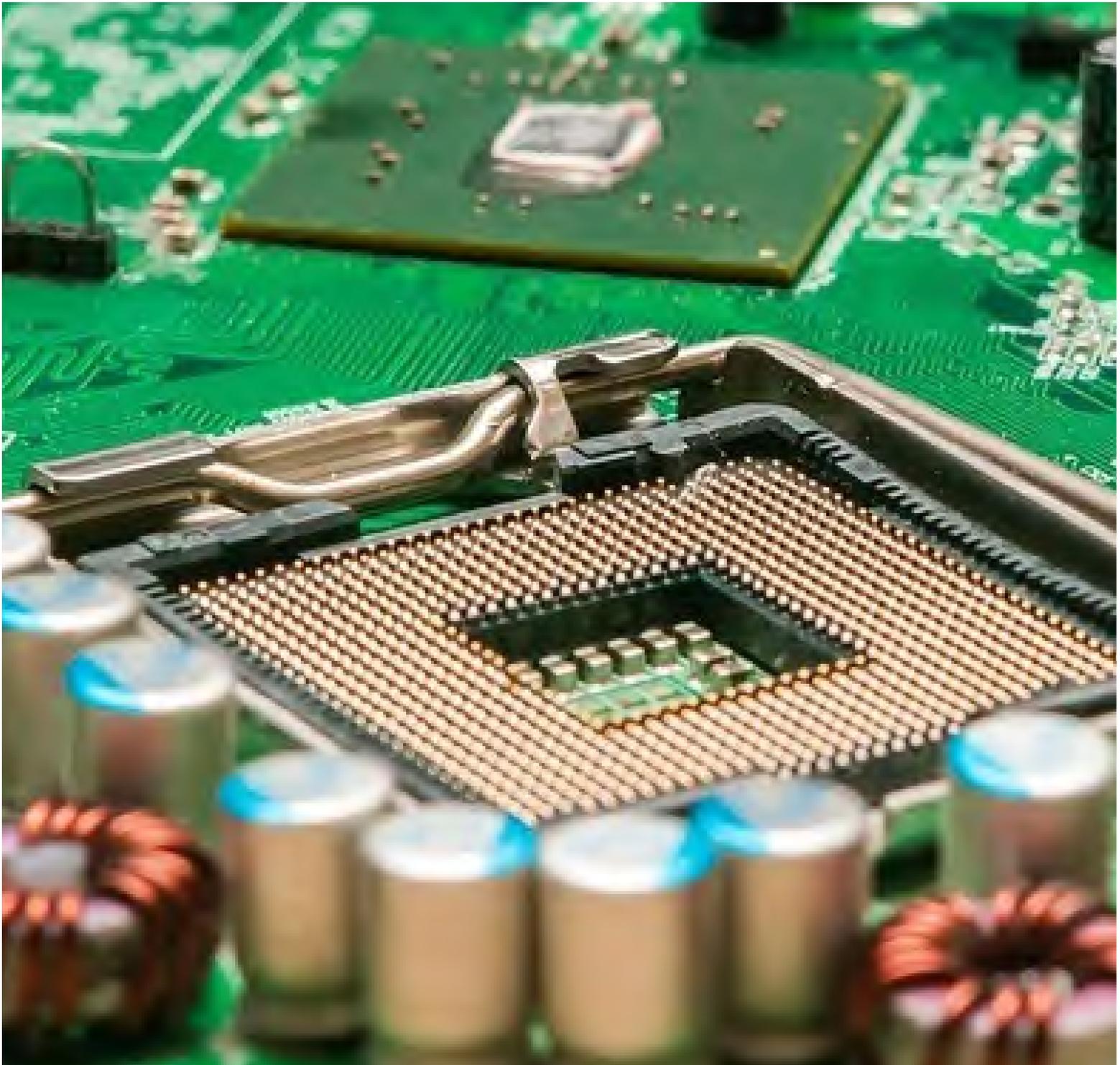


ISSN 2594-2921

# Científica

**Científica:** Journal of Electromechanical Engineering | vol. 25, no. 2 | July-December 2021 | Instituto Politécnico Nacional | <https://cientifica.site/>



## Volumen 25 Issue 2, July-December 2021

### **Análisis de la sensibilidad, respuesta de pequeña señal y respuesta dinámica de un sensor GMR**

Analysis of the sensitivity, small-signal and dynamic responses of a GMR sensor

Nestor **Romero-Arismendi**; Pedro **Martínez-Ortiz**; José H. **Espina-Hernández**; José **Pérez-Benítez**.

---

### **Cálculo de las propiedades térmicas y mecánicas de nanotubos de carbono a partir de la dispersión de fonones**

Calculation of thermal and mechanical properties of crystalline CNTs (C-CNTs) and low crystallinity (LC-CNTs) by study the phonon dispersion

José Antonio **García-Merino**.

---

### **Máquina de recubrimiento de pulverización catódica PVD**

PVD sputtering coating machine

Sergio Arturo **Rodriguez-Valencia**; Iyari Alejandro **Nava-Tellez**; Milton Carlos **Elias-Espinosa**.

---

### **Ergophthalmology around COVID-19**

La ergoftalmología entorno a la COVID-19

Edgar Omar **López-de-León**; Ángel **Morales-González**; Flavio Arturo **Domínguez-Pacheco**; Alfredo **Cruz-Orea**; Claudia **Hernández-Aguilar**.

---

### **Mantenimiento centrado en la confiabilidad a equipos en industria de conservas de atún**

Maintenance focused on reliability of equipment in the tuna canning industry

Jorge Luís **Muñoz-Cevallos**; Manuel **Cantos Macías**.

---

### **Optimización del mecanismo de elevación de una cama robótica hospitalaria**

Optimization of a lift mechanism for a hospital robotic bed

Ixhel Jhoselyn **Foster-Vázquez**; Rogelio de Jesús **Portillo-Vélez**; Eduardo Filemón **Vázquez-Santacruz**.

## Sistema inteligente de monitoreo para condiciones ambientales en Industria 4.0

Intelligent monitoring system for environmental conditions in Industry 4.0

Manuel **Luna-López**; Minerva **Hernández-Lozano**; Rosario **Aldana-Franco**;  
Ervin **Álvarez-Sánchez**; José Gustavo **Leyva-Retureta**;  
Francisco **Ricaño-Herrera**; Fernando **Aldana-Franco**.

---

## Funcionalización de nanocelulosa a partir de rastrojo de piña y raquis de palma africana

Functionalized Nanocellulose Extracted from Pineapple Stubble and African Palm Rachis

Jairo **Vargas Mesén**; Karina **Rodríguez Mora**.

---

## Análisis de esfuerzos de tensión y presiones de contacto en prótesis tumoral de rodilla en la posición de 15 grados durante el ciclo caminata

Analysis of the Applied Load of a Knee Tumor Prosthesis in Critical Point Condition of 15° in the Walking Cycle

Tomas **De la Mora-Ramírez**; Elvis **Coutiño-Moreno**; Daniel **Maldonado-Onofre**; Carlos **León-Cruz**.

---

## Diseño de un dispositivo wearable para la traducción del lenguaje de señas mexicano

Design of a Wearable Device to Translate Mexican Sign Language

Luis Manuel **Valverde-Cedillo**; Geny Itzamar **Ochoa-Rodriguez**; Cristian Vicente **Salazar-Hernandez**.

---

**CIENTIFICA**, year 25, issue 2 July-December 2021. 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](mailto: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 Científica 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.

## **Análisis de la sensibilidad, respuesta de pequeña señal y respuesta dinámica de un sensor GMR**

Analysis of the sensitivity, small-signal and dynamic responses of a GMR sensor

Nestor **Romero-Arismendi**<sup>1</sup>, Pedro **Martínez-Ortiz**<sup>2</sup>, José H. **Espina-Hernández**<sup>3</sup>, José **Pérez-Benítez**<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO

<https://orcid.org/0000-0002-9666-2724> | [noromeroar@gmail.com](mailto:noromeroar@gmail.com)

<sup>2</sup>Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO

<https://orcid.org/0000-0002-6283-4399> | [pmartinezo@ipn.mx](mailto:pmartinezo@ipn.mx)

<sup>3</sup> scan Messtechnik GmH, AUSTRIA

[jhespina@gmail.com](mailto:jhespina@gmail.com)

<sup>4</sup>Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO

<https://orcid.org/0000-0001-8867-5341> | [benitez\\_edl@yahoo.es](mailto:benitez_edl@yahoo.es)

Recibido 09-03-2021, aceptado 28-06-2021.

### **Resumen**

En este trabajo se lleva a cabo el análisis de la sensibilidad de un sensor magnético, basado en el fenómeno de magnetorresistencia gigante (GMR), cuando se utiliza en la medición de campos magnéticos variantes en el tiempo en superposición con componentes estáticas. La característica de transferencia del sensor GMR se obtuvo experimentalmente midiendo el campo magnético generado por una bobina de Helmholtz. A partir de la característica de transferencia experimental se obtuvo computacionalmente la respuesta de sensibilidad del sensor GMR y posteriormente se validó experimentalmente. Se determinó una nueva región de operación del sensor GMR en la respuesta de sensibilidad del sensor GMR, la cual tiene un comportamiento lineal. Los resultados demuestran que, es indispensable utilizar un campo de polarización para garantizar un mejor desempeño del sensor GMR en las mediciones de campos magnéticos pequeños. El valor del campo de polarización utilizado depende del tipo de campo magnético en función del tiempo que se vaya a medir (AC o DC). Finalmente, en este artículo se presentan y proponen los correspondientes rangos de valores de los campos magnéticos de polarización.

**Palabras clave:** respuesta a pequeña señal, sensores GMR, sensores magnéticos, sensibilidad dinámica del sensor GMR.

### **Abstract**

In this paper the analysis of the sensitivity of a Giant Magnetoresistance-based sensor AAI002 type is carried out when it is used to measure time-varying magnetic fields superposed on static components. In order to obtain an experimental transfer characteristic from the output voltage of the GMR sensor, the magnetic field generated by a Helmholtz coil was measured. From the experimental transfer characteristic, it was obtained the sensitivity response of the GMR sensor and then it was experimentally validated. Results reveal that there exists a region in which the sensitivity response of the GMR sensor is linear. Outcomes show that to improve measurements of small time-varying magnetic fields, a polarization magnetic field should be used. The superadded magnetic field should be selected according to the type of in function time (ac or dc) magnetic field to be measured. The corresponding superadded magnetic field operation range for each measurement type are presented and described in this paper.

**Index terms:** small signal response, GMR sensors, magnetic sensors, dynamic sensitivity of GMR sensors.

## I. INTRODUCCIÓN

Desde que se descubrió que algunos materiales sufren variaciones en sus características magnéticas debido a la influencia de un campo magnético externo ( $h$ ), las mediciones de  $H$  han estado presentes en el desarrollo de la sociedad [1]. Se ha demostrado que es posible relacionar de forma directa o indirecta variaciones en los campos magnéticos con variaciones de algunas magnitudes de importancia para diferentes aplicaciones: biológicas [2], biomédicas [3], inclusive en la ciencia de materiales [4], [5]. Principalmente, las bobinas han sido usadas como los sensores magnéticos por excelencia dada su facilidad de implementación. Sin embargo, estas tienen la restricción de que únicamente son capaces de medir campos magnéticos variantes en el tiempo. Esta incapacidad de las bobinas como sensores magnéticos aumentó el número de investigaciones en nuevos sensores basados en diversos fenómenos físicos que permitan medir campos magnéticos tanto variables en el tiempo como constantes. Uno de los fenómenos ampliamente utilizados para el desarrollo de sensores magnéticos es el efecto Hall. El fenómeno conocido como efecto Hall consiste en la aparición de una diferencia de potencial debida a la separación de las cargas en el interior de un material conductor por el cual está circulando una corriente. La separación y agrupación de las cargas a un lado del material conductor es debida a la presencia de un campo magnético perpendicular a la dirección de la corriente [6]. Actualmente, los sensores Hall tienen un bajo costo y su implementación es sencilla, esto los ha convertido en los principales sensores utilizados para la medición de campos magnéticos [1], [7]. Sin embargo, los sensores basados en el efecto Hall no presentan una alta sensibilidad para la medición de campos magnéticos de pequeñas magnitudes comparado con otros tipos de sensores más actuales, como los sensores basados en el fenómeno de magnetorresistencia gigante (GMR) [1], [7], [8]. El fenómeno de magnetorresistencia gigante es un fenómeno cuántico en el cual un material cambia su resistencia eléctrica al aplicar un campo magnético externo. Este fenómeno es comúnmente presentado en materiales compuestos por varias capas delgadas de un material ferromagnético intercaladas por una capa de un material diamagnético. Las capas ferromagnéticas del material se ubican de manera que la dirección de magnetización de cada capa sea antiparalela a las subsiguientes capas ferromagnéticas en ausencia de un campo externo. Esta configuración del material permite que la dispersión de los electrones aumente de manera tal que la resistencia de material ferromagnético aumente. Cuando el material se encuentra en presencia de un campo magnético externo, la magnetización de las capas ferromagnéticas se orienta en la dirección del campo externo y de esta manera la dispersión de los electrones se reduce y, por ende, su resistencia eléctrica cambia [9]. Recientemente, los sensores GMR se han convertido en los sensores magnéticos más usados en aplicaciones que requieren medir pequeños campos magnéticos, esto debido a la reducción de su costo y la alta sensibilidad de estos. Los sensores GMR tienen a su favor sus pequeñas dimensiones, alta sensibilidad y un valor no tan alto en el mercado [8], [10]. Tawfik *et al.* [11] demostraron que cuando se usan sensores GMR para la medición de campos magnéticos, se mejora el desempeño de aplicaciones espaciales y ensayos no destructivos. Inclusive, los sensores GMR mejoran el desempeño de biosensores. Whang *et al.* [12] demostraron que el uso de sensores GMR en biosensores permite reducir el costo y aumentar la sensibilidad con respecto a biosensores que utilizan sensores Hall.

