t) = K_3(q_f(t) - q_d(t)) - K_4\dot{q}_d(t) \quad (3)$$

donde $q_f \in \mathbb{R}$ es la posición del sistema físico. Las ganancias $\{K_1, K_3\}$, representan la rigidez de los resortes que conectan a ambos motores, y aunque es usual que $K_1 = K_3$, es posible ajustar estos valores de forma heurística para obtener un mejor desempeño; entre más se incrementa el valor de estas ganancias más rígido se vuelve la conexión entre ambos sistemas. Las ganancias $\{K_2, K_4\}$ representan la capacidad del sistema a disipar energía y reducir oscilaciones, entre mayor sean estas ganancias más rápido se reducirán oscilaciones no deseadas, pero valores muy altos provocarán un sistema muy rígido y poco ágil; además, la eficacia de este mecanismo de disipación depende de la precisión en la que podemos medir o estimar el valor de la velocidad del sistema, pues estimaciones incorrectas o ruidosas provocarán oscilaciones en el sistema en vez de reducirlas llegando a producir inestabilidad en el comportamiento del sistema.

B. Implementación de señales de control en la plataforma experimental

En la plataforma Arduino, fue programada la ecuación (4):

$$u_f[k] = K_1(q_d[k] - q_f[k]) - K_2\dot{q}_f[k] \quad (4)$$

mientras que la ecuación (5) se programó en Unreal Engine,

$$u_d[k] = K_3(q_f[k] - q_d[k]) - K_4\dot{q}_d[k] \quad (5)$$

Observe que hemos sustituido la variable continua tiempo (t) para dar paso a la $[k]$ —ésima iteración para expresar la discretización que ocurre en los sistemas digitales; también, se sustituyó la velocidad $\dot{q}_f$ por una aproximación numérica $\hat{q}_f$ que resulta de solamente poder medir la posición de los motores por medio de un codificador rotacional, debiendo reconstruir de alguna forma la velocidad. Las estrategias y códigos para estimar la velocidad se presentan en la siguiente sección; además se presentarán las estimaciones de la aceleración que, pese a no utilizarse en este trabajo, serán útiles para aquellos que quieran estimar las fuerzas externas que actúan sobre los motores.

V. ESTRATEGIAS DE ESTIMACIÓN DE VELOCIDADES Y ACELERACIONES EN PLATAFORMA EXPERIMENTAL

Existen muchas estrategias para obtener la estimación de la velocidad, aquí presentamos tres estrategias que nos permiten obtener de forma simple la derivada de una señal, además de entender algunos aspectos sobre la sintonización de las ganancias.

A. Método de Euler

El método de Euler es ampliamente conocido, en este trabajo solo se presenta con fines comparativos. Recordemos que, en este método se establece que para una función diferenciable $f(t)$ su derivada está definida como:

$$\dot{f}(t) = \lim_{T \rightarrow 0} \frac{f(t) - f(t - T)}{T} \quad (6)$$

Y para fines de implementación en la plataforma Arduino, la constante T se considera como el tiempo de muestreo y el algoritmo numérico se puede escribir como:

$$\dot{f}[k] = \frac{f[k] - f[k - 1]}{T} \quad (7)$$

B. Derivador con filtro pasa baja

Consideremos ahora $x(t) \in \mathbb{R}$ una señal diferenciable, y sea $y(t) = \dot{x}(t)$ la derivada que deseamos estimar. En el dominio de la frecuencia se tiene que $Y(s) = L\{\dot{x}\} = sX(s)$, la cual tiene la función de transferencia no realizable:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = s \quad (8)$$

que, al ser multiplicada por una función propia de primer orden asociada a un filtro pasa-baja permite obtener una función realizable de la forma:

$$Y(s) = \frac{a}{s + a} sX(s) = \frac{a}{1 + \frac{a}{s}} X(s) \quad (9)$$

Ahora, para obtener un diferenciador de segundo orden, basta multiplicar dos veces la ecuación (9), para obtener la ecuación:

$$Y(s) = \frac{a^2}{1 + 2\frac{a}{s} + \frac{a^2}{s^2}} X(s) \quad (10)$$

Empleando el cambio de variable $\ddot{\hat{x}} = y(t)$ en el dominio del tiempo, de la ecuación (10) se obtiene la ecuación diferencial de segundo orden:

$$\ddot{\hat{x}}(t) = a^2(x(t) - \hat{x}(t)) - 2a\dot{\hat{x}}(t) \quad (11)$$

La cuál es estable para valores positivos de a , y se observa que $\hat{x} \rightarrow x$ exponencialmente por lo que las derivadas convergen exponencialmente $\dot{\hat{x}} \rightarrow \dot{x}$ y $\ddot{\hat{x}} \rightarrow \ddot{x}$ en una vecindad. Para verificar esta propiedad, se puede definir la variable de error $\xi(t) \in \mathbb{R}$ como $\xi(t) = |x - \hat{x}|$, y verificar que se cumple que :

$$\xi(t) \rightarrow 0 \Rightarrow \dot{\xi}(t) \leq \epsilon_1 \text{ así como } \ddot{\xi}(t) \leq \epsilon_2 \quad (12)$$

1) Implementación numérica en nuestra plataforma experimental

Para implementar el derivador de segundo orden, recordemos que la transformada Z de una integral definida, por ejemplo, $\omega(t) = \int_0^t \dot{\omega}(\tau) d\tau$, con condiciones iniciales $\omega(0) = 0$, asociada al método trapezoidal, se puede escribir como:

$$\Omega(z) = \frac{T}{2} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} \dot{\Omega}(z), \Rightarrow \Omega[k] = \Omega[k-1] + \frac{T}{2} (\dot{\Omega}[k] + \dot{\Omega}[k-1]), \quad (13)$$

∞

Donde, nuevamente, T es el tiempo de muestreo en segundos del sistema. Por lo que nuestro derivador de segundo orden puede ser escrito de forma discreta como:

$$\begin{aligned} \ddot{\hat{x}}[k] &= a^2(x[k-1] - \hat{x}[k-1]) - 2a\dot{\hat{x}}[k-1], \\ \dot{\hat{x}}[k] &= \dot{\hat{x}}[k-1] + \frac{T}{2} (\ddot{\hat{x}}[k] + \ddot{\hat{x}}[k-1]), \\ \hat{x}[k] &= \hat{x}[k-1] + \frac{T}{2} (\dot{\hat{x}}[k] + \dot{\hat{x}}[k-1]). \end{aligned} \quad (14)$$

De la ecuación anterior se vuelve un como más claro el papel de la constante a , usado para definir la frecuencia de corte del filtro pasaba baja en la ecuación (10), entre más alto sea el valor de a , mayor será el ajuste de la aceleración ante un error en la estimación de la posición lo que permitirá reaccionar más rápido ante variaciones de la señal y responder ante altas frecuencias; si, por el contrario, el parámetro a es pequeño observaremos ajustes pequeños de la aceleración siendo ideal para bajas frecuencias.

Al implementar este algoritmo se debe conocer en que frecuencias opera el sistema para la correcta sintonización del parámetro a .

C. Observadores de alta ganancia

Finalmente, construiremos un derivador empleando un observador de alta ganancia que es formulado a partir del conocimiento de la planta del sistema. Dado que la aceleración del sistema es proporcional al torque τ del sistema, esto es $\ddot{x}(t) = k\tau(t)$, podemos escribir el sistema dinámico, con $x \in \mathbb{R}^2$, en forma matricial como:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B\tau(t), y(t) = Cx(t) \quad (15)$$

donde $x(t) = [x(t) \quad \dot{x}(t)]^T = [x_1(t) \quad x_2(t)]^T$, $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$, y $C = [1 \quad 0]$. Como la matriz de observabilidad $O = \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix}$ es de rango completo, el sistema es observable y podemos construir un observador con la ecuación dinámica dada como:

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + H(y(t) - C\hat{x}(t)) = A\hat{x}(t) + HC(x(t) - \hat{x}(t)), \quad (16)$$

donde $\hat{x} = [\hat{x}_1 \quad \hat{x}_2]^T$, y $H = [h_1 \quad h_2]^T$. Definiendo el error $\xi(t) = x(t) - \hat{x}(t)$, se puede construir la ecuación dinámica del error:

$$\dot{\xi}(t) = A_0\xi(t) + B\tau, \quad (17)$$

Donde $A_0 = \begin{bmatrix} -h_1 & 1 \\ -h_2 & 0 \end{bmatrix}$. Con una función de transferencia de τ a ξ como:

$$G_\tau(s) = \frac{k}{s^2 + h_1 s + h_2} \begin{bmatrix} 1 \\ h_1 + s \end{bmatrix} \quad (18)$$

Que al seleccionar $h_2 \gg h_1 \gg 1$, de la forma:

$$h_1 = \frac{\alpha_1}{\varepsilon}, h_2 = \frac{\alpha_2}{\varepsilon^2} \quad (19)$$

La ecuación puede ser escrita como:

$$G_\tau(s, \varepsilon) = \frac{\varepsilon k}{(\varepsilon s)^2 + \alpha_1 \varepsilon s + \alpha_2} \begin{bmatrix} \varepsilon \\ \varepsilon s + \alpha_1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

por lo tanto $G_\tau(s, \varepsilon) \rightarrow 0$, las altas ganancias rechazan la perturbación y

$$\xi(t) \rightarrow 0 \Rightarrow \hat{x}_1 \rightarrow x, \hat{x}_2 \rightarrow \dot{x} \quad (21)$$

Lo que nos permite observar la velocidad directamente, mientras que la aceleración será entendida como $\hat{x}_2$.

1) Implementación numérica en nuestra plataforma experimental

Expandiendo la ecuación del observador, se tiene:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} (x - \hat{x}_1) \quad (22)$$

Por lo que podemos escribir las ecuaciones discretas de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \hat{x}_1[k] &= \hat{x}_2[k-1] + h_1(x_1[k-1] - x_1[k-1]), \\ \hat{x}_2[k] &= h_2(x_1[k] - x_1[k-1]), \\ \hat{x}_1[k] &= \hat{x}_1[k-1] + \frac{T}{2}(\dot{\hat{x}}_1[k] + \dot{\hat{x}}_1[k-1]), \\ \hat{x}_2[k] &= \hat{x}_2[k-1] + \frac{T}{2}(\dot{\hat{x}}_2[k] + \dot{\hat{x}}_2[k-1]). \end{aligned} \quad (23)$$

VI. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para estudiar el comportamiento del robot háptico, se levantó el brazo del robot a una posición de 2.5 rad , ver Fig. 5, y se dejó caer para observar las distintas respuestas del sistema bajo condiciones iniciales similares, pero distintas ganancias en las estrategias de control (4) y (5). En todos los experimentos, como era de esperarse, las dinámicas del robot y su gemelo digital hacían un mutuo seguimiento de trayectorias y sus dinámicas se interrelacionaban. La velocidad de comunicación entre todos los dispositivos se ajustó a 115,200 baudios, en donde se observó que a menores velocidades de comunicación el rendimiento del sistema también disminuía.

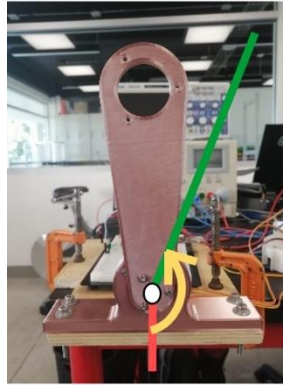


Fig. 5. El brazo se coloca a una posición inicial de 2.5 rad , se permite que el brazo se mueva por efecto de la gravedad y se observa como la dinámica del gemelo digital afecta y es afectada.

En la Fig. 6a se observa el experimento con ganancias $K_2 = K_4 = 0$, mientras que en la Fig. 6b se observa con ganancias $K_2 = 1.0$ y $K_4 = 0$; observe que el sistema digital no tiene la capacidad de disipar energía y solo es activado o desactivado este atributo en el sistema físico. En el experimento donde no se disipa energía se presentaron oscilaciones no deseadas de alta frecuencia las cuales pueden incluso provocar daños mecánicos en los mecanismos. En el sistema donde se consideró disipación en el motor físico, se observa que las oscilaciones disminuyen, además de lograr un mejor seguimiento de trayectorias, pero esta fricción adicional evita que el sistema alcance el punto de equilibrio inferior.

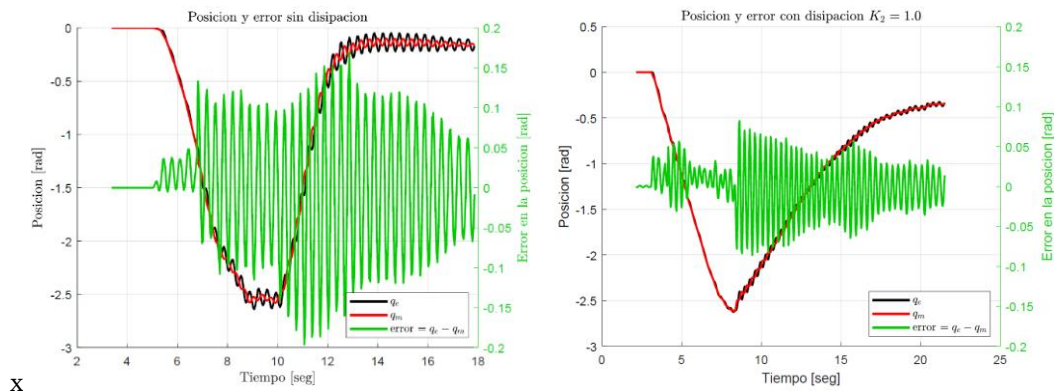


Fig. 6. a) Comportamiento del sistema sin compensación de fricción; b) Comportamiento del sistema con compensación de fricción empleando el método de filtro pasa baja con $\alpha = 6$.

En la Fig. 7, se observa la estimación de velocidades en las dos condiciones experimentales, con y sin fricción. Mientras que el método de Euler presenta oscilaciones que hacen inviable su implementación, el uso de filtros pasa bajas nos brinda una señal con menos oscilaciones. El observador de alta ganancia, así como el derivador con filtro pasa baja con ganancia adecuadamente sintonizadas resultan ser útiles para el objetivo de este trabajo y experimentalmente no se observaron grandes diferencias.

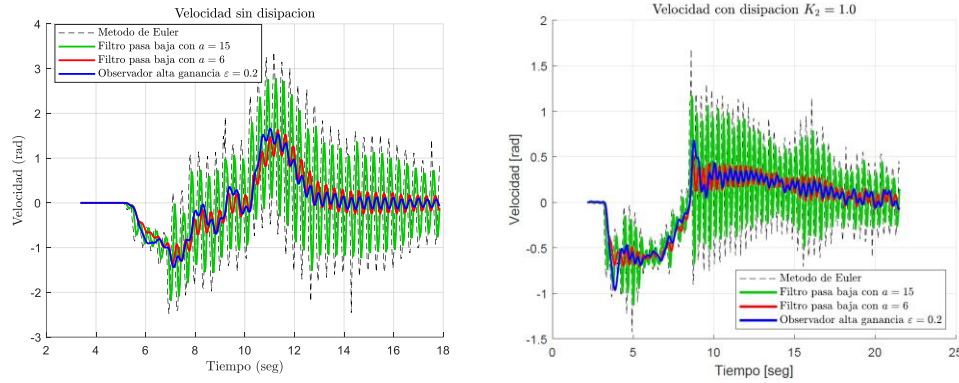


Fig. 7. a) Estimación de la velocidad sin compensación de fricción; b) Estimación de la velocidad con compensación de fricción.