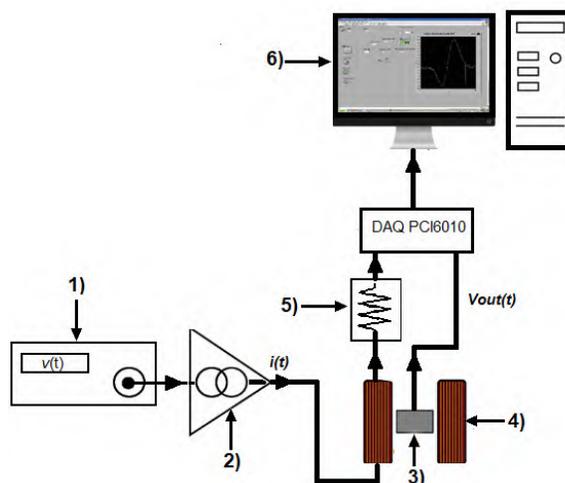
En algunos ensayos no destructivos de materiales (END) por métodos magnéticos es necesario medir el campo magnético y monitorear las pequeñas variaciones de este. Las variaciones del campo magnético de un material contienen información acerca de las características de la superficie de estructuras metálicas [10], [13], [14]. Actualmente, se han implementado sensores GMR en los END que requieren la medición de campos magnéticos pequeños debido a la alta sensibilidad de estos sensores. Los sensores GMR permiten la medición de la amplitud del campo magnético, así como las variaciones de sus componentes. Sin embargo, no se trató a fondo el desempeño de este tipo de sensores para medir de manera separada cada componente del campo magnético. Al conocer el desempeño del sensor GMR para cada uno de los casos, es posible proponer diferentes configuraciones de uso que permitan mejorar el desempeño del sensor GMR al medir la variación de una componente del campo magnético en particular. Con el fin de comprender el comportamiento del sensor para cada componente del campo, se estudió tanto la respuesta a pequeña señal como la respuesta dinámica de este. La respuesta a pequeña señal es definida como salida de voltaje del sensor GMR al detectar un pequeño campo magnético variante en el tiempo. Esta respuesta a pequeña señal permitió analizar el desempeño del sensor

8

GMR cuando es utilizado para medir la amplitud de la componente variante en el tiempo del campo magnético. La respuesta dinámica del sensor GMR se define como la respuesta del sensor GMR debida a variaciones de la componente directa de un campo magnético variante en el tiempo. La respuesta dinámica del sensor GMR es utilizada para mejorar el desempeño del sensor GMR cuando este es usado en la medición de la variación de la componente continua de campos magnéticos variantes en el tiempo. En el año 2013, Bernieri *et al.* [15] realizaron un estudio del comportamiento del sensor GMR cuando este es utilizado para la medición de campos magnéticos variables en el tiempo. En [15] se propuso un rango de operación, en el cual, el sensor GMR tiene una alta sensibilidad cuando es usado para medir el valor RMS de un campo magnético. A partir de estos resultados diversos autores han propuesto diferentes sistemas de linealización del voltaje de salida del sensor GMR con el fin de mejorar el desempeño de este en la región de operación propuesta en [15]. Autores como Sen *et al.* [16], [17] propusieron la reducción de la no linealidad usando un circuito front-end. Sin embargo, este circuito aumenta el ruido presente en las mediciones [18] de manera que debe compensarse con un circuito adicional. Ripka. *et al.* [19] proponen un AC-Driver para mejorar el desempeño del sensor. Zhichao *et al.* [20] proponen un circuito de lazo cerrado que permite eliminar la no linealidad y la histéresis del sensor GMR. Sin embargo, los métodos mencionados anteriormente requieren la adición de complejos circuitos. Una vez modelada matemáticamente la histéresis del sensor GMR [21] se han desarrollado sistemas que mejoran el desempeño de los sensores GMR [22], [23]. Sin embargo, no se ha realizado un estudio del comportamiento de la sensibilidad del sensor GMR en todo su rango de operación. En este trabajo se presenta una expresión matemática que relaciona el voltaje de salida y la intensidad de campo magnético medida por el sensor GMR la cual permite describir el comportamiento del sensor GMR, esta expresión fue utilizada para encontrar la función completa de la sensibilidad del sensor GMR. A partir de los resultados se identificaron tres regiones de operación en la curva de sensibilidad, una correspondiente a la región de operación lineal del sensor GRM o también denominada en este trabajo como región de sensibilidad constante. La citada región de sensibilidad fue la única que ha sido analizada en la literatura científica por Bernieri *et al.* [15]. La segunda región encontrada corresponde a los puntos de saturación del sensor GMR, y la última región de sensibilidad del sensor GMR se caracteriza por un aumento lineal con el campo magnético. Adicionalmente, se llevó a cabo un estudio del punto de operación del sensor GMR y como varía el comportamiento de este tipo de sensores cuando el punto de operación es ajustado en las diferentes regiones encontradas en la función de sensibilidad del sensor GMR

## II. METODOLOGÍA

### A. Estación experimental



**Fig. 1** Diagrama de la instalación experimental utilizada para la caracterización del sensor GMR compuesto por: 1) generador de señales, 2) amplificador de transconductancia, 3) Sensor GMR, 4) bobina de Helmholtz, 5) resistencia de Shunt y 6) computadora.

4

El diagrama de la instalación experimental usada para el desarrollo de este trabajo es mostrado en la Fig. 1. La instalación la integran un generador de señales, un amplificador de transconductancia, una bobina Helmholtz y una resistencia de Shunt. Se utilizó un generador de señales Agilent 33210 con el fin de alimentar el amplificador de transconductancia. El amplificador de transconductancia es utilizado como fuente de corriente de alimentación de la bobina de Helmholtz. El amplificador de transconductancia genera una corriente con un factor de 0.8 veces el voltaje de salida del generador de señales. El amplificador de transconductancia es capaz de proporcionar una corriente RMS máxima de 800 mA con un ancho de banda de 20 kHz. Es importante mencionar que la relación corriente generada por el amplificador de transconductancia y el voltaje de salida del generador de señales es lineal para las frecuencias y valores de operación, de esta manera podemos ajustar tanto la frecuencia como la forma de onda de la corriente mediante el voltaje de salida del generador de señales. La bobina de Helmholtz utilizada está integrada por dos bobinas circulares con 10 cm de radio y 100 vueltas cada una, la separación entre cada una de las bobinas es de 10 cm. Se utilizó una bobina de Helmholtz debido a que esta permite generar un campo magnético homogéneo en su interior. El sensor GMR es ubicado en la región central de la bobina de Helmholtz de tal manera que la dirección de sensibilidad del sensor GMR corresponda al eje  $z$ , el cual es el eje axial de la bobina de Helmholtz (véase Fig. 2). La expresión (1) describe el intervalo de la distancia a partir del punto equidistante entre el par de embobinados con  $z = 0$ , donde el campo magnético generado por la bobina es homogéneo, donde  $a$  es el radio de las bobinas que integran el conjunto de Helmholtz.

$$-\frac{a}{2} < z < \frac{a}{2} \quad (1)$$

Utilizando la expresión (1) podemos observar que el campo magnético homogéneo se encuentra entre -5 y 5 cm. Otra de las principales ventajas de utilizar una bobina de Helmholtz es que la magnitud de la intensidad de campo magnético depende de la corriente de excitación y factores geométricos de la bobina tales como el radio y el número de vueltas. La expresión (2) muestra la ecuación de la intensidad de campo magnético para una bobina de Helmholtz, donde:  $\mu_0$  es la permeabilidad magnética del aire,  $N$  es el número de vueltas de cada bobina individual,  $i$  es la corriente de excitación y  $a$  es el valor del radio de las bobinas.

$$B = \frac{8 \mu_0 N i}{5 \sqrt{5} a} \quad (2)$$

Reemplazando los valores de la bobina utilizada en la ecuación (2), se obtiene que el valor de la intensidad magnética en la región homogénea, el cual viene dado por:

$$B_{-5 < z < 5} = \frac{32\pi * 100 * i}{5\sqrt{5} * 0.1} \times 10^{-7} T = 0.899 * i \text{ [mT]} \quad (3)$$

Utilizando la expresión (3) es posible determinar el valor de la intensidad de campo magnético en el centro de la bobina de Helmholtz a partir de la lectura de la corriente de excitación. En la Fig. 2 se muestran las vistas oblicua y top-down de la ubicación del sensor GMR en la bobina de Helmholtz. El voltaje de salida del sensor GMR,  $V_{out}$ , y la corriente de excitación se adquieren por medio de una tarjeta DAQ PCI6010. Para la adquisición de la corriente de excitación de la bobina de Helmholtz se utilizó una resistencia de Shunt. La resistencia de Shunt utilizada se construyó de manera tal que el valor de la diferencia de tensión entre sus terminales sea igual en magnitud al valor de la corriente que pasa a través de esta. La estación experimental es utilizada para la caracterización del sensor GMR y el análisis de la respuesta a pequeña señal de este elemento. Para realizar la caracterización del sensor GMR se requiere un análisis del comportamiento DC, mientras que para analizar la respuesta de pequeña señal se necesita un análisis conjunto de los componentes DC y el componente AC de la señal. De esta manera se implementaron dos aplicaciones diferentes para el control de la estación experimental. Las dos aplicaciones fueron desarrolladas en el ambiente de programación de LabVIEW.

Una aplicación fue implementada para la obtención de la curva característica del sensor GMR, mientras que la segunda aplicación fue implementada para el análisis de la respuesta de pequeña señal del sensor GMR.

5

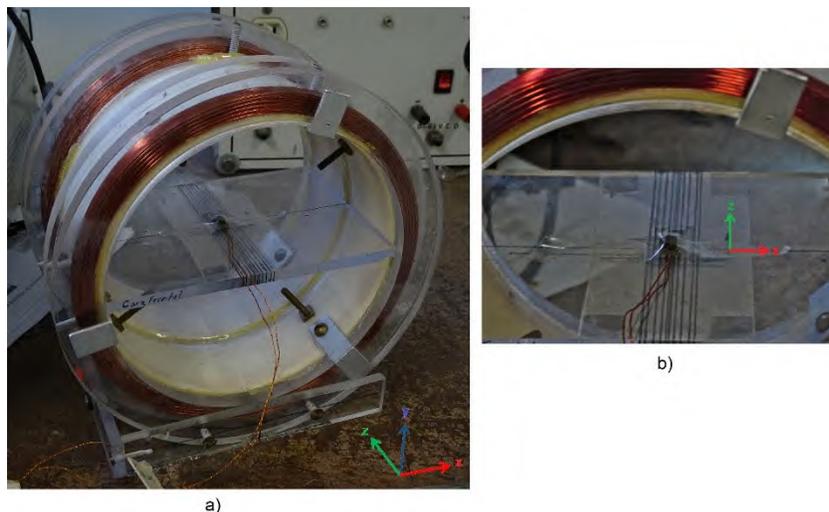


Fig. 2. Configuración bobina Helmholtz-sensor GMR con vista a) oblicua y b) diagonal.

## B. Configuraciones de la estación experimental

### 1) Configuración DC de la estación experimental para el análisis de la respuesta del sensor GMR a campos magnéticos constantes.

En la configuración DC de la estación experimental, el generador de señales Agilent 33210A se ajusta de manera que proporcione un voltaje constante de la forma  $v(t) = V_{DC}$ . Como se mencionó anteriormente, el amplificador de transconductancia mantiene las características de la señal de voltaje. Por lo tanto, se obtiene una corriente de excitación de la bobina de la forma  $I(t) = I_{DC}$ , en consecuencia, la intensidad de campo magnético viene dada de la forma  $B(t) = B_{DC}$ . Es importante resaltar que la intensidad del campo del campo magnético generado en el centro de la bobina de Helmholtz se obtiene a partir de la corriente de excitación usando la ecuación (3). El valor del voltaje de salida del generador de señales fue seleccionado de manera que la intensidad de campo magnético en el centro de la bobina de Helmholtz sea de  $B_{DC} = 3.5$  mT, dado que el sensor alcanza la condición positiva de saturación GMR a este nivel de intensidad de campo magnético. El voltaje de salida del sensor GMR en condiciones de saturación positiva del sensor GMR es de  $V_{out} = 0.28$  V. A partir de este valor, se reduce el voltaje de salida del generador de señales de tal manera que la intensidad de campo magnético se reduzca en 0.1 mT por cada paso. El valor de la corriente de la bobina de Helmholtz y voltaje de salida del sensor GMR son adquiridos usando una aplicación desarrollada en LabVIEW por cada paso. La aplicación realiza la conversión de la corriente de excitación a campo magnético de excitación utilizando la ecuación (3). Este proceso se repite hasta que la bobina de Helmholtz alcance un valor de intensidad de campo magnético de -3.5 mT (valor de saturación magnética negativa). El voltaje de salida del sensor GMR al alcanzar la condición de saturación negativa es de  $V_{out} = 0.28$  V. Una vez alcanzada la condición de saturación magnética negativa se incrementa el campo de la bobina de Helmholtz en pasos de 0.1mT hasta que al sensor alcance nuevamente la condición de saturación magnética positiva. La aplicación almacena tanto el valor de la intensidad de campo magnético de la bobina de Helmholtz como el voltaje de salida del sensor GMR por cada paso.

2) Configuración AC de la estación experimental para el análisis de la respuesta del sensor GMR a campos magnéticos variantes en el tiempo

En la configuración AC de la estación experimental, el generador de señales se ajusta de manera que suministre un voltaje de la forma  $v(t) = V_{DC} + \Delta V(t)$  obteniendo una corriente de excitación de la bobina de Helmholtz de la forma  $I(t) = I_{DC} + \Delta i(t)$ . Al ser alimentada la bobina de Helmholtz con una corriente de esta forma, la intensidad de campo magnético generado tiene una forma  $B(t) = B_{DC} + \Delta B(t)$ . En este caso se generan dos componentes del campo magnético, una componente invariante en el tiempo  $B_{DC}$ , y una componente variante en el tiempo  $\Delta B(t)$ . El voltaje AC del generador de señales se definió de forma que se obtengan 12 valores de intensidad de campo magnético con una componente variante en el tiempo  $\Delta B(t)$  de forma sinusoidal con una amplitud de 25  $\mu\text{T}$  y frecuencia de 10 Hz. Los valores de intensidad de campo magnético se ajustaron usando la expresión (4):

$$B_{DC_i} = |3 - 44 * i|_{i=0}^{i=11} \times 10^{-3} \text{ [mT]} \quad (4)$$

En la Fig. 3 se muestra la amplitud de la componente variante en el tiempo de la intensidad de campo magnético  $B_i$  generado por la bobina de Helmholtz. Se puede apreciar que la amplitud de  $B_i$  para cada uno de los campos de polarización es constante, con lo cual se demuestra que se cuenta con una fuente de campo magnético de AC con amplitud constante. El voltaje de salida del sensor GMR  $V_{out}$ , y la corriente de excitación se adquieren por medio de una tarjeta DAQ PCI6010, la cual es controlada por medio de una aplicación desarrollada en el ambiente de programación de LabVIEW. La aplicación realiza la conversión de la corriente de excitación a intensidad de campo magnético de excitación utilizando la ecuación (3). Como resultado, la aplicación genera un archivo de texto plano con los valores  $\Delta B$  que es la amplitud del campo magnético medido,  $B_{DC}$ , que representa el valor de la componente constante del campo magnético medido y  $\Delta V_{out}$ , que hace referencia a la amplitud del voltaje de salida del sensor GMR.

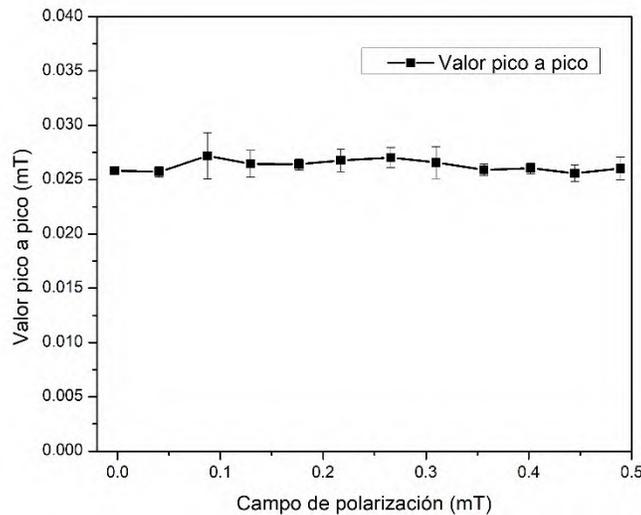


Fig. 3. Valores pico a pico de la componente variante en el tiempo de la intensidad de campo magnético generado por la bobina de Helmholtz.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

El sensor GMR utilizado es del tipo AAI002 manufacturado por NVE electronics. De acuerdo con el fabricante, los sensores de este tipo son de alta sensibilidad y baja histéresis. La sensibilidad de estos sensores, al ser alimentados con 5.15 V, es de 180-210 mV/mT y tienen un área sensible de (200x100)  $\mu\text{m}^2$ . El rango lineal de operación de este tipo de sensor, de acuerdo con el fabricante, es de 0.15 a 1.05 mT. Para cumplir los objetivos trazados en este trabajo se debe obtener la función de sensibilidad del sensor GMR, lo cual se realiza a partir de la curva característica de transferencia del sensor.