En la Fig. 8, se muestra la aproximación a la segunda derivada. Mientras que el método de Euler y el filtro pasa bajas con $a = 15$ presentan oscilaciones de gran amplitud en ambos experimentos, el observador de alta ganancia, así como el filtro pasa bajas con $a = 6$ generan señales de amplitud más pequeñas.

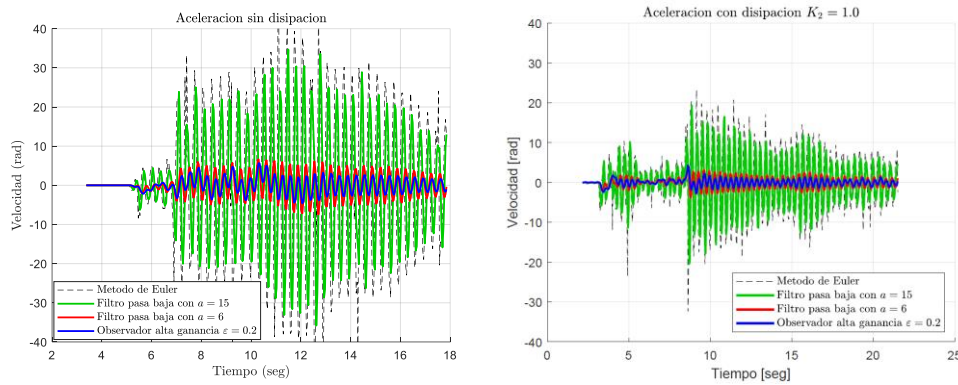


Fig. 8. a) Estimación de la aceleración sin compensación de fricción; b) Estimación de la aceleración con compensación de fricción.

Finalmente, pese a que en los métodos presentados se busca estimar la velocidad y la aceleración, no se cuenta con sensores para medir directamente el valor correcto de estas señales, pero observando que de cada método se puede reconstruir la posición del motor, parámetro que es conocido, nos permite proponer una estrategia para comparar las técnicas de derivación presentadas. En la Fig. 9 se observa la posición medida y la posición estimada, así como el error en cada uno de los métodos. Cualitativamente se puede observar que la mejor aproximación se logra con el método de alta ganancia. Cuantitativamente, se empleó la norma cuadrática:

$$\|x_1 - \hat{x}_1\|_2 = \left(\sum_{k=1}^n x_1[k] - \hat{x}_1[k] \right)^{1/2} \quad (20)$$

para estimar la desviación entre la posición estimada y la medida e identificar el mejor método de diferenciación. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1, en donde se observa que el error con la menor norma es el de alta ganancia.

TABLA 1.

TABLA COMPARATIVA ENTRE LA NORMA DEL ERROR DE LOS DISTINTOS MÉTODOS DE DIFERENCIACIÓN.

EXPERIMENTO	$\ x_1 - \hat{x}_1\ _2$
CON FILTRO PASA BAJA $a = 15$	1.9553
CON FILTRO PASA BAJA $a = 6$	3.6803
CON ALTA GANANCIA	1.4217

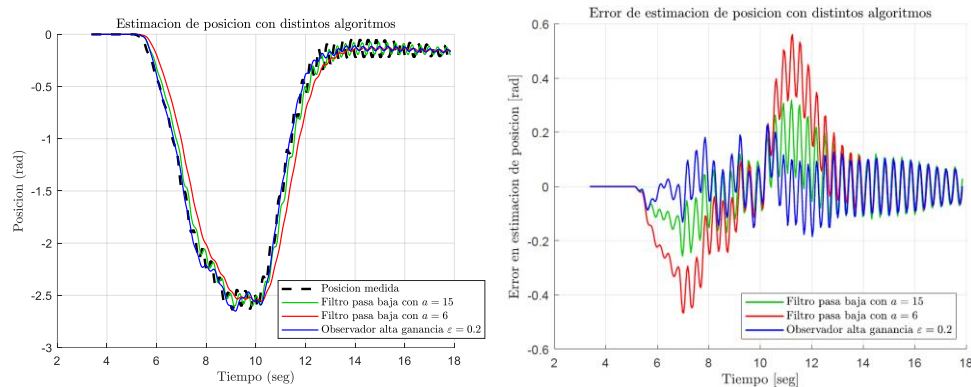


Fig. 9. a) Reconstrucción de la posición a partir de los diferentes métodos de estimación de velocidad. b) Error en la reconstrucción de la posición a partir de la estimación de velocidad.

Finalmente, los archivos que se generaron durante este experimento se pueden encontrar en el repositorio de archivos de GitHub [15].

VII. DISCUSIÓN

En los experimentos realizados, se demostró la viabilidad de la propuesta tecnológica para conseguir una sensación háptica entre un robot físico y la plataforma digital Unreal Engine. Los diagramas para la implementación electromecánica, el diseño digital y algoritmos computacionales se proveen para la reproducibilidad del experimento en el repositorio en línea. La estrategia de interconexión entre ambos sistemas se establece como un control proporcional, lo que equivale a conectar un “resorte digital” entre ambos mecanismos. En la Fig. 6 se observa la capacidad del sistema para seguir la posición de su gemelo, hay que recordar que este no es un sistema obligado a “mantener la posición”, pues debe ser capaz de responder a los estímulos externos de su propio entorno, lo que hace poco práctico implementar algunas otras estrategias de control robusto convencionales.

Los algoritmos presentados son simples para implementarse en plataformas de bajo rendimiento como lo es Arduino, recordemos que existen propuestas de otros algoritmos más complejos [19] [20] pero cuya implementación es más compleja, o bien estén pensadas para plataformas electromecánicas de mayor costo y sistemas de cómputo con características especiales.

Al querer mantener esta plataforma simple, la mera retroalimentación de posiciones no es suficiente pues, como ha sido ampliamente documentado en otros trabajos, retardos en la comunicación, sistemas mecánicos con mucha inercia, ganancias mal sintonizadas, poca fricción mecánica, o inclusive cambios de rigidez producidos por la interacción humana [21] puede provocar oscilaciones que pueden prevalecer una gran cantidad de tiempo y dañar al sistema. Una estimación adecuada de la velocidad (véase Fig. 7) es necesaria pues solo de esta forma podremos reducir las oscilaciones y lograr una mejor operación.

Cabe resaltar que, aunque en la Fig. 7 y Fig. 8 se muestran las estimaciones de velocidad y aceleración, en la práctica no existe una forma de compararlas con los valores reales, pues no se consideró un sensor para tal propósito; sin embargo, puesto que de estas medidas se puede reconstruir nuevamente la posición, podemos establecer una medida sobre qué tan adecuados son los métodos numéricos presentados.

VIII. CONCLUSIÓN

En el presente trabajo se desarrolló un robot de un grado de libertad y su gemelo digital empleando el software Unreal Engine, donde una transmisión bidireccional de datos permitió generar una sensación háptica entre ambos dispositivos. El prototipo mantuvo una construcción simple y a un bajo costo, lo cual permite su utilización tanto para la divulgación de la ciencia y tecnología como plataforma de investigación. Cabe resaltar que el diseño fue logrado al emplear la interfaz de Unreal Engine la cual, optimizada para el desarrollo de videojuegos, cuenta con gráficos visualmente atractivos y permite la programación de las ecuaciones dinámicas de movimiento para un comportamiento adecuado del sistema mecánico de interés; además, la selección de los actuadores permitió mantener un diseño electromecánico simple que puede ser construido con cualquier sistema de impresión 3D. Se implementó un control proporcional para lograr una sensación háptica, siendo la rigidez de conexión entre los mecanismos ajustada mediante la ganancia de la ley de control, implementar estrategias de control PI y PID puede lograr un mejor seguimiento de posición, pero añadiría una sensación de fricción viscosa entre ambos mecanismos o fuerzas que cuya interpretación física no es clara.

Además, se presentaron algoritmos para la estimación de la velocidad y aceleración a partir de la medición de la posición. Mientras que la velocidad estimada fue empleada para añadir fricción viscosa al sistema mecánico y reducir oscilaciones comúnmente encontradas en este tipo de aplicaciones, la estimación de la aceleración se presentó para mostrar las diferencias en los distintos diferenciadores propuestos; eventualmente, la estimación de la aceleración puede servir para mejorar la sensación háptica al transformar esta aceleración en información de fuerza que actúa sobre el sistema.

REFERENCIAS

- [1] C. Semararo, M. Lezoche, P. Hervé, M. Dassisti, "Digital twin paradigm: A systematic literature review", *Computers in Industry*, vol. 130, p. 103-469, 2021.
- [2] Z. Wang, X. Liao, X. Zhao, K. Han, P. Tiwari, M. J. Barth, G. Wu, "A digital twin paradigm: Vehicle-to-cloud based advanced driver assistance systems", en *2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*, 2020.
- [3] E. Glaessgen, D. Stargel, "The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles", en *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS adaptive structures conference 14th AIAA*, 2012.

- [4] W. Yu, P. Panos, B. Young, E. Klinac, T. G. Walmsley, "Energy digital twin technology for industrial energy management: Classification, challenges and future", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 161, pp. 112-407, 2022.
- [5] W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, W. Sihn, "Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification", *Ifac-PapersOnline*, vol. 51, pp. 1016-1022, 2018.
- [6] M. Faisal, F. Laamarti, A. El Saddik, "Digital Twin Haptic Robotic Arms: Towards Handshakes in the Metaverse", *Electronics*, vol. 12, 2023.
- [7] A. Fuller, Z. Fan, C. Day, C. Barlow, "Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research", *IEEE access*, vol. 8, pp. 108952-108971, 2020.
- [8] C. K. Liu, D. Negrut, "The role of physics-based simulators in robotics", *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, vol. 4, pp. 35-58, 2021.
- [9] J. Resch, J. Ehrentauf, M. Barnett-Cowan, et al., "Gamified automation in immersive media for education and research", » *arXiv preprint:1901.00729*, 2018.
- [10] F. Jiang, Q. Hao, "Pavilion: Bridging Photo-Realism and Robotics", en *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2019.
- [11] Y. Zheng, S. Yang, H. Cheng, "An application framework of digital twin and its case study", *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 10, pp. 1141-1153, 2019.
- [12] G. Steindl, M. Stagl, L. Kasper, W. Kastner, R. Hofmann, "Generic digital twin architecture for industrial energy systems", *Applied Sciences*, vol. 24, p. 8903, 2020.
- [13] Y. Lu, C. Liu, I. Kevin, K. Wang, H. Huang, X. Xu, "Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues", *Robotics and computer-integrated manufacturing*, vol. 61, p. 101837, 2020.
- [14] C. Boje, A. Guerriero, S. Kubicki, Y. Rezgui, "Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research", *Automation in construction*, vol. 114, p. 103179, 2020.
- [15] J. Leudet, F. Christophe, T. Mikkonen, T. Mannisto, "Ailivesim: An extensible virtual environment for training autonomous vehicles", en *2019 IEEE 43rd annual computer software and applications conference (COMPSAC)*, 2019.
- [16] S. Jeršov, "Development of Digital Twin in extended Reality with Unreal Engine", Tesis, Tal Tech- School of Information Technologies, Estonia, 2020.
- [17] Y. A. El-Wajeh, P. V. Hatton, N. J. Lee, "Unreal Engine 5 and immersive surgical training: translating advances in gaming technology into extended-reality surgical simulation training programmes", *British Journal of Surgery*, vol. 109, pp. 470-471, 2022.
- [18] Y. Wang, G. Zheng, D. Efimov, W. Perruquetti, "Differentiator application in altitude control for an indoor blimp robot", *International Journal of Control*, vol. 91, pp. 2121-2130, 2018.
- [19] Y. Matsumoto, S. Katsura, K. Ohnishi, "An analysis and design of bilateral control based on disturbance observer", en *IEEE International Conference on Industrial Technology 2003*, vol. 2, pp. 802-807, 2003.
- [20] D. Yashiro, K. Ohnishi, "Performance Analysis of Bilateral Control System With Communication Bandwidth Constraint", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, pp. 436-443, 2011.
- [21] H. Z. Tan, M. A. Srinivasan, B. Eberman, B. Cheng, "Human factors for the design of force-reflecting haptic interfaces", *Dynamic Systems and Control*, vol. 55, pp. 353-359, 1994.
- [22] H. Li, L. Zhang, K. Kawashima, "Operator dynamics for stability condition in haptic and teleoperation system: A survey", *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, vol. 14, p. e1881, 2018.
- [23] A. Colomé, D. Pardo, G. Alenya, C. Torras, "External force estimation during compliant robot manipulation", en *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2013.
- [24] Repositorio de GITHUB: https://github.com/erick-man11/InterfazHaptica_UE5, 2019.

Modelo de reconfiguración óptima de la transmisión*

Optimum Transmission Reconfiguration Model

Olivier Tovar-Barragán¹
Carlos Antonio Beceril-Gordillo²

¹Comisión Federal de Electricidad, MÉXICO
<https://orcid.org/0000-0001-5538-7095> | olivier.tovar@dt.cfe.mx

²Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO
<https://orcid.org/0000-0002-1598-4634> | cbeceril@ipn.mx

Recibido 03-02-2023, aceptado 01-12-2023.

Resumen

En este trabajo se presenta el problema de la reconfiguración óptima de la red de transmisión. Se muestra la forma en la que se construye el modelo matemático que se usa para resolver la problemática, haciendo una extensión del tradicional modelo de flujos óptimos, adicionando variables binarias para describir la conexión y desconexión de líneas de transmisión (tema principal de la reconfiguración óptima). Se utiliza un sistema pequeño de tres nodos para ejemplificar a detalle la construcción del modelo para luego extenderlo en la solución de un sistema de prueba de 14 nodos y otro más de 41 nodos (sur de Brasil) vía una implementación en AMPL usando CPLEX. Se muestran las diferencias económicas de usar un modelo de reconfiguración óptima contra la solución tradicional de flujos óptimos, traducidas en una reducción en el costo total de operación de cada sistema.

Palabras clave: flujos óptimos de potencia, reconfiguración óptima de la transmisión, programación lineal entera-mixta.

Abstract

In this work the problem of the optimal reconfiguration of the transmission network is presented. The way in which the mathematical model used to solve the problem is built is shown, making an extension of the traditional model of optimal power flows, adding binary variables to describe the connection and disconnection of transmission lines (main topic of optimal reconfiguration). A small system of three nodes is used to exemplify in detail the construction of the model to later extend it in the solution of a test system of 14 nodes and another one of 41 nodes (south of Brazil) via an implementation in AMPL using CPLEX. The economic differences of using an optimal reconfiguration model against the traditional solution of optimal power flows are shown with a reduction in the total cost of operation of each system.

Index terms: optimal power flows, optimal transmission switching, mixed-integer linear programming.

*Este artículo es la versión extendida de uno de los mejores trabajos del Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas 2022.

I. INTRODUCCIÓN

La redundancia presente de forma general en las redes de transmisión eléctrica ha sido una constante en el mundo con la finalidad de garantizar la confiabilidad de los sistemas eléctricos ante los peores escenarios de contingencias. Al ser esta la naturaleza de los sistemas de transmisión, los elementos que lo constituyen (líneas y transformadores) podrían no ser requeridos en determinados períodos de operación, causando una ineficiencia económica considerable en el despacho de generación.

2

De esta manera, el definir qué topología es mejor para un determinado período de tiempo es una tarea importante en la operación en tiempo real de los sistemas de potencia. El análisis clásico de Flujos Óptimos de Potencia (FOP) termina quedándose corto ante esta problemática, ya que aquí se considera a la red eléctrica como un elemento completamente estático y en donde se conoce a priori qué líneas están en servicio o no. Es decir, en el análisis de los FOP se busca optimizar el despacho económico de la generación sujeto a las restricciones físicas de la red de transmisión y un conjunto de variables de control [1]. La Reconfiguración Óptima de la Transmisión (ROT) proporciona una alternativa en la que a corto plazo o durante la operación en tiempo real busca encontrar la mejor configuración de la red para un período específico [2], permitiendo que la conexión y/o desconexión de elementos de transmisión se realice dentro del proceso de solución de despacho, modificando así la topología de la red de acuerdo con las condiciones de operación [4].

Las investigaciones sobre la ROT demuestran que un sistema de transmisión flexible tiene diversos beneficios técnico-económicos [4]. Entre otros aspectos, la ROT ha demostrado ser de utilidad para mejorar los perfiles de tensión principalmente en periodos de demanda mínima, aumentar la capacidad de transmisión, e incluso mejorar la confiabilidad del sistema, esto incluye a los esquemas de acción remedial [8], [9], [10], [11], [12]. Además, se presume el potencial para reducir los costos operativos asociados con el uso de los recursos de transmisión y generación [4], [13], [14], [15], esto último se demuestra en el presente artículo. Así mismo, de forma inicial se busca mostrar la base teórica y validación del modelo ROT.

Para una segunda entrega, se mostrará la aplicación del modelo ROT a la red troncal del Valle de México, perteneciente a la CFE Transmisión, donde se puntualizan los beneficios descritos, para la reconfiguración de la red.

II. MOTIVACIÓN DEL PROBLEMA DE RECONFIGURACIÓN ÓPTIMA DE LA TRANSMISIÓN

El despacho de generación depende en gran medida de la topología de la red, ya que un cambio en la impedancia de un elemento de transmisión o bien un cambio en la configuración de la red, hará que la energía que fluye en cada línea se redistribuya, y se observe un cambio en el despacho de generación factibles [4].

En algunas ocasiones, las restricciones en el sistema de transmisión hacen que una configuración de despacho con un mejor desempeño económico no sea factible, de modo que, si se pudiera contar con un sistema de transmisión flexible, sería posible identificar los elementos de transmisión que obstaculizan dicha configuración y realizar las correcciones que permitan la entrada de unidades de generación económicamente más viables, que hasta antes de la reconfiguración eran irrealizables. Matemáticamente esto se traduce en una expansión del conjunto factible de solución (CFS) y, en términos económicos, esto puede resultar en una reducción del costo total de operación cuando se resuelve el problema de FOP.

A. Motivación geométrica (expansión del CFS)

Considere el sistema de tres nodos de la figura 1, con las impedancias de todas las líneas iguales ($Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{AC}$), los límites de transmisión $|L_{AB}| \leq 50$, $|L_{BC}| \leq 80$, y $|L_{AC}| \leq 200$, suponiendo que no se restringe el

despacho de potencia de los generadores y que todas las líneas se encuentran conectadas [3], [4]. Considerando el despacho G_A y G_B (orden de mérito), las restricciones de la red y el cálculo del flujo en las líneas, se tiene el sistema de desigualdades (1), que se representan en la figura 2 como un CFS.

$$\begin{aligned} \text{Línea}_{B-C}: -80 &\leq \frac{1}{3}G_A + \frac{2}{3}G_B \leq 80 \\ \text{Línea}_{A-B}: -50 &\leq \frac{1}{3}G_A - \frac{1}{3}G_B \leq 50 \\ \text{Línea}_{A-C}: -200 &\leq \frac{2}{3}G_A + \frac{1}{3}G_B \leq 200 \end{aligned} \quad (1)$$

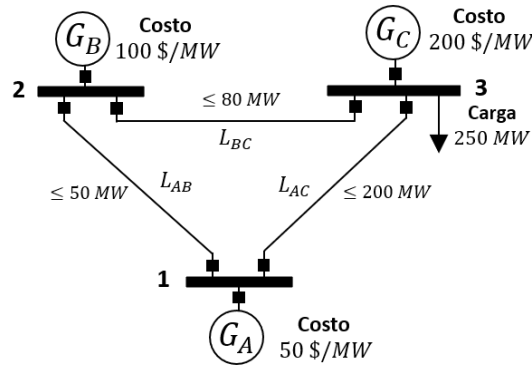


Fig. 1. Sistema de 3 nodos [12].

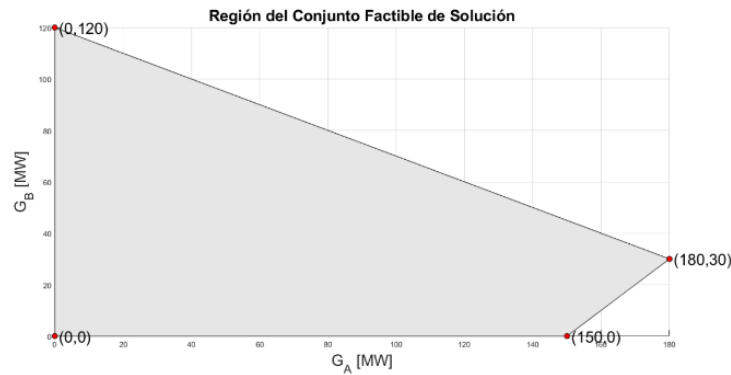


Fig. 2. CFS para el sistema de desigualdades (1) del sistema de 3 nodos con todas las líneas conectadas.

Si ahora se desconecta la línea L_{AB} que es la de menor capacidad de transmisión y se definen nuevas restricciones de transmisión para el sistema, el conjunto de ellas queda [4]:

$$\begin{aligned} \text{Línea}_{B-C}: -80 &\leq G_B \leq 80 \\ \text{Línea}_{A-C}: -200 &\leq G_A \leq 200 \end{aligned} \quad (2)$$

Graficando este sistema de desigualdades (2), se observa que el CFS se forma con los vértices mostrados en la figura 3.

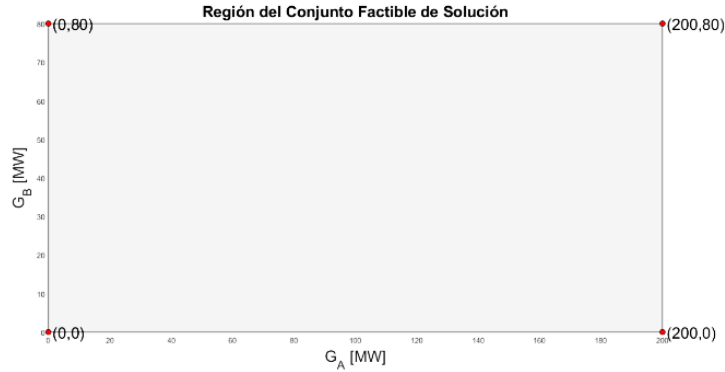


Fig. 3. CFS para el sistema de 3 nodos con L_{AB} desconectada.

Si ahora se comparan los dos conjuntos factibles de solución, es decir, todas las líneas conectadas vs el caso en el que se desconecta la línea L_{AB} , se puede observar la expansión del CFS, tal y como se muestra en la figura 4.

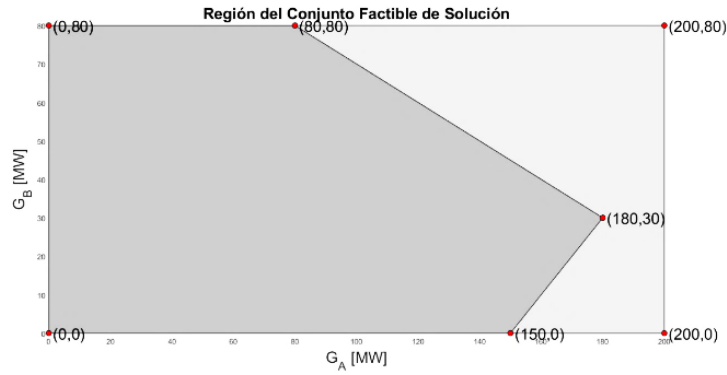


Fig. 4. Comparación de ambos conjuntos factibles de solución (figura 2 vs figura 3).

B. Motivación económica (Reducción del costo total de operación)

Con la finalidad de observar el impacto económico de la reconfiguración de la topología en la red, se considerará una formulación simplificada de FOP con un modelo de CD para la red [1], [2], [3], [4]:

$$\text{minimizar } v = \sum_{n \in \Omega_G} c_n P_{Gn} \quad (3)$$

Sujeto a:

$$\sum_{m, n \in \Omega_L} f_{mn} - \sum_{n, m \in \Omega_L} f_{nm} + P_{Gn} = P_{Dn}; \forall n \in \Omega_B \quad (4)$$

$$f_{nm} = \bar{k}_{nm} \frac{\theta_n - \theta_m}{x_{nm}}; \forall nm \in \Omega_L \quad (5)$$

$$\theta_{Ref} = 0 \quad (6)$$

$$|f_{nm}| \leq \bar{k}_{nm} \bar{f}_{nm}; \forall nm \in \Omega_L \quad (7)$$

$$\underline{P}_{Gn} \leq P_{Gn} \leq \bar{P}_{Gn} \quad \forall n \in \Omega_G \quad (8)$$

Donde: v es la función objetivo (costo de operación del sistema), c_n es el costo de generación en el nodo n , P_{Gn} es la potencia generada en el nodo n , θ_n es el ángulo de fase de la tensión en el nodo, P_{Dn} es la potencia demanda en el nodo n , Ω_G es el conjunto de unidades de generación, Ω_L es el conjunto de enlaces formado por una o más líneas de transmisión, Ω_B es el conjunto de nodos (barras), f_{nm} es el flujo de potencia en el *enlace* que interconecta los nodos n y m , $\bar{f}_{nm}$ es el flujo máximo de potencia en una *línea* del enlace $n-m$, x_{nm} es la reactancia de una *línea* de transmisión en un *enlace* y $\bar{k}_{nm}$ es el número de líneas existentes en el enlace.

Utilizando el sistema de 3 nodos de la figura 1, y resolviendo el modelo para el caso en el que todas las líneas se encuentran conectadas, se obtiene la solución que se muestra en la tabla 1. Observe que, la limitada capacidad de transmisión de las líneas L_{AB} y L_{BC} hace necesario despachar (3) – (8) la unidad G_C [4].

TABLA 1
FOP EN CD, TODAS LAS LÍNEAS CONECTADAS [4]

Nodo	Ángulos θ	Enlace	Flujo LT [MW]	Generador	Potencia [MW]
1	0.0000	(A, B)	50.00	G_A	180.00
2	-5.0000	(A, C)	130.00	G_B	30.00
3	-13.0000	(B, C)	80.00	G_C	40.00

Costo Total de Generación: 20,000.00 US\$/h

En este caso, el costo mínimo total de operación es de 20,000 USD/h, y se da en el vértice (180,30) es decir, $G_A = 180$ MW y $G_B = 30$ MW, con el complemento de $G_C = 40$ MW tal y como se muestra en la figura 5, en donde se muestra además la distribución de los flujos.

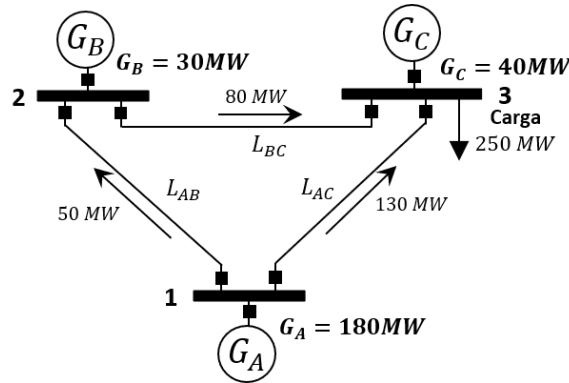


Fig. 5. FOP en CD del Sistema de 3 nodos [12].

Por su parte, la tabla 2 muestra la solución de FOP para el caso en el que se desconecta la línea L_{AB} . Note que en este caso el costo total de operación disminuye de 20,000 USD/h a 15,000 USD/h, debido a la reconfiguración por la desconexión de L_{AB} . La solución óptima de este último problema se ubica en el vértice (200,50), y corresponde al despacho de $G_A = 200$ MW y $G_B = 50$ MW [4]. Nótese además cómo la unidad más cara, G_C , no es despachada antes este cambio de topología.

TABLA 2
FOP EN CD, CON L_{AB} DESCONECTADA [4]

Nodo	Ángulos θ	Enlace	Flujo LT [MW]	Generador	Potencia [MW]
1	0.0000	(A, B)	---	G_A	200.00
2	-15.0000	(A, C)	200.00	G_B	50.00
3	-20.0000	(B, C)	50.00	G_C	0.00

Costo Total de Generación: 15,000.00 US\$/h

III. RECONFIGURACIÓN ÓPTIMA DE LA TRANSMISIÓN

En la sección anterior se mostró cómo se puede mejorar el costo total de operación del sistema eléctrico tras retirar de servicio aquellas líneas ineficientes, o con un mínimo uso, que sólo serían empleadas en condiciones particulares o estrictamente necesarias [2], [3], [4], [5]. En esta sección se mostrará el desarrollo de un modelo que permita realizar lo anterior dentro de una misma formulación, mostrando los cambios que debe tener el modelo clásico de FOP mostrados en el conjunto (3) – (8).