7

### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### A. Obtención de la curva característica de transferencia del GMR

Para la obtención de una expresión que relacione el voltaje de salida del sensor GMR con respecto a la intensidad de campo magnético medido, se utilizó la configuración DC de la estación experimental mencionada en la sección II.b.1 Una vez obtenido el conjunto completo de valores, estos se grafican para obtener la relación del voltaje de salida del sensor GMR con respecto a la intensidad de campo magnético medido. Con el fin de obtener una expresión matemática aproximada del comportamiento del voltaje de salida del sensor GMR se realiza un ajuste de la relación entre el voltaje salida del sensor GMR  $V_{out}$  con el valor de intensidad de campo magnético medido obtenida experimentalmente por medio de una serie de Fourier de 8 términos descrita en la ecuación (5):

$$V_{out} = a_0 + \sum_{i=1}^8 a_i \cos(i * 0.91B) + b_i \sin(i * 0.91B) \quad (5)$$

Los valores de coeficientes de la expresión del voltaje de salida ajustada del sensor GMR son mostrados en la Tabla 1. En la Fig. 4 se muestra la relación experimental del voltaje de salida del sensor GMR y la expresión matemática del voltaje de salida del sensor GMR definida usando la ecuación (4). Los resultados muestran que la expresión matemática obtenida por medio de la aproximación por series de Fourier tiene un error porcentual de 0.8 %, un valor SSE de  $3.7 \times 10^{-7}$  y un valor de  $R^2$  de 0.99. Estos valores de error indican que la expresión del voltaje de salida del sensor GMR obtenida es una buena aproximación matemática del comportamiento del sensor GMR.

TABLA 1  
VALORES DE LOS COEFICIENTES A Y B DE LA FUNCIÓN CARACTERÍSTICA DEL SENSOR GMR.

Subíndice	0	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Coefficientes a</b>	194.9	-129.70	-39.51	-9.166	-2.985	-2.504	-2.630	-1.879	-2.031
<b>Coefficientes b</b>		9.55	4.23	0.273	0.445	0.624	1.409	1.128	1.322

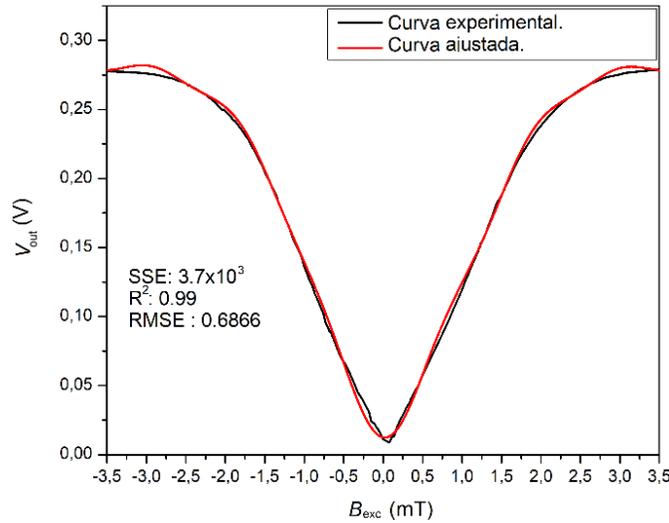


Fig. 4. Curva característica de transferencia obtenida experimentalmente del sensor GMR y curva de ajuste por series de Fourier.

#### B. Obtención de la función de sensibilidad del sensor GMR

La sensibilidad de un sensor,  $S(B)$ , se define como la variación de su voltaje de salida,  $V_{out}$ , con respecto a la variación de la magnitud física medida. Para el caso de los sensores GMR, se define la sensibilidad del sensor como la variación del voltaje ( $V_{out}$ ) con respecto a variaciones en la intensidad de campo magnético  $B(t)$  medido. Analíticamente se puede definir la sensibilidad del sensor GMR como la primera derivada de la función característica de transferencia con respecto a  $B(t)$ , tal y como se muestra en la ecuación (6):

$$S(B)_{GMR} = \left| \frac{dV_{out}(B)}{dB} \right|_{B_i} \quad [\text{mV/mT}] \quad (6)$$

Definiendo un campo magnético resultante de la superposición de dos componentes, una componente variante en el tiempo  $\Delta B(t)$  y una componente constante  $B_{DC}$ , podemos definir en la ecuación (7) la intensidad de campo magnético  $B(t)$  en cada punto  $B_i$ .

$$B_i = B_{DC_i} + \Delta B(t) \quad [\text{mT}] \quad (7)$$

Teniendo la expresión del voltaje de salida del sensor GMR, podemos obtener su voltaje de salida a partir de un valor de intensidad de campo magnético, véase ecuación (8). Considerando la linealidad del sensor GMR podemos expresar el voltaje de salida dado el campo magnético  $B(t)$  en la ecuación (9).

$$V_{out}(B_{DC_i}) = V_{DC_i} \quad (8)$$

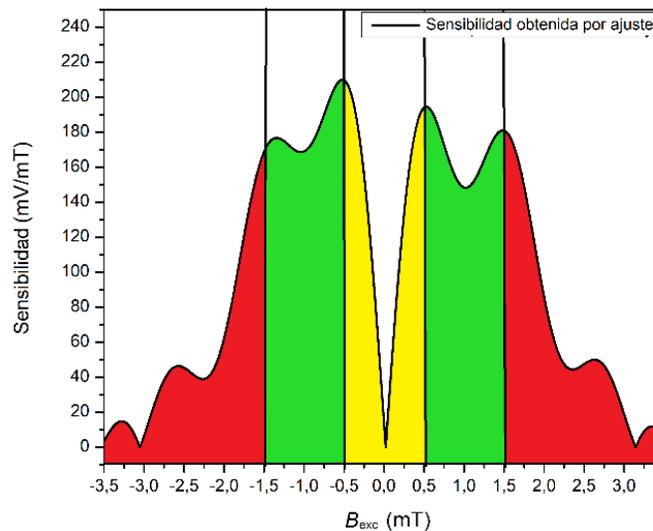
$$V_{out}(B_{DC_i} + \Delta B(t)) = V_{DC_i} + \Delta V \quad [\text{mV}] \quad (9)$$

La expresión (10) muestra la definición analítica de la sensibilidad del sensor GMR, esta corresponde a la definición formal la derivada de la expresión del voltaje de salida del sensor GMR. Reemplazando las expresiones (8) y (9) en la expresión (10), obtenemos el valor de la sensibilidad del sensor GMR en un punto dado. Como se puede observar en la ecuación (11), la sensibilidad del sensor GMR en el punto  $B_i$  se expresa como la relación entre la amplitud de la componente variable de campo magnético de excitación y la amplitud de la componente variable del correspondiente voltaje de salida:

$$S(B_i) = \left. \frac{dV_{out}(B)}{dB} \right|_{B_i} = \frac{V_{out}(B_{DC_i} + \Delta B) - V_{out}(B_{DC_i})}{\Delta B} \text{ [mV/mT]} \quad (10)$$

$$S(B_i) = \left. \frac{dV_{out}(B)}{dB} \right|_{B_i} = \frac{V_{DC_i} + \Delta V - V_{DC_i}}{\Delta B} = \frac{\Delta V}{\Delta B} \text{ [mV/mT]} \quad (11)$$

Haciendo uso de la ecuación (10), se puede obtener la curva de sensibilidad del sensor GMR derivando la expresión del voltaje de salida del sensor GMR. En la Fig. 5 se muestra la curva de sensibilidad del sensor GMR obtenida computacionalmente. Analizando la Fig. 5 se pueden identificar tres regiones de operación en la sensibilidad del sensor GMR. Resaltada en color rojo, se señala la región de sensibilidad que corresponde con la zona de saturación en la característica de transferencia (véase Fig. 4), en esta región la sensibilidad del sensor es muy baja por lo tanto se debe evitar que el sensor trabaje en esta región. En color verde, se resalta la región en la cual se encuentran los puntos máximos de sensibilidad, que corresponde con la zona lineal en la característica de transferencia (véase Fig. 4), en esta región la sensibilidad del sensor se encuentra entre 150 y 200 mV/mT. Bernieri *et al.* [13] proponen que el sensor GMR solamente debe ser operado en esta región para obtener el mejor desempeño. Por último, se observa en color amarillo, una nueva región donde la sensibilidad del sensor GMR tiene un comportamiento lineal, esta región se encuentra entre -0.5 a 0 mT y de entre 0 a +0.5 mT. La región de sensibilidad lineal del sensor GMR no ha sido discutida en la literatura científica.



**Fig. 5.** Curva de la función de sensibilidad del sensor GMR obtenida después del procesamiento de la curva característica de transferencia del GMR, en la cual, se identifican tres diferentes regiones de sensibilidad: (rojo) en saturación, (verde) máxima sensibilidad y (amarillo) lineal.

Es importante contrastar la curva de sensibilidad obtenida computacionalmente con resultados experimentales, por lo tanto, se utilizó la configuración AC de la estación experimental mencionada en la sección II.B.2. Se tomaron los valores de  $\Delta V_{out}$ ,  $\Delta B$  y  $B_{DC}$  y aplicando la ecuación (11) se obtuvo la sensibilidad del sensor para cada punto  $B_{DC}$ . La Fig. 6 muestra las mediciones de la sensibilidad del sensor GMR superpuestas a la función de sensibilidad del sensor GMR. En dicha figura se puede observar que los valores experimentales están en correspondencia con la función de sensibilidad obtenida por medios computacionales. Adicionalmente, se observa que la sensibilidad del sensor GMR tiene un comportamiento lineal para campos de polarización que se encuentren entre 0.035 y 0.3 mT.

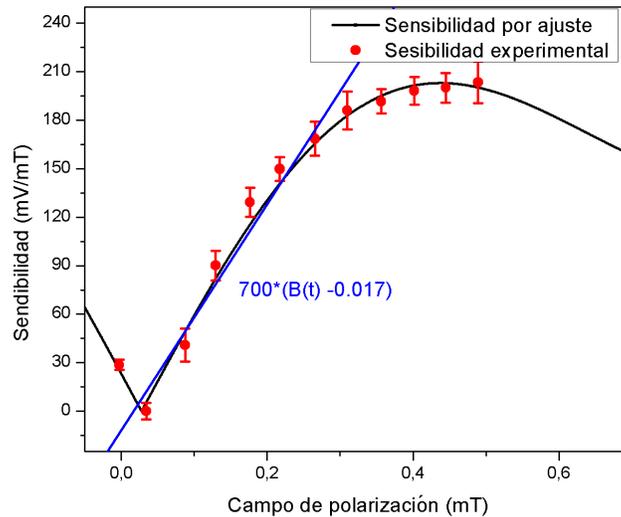


Fig. 6. Valores de sensibilidad del sensor GMR obtenidos de forma experimental y curva de la función de sensibilidad del sensor GMR y ajuste lineal de región lineal de la curva de sensibilidad.

### C. Respuesta de pequeña señal y sensibilidad dinámica del sensor GMR

El comportamiento de un sensor cuando este es utilizado para medir señales de pequeña amplitud y potencia, es definido como la respuesta a pequeña señal. Comúnmente, para analizar la respuesta a pequeña señal de un sensor se adiciona un valor de polarización que fija un punto de operación, para el caso de sensores magnéticos se adiciona un campo magnético DC de polarización. Para analizar la respuesta a pequeña señal del sensor GMR AA1002, de nueva cuenta se utilizaron los valores de  $\Delta V_{out}$ ,  $\Delta B$  y  $B_{DC}$  adquiridos usando la configuración mostrada en la sección II.B.2. En la Fig. 5 se presentan los valores de  $\Delta V_{out}$  para cada valor de  $B_{DC}$ . Observando la Fig. 5 podemos inferir que los valores de  $B_{DC}$  menores a 0.3 mT fijan un punto de operación en la región de sensibilidad lineal del sensor GMR, mientras que los campos de polarización restantes fijan un punto de operación en la región de sensibilidad máxima (región de operación lineal) del sensor GMR. En la Fig. 7 se presentan los valores  $\Delta V_{out}$  con respecto al campo superpuesto de polarización  $B_{DC}$ . Se puede observar que cuando el punto de operación se encuentra en la región de sensibilidad lineal,  $\Delta V_{out}$  aumenta a medida que el campo de polarización  $B_{DC}$  aumenta. Por otra parte, cuando  $B_{DC}$  en la región de operación lineal del sensor GMR (sensibilidad máxima), El valor de  $\Delta V_{out}$  GMR permanece constante y alcanza su valor máximo. De acuerdo con estos resultados, si el sensor es utilizado para medir la intensidad de un campo magnético variante en el tiempo, es necesario superponer un campo de polarización. El punto de operación correspondiente al campo de polarización que se adiciona debe ubicarse en la región lineal de la curva característica del sensor GMR. Se puede observar en la Fig. 6 que la sensibilidad del sensor GMR utilizando este método para la

medición de la componente variante en el tiempo se encuentra entre 200 y 220 mV/mT, mientras que si es usado un sensor de efecto Hall su sensibilidad se encuentra entre 8 y 40 mV/mT [1].

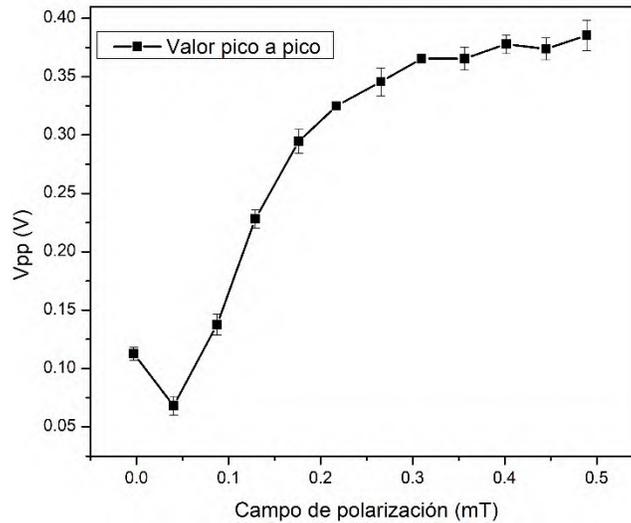


Fig. 7. Valores pico a pico del voltaje de salida del sensor GMR con respecto al valor del campo magnético de polarización aplicado.