C. Formulación matemática

La formulación matemática tradicional del problema de la ROT se puede escribir como una extensión del problema de FOP [2], [3], [5], en donde ahora, se considera por separado cada una de las líneas de transmisión de un enlace, es decir, la ecuación de balance de potencia (4) se escribe ahora como:

$$P_{G_n} + \sum_{m, n \in \Omega_L} \sum_{y=1}^{\bar{k}_{mn}} f_{mn,y} - P_{D_n} - \sum_{n, m \in \Omega_L} \sum_{y=1}^{\bar{k}_{nm}} f_{nm,y} = 0; \quad n \in \Omega_b$$

en donde $f_{mn,y}$, es la variable que representa el flujo de energía en la línea ‘y’ del enlace mn . Nótese que se han modelado todas las inyecciones y extracciones de potencia para cada nodo. Es decir, la inyección de la generación conectada al nodo n , más la suma de las inyecciones que se tiene desde otros nodos hacia el nodo n a través de líneas de transmisión, menos la extracción debida a todas las cargas conectadas al nodo n menos los envíos desde ese nodo n hacia cualquier otro nodo m deben estar equilibrados [4],

Como en una rama puede haber una o más líneas, el flujo de energía total en un enlace se puede calcular como:

$$f_{nm} = \sum_{y=1}^{\bar{k}_{nm}} f_{nm,y}$$

Otro cambio más para el nuevo modelo es el equivalente de la LVK en cada enlace del sistema (5), que ahora se escribe como una desigualdad:

$$|x_{nm} f_{mn,y} - (\theta_n - \theta_m)| \leq M(1 - w_{nm,y}) \quad (9)$$

donde w_{nm} es una variable de decisión binaria $\{0,1\}$, e indica si la línea ‘y’ del enlace nm está conectada al sistema, es decir, $w_{nm,y} = 1$ si la línea del enlace nm está conectada y $w_{nm,y} = 0$ en caso contrario [2], [3], [4]. M , es el flujo máximo de potencia presente en el sistema de transmisión (7), que se expresa como:

$$M = \max \left\{ \frac{\theta_n - \theta_m}{x_{nm}} \right\}$$

La restricción (9) representa la aplicación de la LVK en cada enlace del sistema, a diferencia del modelo de FOP en CD esta restricción se transforma en una desigualdad, debido a que si la línea está desconectada ($w_{nm,y} = 0$), la restricción no está activa, y la diferencia de ángulo $\theta_n - \theta_m$ debe estar limitada por el parámetro M ; la adecuada elección de este parámetro impactará en la cantidad de líneas abiertas en la reconfiguración de la red [2], [4]. Por otro lado, si la línea está conectada al sistema ($w_{nm,y} = 1$), entonces la LVK debe cumplirse.

Trabajando el valor absoluto de (9) se tiene:

$$-M(1 - w_{nm,y}) \leq x_{nm} f_{nm,y} - (\theta_n - \theta_m) \leq M(1 - w_{nm,y})$$

Es decir:

$$x_{nm} f_{nm,y} - (\theta_n - \theta_m) \leq M(1 - w_{nm,y})$$

$$x_{nm} f_{nm,y} - (\theta_n - \theta_m) \geq -M(1 - w_{nm,y})$$

7

Por su parte, los límites en los flujos se escriben como:

$$|f_{nm,y}| \leq w_{nm,y} \bar{f}_{nm} \quad \forall nm \in \Omega_L, y = 1, \dots, \bar{k}_{nm}$$

Procediendo de la misma manera que con (9), esta expresión se reescribe como:

$$f_{nm,y} \leq w_{nm,y} \bar{f}_{nm}$$

$$f_{nm,y} \geq -w_{nm,y} \bar{f}_{nm}$$

Además, se debe considerar:

$$w_{nm,y} \leq w_{nm,y-1} \quad \forall nm \in \Omega_L, y = 2, \dots, \bar{k}_{nm}$$

$$w_{nm,y} \in \{0,1\} \quad \forall nm \in \Omega_L, y = 1, \dots, \bar{k}_{nm}$$

Finalmente, el modelo resultante de la ROT queda [4]:

$$\text{minimizar } v = \sum_{n \in \Omega_G} c_n P_{Gn} \quad (10)$$

Sujeto a:

$$\sum_{m,n \in \Omega_L} \sum_{y=1}^{\bar{k}_{mn}} f_{mn,y} - \sum_{n,m \in \Omega_L} \sum_{y=1}^{\bar{k}_{nm}} f_{nm,y} + P_{Gn} = P_{Dn}; \quad \forall n \in \Omega_b \quad (11)$$

$$|x_{nm} f_{mn,y} - (\theta_n - \theta_m)| \leq M(1 - w_{nm,y}) \quad (12)$$

$$|f_{nm,y}| \leq w_{nm,y} \bar{f}_{nm} \quad \forall nm \in \Omega_L, y = 1, \dots, \bar{k}_{nm} \quad (13)$$

$$w_{nm,y} \leq w_{nm,y-1} \quad \forall nm \in \Omega_L, y = 2, \dots, \bar{k}_{nm} \quad (14)$$

$$w_{nm,y} \in \{0,1\} \quad \forall nm \in \Omega_L, y = 1, \dots, \bar{k}_{nm} \quad (15)$$

$$\theta_{Ref} = 0 \quad (16)$$

$$\underline{P}_{Gn} \leq P_{Gn} \leq \bar{P}_{Gn} \quad (17)$$

D. Ejemplo de modelado

Se mostrará la forma en la que se construye el modelo (10) – (17) de la ROT, usando el sistema de 3 nodos de la figura 6, con una potencia base de 100 MW y $n = 1$ como nodo de referencia [6]. El desarrollo de las expresiones aquí mostradas y otros detalles más se pueden consultar en [4].

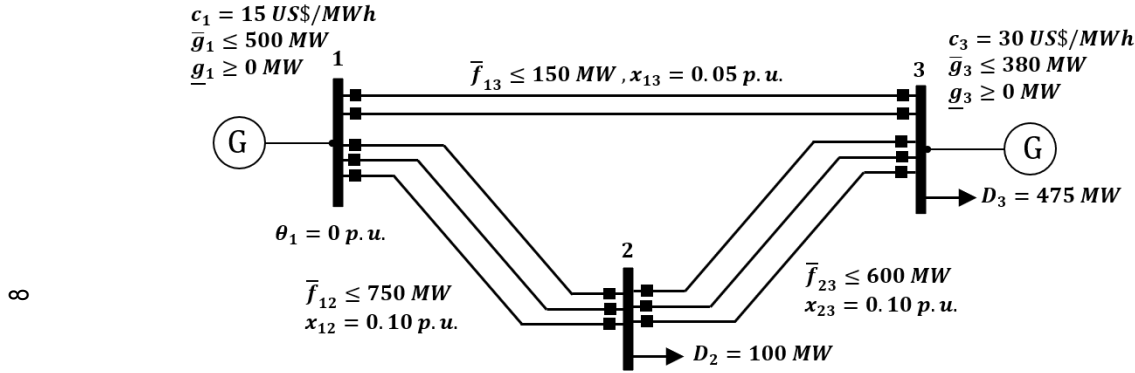


Fig. 6. Sistema de prueba de 3 nodos [6].

Conjuntos. Nodos de generación: $\Omega_G = \{1,3\}$

Función objetivo: Como en los nodos 1 y 3 existe una unidad de generación, la expresión (10) queda:

$$v = c_1 P_{G1} + c_3 P_{G3}$$

Restricciones de igualdad. El conjunto de ecuaciones (11) correspondientes a la LCK (Balance de potencia) se desarrolla como sigue:

Enlaces: $\Omega_L = \{(1,2), (1,3), (2,3)\}$

Nodos: $\Omega_B = \{1,2,3\}$

Número de líneas por enlace es: $\bar{k}_{12} = 3, \bar{k}_{13} = 2$ y $\bar{k}_{23} = 3$.

Para el nodo $n = 1$: Se tienen los enlaces (1,2) y (1,3). Asumiendo que ambos enlaces envían flujo de potencia a la red (extracciones de flujo):

$$-f_{12,1} - f_{12,2} - f_{12,3} - f_{13,1} - f_{13,2} + P_{G1} = 0$$

Para el nodo $n = 2$. Se tienen los enlaces (1,2) y (2,3). Asumiendo que el primer enlace inyecta flujo al nodo 2 y que el segundo enlace envía flujo a la red:

$$f_{12,1} + f_{12,2} + f_{12,3} - f_{23,1} - f_{23,2} - f_{23,3} = P_{D2}$$

Para el nodo $n = 3$. Se tienen los enlaces (1,3) y (2,3). Asumiendo que ambos enlaces inyectan flujo al nodo:

$$f_{13,1} + f_{13,2} + f_{23,1} + f_{23,2} + f_{23,3} + P_{G3} = P_{D3}$$

Ángulo de referencia. Se asigna $n = 1$, de modo que la restricción (16) queda: $\theta_1 = 0$.

Restricciones de desigualdad.

a) Las restricciones (12), correspondientes al equivalente de la LVK:

- Para el enlace $\Omega_L = (1, 2)$, se tiene $n = 1$ y $m = 2$, $\bar{k}_{12} = 3$.
Para la línea $y = 1$ de este enlace (1, 2), se tiene:

$$x_{12} f_{12,1} - (\theta_1 - \theta_2) \leq M(1 - w_{12,1})$$

$$x_{12} f_{12,1} - (\theta_1 - \theta_2) \geq -M(1 - w_{12,1})$$

Para la línea $y = 2$ de este enlace $(1, 2)$, se tiene:

$$x_{12} f_{12,2} - (\theta_1 - \theta_2) \leq M(1 - w_{12,2})$$

$$x_{12} f_{12,2} - (\theta_1 - \theta_2) \geq -M(1 - w_{12,2})$$

Para la línea $y = 3$ de este enlace $(1, 2)$, se tiene:

$$x_{12} f_{12,3} - (\theta_1 - \theta_2) \leq M(1 - w_{12,3})$$

$$x_{12} f_{12,3} - (\theta_1 - \theta_2) \geq -M(1 - w_{12,3})$$

- Para el enlace $\Omega_L = (1, 3)$, se tiene $n = 1$ y $m = 3$, $\bar{k}_{13} = 2$.

Para la línea $y = 1$ de este enlace $(1, 3)$, se tiene:

$$x_{13} f_{13,1} - (\theta_1 - \theta_3) \leq M(1 - w_{13,1})$$

$$x_{13} f_{13,1} - (\theta_1 - \theta_3) \geq -M(1 - w_{13,1})$$

Para la línea $y = 2$ de este enlace $(1, 3)$, se tiene:

$$x_{13} f_{13,2} - (\theta_1 - \theta_3) \leq M(1 - w_{13,2})$$

$$x_{13} f_{13,2} - (\theta_1 - \theta_3) \geq -M(1 - w_{13,2})$$

- Enlace $\Omega_L = (2, 3)$ se tiene $n = 2$ y $m = 3$, $\bar{k}_{23} = 3$.

Para la línea $y = 1$ de este enlace $(2, 3)$, se tiene:

$$x_{23} f_{23,1} - (\theta_2 - \theta_3) \leq M(1 - w_{23,1})$$

$$x_{23} f_{23,1} - (\theta_2 - \theta_3) \geq -M(1 - w_{23,1})$$

Para la línea $y = 2$ de este enlace $(2, 3)$, se tiene:

$$x_{23} f_{23,2} - (\theta_2 - \theta_3) \leq M(1 - w_{23,2})$$

$$x_{23} f_{23,2} - (\theta_2 - \theta_3) \geq -M(1 - w_{23,2})$$

Para la línea $y = 3$ de este enlace $(2, 3)$, se tiene:

$$x_{23} f_{23,3} - (\theta_2 - \theta_3) \leq M(1 - w_{23,3})$$

$$x_{23} f_{23,3} - (\theta_2 - \theta_3) \geq -M(1 - w_{23,3})$$

- b) El conjunto de desigualdades (13), correspondiente a las restricciones de flujo de energía en cada línea:

- Para el enlace $\Omega_L = (1, 2)$, se tiene $n = 1$ y $m = 2$, $\bar{k}_{12} = 3$.

Para la línea $y = 1$ de este enlace $(1, 2)$, se tiene:

$$f_{12,1} \leq w_{12,1} \bar{f}_{12}$$

$$f_{12,1} \geq -w_{12,1} \bar{f}_{12}$$

Para la línea $y = 2$ de este enlace $(1, 2)$, se tiene:

$$\begin{aligned} f_{12,2} &\leq w_{12,2} \bar{f}_{12} \\ f_{12,2} &\geq -w_{12,2} \bar{f}_{12} \end{aligned}$$

Para la línea $y = 3$ de este enlace $(1, 2)$, se tiene:

$$\begin{aligned} f_{12,3} &\leq w_{12,3} \bar{f}_{12} \\ f_{12,3} &\geq -w_{12,3} \bar{f}_{12} \end{aligned}$$

- Para el enlace $\Omega_L = (1, 3)$, se tiene $n = 1$ y $m = 3$, $\bar{k}_{13} = 2$.

Para la línea $y = 1$ de este enlace $(1, 3)$, se tiene:

$$\begin{aligned} f_{13,1} &\leq w_{13,1} \bar{f}_{13} \\ f_{13,1} &\geq -w_{13,1} \bar{f}_{13} \end{aligned}$$

Para la línea $y = 2$ de este enlace $(1, 3)$, se tiene:

$$\begin{aligned} f_{13,2} &\leq w_{13,2} \bar{f}_{13} \\ f_{13,2} &\geq -w_{13,2} \bar{f}_{13} \end{aligned}$$

- Para el enlace $\Omega_L = (2, 3)$, se tiene $n = 2$ y $m = 3$, $\bar{k}_{23} = 3$.

Para la línea $y = 1$ de este enlace $(2, 3)$, se tiene:

$$\begin{aligned} f_{23,1} &\leq w_{23,1} \bar{f}_{23} \\ f_{23,1} &\geq -w_{23,1} \bar{f}_{23} \end{aligned}$$

Para la línea $y = 2$ de este enlace $(2, 3)$, se tiene:

$$\begin{aligned} f_{23,2} &\leq w_{23,2} \bar{f}_{23} \\ f_{23,2} &\geq -w_{23,2} \bar{f}_{23} \end{aligned}$$

Para la línea $y = 3$ de este enlace $(2, 3)$, se tiene:

$$\begin{aligned} f_{23,3} &\leq w_{23,3} \bar{f}_{23} \\ f_{23,3} &\geq -w_{23,3} \bar{f}_{23} \end{aligned}$$

- c) El conjunto de desigualdades (14), correspondiente a las restricciones a las restricciones complementarias sobre la desconexión secuencial de líneas:

- Para el enlace $\Omega_L = (1, 2)$, se tiene $n = 1$ y $m = 2$, $\bar{k}_{12} = 3$, aquí $y = 2, \dots, \bar{k}_{nm}$.

Para la línea $y = 2$: $w_{12,2} \leq w_{12,1} ; \in \{0,1\}$. Para la línea $y = 3$: $w_{12,3} \leq w_{12,2} ; \in \{0,1\}$.

- Para el enlace $\Omega_L = (1, 3)$, se tiene $n = 1$ y $m = 3$, $\bar{k}_{13} = 2$, aquí $y = 2, \dots, \bar{k}_{nm}$.

Para la línea $y = 2$: $w_{13,2} \leq w_{13,1} ; \in \{0,1\}$.

- Para el enlace $\Omega_L = (2,3)$ se tiene $n = 2$ y $m = 3$, $\bar{k}_{23} = 3$, aquí $y = 2, \dots, \bar{k}_{nm}$.

Para la línea $y = 2$: $w_{23,2} \leq w_{23,1} ; \in \{0,1\}$. Para la línea $y = 3$: $w_{23,3} \leq w_{23,2} ; \in \{0,1\}$

d) Los límites mínimos y máximos de generación del conjunto de desigualdades (17), quedan:

$$\underline{P}_{G1} \leq P_{G1} \leq \bar{P}_{G1}$$

$$\underline{P}_{G3} \leq P_{G3} \leq \bar{P}_{G3}$$

11

Además de elegir un valor de M , si el caso lo requiere, es importante el realizar las siguientes adecuaciones:

- Obtener la susceptancia para cada línea $\beta_{nm} = 1/x_{nm}$.
- Cambiar las susceptancias de las líneas de valores por unidad ($p.u.$) a valores reales.

Así, con los datos del sistema y considerando un valor $M = 30$, el modelo (10) – (17) quedaría [4]:

$$\text{minimizar: } v = 15 P_{G1} + 30 P_{G3}$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} & -f_{12,1} - f_{12,2} - f_{12,3} - f_{13,1} - f_{13,2} + P_{G1} = 0 \\ & f_{12,1} + f_{12,2} + f_{12,3} - f_{23,1} - f_{23,2} - f_{23,3} = 100 \text{ MW} \\ & f_{13,1} + f_{13,2} + f_{23,1} + f_{23,2} + f_{23,3} + P_{G3} = 475 \text{ MW} \\ & \theta_1 = 0 \\ & 0.1 f_{12,1} + \theta_2 \leq 30(1 - w_{12,1}) \\ & 0.1 f_{12,1} + \theta_2 \geq -30(1 - w_{12,1}) \\ & 0.1 f_{12,2} + \theta_2 \leq 30(1 - w_{12,2}) \\ & 0.1 f_{12,2} + \theta_2 \geq -30(1 - w_{12,2}) \\ & 0.1 f_{12,3} + \theta_2 \leq 30(1 - w_{12,3}) \\ & 0.1 f_{12,3} + \theta_2 \geq -30(1 - w_{12,3}) \\ & 0.2 f_{13,1} + \theta_3 \leq 30(1 - w_{13,1}) \\ & 0.2 f_{13,1} + \theta_3 \geq -30(1 - w_{13,1}) \\ & 0.2 f_{13,2} + \theta_3 \leq 30(1 - w_{13,2}) \\ & 0.2 f_{13,2} + \theta_3 \geq -30(1 - w_{13,2}) \\ & 0.1 f_{23,1} - (\theta_2 - \theta_3) \leq 30(1 - w_{23,1}) \\ & 0.1 f_{23,1} - (\theta_2 - \theta_3) \geq -30(1 - w_{23,1}) \\ & 0.1 f_{23,2} - (\theta_2 - \theta_3) \leq 30(1 - w_{23,2}) \\ & 0.1 f_{23,2} - (\theta_2 - \theta_3) \geq -30(1 - w_{23,2}) \\ & 0.1 f_{23,3} - (\theta_2 - \theta_3) \leq 30(1 - w_{23,3}) \\ & 0.1 f_{23,3} - (\theta_2 - \theta_3) \geq -30(1 - w_{23,3}) \\ & f_{12,1} \leq 250 w_{12,1}, f_{12,1} \geq -250 w_{12,1} \\ & f_{12,2} \leq 250 w_{12,2}, f_{12,2} \geq -250 w_{12,2} \\ & f_{12,3} \leq 250 w_{12,3}, f_{12,3} \geq -250 w_{12,3} \\ & f_{13,1} \leq 75 w_{13,1}, f_{13,1} \geq -75 w_{13,1} \\ & f_{13,2} \leq 75 w_{13,2}, f_{13,2} \geq -75 w_{13,2} \\ & f_{23,1} \leq 200 w_{23,1}, f_{23,1} \geq -200 w_{23,1} \\ & f_{23,2} \leq 200 w_{23,2}, f_{23,2} \geq -200 w_{23,2} \\ & f_{23,3} \leq 200 w_{23,3}, f_{23,3} \geq -200 w_{23,3} \\ & w_{12,2} \leq w_{12,1} ; \in \{0,1\} \\ & w_{12,3} \leq w_{12,2} ; \in \{0,1\} \\ & w_{13,2} \leq w_{13,1} ; \in \{0,1\} \\ & w_{23,2} \leq w_{23,1} ; \in \{0,1\} \\ & w_{23,3} \leq w_{23,2} ; \in \{0,1\} \\ & 0 \leq P_{G1} \leq 500 \\ & 0 \leq P_{G3} \leq 380 \end{aligned} \tag{18}$$

IV. SISTEMAS DE PRUEBA Y RESULTADOS

El modelo de la ROT se aplicó a tres sistemas de prueba: básico de 3 nodos, 14 nodos y 41 nodos (sur de Brasil), cuyas características y resultados de la implementación se detallan en esta sección [4], [6], [17].

A. Sistema de 3 nodos [6]

Este sistema cuenta con 2 generadores con una capacidad de generación total de 880 MW, 3 enlaces de los cuales, uno se compone de 2 líneas y los otros dos de 3 líneas, y 2 cargas ubicadas en el nodo 2 y 3 con una demanda total de 575 MW (figura 6).

La figura 7 muestra el resultado del análisis clásico de FOP implementando el modelo (3) – (8), con el que se obtiene un costo de operación de 13,406.25 US\$/h.

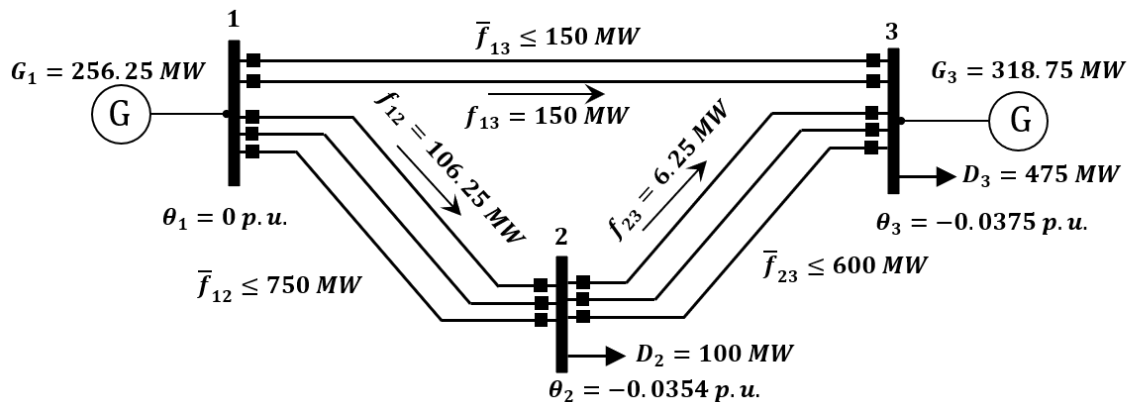


Fig. 7. Operación con ROT: Sistema de 3 nodos [6].

Por otro lado, en la figura 8 se muestran los resultados del mismo sistema de 3 nodos, pero implementando el modelo de la ROT dado por (10) – (17) en donde se obtiene un costo total de operación de 9,750.00 US\$/h, es decir, menor que con el modelo de FOP.

Nótese que con este modelo se desconectan las dos líneas del enlace (1, 3), dejando conectados únicamente los corredores (1, 2) y (2, 3). Sin embargo, esto es posible porque los enlaces restantes contienen tres líneas cada uno. Es importante notar que, para este sistema y a pesar de esta desconexión, se satisface la LVK y la confiabilidad no se ve afectada, lo cual resulta en una paradoja [6], ya que el sistema continuará operando dentro de los límites establecidos ante la ocurrencia de una contingencia $N-1$, que provoque la salida o desconexión de una línea adicional perteneciente a los enlaces (1, 2) o (2, 3). Estos fenómenos pueden cambiar drásticamente cuando se trata del estudio de FOP, por ejemplo, si ocurriera una falla en alguna línea del enlace (1, 3), no es posible encontrar un punto de operación factible del sistema con este estudio tradicional.

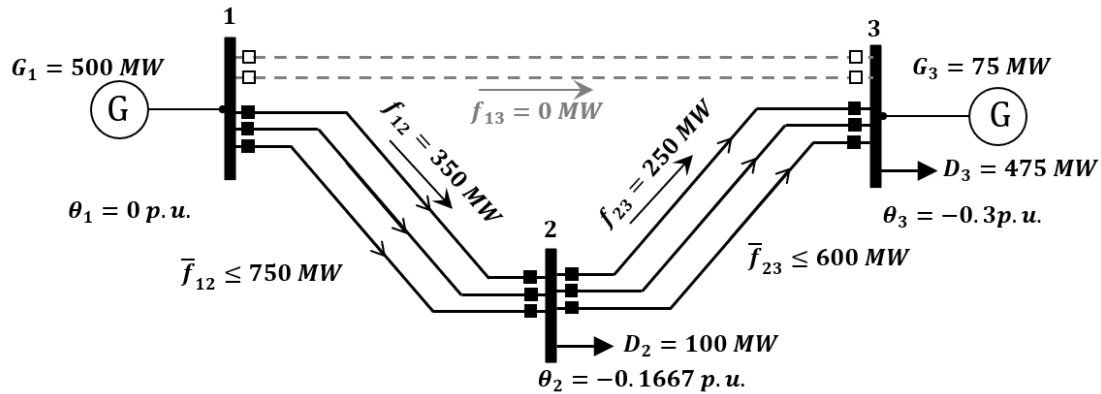


Fig. 8. Operación con ROT: Sistema de 3 nodos [6].

B. Sistema de 14 nodos [17]

Sistema con 5 generadores con una capacidad total de 772.4 MW , 20 líneas y 11 cargas con una demanda total de 259 MW ; para este problema, se incrementó en 1,6 veces la demanda del sistema, es decir la demanda del sistema es de 414.4 MW . Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 3, mientras que en la figura 9 se muestra la operación del sistema.

TABLA 3

RESULTADOS ROT EN CD, SISTEMA DE 14 NODOS (M=30) [4]

Nodo	Ángulos θ	Enlace	No. Línea	Flujo en c/Línea [MW]	w	Generador	Potencia [MW]
1	0.0000	(1,2)	1	150.00	1	G_1	300
2	-0.0009	(1,5)	1	150.00	1	G_2	0.00
3	-0.0053	(2,3)	1	0.00	0	G_3	11.92
4	-0.0029	(2,4)	1	115.28	1	---	---
5	-0.0033	(2,5)	1	0.00	0	---	---
6	-0.0068	(3,4)	1	-138.80	1	G_6	2.48
7	-0.0008	(4,5)	1	0.00	0	---	---
8	0.0009	(4,7)	1	-100.00	1	G_8	100.00
9	-0.0109	(4,9)	1	0.00	0	Se satisface la demanda Total del Sistema de 14 Nodos.	
10	-0.0103	(5,6)	1	137.84	1		
11	-0.0086	(6,11)	1	91.04	1		
12	-0.0071	(6,12)	1	9.76	1		
13	-0.0071	(6,13)	1	21.60	1		
14	-0.0115	(7,8)	1	-100.00	1		
		(7,9)	1	0.00	0		
		(9,10)	1	-71.04	1		
		(9,14)	1	23.84	1		
		(10,11)	1	-85.44	1		
		(12,13)	1	0.00	0		
		(13,14)	1	0.00	0		
Costo total de generación 14,980.40 USD/h.							

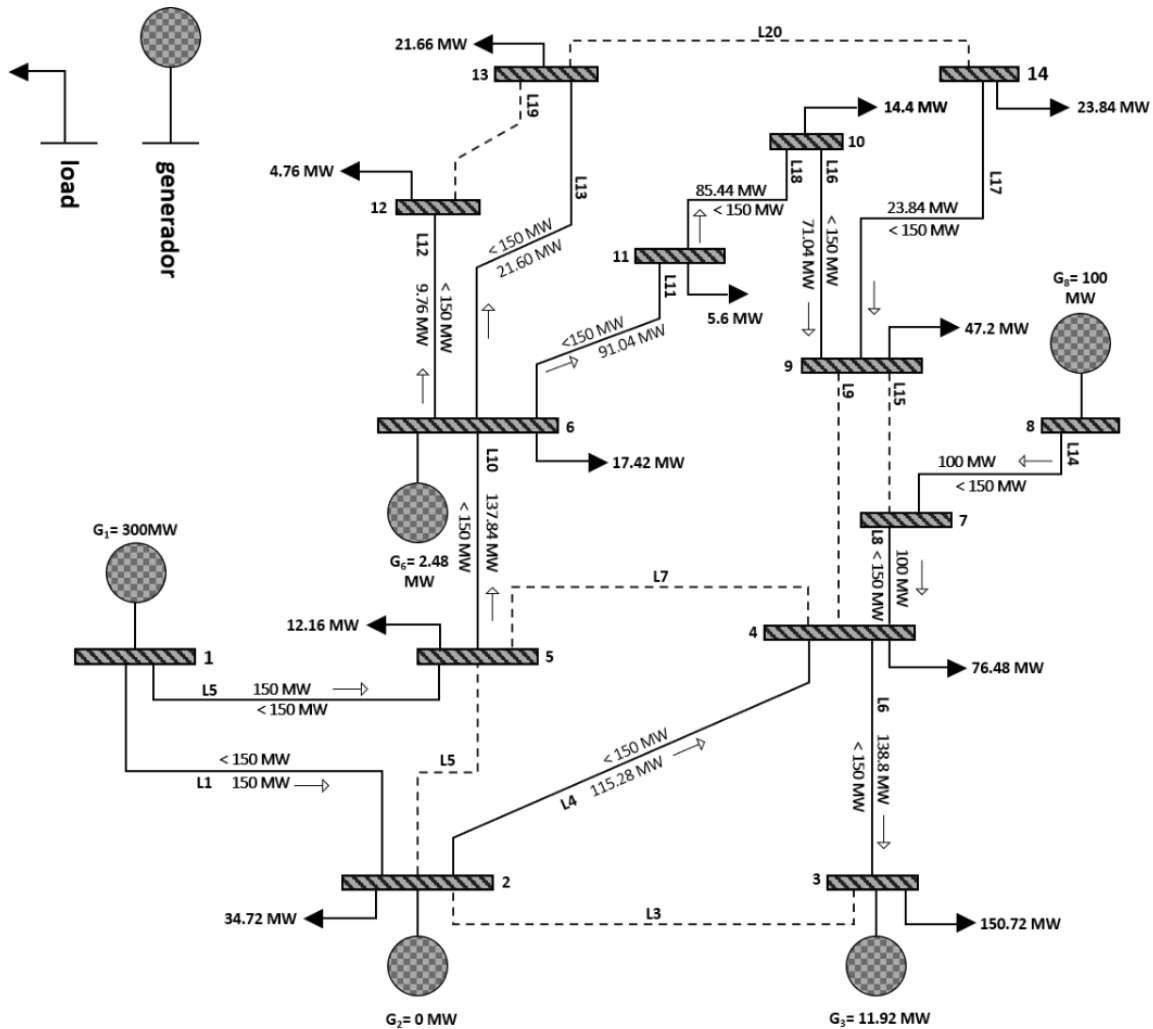


Fig. 9. Operación con ROT: Sistema de 14 nodos [17].