Los sensores GMR son usados en algunas aplicaciones en las cuales la medición de la componente variante en el tiempo de la densidad de campos magnéticos no es significativa, sino que se requiere determinar la variación de la componente continua. Por ejemplo, Espina *et al.* [24], [25], [26] demostraron que se pueden caracterizar defectos en la superficie de un material conductor midiendo las variaciones del componente continuo de un campo magnético generado por las corrientes inducidas en este. Para estos casos particulares, el sensor GMR tiene un comportamiento diferente a la respuesta estudiada anteriormente. Para estas aplicaciones particulares se propuso la sensibilidad dinámica del sensor GMR, la cual es definida como la variación del voltaje de salida del sensor GMR con respecto a la variación en el campo de polarización. De forma matemática podemos expresar la sensibilidad dinámica como la derivada parcial del voltaje de salida del sensor GMR con respecto a la intensidad de campo magnético del campo de polarización (véase ecuación (12)). Si consideramos a la intensidad de campo magnético como una combinación lineal de su componente continua con su componente variante en el tiempo, podemos definir la sensibilidad dinámica con la ecuación (12)

$$\frac{\partial V_{out}(t)}{\partial B_{DC}} = \frac{\Delta V_{out}(t)}{\Delta B_{DC}} + \frac{\Delta V_{DC}}{\Delta B_{DC}} \quad (12)$$

Ahora bien, si analizamos detalladamente la ecuación (12) podemos observar que tanto la componente alterna como la componente directa del voltaje de salida del sensor GMR dependen de la variación del campo de magnético de polarización, sin embargo, en el caso donde el campo de polarización fija un punto de operación en la región lineal de operación del sensor GMR, la amplitud de la componente variante en el tiempo del voltaje de salida debido al campo magnético de AC no varía cuando el campo de polarización cambia como se demostró anteriormente. Por lo tanto, la sensibilidad dinámica del sensor GMR cuando el punto de operación se encuentra en la región de operación lineal (región de sensibilidad constante) viene dada por la ecuación (13). Como se puede observar para este caso, la sensibilidad dinámica corresponde a la misma sensibilidad del sensor GMR.

$$\frac{\partial V_{out}(t)}{\partial B_{DC}} = \frac{\Delta V_{DC}}{\Delta B_{DC}} = S(B_i) \quad (13)$$

Para el caso en que el punto de operación del sensor GMR se encuentra en la región lineal, se demostró que existe una variación en la amplitud de la componente variante del voltaje de salida del sensor GMR con respecto a las variaciones del campo magnético de polarización. Observando la ecuación (12), si el punto de operación del sensor GMR es ubicado en la región de sensibilidad lineal, podemos aumentar la sensibilidad propia del sensor GMR. En la Fig. 8 se presentan normalizadas las funciones de sensibilidad dinámica y de sensibilidad del sensor GMR. Es posible observar que, así como el máximo valor de la sensibilidad del sensor GMR se encuentra en la región lineal de operación, el máximo valor de la sensibilidad dinámica del sensor GMR se encuentra en la región de sensibilidad lineal. Es posible aumentar la sensibilidad del sensor GMR cuando este es usado para medir variaciones del campo magnético de polarización utilizando la componente variante del tiempo ubicando el punto de operación en la región de sensibilidad lineal. De acuerdo con la ecuación (12) la sensibilidad del sensor GMR cuando el punto de operación se ubica en la región de sensibilidad lineal depende tanto de la amplitud de la componente de campo magnético de AC como de la variación en la componente constante. Por lo tanto, es importante el poder tener una medición de la componente variante en el tiempo del voltaje de salida del sensor GMR, así que se recomienda que el punto de operación del sensor GMR, para estas aplicaciones, se ajuste en una región donde la sensibilidad y la sensibilidad dinámica se encuentren por encima del 40% del valor máximo. Los resultados demuestran que, si se desea utilizar el sensor GMR para medir variaciones de la componente continua de un campo magnético, es necesario superponer un campo magnético constante de polarización con magnitud de entre 0,13 mT y 0,31 mT.

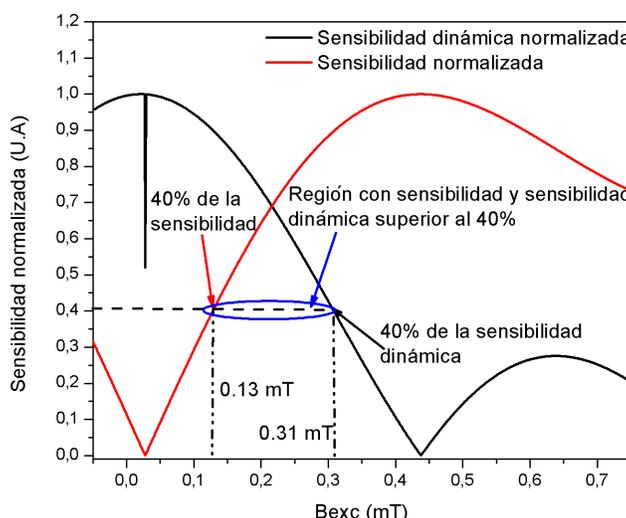


Fig. 8. Sensibilidad dinámica y sensibilidad del sensor GMR AAI002 normalizadas.

## V. CONCLUSIONES

En este trabajo se expusieron las particularidades de operación de un sensor GMR AAI002. Sin embargo, los métodos propuestos pueden extenderse para el análisis de diferentes sensores GMR. Se propuso un método de caracterización de sensores GMR que permite la obtención de expresiones matemáticas que describen el comportamiento y la sensibilidad del sensor GMR. Se identificaron tres regiones de operación del sensor GMR en la curva de sensibilidad: la región de sensibilidad lineal que va desde los 0.035 hasta los 0.5 mT, la región lineal de operación que va desde los 0.5 mT hasta los 1.5mT y la región de saturación que va desde 1.5 mT hasta 4 mT. Es importante mencionar que estos valores reportados corresponden a campos magnético que tienen

una dirección positiva respecto al eje de sensibilidad del sensor GMR, sin embargo, también son válidos para los campos que están en dirección negativa al eje de sensibilidad del sensor GMR.

Los resultados revelaron que el desempeño del sensor para medir la amplitud de campos magnéticos variantes en el tiempo mejora cuando el punto de operación se encuentra en la zona lineal de la curva característica de transferencia. Se observó que la sensibilidad del sensor GMR utilizando este método para la medición de la componente variante en el tiempo mejora y se encuentra entre 140 y 200 mV/mT, mientras que la sensibilidad de un sensor de efecto Hall para el mismo caso se encuentra entre 8-40 mV/mT [1]. Se observó que cuando el punto de operación se ubica en la región de sensibilidad lineal, la sensibilidad dinámica del sensor depende de las dos componentes del campo magnético. A partir de los resultados obtenidos se definió que el valor del campo de polarización debe estar entre 0.035 y 0.3 mT para mejorar el rendimiento del sensor GMR al ser usado para medir variaciones de la componente constante de un campo magnético. La nueva región de sensibilidad lineal del sensor GMR abre nuevas líneas de investigación para la mejora del desempeño de este tipo de sensores en aplicaciones que requieran medir pequeñas variaciones de campos magnéticos. Sin embargo, aún se requiere realizar un análisis experimental de la sensibilidad dinámica, lo cual permitiría seleccionar los valores de amplitud de la componente de campo magnético que permitan aumentar la sensibilidad del sensor GMR. De igual manera es indispensable comprobar con diferentes frecuencias de excitación magnética los resultados presentados en este trabajo.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen al Instituto Politécnico Nacional por el financiamiento de este proyecto (SIP-20200271). El autor, N. O. R., agradece a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco por hacer uso de sus instalaciones, y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado.

#### REFERENCIAS

- [1] N. Novkovsky, "Progress and limitations in magnetic field measurements," in *Geomagnetics for Aeronautical Safety*, First ed., J. Rasson and T. Delipetrov (Eds.), pp. 201-212.
- [2] M. Evans, Friedrich Heller, *Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics*, San Diego, USA, 2003.
- [3] C. Zhu, L. Zhang, X. Shi, H. Qian, "Calibration strategy based on reference sensor for GMR biosensing and biodetection system," *2016 13th IEEE Int. Conf. Solid-State Integr. Circuit Technol. ICSICT 2016 - Proc.*, pp. 1161–1163, 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/ICSICT.2016.7998681>
- [4] P. Gao, X. Wang, D. Han, Q. Zhang, "Eddy Current Testing for Weld Defects with Different Directions of Excitation Field of Rectangular Coil," *2018 4th Int. Conf. Control. Autom. Robot.*, pp. 486-491, 2018.
- [5] P. Gao, C. Wang, Y. Li, F. Li, Y. Yan, Y. Hu, "Defect evaluation using the phase information of an EC-GMR sensor," *Conf. Rec. - IEEE Instrum. Meas. Technol. Conf.*, pp. 25-29, 2014, doi: <https://doi.org/10.1109/I2MTC.2014.6860516>
- [6] W. H. Hayt, *Teoría electromagnética*, Mc Graw-Hill, USA, 2012, pp. 198-199.
- [7] J. García-Martín, J. Gómez-Gil, E. Vázquez-Sánchez, "Non-destructive techniques based on eddy current testing," *Sensors*, vol. 11, no. 3, pp. 2525–2565, 2011, doi: <https://doi.org/10.3390/s110302525>
- [8] J. Garcia-Martin, J. Gomez-Gil, "Comparative evaluation of coil and hall probes in hole detection and thickness measurement on aluminum plates using eddy current testing," *Russ. J. Nondestruct. Test.*, vol. 49, no. 8, pp. 482-491, 2013, doi: <https://doi.org/10.1134/S1061830913080044>
- [9] C. Reig, S. Cardoso, S. C. Mukhopadhyay, *Giant Magnetoresistance (GMR) Sensors*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [10] T. Dogaru, S. T. Smith, "Giant Magnetoresistance-Based Eddy-Current Sensor," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37, no. 5, pp. 3831-3838, 2001.
- [11] N. G. Tawfik, Y. Hussein, E. Azab, "Analysis of magnetoresistive sensors for nondestructive evaluation," *2018 IEEE Sensors Appl. Symp. SAS 2018 - Proc.*, vol. 2018, Jan., pp. 1-4, 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/SAS.2018.8336718>

- [12] W. Wang, Y. Wang, L. Tu, T. Klein, Y. Feng, J.-P. Wang, "Surface Modification for Protein and DNA Immobilization onto GMR Biosensor," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 1, pp. 296–299, Jan. 2013, doi: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2012.2224327>
- [13] R. Hamia, C. Cordier, C. Dolabdjian, "Eddy-current non-destructive testing system for the determination of crack orientation," *NDT E Int.*, vol. 61, pp. 24–28, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.09.005>
- [14] O. Postolache, A. L. Ribeiro, H. G. Ramos, "Uniform eddy current probe based on GMR sensor array and image processing for NDT," *2012 IEEE I2MTC - Int. Instrum. Meas. Technol. Conf. Proc.*, pp. 458-463, 2012, doi: <https://doi.org/10.1109/I2MTC.2012.6229366>
- [15] A. Bernieri, G. Betta, L. Ferrigno, M. Laracca, "Improving performance of gmr sensors," *IEEE Sens. J.*, vol. 13, no. 11, pp. 4513–4521, 2013, doi: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2271275>
- [16] T. Sen, C. S. Anoop, S. Sen, "Simple linearising front-end-circuit for giant magneto-resistance sensors," *Electron. Lett.*, vol. 54, no. 2, pp. 81-83, 2018, doi: <https://doi.org/10.1049/el.2017.3860>
- [17] T. Sen, C. S. Anoop, S. Sen, "Design and performance evaluation of two novel linearisation circuits for giant magneto-resistance based sensors," *IET Circuits, Devices Syst.*, vol. 11, no. 5, pp. 496-503, 2017, doi: <https://doi.org/10.1049/iet-cds.2017.0047>
- [18] S. Dutta, T. Sen, C. S. Anoop, "Study and Noise Analysis of a Linearizing Front-End Circuit for GMR Sensors," *IEEE Reg. 10 Annu. Int. Conf. Proceedings/TENCON*, vol. 2019, Oct., pp. 2275-2279, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/TENCON.2019.8929701>
- [19] P. Ripka, M. Tondra, J. Stokes, R. Beech, "AC-driven AMR and GMR magnetoresistors," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 76, no. 1-3, pp. 225-230, 1999, doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(99\)00034-5](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(99)00034-5)
- [20] Z. Li, S. Dixon, "A Closed-Loop Operation to Improve GMR Sensor Accuracy," *IEEE Sens. J.*, vol. 16, no. 15, pp. 6003–6007, 2016, doi: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2580742>
- [21] J. Han, J. Hu, Y. Ouyang, S. X. Wang, J. He, "Hysteretic modeling of output characteristics of giant magnetoresistive current sensors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 1, pp. 516-524, 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2326989>
- [22] I. Jedlicska, R. Weiss, R. Weigel, "Linearizing the output characteristic of GMR current sensors through hysteresis modeling," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 5, pp. 1728-1734, 2010, doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2033090>
- [23] F. Xie, R. Weiss, R. Weigel, "Hysteresis Compensation Based on Controlled Current Pulses for Magnetoresistive Sensors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 12, pp. 7804-7809, 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2458958>
- [24] N. O. Romero-Arismendi, J. A. Pérez-Benítez, E. Ramírez-Pacheco, J. H. Espina-Hernández, "Sensors and Actuators A : Physical Design method for a GMR-based eddy current sensor with optimal sensitivity," *Sensors Actuator A Phys.*, vol. 314, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112348>
- [25] E. Ramírez-Pacheco, J. H. Espina-Hernández, F. Caleyó, J. M. Hallen, "Defect detection in aluminium with an eddy currents sensor," *Proc. - 2010 IEEE Electron. Robot. Automot. Mech. Conf. CERMA 2010*, pp. 765-770, 2010, doi: <https://doi.org/10.1109/CERMA.2010.91>
- [26] N. O. R. Arismendi, E. R. Pacheco, J. H. Espina-Hernandez, J. A. P. Benítez, "Estudio de la influencia de las características físicas de la bobina y el descentrado bobina-sensor GMR en el sistema de detección de defectos por corrientes de remolino," *Congr. Nac. Ing. Electr. y Sistemas*, no. XVI, 2017.

## Cálculo de las propiedades térmicas y mecánicas de nanotubos de carbono a partir de la dispersión de fonones

Calculation of thermal and mechanical properties of crystalline CNTs (C-CNTs) and low crystallinity (LC-CNTs) by study the phonon dispersion

José Antonio **García-Merino**

Pontificia Universidad Católica de Chile, Instituto de Física, Casilla 306, Santiago 6904411, CHILE  
<https://orcid.org/0000-0002-3296-6315> | [jose.garcia@uc.cl](mailto:jose.garcia@uc.cl)

Recibido 21-05-2021, aceptado 23-06-2021.

### Resumen

La importancia de estudiar a los nanotubos de carbono (CNT) desde una perspectiva de cristalinidad es de suma importancia ya que sus propiedades son altamente modificadas en función de su distribución atómica. Este trabajo, describe el cálculo de propiedades térmicas y mecánicas de CNT cristalinos (C-CNT) y de baja cristalinidad (LC-CNT) por medio del estudio numérico de la dispersión de fonones. La estructura de bandas y la densidad de estados de los fonones se obtuvieron por medio de un programa de cómputo (QuantumATK) y considerando CNT de las mismas dimensiones morfológicas. La diferencia en la dispersión de fonones entre los materiales resultó determinante en las propiedades térmicas y mecánicas. A pesar de que la capacidad calorífica es similar en ambos CNT, se observó una diferencia de 1 orden de magnitud para la conductividad térmica. Así mismo, el módulo de Young se calculó en 5.4 MPa para los C-CNT y en 73.6 MPa para los LC-CNT. Estas diferencias se atribuyen a los valores de la velocidad del sonido en los materiales.

Por otra parte, los CNT tienen una gran relación de aspecto y por tanto presentan una alta polarización molecular, lo cual lo hace un material atractivo para modular las propiedades mecánicas mediante el efecto de electrostricción. El cambio de la densidad y el módulo de Young se calcularon considerando una fuente de luz con una irradiancia entre 0.1 a 1.0 GW/cm<sup>2</sup>, tomando como base las propiedades ópticas lineales y no-lineales de los CNT de investigaciones previas. Los resultados aproximan las propiedades térmicas y mecánicas de C-CNT y/o LC-CNT analizando los modos fundamentales de vibración atómica.

**Palabras clave:** Nanotubos de carbono, electrostricción, densidad de estados de fonones, efectos opto-mecánicos.

### Abstract

The importance of studying carbon nanotubes (CNTs) from a crystallinity perspective is of utmost importance since their properties are highly modified depending on their atomic distribution. This work describes the calculation of thermal and mechanical properties of crystalline CNTs (C-CNTs) and low crystallinity (LC-CNTs) by study the phonon dispersion. The phonon band structure and phonon density of states were obtained using computer software (QuantumATK) and considering CNTs of the same morphological dimensions. The difference in the dispersion of phonons between the materials was decisive in the thermal and mechanical properties. Even though the heat capacity is comparable in both CNTs, a difference of 1 order of magnitude was observed for the thermal conductivity. Likewise, the Young modulus was computed in 5.4 MPa for C-CNTs and in 73.6 MPa for LC-CNTs. These differences are attributed to the values of the speeds of sound in the materials.