C. Sistema de 41 nodos (sur de Brasil) [6]

Sistema con una capacidad de generación total de $10,545 \text{ MW}$, 55 enlaces con 78 líneas de transmisión y una demanda total de $6,880 \text{ MW}$. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 4, mientras que en la figura 10 se muestra la operación del sistema.

TABLA 4
RESULTADOS ROT EN CD, SISTEMA DE 41 NODOS, SUR DE BRASIL (M=30) [4]

Nodo	Ángulos θ	Enlace	Flujo en c/Línea [MW]	w	Generador	Potencia [MW]
1	-0.2579	(1,7)	0.0000	0	---	---
2	-0.2579	(1,2) X 2	0.0000	1,1	---	---
3	0.0000	(4,9)	-215.3202	1	---	---
4	-0.2103	(5,9)	-149.0140	1	---	---
5	-0.1861	(5,8)	119.5961	1	---	---
6	-0.1400	(7,8)	0.0000	0	---	---
7	-0.5579	(4,5) X 2	-42.6899	1,1	---	---
8	-0.3215	(2,5) X 2	-221.5500	1,1	---	---
9	-0.0113	(8,13)	47.3961	1	---	---
10	0.0000	(9,14) X 2	-182.1671	1,1	---	---
11	0.0000	(12,14) X 2	-255.9500	1,1	---	---
12	0.1192	(14,18) X 2	239.8926	1,1	---	---
13	-0.3854	(13,18)	-183.2433	1	---	---
14	0.3086	(13,20)	44.8394	1	G_{14}	1,257
15	0.0000	(18,20)	189.7180	1	---	---
16	0.1243	(19,21)	1073.4620	1	G_{16}	2,000
17	0.0336	(16,17)	1162.5696	1	G_{17}	503
18	-0.0546	(17,19)	1665.5696	1	---	---
19	-0.0680	(14,26)	-69.6987	1	G_{19}	0.00
20	-0.4335	(14,22)	-29.3207	1	---	---
21	-0.3664	(22,26)	-111.2207	1	---	---
22	0.3332	(20,23) X 2	216.8194	0,1	---	---
23	-0.6356	(23,24) X 2	-241.2806	0,1	---	---
24	-0.4488	(26,27) X 2	193.5903	1,1	---	---
25	-0.3874	(24,34)	34.2280	1	---	---
26	0.4211	(24,33)	229.1000	1	---	---
27	0.2600	(33,34)	0.0000	0	G_{27}	220
28	0.6617	(27,36)	209.4086	1	G_{28}	800
29	0.5653	(27,38) X 2	198.8860	1,1	---	---
30	0.6153	(36,37)	119.3086	1	---	---
31	0.0000	(34,35) X 2	17.1140	1,1	G_{31}	700
32	-0.0322	(35,38)	-181.7720	1	G_{32}	500
33	-0.7806	(37,39)	0.0000	0	---	---
34	-0.5052	(37,40)	262.1000	1	G_{34}	0.00
35	-0.5136	(37,42)	157.2086	1	---	---
36	0.0684	(39,42) X 3	200.0000	1,1,1	---	---
37	-0.0577	(40,42)	0.0000	0	G_{37}	300
38	-0.1537	(38,42) X 3	0.0000	0,0,0	---	---
39	0.0174	(32,43)	1016.4914	1	G_{39}	600
40	-0.3935	(42,44)	165.8000	1	---	---
41	0.0000	(44,45)	86.7000	1	---	---
42	-0.3886	(19,32)	-183.5086	1	---	---
43	-0.3463	(46,19)	100.3685	1	---	---
44	-0.5886	(46,16)	-837.4304	1	---	---
45	-0.7502	(18,19)	106.8239	1	---	---
46	-0.0457	(20,21) X 2	-536.7310	1,1	G_{46}	0.00
		(42,43) X 3	-338.8305	1,1,1	Se satisface la demanda Total del Sistema de 41 Nodos	
		(46,6)	737.0619	1		
		(19,25)	982.8086	1		
		(31,32)	700.0000	1		
		(28,30)	800.0000	1		
		(26,29) X 3	-266.6667	1,1,1		
		(24,25) X 2	-491.4043	1,1		
		(29,30) X 2	-400.0000	1,1		
		(5,6) X 2	-368.5309	1,1		

Nota: Para los enlaces de dos o más líneas, a cada línea corresponde una variable binaria w.

- Si $w = 0$, el flujo en la línea de transmisión es cero MW.
- Si $w = 1$, el flujo en la línea de transmisión será el indicado en la tabla.

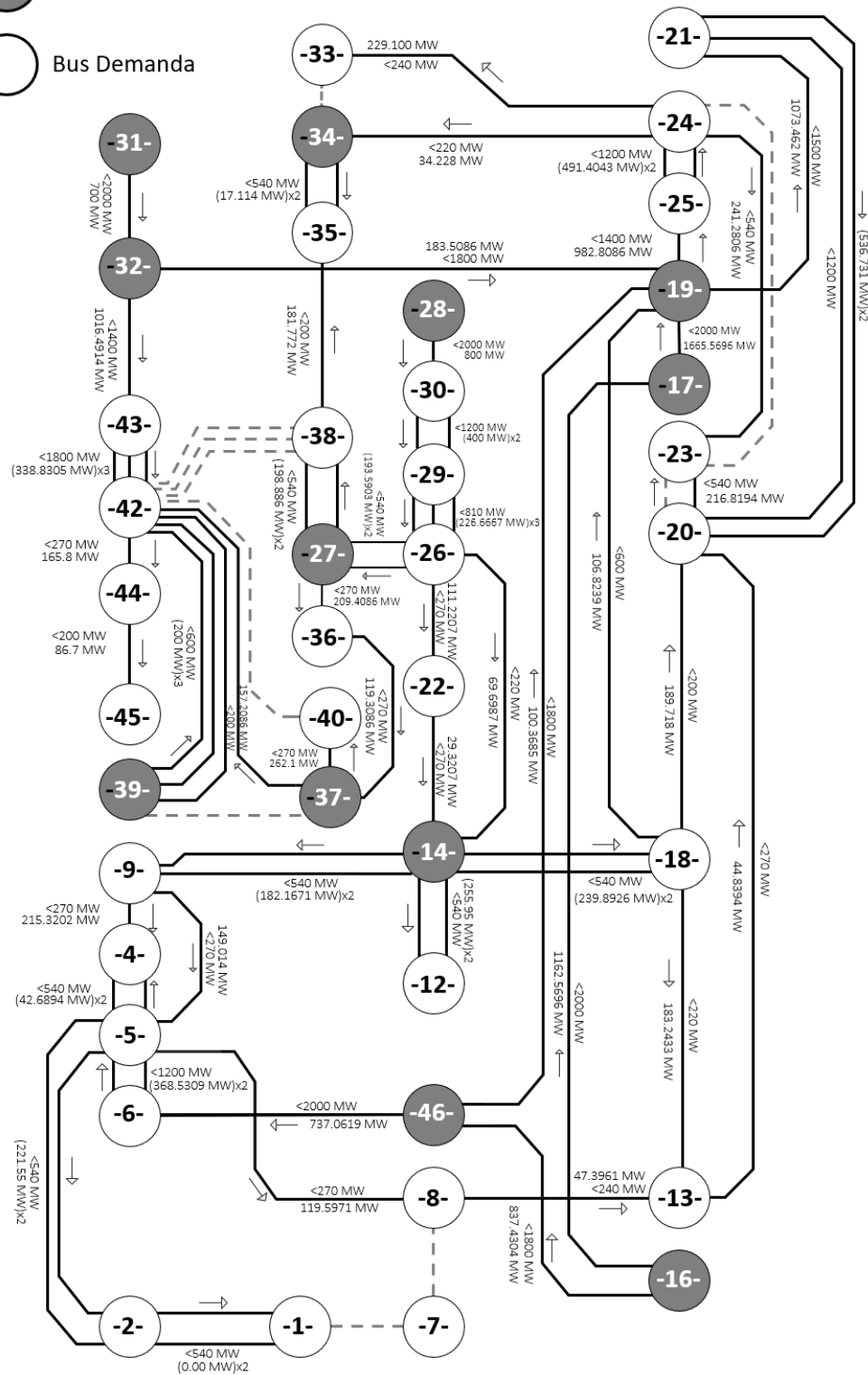


Fig. 10. Operación con ROT: Sistema de 41 nodos (sur de Brasil) [6].

Finalmente, para observar de mejor forma los resultados y ventajas de la implementación del modelo ROT, en la tabla 5 se presenta un resumen comparativo de los costos de operación total obtenidos en cada uno de los sistemas de prueba. También, se realiza una comparación del número de líneas desconectadas cuando el parámetro M cambia.

TABLA 5
COMPARATIVO DE RESULTADOS ROT VS FOP EN CD [4]

Sistema de prueba	FOP en CD Costo \$/h	ROT con $M = 30^\circ$ Costo \$/h	No. Líneas Desconectadas $M = 30^\circ$	No. Líneas Desconectadas $M = 180^\circ$
3	13,406.25	9,750.00	2	4
14	15,552.70	14,980.40	7	7
41	185,511.80	184,063.00	10	5

V. CONCLUSIONES

Se ha modelado y resuelto el problema de la Reconfiguración Óptima de la Transmisión para tres sistemas de prueba de diferentes dimensiones (3, 14 y 41 nodos). De acuerdo con la tabla 5, se puede observar que en cada uno de los modelos se logra obtener un costo total de generación menor comparado con el obtenido con el análisis de Flujos Óptimos de Potencia, obteniéndose así una alternativa eficiente desde el punto de vista económico para la planeación de la operación de los sistemas de potencia.

El parámetro M es un elemento importante en el modelo, ya que éste puede dictar una secuencia y un número distinto de desconexiones, aunque resulte en un mismo costo de operación. Esto cobra relevancia ante escenarios reales, al dar una opción a los operadores del sistema para tomar las mejores decisiones, beneficiándose de la experiencia y datos extras con los que pueden contar.

REFERENCIAS

- [1] J. Zhu, *Optimization of Power System Operation*, USA: John Wiley & Sons, 2015.
- [2] K. W. Hedman, R. P. O'Neill, E. B. Fisher, S. S. Oren, «Optimal transmission switching—sensitivity analysis and extensions», *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 1469-1479, 2008.
- [3] K. W. Hedman, R. P. O'Neill, E. B. Fisher, «Smart grid application of Optimal Transmission Switching», *INFORMS Annual Meeting*, Washington DC, 2008.
- [4] O. Tovar Barragán, «Modelo de reconfiguración óptima de la red aplicado a la zona metropolitana del área de control central». Tesis de Maestría en Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Ciudad de Puebla, México, 2021.
- [5] K. W. Hedman, R. P. O'Neill, E. B. Fisher, S. S. Oren, «Optimal transmission switching with contingency analysis». *Power Systems, IEEE Transactions*, vol. 24, no. 3, pp.1577-1586, Aug. 2009.
- [6] M. Flores, L. H. Macedo, R. Romero, «Alternative mathematical models for the optimal transmission switching problema», *IEEE Syst. J.*, vol. 15, no. 1, pp. 1245-1255, 2021.
- [7] R. Bacher, H. Glavitsch, «Loss reduction by network switching», *Power Systems, IEEE Transactions*, vol. 3, no. 2, pp. 447-454, 1988.
- [8] S. Fliscounakis, F. Zaoui, G. Simeant, R. Gonzalez, «Topology influence on loss reduction as a mixed integer linear programming problem», en *2007 IEEE Lausanne Power Tech*, 2007.
- [9] G. Granelli, M. Montagna, F. Zanellini, P. Bresesti, R. Vailati, M. Innorta, «Optimal network reconfiguration for congestion management by deterministic and genetic algorithms», *Electric Power Systems Research*, vol. 76, no. 6-7, pp. 549-556, Apr. 2006.
- [10] K. W. Hedman, R. P. O'Neill, E. B. Fisher, S. S. Oren, «Optimal transmission switching with contingency analysis». *Power Systems, IEEE Transactions*, vol. 24, no. 3, pp.1577-1586, Aug. 2009.
- [11] K. W. Hedman, R. P. O'Neill, E. B. Fisher, S. S. Oren, «Optimal transmission switching – sensitivity analysis and extensions», *Power Systems, IEEE Transactions*, vol. 23, no. 3, pp. 1469-1479, Aug. 2008.
- [12] E. B. Fisher, K. W. Hedman, R. P. O'Neill, M. C. Ferris, S. S. Oren, «Optimal transmission switching in electric network for improve economic operations», *INFRADAY Conference*, 2008.

- [13] K. W. Hedman, S. S. Oren, R. P. O'Neill, "Optimal transmission switching: when economic efficiency and financial transmission rights markets collide", *Economic of Energy Markets Conference*, Toulouse, France, 2010.
- [14] R. P. O'Neill, R. Baldick, U. Helman, M. H. Rothkopf, W. Stewart, "Dispatchable transmission in RTO markets" *Power Systems, IEEE Transactions*, vol. 20, no. 1, pp. 171-179, Feb. 2005.
- [15] W. Shao, V. Vittal, "Corrective switching algorithm for relieving overloads and voltage violations", *Power Systems, IEEE Transactions*, vol. 20, no. 4, pp. 1877-1885, Nov. 2005.
- [16] O. Tovar Barragán, "Programación de la generación en un sistema hidrotérmico usando optimización lineal". Tesis de Licenciatura, Ingeniería Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, 2011.
- [17] M. Jabarnejad, "Approximate optimal transmission switching", *Electric Power Syst. Res.*, vol. 161, pp. 1-7, 2018.

SAR and Temperature Increase in a Head Model Composed of Several Tissues Produced by Two WiFi Devices Working on the 2.4 GHz Band

SAR y el incremento de temperatura en un modelo de cabeza compuesto por varios tejidos producidos por dos dispositivos WiFi que funcionan en la banda de 2.4 GHz

Ezequiel Ignacio **Espinosa Rivas**¹, Roberto **Linares y Miranda**²

Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO

¹ <https://orcid.org/0000-0003-4173-1400> | eiespinosar@ipn.mx

² <https://orcid.org/0000-0001-9569-1171> | rlinaresy@ipn.mx

Recibido 10-08-2023, aceptado 24-05-2023.

Resumen

En este trabajo se presenta un análisis de la tasa de absorción específica (conocida como SAR, por sus siglas en inglés) debida a la exposición de dos fuentes de campo electromagnético en un modelo de cabeza humana; formado por diferentes tejidos. Las fuentes de campo son un modem Wi-Fi y un teléfono celular operando ambos a la frecuencia de 2.4 GHz. El campo eléctrico necesario en el cálculo del SAR se obtiene usando una simulación mediante el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD por sus siglas en inglés). Con el propósito de evaluar como interactúa el campo electromagnético con los diferentes tejidos que componen la cabeza humana, especialmente los del cerebro, el SAR es desglosado por tejido y los datos son presentados en diagramas de caja, nueve diferentes tejidos fueron usados en la simulación. Finalmente, utilizando la ecuación de bio-calor en su forma más simple se realizó un análisis sencillo del incremento de temperatura en cada tejido.

Palabras clave: dispositivos Wi-Fi, distribución del SAR, ecuación de bio-calor, incremento de temperatura, método FDTD.

Abstract

An analysis of the specific absorption rate (SAR) in a model of a human head, composed of several tissues, as a result of the exposure to two electromagnetic sources working on the 2.4 GHz WiFi band is presented; the devices are a WiFi modem and a cell phone. The electric field necessary to get the SAR is calculated using a simulation based on the finite-difference time-domain (FDTD) method. With a view to evaluating how the electromagnetic field interacts in different tissues, specially in brain tissues, the SAR is broken down by tissue, and the data are displayed using box-plots. Nine other tissues were used in the head model. Finally, using a simple bio-heat equation, a simple analysis of the temperature increase is done as well.

Index terms: Bio-heat equation, FDTD method, SAR distribution, Temperature rate, WiFi devices.

I. INTRODUCTION

Interaction between the human body, specially the head, and electromagnetic fields (EMFs) produced by cell phones in phone call mode have been intensively analyzed and regulated by international organizations, and some of these results can be found in [1], [2], [3], [4], [5] and [6]. However, as far as we know, there are no similar extensive studies for these mobile devices used as internet access points working with WiFi technology. In this case, the cell phone is not longer used next to the ear instead, it is used several centimeters from the face, which causes the EMF to be a far field, not a near field, as in phone call mode. In addition to this, the usage time can be longer, even several hours watching videos or similar, not just calls for a few minutes.

In Mexico more than 90% of people who use the internet do so or have done so through a cell phone [7], [8]. Due to the above, it is a particular concern to analyze the effects of EMFs working on WiFi bands. In this work, we try to take into consideration the normal operating conditions for an end user of a WiFi communications network. It is assumed that the mobile device, a cell phone, is used at 30 cm from the user's face, and the WiFi modem is located at 2.5 m from the user's right cheek, see Fig. 1.

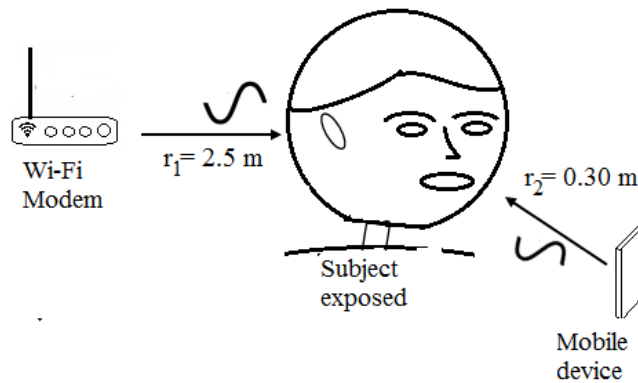


Fig 1. Subject exposed to electromagnetic waves from two sources

Recommendations from ICNIRP [4], IEEE [5], and FCC [6] establish the limits to which a person can be exposed to EMFs based on the temperature increase. In order to have just a coarse value of temperature increase in the tissues that compose the modeled head, an analysis using the bio-heat equation in its simplest form was carried out.

Any issue that involves EMFs can be solved using Maxwell's equations; however, the shape and the different tissues that compose the human being produce several phenomena, so an analytic solution to find the EMF in a point is a challenging task. Therefore, computational methods are used. The chosen one in this work is the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method.

II. SPECIFIC ABSORPTION RATE (SAR) AND BIO-HEAT EQUATION

The specific absorption rate (SAR) indicates the amount of electromagnetic energy, in the form of power, absorbed per unit mass in a volume when it is exposed to EMFs [9]. The SAR is calculated using (1) and it has units of W kg^{-1} .

$$SAR = \frac{\sigma |E_{rms}|^2}{\rho} \quad (1)$$

Where σ and ρ represent the conductivity (S m^{-1}) and mass density (kg m^{-3}) of the tissues, respectively, and E_{rms} is the rms electric field (V m^{-1}).

Standards and recommendations that limit the exposure to EMFs as [4], [5], and [6] use the whole-body averaged SAR as well as a local SAR averaged over 10 g of mass as a value of reference to limit the exposure. However, the averaged value works well in a constant distribution, but SAR is not constant, as can be seen in (1). Even if the electric field were uniform, SAR depends on the conductivity and density of the tissue, and the human body is not composed of regular tissue, so SAR can be a constant value. For that reason, we put particular emphasis on analyzing the SAR in several tissues specially in brain tissues, which can not be studied when measurements in phantoms are made.

SAR is an indirect measure of the temperature increase. Although it is not an easy task to model the thermal energy transport in a living being, many efforts have been made [10], [11], [12], and [13], and the bio-heat equation given by (2) is widely accepted to perform this task.

$$\rho C \frac{dT}{dt} = q_m + k \nabla^2 T - BT \quad (2)$$

If the heat diffusion and perfusion are negligibly, namely, the last two terms are zero, and the heat generation by a metabolic process is given by (3):

$$q_m = \rho(SAR) \quad (3)$$

So, we can rewrite (2) as (4):

$$C \frac{\Delta T}{\Delta t} = SAR \quad (4)$$

Which is valid just for homogeneous bodies and exposure times Δt of a few seconds. From the above, it is necessary to get a reliable value of the electric field at each point.

III. PARAMETERS USED IN THE FDTD SIMULATION

The FDTD method was introduced by Yee [14]. All the equations used here are too long to write, and they can be found in textbooks as [15], [16] and [17]. For a more detailed view of all the FDTD equations used in this work, see [18]. The Convolutional Perfect Match Layer (CPML) method [19] was used in the FDTD simulation in order to simulate an open area and avoid wave reflections.

A. INCIDENT ELECTRIC FIELD

Before starting the simulation, it is necessary to know the electric field intensity of the electromagnetic waves that impinge on the object. Electromagnetic waves from WiFi devices working at 2.4 GHz were used in the simulation whose radiated power is regulated by several standards, ERC [20], [21] and ITU [22]. So, using (5), the electric field impinging on the head can be calculated:

$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot P_t \cdot G_t}}{r} \quad (5)$$

Where E is the electric field ($V \cdot m^{-1}$) at a distance r (m) from a transmitting antenna, P_t is the power radiated by the antenna (W), and G_t is the numeric gain of the antenna.

The electric field intensity from a mobile device was obtained from the measuring of several devices using an anechoic chamber and an electric field probe ETS LINDGREN model HI-6105. Eighteen devices were tested, and it was noticed that there was a significant dispersion in the data. Still, we wanted just an approximated value in order to use it in the simulation. The value used was 1 V m^{-1} for the mobile device.

B. SOURCE USED

The FDTD object needs to be excited and to do it, the Total-Field Scattering Field (TFSF) technique was used. The source used was a sine plane wave oscillating at 2.4 GHz, which can be expressed in the computational domain by (6) as [17]:

$$f[m, q] = \sin\left(\frac{2\pi}{N_\lambda}(S_c q - l)\right) \quad (6)$$

Where l is the delay in time steps, S_c is a relationship between the spatial steps and the time step called the Courant number [23], the spatial and time step discretized is represented by m and q , respectively, and the number of points per wavelength used is given by N_λ where $N_\lambda = S_c/f\Delta t$ in which Δt is the time step size and f is the frequency in Hz.

C. SPATIAL AND TIME STEP SIZE

The object to be solved is a human head, which needs to be turned into a Yee's object composed of a set of Yee's cell. A cube with an edge of 2.5 mm was chosen for each Yee's cell that composed the discretized head. Therefore, the spatial step size is: $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 2.5 \text{ mm}$.

In order to get the time step size, (7) must be satisfied [23]:

$$c\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (7)$$

Where c is the speed of light. Thus, the time step is $\Delta t = 4.8113 \times 10^{-12} \text{ s}$ so that (7) is fulfilled.

The head size is not the same for all the people. Nevertheless, it was chosen a head with a size of $17.0 \text{ cm} \times 20.5 \text{ cm} \times 22.0 \text{ cm}$. The model of the head is composed of nine tissues, and the anatomy of the head was set up using the data from [24] and [25]. The electrical properties, as well as the physical properties of the model, were gotten from [26], [27], [28], [29], and [30]. In Fig. 2 is displayed a sagittal section of the model used in the simulation.

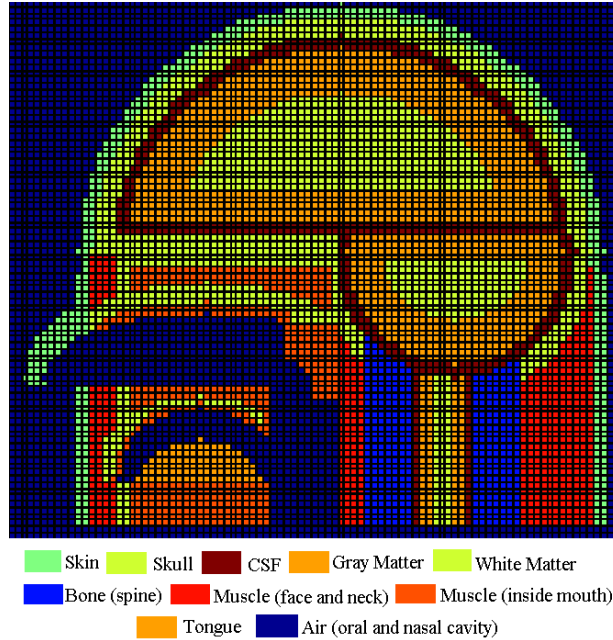


Fig 2. Sagittal section of the model of the head used in the simulation, nine tissues and air were considered.

IV. RESULTS

A. SPECIFIC ABSORPTION RATE

Due to the difference between the maximum and minimum values of SAR and in order to have a better visualization of SAR distribution, it was necessary to turn them into decibels. This conversion was made using (8), where the maximum value of SAR in a Yee's cell found was used as reference so that $0 \text{ dB}_{\text{SAR}} = 2.5626 \times 10^{-3} \text{ W kg}^{-1}$.

$$SAR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{SAR_{x,y,z}}{SAR_{\text{max}}} \right) \quad (8)$$

Fig. 3 shows the results of SAR distribution along the head model. From Fig. 3, it is noticed that plane 1, namely the correct check, and the face have an uniform SAR distribution. These areas are where the EMFs coming from the WiFi devices impinge. However, the EMFs coming from mobile devices are attenuated as long as they propagate along the head due to the skin effect. Besides, the several layers of tissue that make up the model produce multiple reflections that causes an interference phenomenon. As a result, a non-uniform SAR distribution in the whole model of the head is caused. Table 1 displays the maximum, mean, and minimum values of SAR found for the entire model of head and in each plane of Fig. 3.

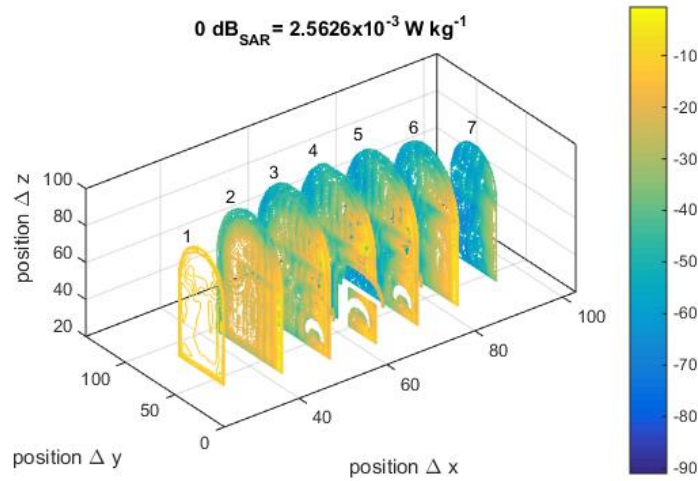


Fig 3. SAR distribution in the model of head used due to two sources of electromagnetic field. Values in dB_{SAR} .

TABLE 1
SAR VALUES FOR THE WHOLE MODELED HEAD AND FOR EACH PLANE OF FIGURE 1.

	Minimum	Mean	Maximum
Whole model	4.0091×10^{-11}	3.4970×10^{-5}	2.5626×10^{-3}
Plane 1	7.0137×10^{-5}	4.3595×10^{-5}	6.2217×10^{-4}
Plane 2	9.6420×10^{-9}	1.5671×10^{-5}	9.5751×10^{-4}
Plane 3	5.1308×10^{-10}	9.4278×10^{-6}	1.1057×10^{-3}
Plane 4	2.5573×10^{-10}	9.9191×10^{-6}	2.5626×10^{-3}
Plane 5	1.9768×10^{-10}	8.8688×10^{-6}	1.1294×10^{-3}
Plane 6	5.1055×10^{-11}	1.1471×10^{-5}	8.7679×10^{-4}
Plane 7	1.8607×10^{-10}	7.2785×10^{-8}	5.3400×10^{-6}

The SAR is broken down by tissue in Table 2 with a view to giving the best description of SAR distribution and seeing SAR values in each tissue. In Fig. 4, these data are displayed by means of box plots. The data shown in the box plot are maximum, third quartile, median, first quartile, and minimum [31], [32]. From Table 2 and Fig. 4, it can be seen that although the maximum value of SAR is located in the skin, the cerebrospinal fluid (CSF) has a third quartile bigger than the skin and tissues, as the white matter has the largest medium value of SAR and the gray matter has the third largest median value of SAR, both of them important cerebral tissues. The authors wish to emphasize that these data cannot be obtained with uniform models such as the phantom models.

TABLE 2.
VALUES OF SAR IN EACH TISSUE, ALL VALUES IN $W\ kg^{-1}$.