On the other hand, CNTs have a large aspect ratio and therefore have highly molecular polarizability. This property makes it an attractive material for modulating mechanical properties through the electrostriction effect. The change in density and Young modulus were computed considering a light source with an irradiance between 0.1 to 1.0 GW/cm<sup>2</sup>, based on the linear and non-linear optical properties of CNTs from previous investigations. The results approximate the thermal and mechanical properties of C-CNTs and/or LC-CNTs by analyzing the fundamental atomic vibration modes.

**Index terms:** Carbon nanotubes, electrostriction, phonon density of states, opto-mechanical effects.

## I. INTRODUCCIÓN

Los nanotubos de carbono (CNT) han sido tema de estudio desde su descubrimiento ya que poseen propiedades exóticas que son de gran utilidad en la ciencia. Como ejemplo, han sido utilizados en sistemas eléctricos a modo de super capacitores [1], en cátodos de eficiente emisión termiónica [2], en dispositivos de activación magnética [3], en sensores de gases [4], entre otros. Los CNT son hojas de grafeno enrolladas sobre un eje, de tal manera que se forma un cilindro hueco. Dependiendo de las capas o paredes que tenga el nanotubo se define de simple, de doble o de múltiple pared. Además, el ángulo quiral con el que se enrolla el grafeno para formar un nanotubo es de gran importancia ya que esto determinará las propiedades electrónicas y mecánicas [5]. Dependiendo de la dirección del vector quiral, los CNT son de tipo sillón, zigzag o quirales, siendo los más comunes los primeros dos. Los CNT de sillón son tipo metálicos, por tanto, tienen buena conductividad eléctrica y logran transportar 1000 veces más corriente para su tamaño que otros conductores. Por su parte, los CNT tipo zigzag y quirales tienen propiedades eléctricas similares a los semiconductores y presentan una brecha prohibida en la estructura de bandas electrónicas [6]. Estos últimos pueden ser utilizados para generar dispositivos optoelectrónicos de rápida conmutación como fotodiodos o fototransistores [7].

Para explicar las propiedades de los CNT es necesario analizar los modos de vibración atómica llamados fonones. En general, las propiedades térmicas en sólidos consisten en contribuciones de los fonones y los electrones, pero en sistemas derivados del grafeno como son los CNT la contribución dominante es debido a fonones [8]. Los fonones son el producto de la vibración atómica dentro de una red cristalina y se observan como ondas acústicas que se propagan en el sólido. Los átomos vibran entorno a su punto de equilibrio y están ligados a un átomo vecino por medio de un potencial; si estas oscilaciones son pequeñas, el sistema se puede modelar por medio de varios cuerpos (masas) unidos por potenciales de ligadura (resortes) y resolverse clásicamente con las leyes de Newton [9]. Para materiales monoatómicos y una estructura cristalina bien definida, las oscilaciones de los átomos ocurren en tres dimensiones con movimientos coherentes, generando así fonones acústicos. Para este tipo de fonones las frecuencias tienden a cero para longitudes de onda largas. De existir más de dos átomos distintos en la red cristalina, se generan movimientos combinados (no-coherentes) entre las distintas masas atómicas que inducen la propagación de fonones ópticos, los cuales tienen una frecuencia distinta de cero en el centro de la zona de Brillouin (punto  $\Gamma$ ). No obstante, para sistemas monoatómicos como los CNT existe una componente vibracional fuera del plano de la red, ya sea por la interacción entre las paredes concéntricas o por la curvatura del material, que induce la aparición de fonones ópticos [10].

Por otra parte, los materiales con baja cristalinidad tienden a presentar estados cuánticos localizados [11]. En este caso, los modos de vibración de los fonones en un sistema con desorden estructural tienden a concentrarse en un rango energético menor [12]. Este efecto causa que dos CNT con las mismas dimensiones, pero arreglo atómico distinto tengan diferentes mecanismos de transporte. Por ello, se espera que las propiedades ligadas a la dispersión de fonones difieran para CNT cristalinos (C-CNT) y CNT de baja cristalinidad (LC-CNT). Por ello, en este trabajo de investigación se exploran las propiedades térmicas y mecánicas de CNT con la misma morfología, pero cambiando su distribución atómica. Adicionalmente, se estudian las diferencias en la modulación de las propiedades mecánicas debido al efecto de electrostricción. El campo eléctrico de alta intensidad se consideró al ser asistido por una fuente óptica de alta irradiancia. Con las propiedades de estos materiales bien definidos, se pueden proponer arreglos que contengan una mezcla de C-CNT y LC-CNT para crear sistemas de mayor complejidad y utilizarlos en el diseño de nuevos materiales inteligentes.

## II. METODOLOGÍA

### A. Simulación numérica de la estructura de fonones de nanotubos de carbono

La estructura de las bandas de fonones (PBS) y la densidad de estados de fonones (PDOS) de C-CNT y de LC-CNT se simuló por medio de la plataforma QuantumATK<sup>®</sup> [13]. Para modelar la dinámica atómica en los

nanotubos se utilizaron los siguientes parámetros constantes: tolerancia a la fuerza  $0.001\text{eV}/\text{\AA}$ , tolerancia al error de tensión  $0.0001\text{ eV}/\text{\AA}^3$ , y presión atmosférica isotrópica [14]. Los potenciales de enlace utilizados para los cálculos de interacción atómica se obtuvieron mediante un modelo basado en un potencial de muchos cuerpos, disponible en el programa de cómputo [15]. Las dimensiones de los CNT considerados fueron  $7.0\text{ nm}$  de diámetro externo,  $0.24\text{ nm}$  de espesor de pared y  $100\text{ nm}$  de altura. Los C-CNT son de doble pared y los LC-CNT tienen una pared intermedia y se desordenó aleatoriamente la estructura para simular un material amorfo. Las estructuras estudiadas se muestran en la Fig. 1, los cuales son de tipo zigzag con una quiralidad  $(m,0)$ . En la vista transversal se observa el contraste de la cristalinidad y del desorden estructural. Los LC-CNT se trataron de mantener con una configuración cercana a lo ya antes estudiado experimentalmente [16]. La dispersión de fonones se estudió particularmente entre las zonas de Brillouin  $\Gamma$  y  $Z$ , lo cual arroja la componente sobre el eje longitudinal del nanotubo, por lo tanto, las propiedades se calcularán sobre dicho eje.

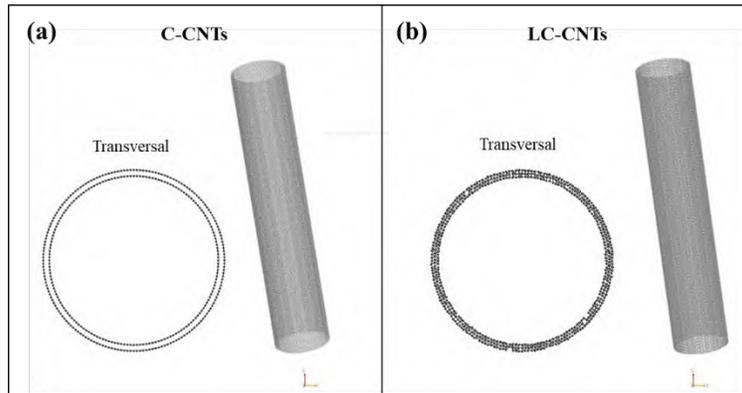


Fig. 1. Estructuras de CNT considerada para el estudio dinámico molecular en la simulación. (a) CNT cristalinos (C-CNT) y (b) CNT de baja cristalinidad (LC-CNT).

### B. Cálculo de las propiedades térmicas

El cálculo de las propiedades térmicas en C-CNT y LC-CNT se realizó por medio del análisis de la dispersión de la función de PDOS. La capacidad calorífica ( $C_p$ ) dependiente de la temperatura se calculó con la siguiente relación [17]:

$$C_p(T) = \frac{3R}{M_m} \int_0^\infty D(\omega) \frac{(\hbar\omega)^2 e^{\hbar\omega/kT}}{(kT)^2 (1 - e^{\hbar\omega/kT})^2} d\omega \quad (1)$$

Donde  $R$  es la constante de los gases,  $M_m$  es la masa molar,  $D(\omega)$  es la función de PDOS de los modos vibracionales,  $\hbar$  es la constante de Plack,  $k$  es la constan de Boltzmann y  $\omega$  es la frecuencia de vibración que está dada por la energía  $E = \hbar\omega$ . La función  $D(\omega)$  debe de estar normalizada  $\int D(\omega) d\omega = 1$ .

Derivado de la ecuación de transporte de Boltzmann, se puede calcular la conductividad térmica por la siguiente relación [18]:

$$\lambda_p(T) = \frac{\tau}{2\pi^2 v} \int_0^{\omega_D} \frac{\hbar^2 \omega^4}{kT^2} \frac{e^{\hbar\omega/kT}}{(e^{\hbar\omega/kT} - 1)^2} d\omega \quad (2)$$

donde  $v$  es la velocidad del sonido,  $\omega_D = (6\pi^2 n v^3)^{1/3}$  es la frecuencia de Debye,  $n$  es la densidad atómica y  $\tau$  es el tiempo de relajación. Este tiempo depende de los procesos de esparcimiento de fonones dentro del cristal.

### C. Cálculo de las propiedades mecánicas

A partir de la dispersión de fonones, se obtienen propiedades mecánicas como el módulo de Young ( $Y$ ), el cual depende de la velocidad del sonido ( $v$ ) y la densidad másica ( $\rho$ ) por medio de la siguiente ecuación [19]:

$$Y = \rho v^2 \quad (3)$$

La velocidad del sonido en un sólido se determina por la pendiente de la relación de dispersión de un fonón acústico para valores pequeños del vector de onda o longitudes de onda largas (cercano al punto  $\Gamma$ ). Para esta condición, la relación de dispersión es lineal y la velocidad del sonido se vuelve independiente de la frecuencia del fonón. De este efecto se desprende que longitudes de onda largas, como las ondas sonoras, se propagan eficientemente en los sólidos.

Adicionalmente, un sólido con una alta polarizabilidad molecular ( $\gamma$ ) como lo son los CNT, tiende a sufrir un cambio instantáneo en las propiedades mecánicas debido al efecto de electrostricción. Derivado de la relación de Lorentz–Lorenz y de la Eq. (3) se deduce el valor del módulo de Young debido a una alta irradiancia óptica ( $I$ ) [19]:

$$Y = v^2 \left[ \frac{(n_0 + n_2 I)^2 - 1}{(n_0 + n_2 I)^2 + 2} \right] \left[ \frac{3M_m}{4\pi N_a \gamma} \right] \quad (4)$$

Donde:  $n_0$  es el índice de refracción lineal,  $n_2$  es el índice de refracción no-lineal, y  $N_a$  es el número de Avogadro.

### III. RESULTADOS

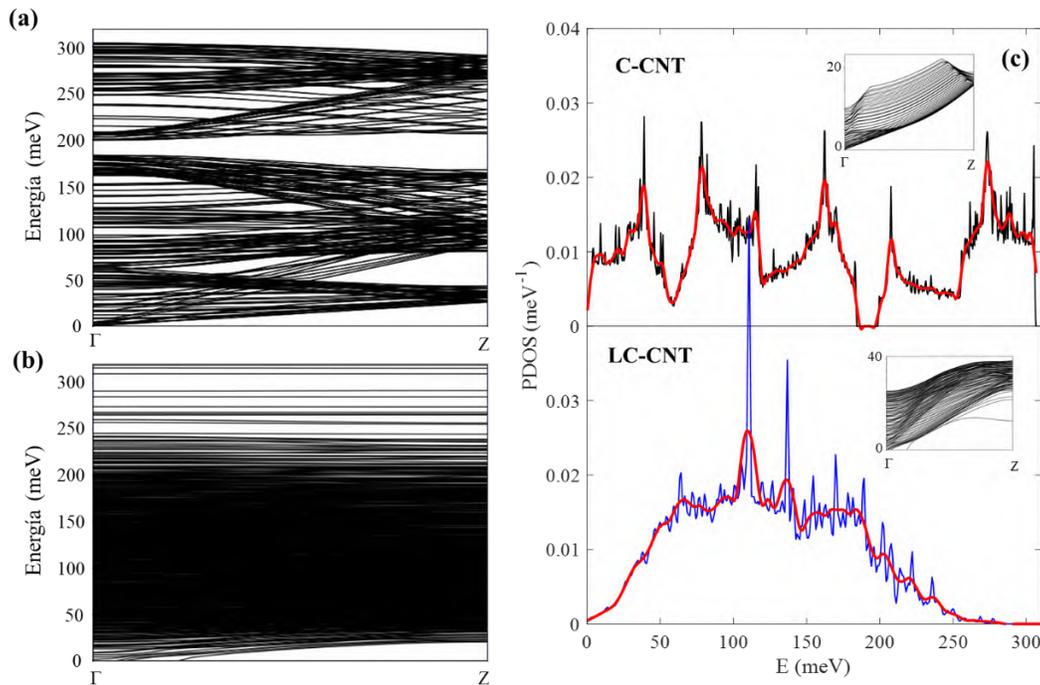


Fig. 2. Estructura de bandas de los fonones de los (a) C-CNTy (b) LC-CNT. (c) Densidad de estados de los fonones de los CNT en estudio. Insertos muestran las primeras 100 bandas de la estructura de bandas de los fonones.

5

La PBS de los CNT considerados para la simulación numérica es la mostrada en la Fig. 2. En la simulación el C-CNT contiene un número de átomos de 696 por celda unitaria y el LC-CNT un número de átomos de 979 por celda unitaria. La Fig. 2(a) muestra la estructura de bandas de los C-CNT, mientras que la Fig. 2(b) muestra la de los LC-CNT. Se observa que los C-CNT muestran una dispersión más cercana a un material cristalino, en donde las bandas de fonones acústicas y ópticas son claramente divididas cercanos a 200 meV. Asimismo, los LC-CNT muestran una tendencia de las bandas a localizarse en un intervalo de energía menor (0 – 250 meV). Este efecto puede ser mejor observado en la función de PDOS mostrada en la Fig. 2(c) en donde los C-CNT tienen una distribución de estados de fonones más discreto con bandas intermedias entre 57 meV, 120 meV y 252 meV y con una banda prohibida entre 184 meV y 198 meV. Por otro lado, los LC-CNT presentan una localización de estados sin existir una transición de banda prohibida. Este efecto es consistente con la literatura en donde los estados cuánticos tienden a ser más localizados en sistemas con un mayor desorden estructural [12]. Debido a que los mecanismos de transporte en estos materiales son mayormente asistidos por fonones, se resalta la gran diferencia que existe entre ambos nanotubos. Adicionalmente, en los insertos de la Fig. 2(c) se muestran las primeras 100 bandas de la PBS. Este acercamiento permite visualizar el cambio de la energía en función de vector de onda, lo cual es un indicio de la velocidad de propagación del sonido en la red cristalina. La velocidad del sonido se determina cercano al punto  $\Gamma$ , y los resultados numéricos obtenidos son 2,528 m/s y 7,864 m/s para C-CNT y LC-CNT, respectivamente.

Para poder calcular las propiedades térmicas y mecánicas de los CNT se consultaron parámetros establecidos en la literatura y otros se determinaron. La Tabla 1 muestra las propiedades necesarias para realizar los cálculos indicados [19], [20], [21]. El módulo de Young se determinó utilizando la Eq. (3) y la polarizabilidad molecular se obtuvo utilizando la Eq. (4), considerando  $I=0$  W/m<sup>2</sup>. Los demás resultados se obtuvieron del programa de cómputo utilizado en la simulación molecular.

TABLA 1. PROPIEDADES DE LOS CNT EN ESTUDIO.