Tissue	Minimum	First quartile	Median	Third quartile	Maximum
Skin	5.1055×10^{-11}	1.1507×10^{-8}	4.9434×10^{-7}	1.3432×10^{-4}	2.5626×10^{-3}
Skull	4.6758×10^{-11}	3.4378×10^{-8}	1.8275×10^{-6}	3.2078×10^{-5}	1.3656×10^{-3}
CSF	2.2206×10^{-10}	7.6537×10^{-8}	8.3195×10^{-7}	2.3741×10^{-5}	1.1956×10^{-3}
Gray Matter	2.1877×10^{-10}	7.5134×10^{-8}	5.0138×10^{-7}	5.2390×10^{-6}	7.8167×10^{-4}
White Matter	1.9767×10^{-10}	1.6702×10^{-7}	8.8920×10^{-7}	3.7897×10^{-6}	1.1834×10^{-4}
Bone (spine)	4.0091×10^{-11}	2.5954×10^{-9}	8.5429×10^{-9}	5.9910×10^{-8}	1.2820×10^{-6}
Muscle	6.0694×10^{-11}	9.3103×10^{-9}	2.5167×10^{-7}	2.8922×10^{-5}	1.8940×10^{-3}
Muscle (inside mouth)	2.1647×10^{-9}	1.8201×10^{-6}	1.1107×10^{-5}	4.8641×10^{-5}	1.3656×10^{-3}
Tongue	4.4142×10^{-7}	2.9337×10^{-6}	4.5524×10^{-6}	9.5441×10^{-6}	9.4273×10^{-4}

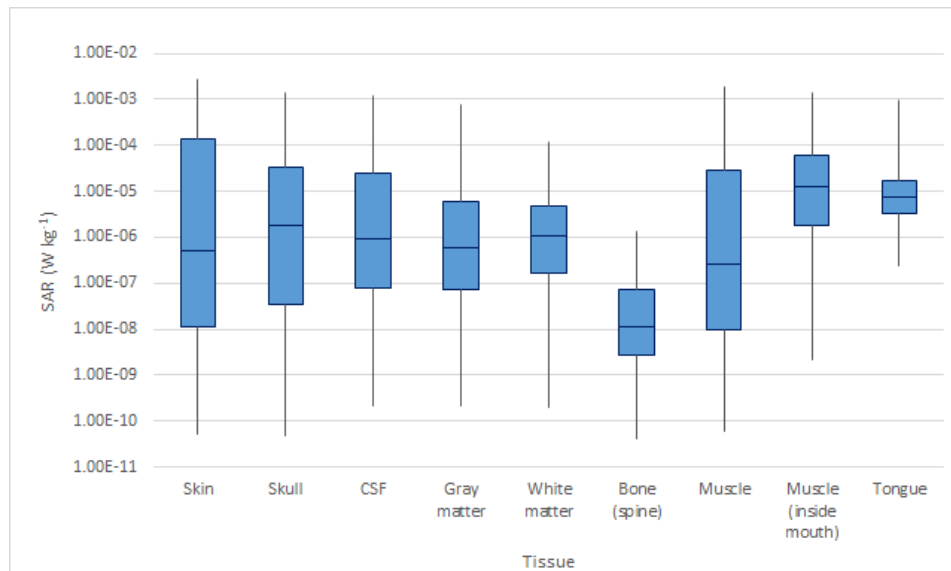


Fig. 4. Box-plots of SAR distribution by tissue.

B. TEMPERATURE INCREASE

In some papers, [33], [34], and [35] (4) are used to quantify the temperature increase due to EMFs in a material similar to phantom. (4) must be used just for short periods [34], and homogenous bodies, here, are used with $\Delta t = 60$ s.

Fig. 5 displays by means of a box-plot the temperature increase distribution for the model of head used, and in Table 3, the breaking down of temperature increase by tissues is shown. Regarding the temperature increase, the skull has the maximum value. However, it must be taken into account that, for the sake of simplicity, the heat diffusion and perfusion were negligible, but this was done to have a coarse value of the possible temperature increase in each tissue due to the two sources of the electromagnetic field.

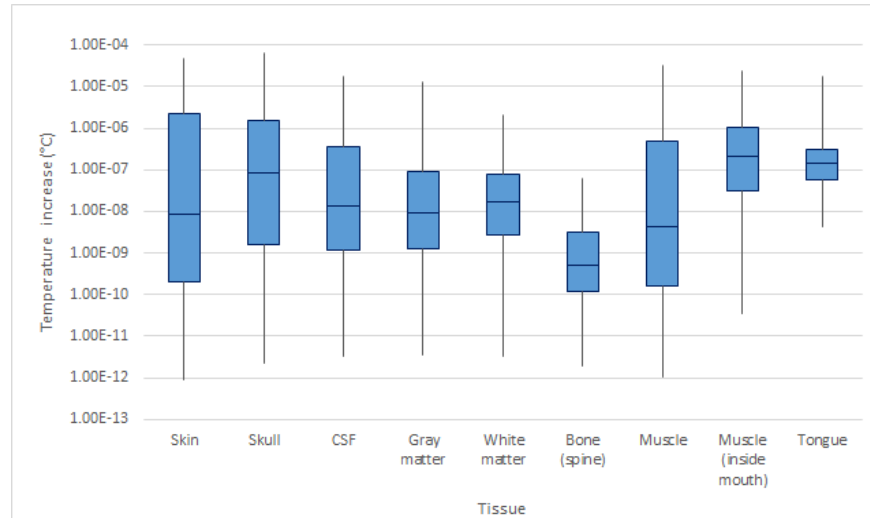


Fig 5. Box-plots of temperature increase by tissue.

TABLE 3.
VALUES OF TEMPERATURE INCREASE IN EACH TISSUE, ALL VALUES IN °C.

Tissue	Minimum	First quartile	Median	Third quartile	Maximum
Skin	8.7523×10^{-13}	1.9726×10^{-10}	8.4745×10^{-9}	2.3026×10^{-6}	4.3931×10^{-5}
Skull	2.1580×10^{-12}	1.5866×10^{-9}	8.4348×10^{-8}	1.4805×10^{-6}	6.3029×10^{-5}
CSF	3.3309×10^{-12}	1.1480×10^{-9}	1.2479×10^{-8}	3.5612×10^{-7}	1.7934×10^{-5}
Gray Matter	3.5476×10^{-12}	1.2183×10^{-9}	8.1305×10^{-9}	8.4958×10^{-8}	1.2675×10^{-5}
White Matter	3.2946×10^{-12}	2.7838×10^{-9}	1.4820×10^{-8}	6.3162×10^{-8}	1.9724×10^{-6}
Bone (spine)	1.8503×10^{-12}	1.1978×10^{-10}	3.9428×10^{-10}	2.7650×10^{-9}	5.9173×10^{-8}
Muscle	1.0115×10^{-12}	1.5517×10^{-10}	4.1945×10^{-9}	4.8203×10^{-7}	3.1657×10^{-5}
Muscle (inside mouth)	3.6078×10^{-11}	3.0336×10^{-8}	1.8512×10^{-7}	8.1069×10^{-7}	2.2760×10^{-5}
Tongue	4.3895×10^{-9}	5.3341×10^{-8}	8.2772×10^{-8}	1.7352×10^{-7}	1.7140×10^{-5}

V. CONCLUSIONS

The human body is made up of various tissues; it is not a uniform set, so we believe that making use of uniform models to obtain the SAR is not enough, either by means of simulations or phantom measurements, because the uniform models do not take into account a significant phenomenon that is of multiple reflections. When there are reflections, the phenomenon of constructive and/or destructive interference of the electromagnetic wave occurs, which can cause some tissues to be more affected by the electromagnetic field than others.

In addition, uniform models use the averaged SAR; although the averaged value works well in an uniform distribution, SAR is not constant. Due to the above, box-plots that describe better no uniform distributions were used, and what is more, a breaking down of SAR and temperature increase values by tissue was done. In this way, it can be noticed more clearly which tissues can be more affected than others.

Although the SAR and temperature increase values are far below the given in the recommendations, the long time that the mobile device is used must be taken into account. The authors are aware that the temperature analysis done was very simple and that more research is still needed for exposure times of hours since, as is well known, these devices are increasingly used to watch videos and movies. In other words, they can be used for hours, but the analysis done can give us a basic idea of which tissues may be more affected by this use.

Not only that, the authors are conscious of the use of new operating bands, such as 5 GHz, and those used by 5G technology. A person is not only subjected to one electromagnetic field source but to several ones. Therefore, an analysis much more detailed must be done in which all these sources are taken into account, so we hope that this paper can be used as one of the bases for a much broader work to establish standards and recommendations on the use of wireless technologies as was done at the time with the cell phone used for phone calls.

REFERENCES

- [1] International Agency Research of Cancer, *Press Release no. 200: Interphone Study Reports on Mobile Phone Use and Brain Cancer Risk*. World Health Organization, 2010.
- [2] INTERPHONE Study Group, "Brain tumour risk in relation to mobile telephone use: results of the INTERPHONE international case-control study", *Int J Epidemiol*. Vol. 39, no. 3, 2010, pp. 675-94.
- [3] INTERPHONE Study Group, "Acoustic neuroma risk in relation to mobile telephone use: Results of the INTERPHONE international case-control study", *Cancer Epidemiology*, vol. 35, no. 5, Oct. 2011, pp. 453-464, doi: <https://doi.org/10.1016/j.canep.2011.05.012>
- [4] ICNIRP, "Guidelines for limiting exposure to time varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)", *Health Phys.*, vol. 74, no. 4, pp. 494-522.
- [5] IEEE Standard C95.1-2005. *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields 3 kHz to 300 GHz*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2005.
- [6] FCC, *In the Matter of Reassessment of Federal Communications Commission Radio Frequency Exposure Limits and Policies*, Federal Communications Commission, 2003.
- [7] INEGI. Encuesta nacional sobre disponibilidad y uso de tecnologías de la información en los hogares (ENDUTIH) 2021. Comunicado de prensa núm. 350/22. Jul. 4 2022. Available on: <https://www.inegi.org.mx/programas/dutih/2021/>
- [8] Asociación de internet MX, *18° Estudio sobre los hábitos de personas usuarias de internet en México 2022*, May 2022. Available on: <https://www.asociaciondeinternet.mx/estudios/habitos-de-internet>
- [9] NCRP Report No.67, *Radiofrequency Electromagnetic Fields Properties, Quantities and Units, Biophysical Interaction and Measurements*, National Council on Radiation Protection and Measurements, 1981.
- [10] H. Pennes, "Analysis of Tissue and Arterial Blood Temperatures in the Resting Human Forearm", *J Appl Physiol.*, vol. 1, no. 2, 1948, pp. 93-122.
- [11] W. Wulff, "The Energy Conservation Equation for Living Tissue", *IEEE Trans Biomed Eng.*, vol. 21, no. 6, 1974, pp. 494-495.
- [12] A. Shitzer, J. C. Chato, "Analytical Solutions to the Problem of Transient Heat Transfer in Living Tissue", *J Biomech Eng.*, vol. 100, no. 4, 1978, pp. 202-210.
- [13] A. Hirata, M. Morita, T. Shiozawa, "Temperature Increase in the Human Head due to a Dipole Antenna at Microwave Frequencies", *IEEE Trans Electromagn Compat.*, vol. 45, no. 1, 2003, pp. 109-116.
- [14] K. S. Yee, "Numerical Solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media", *IEEE Trans on Antennas Propag.*, vol. 14, no. 3, 1966, pp. 302-307.
- [15] D. M. Sullivan, *Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method*, New York: IEEE Press Series, 2000.
- [16] A. Elsherbeni, V. Demir, *The Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetics with MATLAB simulations*, North Carolina: SciTech Publishing Inc., 2009
- [17] J. B. Schneider, *Understanding the Finite-Difference Time-Domain Method*. School of Electrical Engineering and Computer Science Washington State University. [accessed 2023 July 26], 2023, <http://www.eecs.wsu.edu/~schneidj/uftdd/>.
- [18] R. Espinosa, I. Ezequiel, *Análisis de la distribución del SAR producido por dispositivos de comunicación móvil en modelos de tejido usando el método FDTD* [Analysis of the SAR distribution produced by devices of mobile communications in models of tissue using the FDTD method]. [dissertation] Mexico City: Instituto Politécnico Nacional, 2019.
- [19] J. A. Roden, S. D. Gedney, "Convolution PML (CPML): an efficient FDTD implementation of the CFS-PML for arbitrary media", *Microw Opt Technol Lett.*, vol. 27, no. 5, 2000, pp. 334-339.
- [20] ERC, *Decision on harmonized frequencies technical characteristics and exemption from individual licensing of Short Range Devices used for Radio Local Area Networks (RLANs) operating in the frequency band 2400-2483.5 MHz*. European Radiocommunications Committee, 2001.
- [21] ERC Recommendation 70-3, *Relating to the use of Short Range Devices (SRD)*. European Radiocommunications Committee, 2017.

- [22] ITU 2014. *International, regional and National regulation of SRD's*, Geneva Switzerland, June 3. International Telecommunication Union. [accessed: 2023 June 1], 2014, <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/workshops/RWP1B-SRD-UWB-14/Presentations/International,%20regional%20and%20national%20regulation%20of%20SRDs.pdf>
- [23] R. Courant, K. Friedrichs, H. Lewy, "On the Partial Difference Equations of Mathematical Physics", *IBM J Res Dev.*, vol. 11, no. 2, 1967, pp. 215–234.
- [24] K. Wendel, D. Stoliar, J. Malmivvo, J. Hyttinen, "Measuring Tissue Thickness of the Human Head Using Centralized and Normalized Trajectories", In *Proceedings of the Conference Consciousness and its Measures*; Nov 29.-Dec 1.2009; St. Raphael hotel, Limassol, Cyprus, 2009, pp. 112-113.
- [25] A. M. Gilroy, B. R. MacPherson, L. M. Roy, *Atlas of Anatomy*. 2nd ed., New York: Thieme, 2012.
- [26] H. J. Krzywicki, S. K. Kenneth, *Human Body Density and Fat of an Adult Male Population as Measured by Water Displacement*. Colorado (CO). US Army Medical Research Nutrition. Laboratory (US), 1966.
- [27] C. Gabriel, S. Gabriel, E. Corthout, "The dielectric properties of biological tissues: I", *Literature Survey. Phys. Med. Biol.*, vol. 41, no. 11, 1996, pp. 2231-2249.
- [28] S. Gabriel, R. W. Lau, C. Gabriel, "The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the Frequency range 10 Hz to 20 GHz", *Phys. Med. Biol.*, vol. 41, no. 11, 1996, pp. 2251-2269.
- [29] S. Gabriel, R. W. Lau, C. Gabriel, "The dielectric properties of Biological Tissues: III. Parametric Models for the Dielectric Spectrum of Tissues", *Phys. Med. Biol.*, vol. 41, no. 11, 1996, pp. 2271-2293.
- [30] O. P. Gandhi, Q. X. Li, G. Kang, "Temperature Rise for the Human Head for Cellular Telephones and for Peak SARs Prescribed in Safety Guidelines", *IEEE Trans Microw Theory Tech.*, vol. 49, no. 9, 2001, pp. 1607-1613.
- [31] R. McGill, J. W. Tukey, W. A. Larsen, "Variations at Box Plots", *Am Stat.*, vol. 32, no. 1, 1978, pp.12-16.
- [32] W. Esty, J. Banfield, "The Box-Percentile Plot", *J Stat Softw.*, vol. 8, no. 17, 2003, pp. 1-14.
- [33] Y. Okano, K. Ito, I. Ida, M. Takahashi, "The SAR Evaluation Method by a Combination of Thermographic Experiments and Biological Tissue-Equivalent Phantoms", *IEEE Trans Microw Theory Tech.*, vol. 48, no. 11, 2003, pp. 2094-2103.
- [34] J. C. Lin, "Specific Absorption Rates (SARs) Induced in Head Tissues by Microwave Radiation from Cell Phones", *IEEE Antennas Propag Maga.*, vol. 42, no. 5, 2000, pp. 138-139.
- [35] N. Ticaud, S. Kohler, P. Jarrige, L. Duvallaret, G. Gaborit, R. P. O'Connor, D. Arnaud-Cormos, P. Leveque, "Specific Absorption Rate Assessment Using Simultaneous Electric Field and Temperature Measurements", *IEEE Antennas Wirel Propag Lett.*, vol. 11, 2012, pp. 252-255.