Propiedad	Símbolo	Unidades	C-CNT	LC-CNT
Masa molar del carbono	$M_m$	$\times 10^{-3}$ [kg/mol]	12.017	12.017
Número de átomos por celda unitaria		atm	696	979
Volumen	$V$	$\times 10^{-26}$ [m <sup>3</sup> ]	1.64	1.64
Densidad	$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	846	1190
Densidad atómica	$n$	$\times 10^{28}$ [1/m <sup>3</sup> ]	4.24	5.96
Velocidad del sonido	$v$	[m/s]	2528	7864
Frecuencia de Debye	$\omega_D$	$\times 10^{14}$ [rad/s]	0.343	1.198
Tiempo de relajación	$\tau$	[ps]	0.59 [20]	0.59 [20]
Polarizabilidad molecular	$\gamma$	[Å <sup>3</sup> /atm]	1.8	1.27
Módulo de Young	$Y$	[GPa]	5.4	73.6
Índice de refracción	$n_0$		1.55 [21]	1.55 [21]
Índice de refracción no-lineal	$n_2$	$\times 10^{-15}$ [m <sup>2</sup> /W]	-1.1 [19]	-1.1 [19]

Una vez analizado el esparcimiento de fonones dentro de las estructuras carbonáceas de estudio, se calculan las propiedades térmicas en función de la temperatura. La Fig. 3(a) muestra el gráfico de la capacidad calorífica, la cual se calculó usando la Eq. (1). A pesar de que esta variable depende exclusivamente de la PDOS, las funciones tanto del material cristalino como el amorfo se comportan similares en todo el rango de temperatura. Este efecto se debe a que el área bajo la curva de la densidad de estados es similar en ambos materiales:

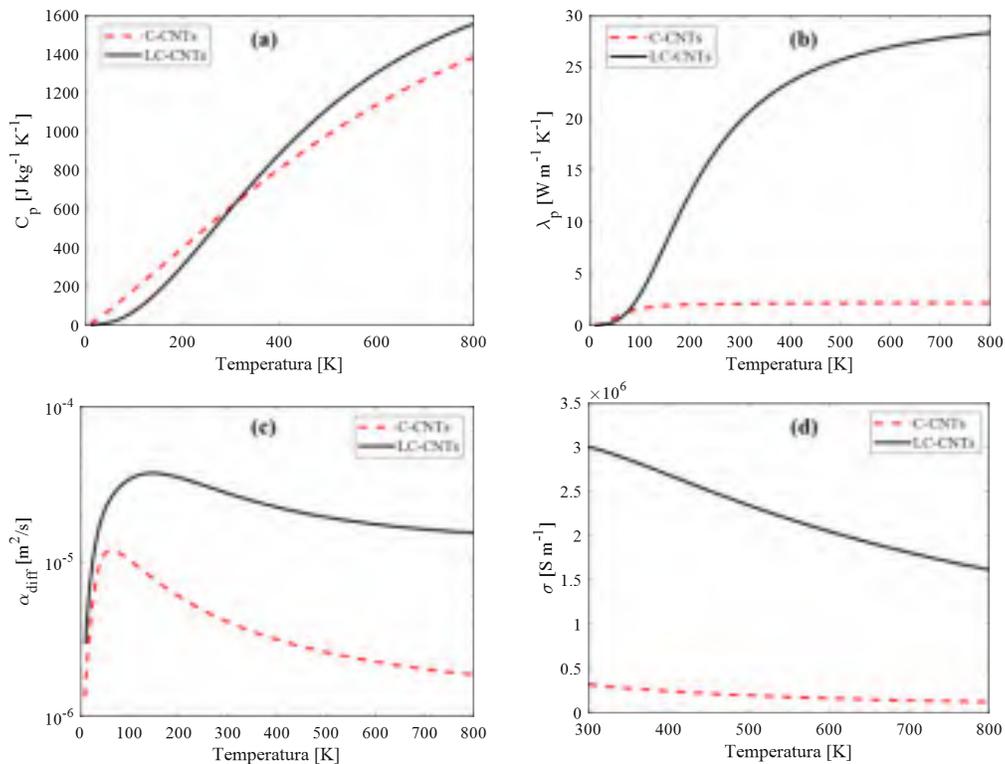
6

$3.013 \times 10^{-6}$  para C-CNT y  $2.95 \times 10^{-6}$  para LC-CNT. Por su parte, la conductividad térmica presentada en la Fig. 3(b) muestra una gran diferencia entre los nanotubos. Esta diferencia se atribuye a que este parámetro depende del límite superior de la integral de la Eq. (2) por medio de la frecuencia de Debye y esta magnitud es 3.5 veces mayor en LC-CNT que en C-CNT. Un resultado inmediato a partir de la capacidad calorífica y la conductividad térmica es la difusividad térmica, la cual sigue la relación  $\alpha_{diff} = \lambda_p / (\rho C_p)$ . La Fig. 3(c) muestra el gráfico de la difusividad térmica en función de la temperatura. Esta magnitud indica la velocidad de propagación de una onda térmica por unidad de superficie. Claramente los LC-CNT tienen una mayor difusión ya que depende directamente de la conductividad térmica. Un valor alto de esta propiedad puede ser una ventaja para un proceso dinámico, ya que, a mayor difusividad térmica la constante de tiempo se reduce y un cuerpo adquiere el equilibrio térmico más rápido. Por otra parte, también puede ser una desventaja si se requiere almacenar por más tiempo el calor, para ello se necesitaría una difusividad térmica menor.

Adicionalmente, la Fig. 3(d) muestra una estimación de la conductividad eléctrica de los dos CNT estudiados. Esta propiedad se obtuvo por medio de la ley de Wiedemann-Franz con la siguiente ecuación [22]:

$$\sigma = \frac{\lambda_p}{LT} \quad (5)$$

donde  $L = 2.44 \times 10^{-8} \text{ W}\Omega\text{K}^{-2}$  es el número de Lorenz [22]. Esta relación se deriva de asumir que la conductividad eléctrica y térmica se determinan por el mismo camino libre medio (*mean free path* en inglés) por colisiones de los electrones conductores con la matriz sólida. Esto es una idealidad ya que en general, los caminos libres medios por conducción térmica y eléctrica suelen ser distintos y la ley de Wiedemann-Franz no es estrictamente válida. Aun así, esta ley es más aproximada para temperaturas elevadas ( $T > 200 \text{ K}$ ), por ello la Fig. 3(c) solo muestra el comportamiento de la conductividad eléctrica para valores de temperatura mayores a 300 K.



**Fig. 3.** Propiedades térmicas de CNT estudiados en función de la temperatura. (a) Capacidad calorífica, (b) conductividad térmica, (c) difusividad térmica y (d) conductividad eléctrica.

Por otra parte, las propiedades optomecánicas de los CNT al ser sometidos a una alta irradiancia se calculan por medio de la Eq. (4). Se espera que estos materiales cambien su densidad másica por medio del efecto de electrostricción y por ende su módulo de Young. Para lograr un considerable cambio en las propiedades mecánicas se necesita de una alta irradiancia, comparable al inverso del índice de refracción no-lineal, el cual se ha calculado en estos materiales alrededor de  $-1.1 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{W}$  [19]. Por tanto, la Fig. 4 (a) y 4 (b) muestran el cambio en el módulo de Young y de la densidad másica en función de una irradiancia desde  $0.1 \text{ GW}/\text{cm}^2$  hasta  $1 \text{ GW}/\text{cm}^2$ . Esta magnitud se puede lograr utilizando un láser pulsado (nanosegundos o picosegundos) de alta energía concentrándolo por medio de lentes en el material de análisis [23]. De los gráficos se observa un comportamiento lineal de ambas propiedades en el rango escogido. No obstante, al aumentar la irradiancia, la función matemática indica un comportamiento no-lineal para valores mayores de irradiancia. Debido a que sobrepasar estos límites de irradiancia implicaría depositar mucha energía en el material, éste deberá soportarlo sin sufrir ablación u oxidación, procesos que alteran estructuralmente a los materiales. Por su alta absorción óptica, los CNT aumentan su temperatura ante un haz pulsado, esto puede generar un proceso de ablación para irradiancias muy elevadas, es por eso que es recomendable utilizar haces pulsados de picosegundos para acortar la propagación del haz sobre la muestra, manteniendo el campo eléctrico con gran magnitud. Adicionalmente, para explorar las propiedades opto-mecánicas y fototérmicas de CNT, un láser en el rango del infrarrojo cercano será una mejor opción para poder excitar adecuadamente los fonones y no generar transiciones electrónicas. Con las funciones definidas en el trabajo, se logró controlar las propiedades mecánicas de ambos CNT por medio de una fuente de luz óptica de alta intensidad. Estos efectos dan pie a la realización de dispositivos de rápida conmutación con base en una combinación de C-CNT y LC-CNT para su implementación en actuadores lineales.

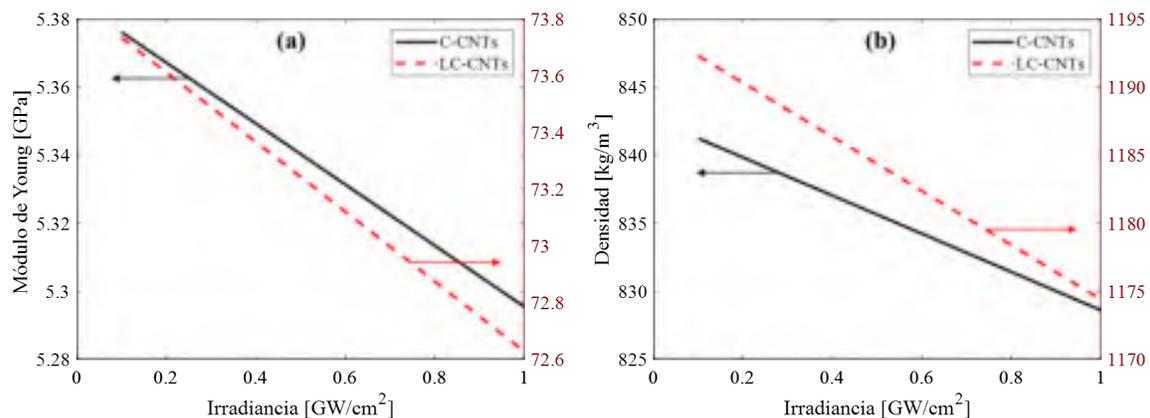


Fig. 4. Cambio de las propiedades mecánicas en función de la irradiancia óptica. (a) Módulo de Young, y (b) densidad.

#### IV. CONCLUSIONES

Se determinó numéricamente la dispersión de fonones en C-CNT y LC-CNT con configuración quiral de zigzag,  $7.0 \text{ nm}$  de diámetro externo y un ancho de pared de  $0.24 \text{ nm}$ . La PDOS tiende a ser más localizada para los nanotubos con un desorden estructural mayor. A partir de los estados de vibración se lograron determinar las propiedades térmicas y mecánicas de ambos CNT. La capacidad calorífica mostró un comportamiento similar para los dos CNT estudiados ya que el área bajo la curva de la PDOS es prácticamente la misma. La conductividad térmica por su parte mostró una diferencia de 1 orden de magnitud, siendo la mayor para los LC-CNT. Asimismo, el módulo de Young también es mayor para los LC-CNT ya que esta magnitud, así como la conductividad térmica, dependen de la velocidad del sonido en la red cristalina. La red amorfa de los LC-CNT

permite propagar más rápido los fonones ya que existe un mayor esparcimiento por colisiones y hace que las ondas mecánicas sean eficientemente propagadas. Adicionalmente, se estimó el cambio de las propiedades mecánicas por medio del efecto de electrostricción; ambos CNT mostraron una dependencia lineal negativa del módulo de Young y de la densidad másica en un rango de 0.1 – 1 GW/cm<sup>2</sup>. Un arreglo de C-CNT, LC-CNT o una combinación de ambos puede ser considerado para desarrollar actuadores opto-mecánicos lineales.

## REFERENCIAS

- [1] Z. Yang, J. Tian, Z. Yin, C. Cui, W. Quian, F. Wei, “Carbon nanotube- and graphene-based nanomaterials and applications in high-voltage supercapacitor: A review,” *Carbon*, vol. 141, pp. 467-480, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.10.010>
- [2] Z. Li, B. Bai, C. Li, Q. Dai, “Efficient photo-thermionic emission from carbon nanotube arrays,” *Carbon*, vol. 96, pp. 641-646, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.09.074>
- [3] J. García-Merino, E. Jiménez-Marín, C. Mercado-Zúñiga, M. Trejo-Valdez, J. Vargas-García, C. Torres-Torres, “Quantum and bistable magneto-conductive signatures in multiwall carbon nanotubes decorated with bimetallic Ni and Pt nanoparticles driven by phonons,” *OSA Continuum*, vol. 2, no. 4, pp. 1285-1295, 2019, doi: <https://doi.org/10.1364/OSAC.2.001285>
- [4] T. Han, A. Nag, S. Mukhopadhyay, Y. Xu, “Carbon nanotubes and its gas-sensing applications: A review,” *Sens. Actuators, A*, vol. 291, pp. 107-143, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.03.053>
- [5] G. Cao, X. Chen, “The effects of chirality and boundary conditions on the mechanical properties of single-walled carbon nanotubes,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 44, no. 44, pp. 5447-5465, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2007.01.005>
- [6] J. Liang, Y. Wang, Y. Huang, Y. Ma, Z. Liu, J. Cai, C. Zhang, H. Gao, Y. Chen, “Electromagnetic interference shielding of graphene/epoxy composites,” *Carbon*, vol. 47, pp. 922-925, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2008.12.038>
- [7] K. Bergemann, F. Léonard, “Giga-gain at room temperature in functionalized carbon nanotube phototransistors based on a nonequilibrium mechanism,” *ACS Nano*, vol. 14, no. 8, pp. 10421–10427, 2020, doi: <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c04296>
- [8] J. Hone, “Phonons and Thermal Properties of Carbon Nanotubes,” in *Carbon Nanotubes. Topics in Applied Physics*, Berlin: Springer, 2001, pp. 273-286, doi: [https://doi.org/10.1007/3-540-39947-X\\_11](https://doi.org/10.1007/3-540-39947-X_11)
- [9] F. Vasko, O. Raichev, *Quantum kinetic theory and applications: Electrons, photons, phonons*, New York, USA: Springer, 2005, doi: <https://doi.org/10.1007/0-387-28041-3>
- [10] S. Piscanec, M. Lazzeri, F. Mauri, A. Ferrari, “Optical phonons of graphene and nanotubes,” *Eur. Phys. J. Special Topics*, vol. 148, p. 159–170, 2007, doi: <https://doi.org/10.1140/epjst/e2007-00236-2>
- [11] N. F. Mott, “Conduction in non-crystalline materials,” *Philos. Mag.*, vol. 19, pp. 835-852, 1969, doi: <https://doi.org/10.1080/14786436908216338>
- [12] S. Mu, R. Olsen, B. Dutta, L. Lindsay, G. Samolyuk, T. Berlijn, E. Specht, J. Jin, H. Bei, T. Hickel, B. Larson, G. Stocks, “Unfolding the complexity of phonon quasi-particle physics in disordered materials,” *npj Comput. Mater.*, vol. 6, no.4, 2020, doi: <https://doi.org/10.1038/s41524-020-0271-3>
- [13] S. Smidstrup, T. Markussen, P. Vancraeyveld, J. Wellendorff, J. Schneider, T. Gunst, B. Verstichel, D. Stradi, P. Khomyakov, U. Vej-Hansen, “QuantumATK: An integrated platform of electronic and atomic-scale modelling tools,” *J. Phys.: Condens. Matter*, vol. 32, no. 015901, 2020, doi: <https://doi.org/10.1088/1361-648X/ab4007>
- [14] J. Schneider, J. Hamaekers, S. T. Chill, S. Smidstrup, J. Bulin, R. Thesen, A. Blom, K. Stokbro, “ATK-ForceField: a new generation molecular dynamics software package,” *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.*, vol. 25, no. 085007, 2017, doi: <https://doi.org/10.1088/1361-651X/aa8ff0>
- [15] J. Tersoff, “Modeling solid-state chemistry: Interatomic potentials for multicomponent systems,” *Phys. Rev. B*, vol. 39, pp. 5566-5568, 1989, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.39.5566>
- [16] J. García-Merino, L. Fernández-Izquierdo, R. Villarroel, S. Hevia, “Photo-thermionic emission and photocurrent dynamics in low crystallinity carbon nanotubes,” *J. Materiomics*, vol. 7, no. 2, pp. 271-280, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2020.10.002>
- [17] J.P. Hague, “Determining the phonon density of states from specific heat measurements via maximum entropy methods,” *J. Phys.: Condens. Matter.*, vol. 17, pp. 2397-2405, 2005.
- [18] T. M. Tritt, *Thermal conductivity: Theory, properties and applications*, New York, USA: Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2004.

- 9
- [19] C. Torres-Torres, C. Mercado-Zúñiga, C. Martínez-González, H. Martínez-Gutiérrez, N. Rebollo, M. Trejo-Valdez, J. Vargas-García, R. Torres-Martínez, “Optical Kerr effect exhibited by carbon nanotubes and carbon/metal nanohybrid materials,” *Physica E*, vol. 73, pp. 156-162, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.physe.2015.05.035>
  - [20] O. Dyatlova, C. Koehler, P. Vogel, E. Malic, R. Jain, K. Tvrdy, M. Strano, A. Knorr, U. Woggon, “Relaxation dynamics of carbon nanotubes of enriched chiralities,” *Phys. Rev. B*, vol. 90, no. 155402, 2014, doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.90.155402>
  - [21] K. Gharbavi, H. Badehian, “Optical spectra of zigzag carbon nanotubes,” *Optik*, vol. 127, no. 17, pp. 6952-6960, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.05.034>
  - [22] P. Slade, *Electrical contacts: principles and applications*, New York, USA: Marcel Dekker, Inc, 1999.
  - [23] A. Brandao-Silva, R. Lima, C. Fantini, A. Jesus-Silva, M. Alencar, J. Hickmann, R. Jain, M. Strano, E. Fonseca, “Near infrared nonlinear refractive index dispersion of metallic and semiconducting single-wall carbon nanotube colloids,” *Carbon*, vol. 77, pp. 939-946, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.06.008>

## Máquina de recubrimiento de pulverización catódica PVD

PVD sputtering coating machine

Sergio Arturo **Rodriguez-Valencia**<sup>1</sup>, Iyari Alejandro **Nava-Tellez**<sup>2</sup>, Milton Carlos **Elias-Espinosa**<sup>3</sup>

Tecnológico de Monterrey, Escuela de ingeniería y Ciencias, CDMX, México

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0001-5285-1972> | [A01023237@itesm.mx](mailto:A01023237@itesm.mx)

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0001-6425-9642> | [A01013636@itesm.mx](mailto:A01013636@itesm.mx)

<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0002-1377-3569> | [mielias@tec.mx](mailto:mielias@tec.mx)

Recibido 02-12-2020, aceptado 31-03-2021.

### Resumen

En este trabajo se abordará el diseño de una máquina a escala de depósitos por pulverización catódica (PVD) para uso estudiantil. Esto a partir de la generación y focalización de plasma de manera controlada en un sistema de vacío con el apoyo de un sistema de alto voltaje. Por medio de este diseño se consiguió realizar un depósito de aluminio visible sobre sustratos de vidrio durante una ronda sencilla de pruebas. Este tipo de sistema puede abrir las puertas a proyectos futuros en tecnología de materiales, así como la investigación en áreas como la óptica o la tribología a nivel universitario.

**Palabras clave:** Depósito de material, PVD, plasma, tecnología de materiales.

### Abstract

This work will address the design of a small-scale machine for sputtering tanks (PVD) for student use. This from the generation and focusing of plasma in a controlled way in a vacuum system with the support of a high voltage system. Through this design it was possible to make a visible aluminum deposit on glass substrates during a simple round of tests. This type of system can open the doors to future projects in materials technology, as well as research in areas such as optics or tribology at the university level.

**Index terms:** Material deposition, PVD, plasma, materials technology.

## I. INTRODUCCIÓN

Actualmente el estudio relacionado con tecnología de materiales ha sido revolucionado con la implementación del recubrimiento de objetos con metales o cerámicos que, además de dar un nuevo aspecto a los materiales, también modifican notablemente sus propiedades superficiales. Estas modificaciones tienen aplicaciones tanto estéticas como de funcionalidad en ramas como la mecánica, la óptica, la medicina y la electrónica [1], [2]. Es por esto por lo que algunos de los métodos de recubrimiento como la Deposición por Vaporización Física (PVD) son capaces de abrir las puertas al recubrimiento con materiales como el grafeno que durante los últimos años ha demostrado tener propiedades eléctricas superiores al cobre, así como capacidades autolubricantes pero cuyos procesos de aplicación siguen en etapa de investigación [3]. No obstante, a pesar de tratarse de un proceso conocido de manera industrial, no es común encontrarlos para procesos a baja escala y su poca disponibilidad lo convierte en un proceso de costos elevados.

Se le conoce como PVD al proceso que consta en pulverizar o vaporizar elementos metálicos o cerámicos para después depositarlos sobre otro material en la forma de una delgada película que mantiene las propiedades del elemento depositado. Estos procesos están divididos en dos categorías: vaporización térmica y pulverización por transferencia de momento. Los procesos de PVD basados en la pulverización por transferencia de momento son métodos que bombardean una superficie sólida con partículas energéticas, como iones acelerados, de manera que la colisión erosiona la superficie del sólido desprendiendo pequeñas partículas de este en forma de un polvo fino dentro de una cámara de vacío [4]. Por medio de este método, las partículas liberadas del objetivo se impregnan en las superficies expuestas en el interior del área de trabajo. Existen distintos métodos de pulverización por transferencia de momento, pero el más simple es la deposición por pulverización catódica de corriente directa. Este último consta de la ionización de algún gas dentro de un sistema de baja presión con la ayuda de dos electrodos. Sobre el ánodo de estos electrodos se encuentra el sustrato mientras que en el cátodo se encuentra el objetivo de manera que la dirección del plasma generado irá directamente hacia el material a depositar. Para mantener la pureza de los depósitos generalmente son utilizados gases inertes. Sin embargo, el uso de oxígeno y nitrógeno es también utilizado en este proceso debido a que su reacción es capaz de generar depósitos de óxidos y nitruros que dan características diferentes al material depositado [4].

Debido a que este proceso utiliza la energía de colisión de los iones para pulverizar, se recomienda utilizar gases pesados para aumentar su energía cinética. No obstante, debido a la complejidad para encontrar el Kriptón y el Xenón, así como los riesgos cancerígenos que se ha demostrado tiene el Radón [5], el gas más común para realizar este proceso es el Argón. Este tipo de procesos en ocasiones se apoya del uso de un imán por debajo del objetivo con el fin de aumentar la velocidad de colisión, así como atraer el plasma al objetivo cuando este no es directamente el cátodo, aunque no es completamente necesario [2], [4].

Empleando todos los conceptos anteriores en este proyecto; se generó una máquina de PVD a partir de la generación y focalización de plasma de manera controlada en un sistema de vacío con el apoyo de un sistema de alto voltaje. Por medio de este diseño se consiguió realizar un depósito de aluminio visible sobre sustratos de vidrio durante una ronda sencilla de pruebas.

## II. METODOLOGÍA Y DESARROLLO

Dentro del desarrollo de este trabajo se abordó el proceso de pulverización por transferencia de momento. Es necesario comprender que para que este el sistema funcione, se necesita de tres elementos que garanticen la generación y focalización del plasma en un ambiente controlado, estos son: vacío de por lo menos 750 micrones, alto voltaje y un campo magnético que guíe al plasma hacia el objetivo a pulverizar [4], [6]. El proceso para la realización de este trabajo se observa en la Fig. 1.

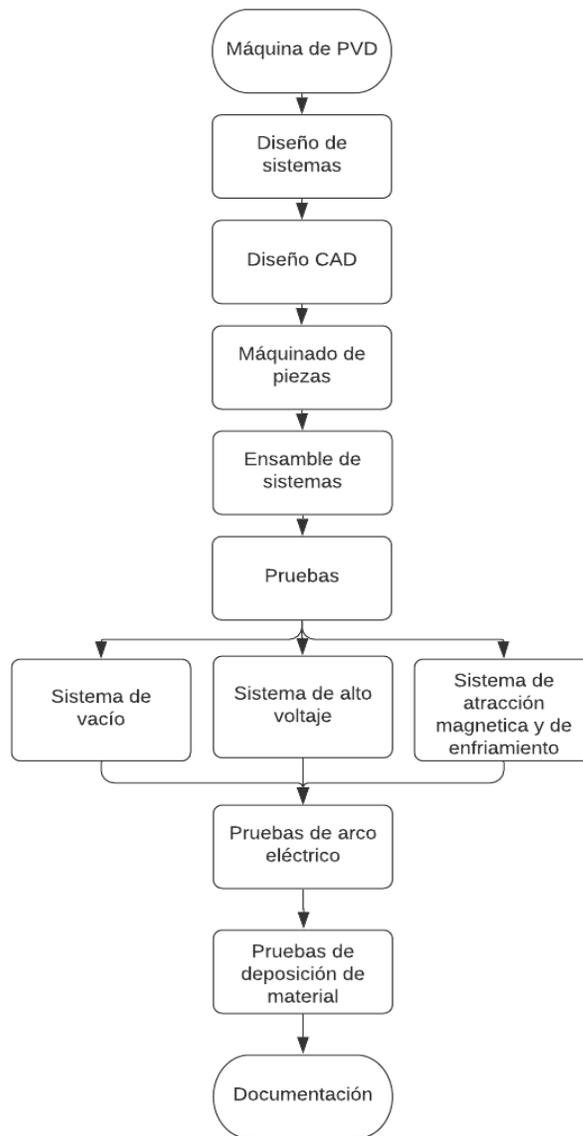


Fig. 1. Diagrama de flujo de la metodología realizada.

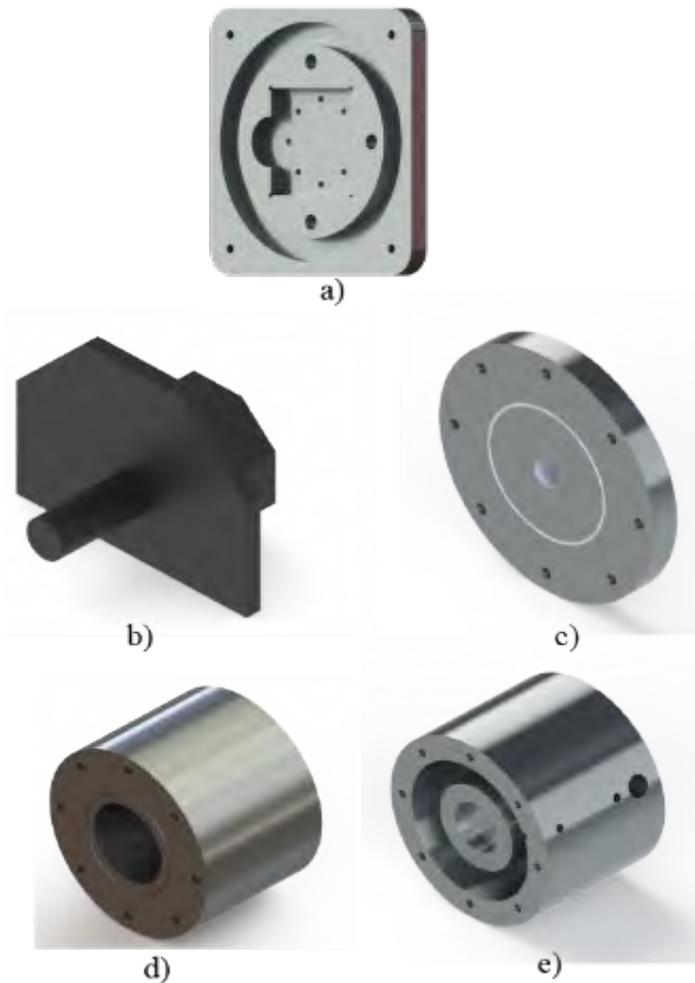
A continuación, se abordarán con más detalle los pasos realizados que fueron mencionados en el diagrama de la Fig. 1.

#### A. *Diseño CAD y maquinado de piezas*

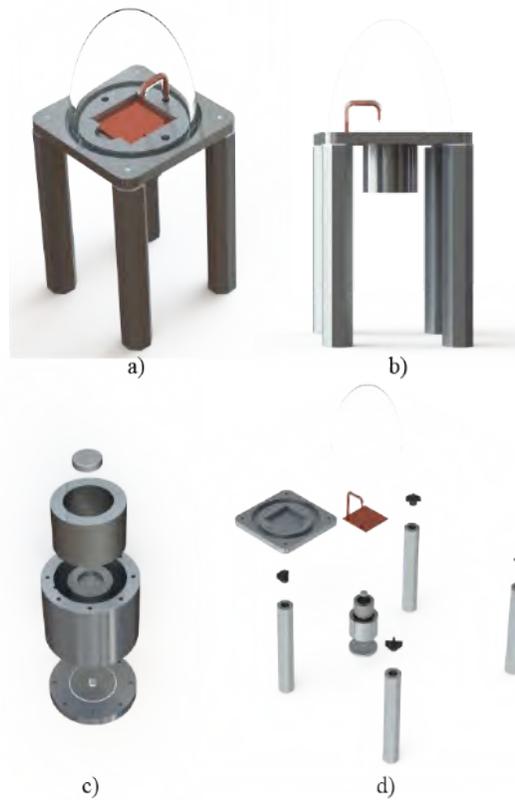
Una vez definidos los elementos requeridos se diseñaron los modelos de tipo CAD de las piezas de este ensamble para posteriormente ser maquinados en un CMV. Para esto fue necesario considerar las dimensiones de una campana de vacío, así como el área de operación del centro de maquinado a utilizar. En total se diseñaron 4 piezas cuyos modelos serían utilizados para su maquinado correspondiente. Estas piezas mostradas en la Fig.2 son la base del ensamble, el sistema de electroimán con enfriamiento (3 piezas) y los coples que serían utilizados

4

para el ensamble de la base sobre perfiles octagonales. Se debe aclarar que las piezas fueron diseñadas para ser maquinadas con procesos de impresión 3D, fresado y torneado. Las piezas se diseñaron para ser maquinadas con impresión 3D, estas fueron realizadas considerando una tolerancia de 1 mm y una geometría que requiriera la menor cantidad de material de soporte posible mientras que las otras piezas fueron realizadas de manera que su maquinado fuera hecho con el menor número de herramientas y cambios de eje, así como el uso de cortadores y tornillos comerciales. Posteriormente con fines expositivos se realizó una modelación de las piezas que no sería maquinadas para poder apreciar las dimensiones requeridas por todo el sistema ensamblado. Las piezas que son sólo con fines expositivos cuentan con las dimensiones originales de sus piezas son: electrodo, imán de neodimio, electroimán, perfiles octagonales, objetivo y campana de vacío. En la Fig. 3 se observa el ensamble de los elementos, así como las vistas normales y en explosión de los dos ensambles (base y sistema de electroimán con enfriamiento).

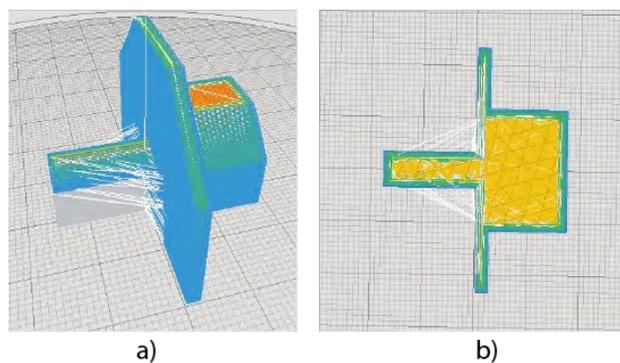


**Fig. 2.** Diseño de piezas a maquinar. a) Base principal. b) Cople de base a perfiles octagonales. c) Base de sistema de enfriamiento. d) Vista posterior del sistema de enfriamiento/magnético. e) Vista frontal del sistema de enfriamiento/magnético.



**Fig. 3.** Ensamble del sistema. a) Vista isométrica del prototipo. b) Vista frontal del prototipo.  
c) Ensamble de sistema magnético. d) Explosión de ensamble del prototipo.

Para el proceso de maquinado se usaron tres métodos diferentes: fresado en centro de maquinado vertical, Torno e impresión 3D. La impresión 3D fue realizada utilizando PLA a una densidad del 20% manteniendo una geometría de impresión intercalada como se muestra en la Fig. 4.



**Fig. 4.** a) Simulación de impresión 3D. b) Sección transversal de impresión.

Para las tres piezas a maquinar restantes, se maquinaron bajo los procesos de fresado y torneado sin darles ningún acabado y cuyas piezas finales se aprecian en la Fig. 5. Una vez maquinadas las piezas se ensamblaron según el CAD. En este punto se decidió diseñar e imprimir la pieza de la Fig. 6 con el fin de añadir estabilidad a la base.

6



Fig. 5. Piezas de aluminio maquinadas. a) Base principal. b) Base de sistema de enfriamiento. c) Sistema magnético.



Fig. 6. Pieza lateral.

Para el empaque de la campana de vacío se utilizó silicón de alta temperatura y se moldeó a la forma de la campana para tener el sello más ajustado a la pieza. Este ensamble se puede ver en la Fig. 7.

7

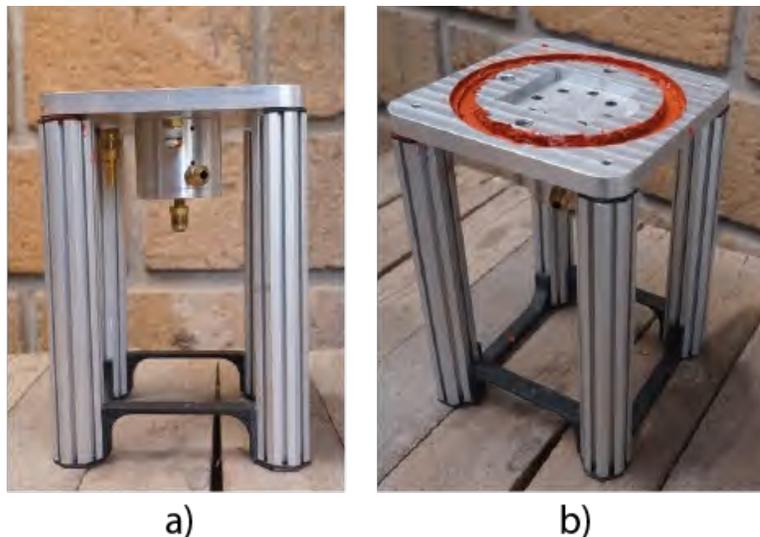


Fig. 7. Ensamble a) Vista lateral. b) Vista isométrica.

En total fueron requeridos los siguientes materiales y equipos:

a. Materiales

- Aluminio
- Placa de 20×20×2.54 cm
- 4x Perfil tipo bosch octagonales de 30 cm
- Barra redonda de aluminio de 3" de diámetro x 2.5" de largo
- Canal en C de ¼"× ¼"× 4"
- Barra redonda de cobre de ¼" de diámetro × 1" de largo
- Bomba de vacío de 75 micrones
- Bomba de refrigerante
- Campana de vacío de cristal
- MOT
- Variac 0-120 Volts AC a 5 Amps
- Fuente conmutada de 12 Volts DC a 8.5 Amps
- 2 x ventilador de 12 Volts
- Rectificador de alto voltaje
- Capacitor de alto voltaje
- Vacuómetro
- Impresiones 3D
- Silicón de alta temperatura
- Conexiones NTP para gas
- Mangueras de baja presión
- Tornillos con tuercas de varias medidas
- Sustratos de cristal
- Núcleo de acero 1026
- Cable magneto calibre 22

b. Equipo

- Centro de maquinado vertical
- Torno
- Impresora 3D (FDM)

### B. Sistema de vacío

Como fue revisado en secciones anteriores será necesario mantener un vacío dentro del espacio de trabajo para garantizar la generación de plasma. El vacío requerido para generar el arco de plasma debe de ser de entre 90 y 750 micrones [4], [6]. Sin embargo. Debido al fenómeno de descarga de arco es posible mantener la ionización con una menor presión algunos minutos después de que se genere el plasma debido al aumento en la temperatura del ánodo [7]. Para garantizar estas presiones, este sistema utiliza una bomba de vacío de 75 micrones conectadas a la base de aluminio a través de mangueras de alta/baja presión. como se muestra en la Fig. 8.

∞



Fig. 8. Sistema de vacío conectado.

Esta presión es medida a través de un vacuómetro ubicado en una terminal directamente debajo de campana para garantizar una medición directa del área de trabajo. Finalmente, la campana de vacío se encuentra colocada sobre la ranura de esta misma base. Se decidió utilizar una campana de vidrio borosilicatado debido a que este material es capaz de soportar altas temperaturas sin comprometer su integridad estructural. Es necesario mantener la campana llena con algún gas inerte (Argón) con el fin de garantizar la pureza de los materiales al momento de hacer los depósitos. Este gas ingresa a la cámara por medio de una conexión tipo “T” ubicada en la manguera que conecta a la bomba de vacío con la campana.

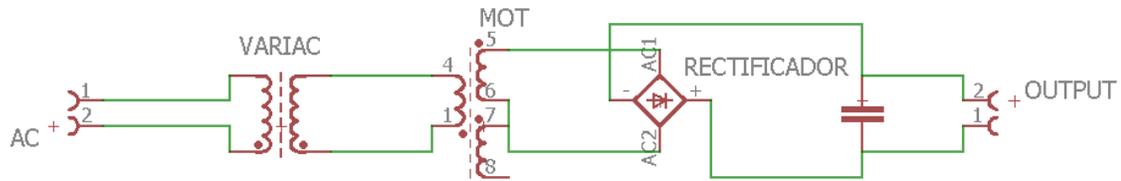
### C. Sistema de alto voltaje

Conociendo la ley de Paschen [4], [6], [7] se sabe que el voltaje de ruptura en la generación de plasma a través de la ionización de gases va a ser equivalente a la presión y a la distancia entre los electrodos. Además, considerando la teoría de la descarga del cátodo y descarga de arco se sabe que el voltaje requerido para ionizar un gas en un espacio cerrado será variable con el paso del tiempo mientras este proceso se haga de manera constante. De manera similar esta resistencia en el vacío va a cambiar si el gas dentro de la cámara también lo hace. No obstante, se conoce que el rango de ionización de los gases se encuentra entre 500 y 3000 volts [7]. Considerando lo anterior se seleccionó un sistema de alto voltaje variable en lugar de conectar uno fijo de manera que se tenga un mejor control sobre el voltaje introducido y así también adaptarlo a otros procesos o gases de ser necesario.

Para lograr este circuito de voltaje variable se utiliza un variac de 0 a 120 volts AC conectado en serie a un MOT con una relación de bobinas de entre 1:18 aproximadamente. Teniendo esta conexión es posible tener un rango de operación de entre 0 y 2200 Volts AC los cuales son convertidos a DC con la ayuda de un puente

rectificador de alto voltaje. De este puente salen el cátodo y ánodo que son conectados dentro de la cámara de vacío no sin antes ser filtrados contra picos de voltaje usando un capacitor de alto voltaje conectado en paralelo a las terminales de salida del puente rectificador. Este circuito se puede observar en la Fig. 9.

9



a)



b)

Fig. 9. a) Circuito de alto voltaje. b) Circuito de alto voltaje ensamblado.

Para fines prácticos de deposición por medio de este método se debe colocar al ánodo sobre el sustrato y al cátodo debajo del objetivo. Cabe mencionar que el ánodo del sistema se encuentra suspendido con la ayuda de una base de aluminio aislada con silicón de alto voltaje en el centro de la cámara con una punta de cobre que funciona como electrodo mientras que el cátodo es toda la base de aluminio.

#### D. Sistema de atracción magnética y de enfriamiento

Existen dos maneras de dirigir un plasma sobre un objetivo específico. El primero es usando a este tanto como objetivo como cátodo obligando al plasma a bombardear con electrones a este material. En el caso de que el objetivo no sea el cátodo en el proceso de ionización entonces se debe colocar a este sobre un campo magnético con el fin de atraer los electrones a la superficie de este objetivo y así erosionarlo. Este último caso será aquel en el cual el objetivo se trate de algún material cerámico con alta resistencia eléctrica. Para este proyecto se decidió implementar la segunda manera debido a que esto abre las puertas a utilizar materiales no conductivos como objetivos. La forma de este sistema se diseñó de manera que en el centro se encuentra un imán permanente de neodimio envuelto por un electroimán polarizado de manera inversa al sentido del imán permanente. Esta geometría nos va a ofrecer una forma de campo toroidal la cual presenta una mayor área de atracción, así como un ligero aumento en la velocidad de colisión del plasma contra el objetivo.

Para mantener la forma toroidal del campo es necesario igualar a la fuerza de atracción del electroimán con la fuerza magnética del imán permanente; el cual se conoce es de 55 Teslas. Usando las leyes de Ampere se calculó el número de vueltas necesarias para obtener esta cifra considerando un núcleo de hierro 1026 de 34

mm y .22 y un amperio de corriente. Es así como el número de vueltas resultó en 240. Una vez embobinado el núcleo mostrado en la Fig. 10 se desarrolló su sistema de enfriamiento.

10



Fig. 10. Electroimán.

Para esto se debe considerar un sistema de enfriamiento que garantice la integridad magnética del imán permanente debido a que su temperatura de operación no debe rebasar los 150°C. Este sistema se puede observar en los CAD de la Fig. 2 en la base de la pieza donde se ensambla el sistema de atracción magnética. Para esto se estará utilizando un sistema de enfriamiento de tipo cascada el cual inunda al núcleo de la pieza desde su base con líquido y lo fuga por la cara lateral de este manteniendo un flujo constante con la ayuda de una bomba de agua de 12 V. Además de esto se cuenta con 2 ventiladores de 12 volts ubicados de manera paralela al sistema con el fin de mantener un flujo constante de aire externamente. Todo este sistema es alimentado por una fuente conmutada de 12 Volts y en su totalidad requiere de 8.2 amperios para funcionar. Este sistema conectado se puede apreciar en la Fig. 11.



Fig. 11. Sistema de atracción magnética y enfriamiento.

### E. Pruebas

Para comenzar las pruebas de funcionamiento, primero se corroboró que el sistema de vacío funcionara de manera correcta. Para esto, la cámara fue cerrada, la bomba de vacío fue encendida y se midió que el vacío dentro del espacio se estuviera generando. Se consideró a esta prueba como finalizada una vez que la presión interna se encontrará por debajo de los 750 micrones como mínimo. De manera expositiva también se introdujo un pequeño globo de aire a la cámara con el fin de visualizar el cambio de presión dentro de esta. Esta prueba fue considerada exitosa a la marca del primer minuto durante el cual alcanzó una presión de 619 micrones como se muestra en la Fig.12.

11

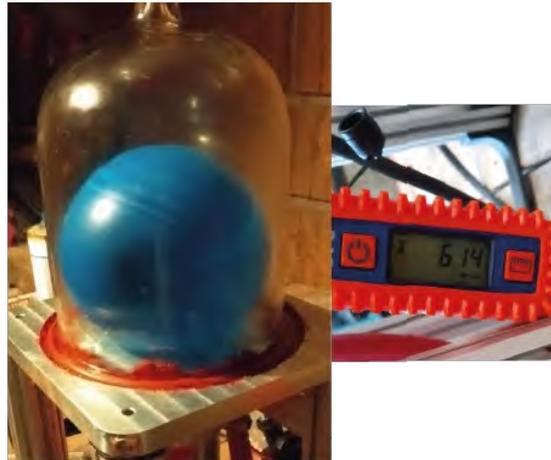


Fig. 12. Pruebas de vacío.

Posteriormente se realizó la primera prueba de los sistemas en conjunto para comprobar la generación de plasma con los equipos antes mencionados. El objetivo de esta prueba es la de generar un arco de luz en un ambiente contaminado para documentar tanto la presión como el voltaje a la cual se generó y después utilizar estos mismos valores para realizar las pruebas de erosión y depósito. Durante esta prueba se consiguió generar un arco eléctrico a una presión de 500 micrones y 550 Volts como se muestra en Fig.13.



Fig. 13. Plasma generado en pruebas de ionización.

### III. RESULTADOS

Se colocó una lámina de 1/8" de aluminio encima del cátodo. Por encima del área del electroimán y se cubrió con hojas de cristal que descansan sobre la ranura de la base que funge como cátodo. Se realizaron rondas de prueba de 1, 10 y 20 min cambiando las hojas de cristal con tal de ver el crecimiento del depósito en cada caso. Mientras las pruebas avanzaban fue más notorio cómo las láminas de cristal comenzaban a tener un cambio en su transparencia imprimiendo la forma de la base con una ligera película blanca como se muestra en Fig. 14. Considerando factores como la tonalidad del depósito, el desgaste sobre el objetivo y el hecho de que únicamente fueron manchadas las caras de las láminas que se encontraban directamente arriba del objetivo, se concluyó que la película generada sobre las láminas de cristal es de aluminio.

12

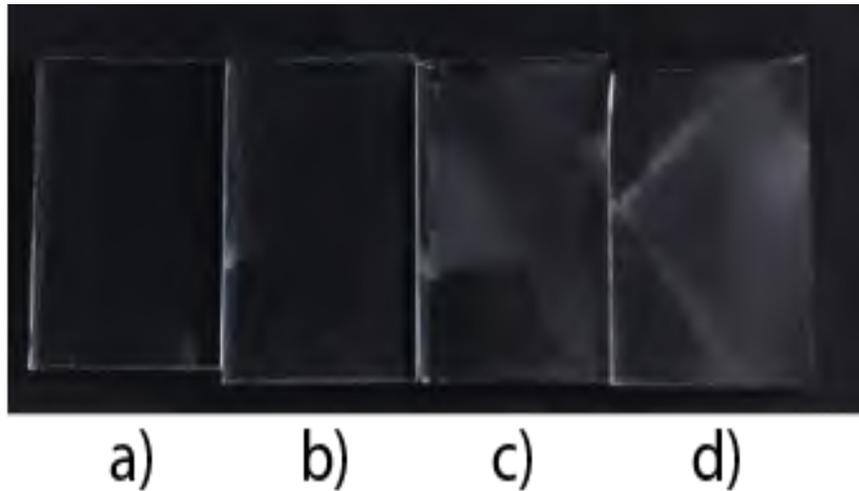


Fig. 14. Depósitos de aluminio sobre láminas de cristal a) lámina vacía. b) operación a 1 min. c) operación a 10 min. d) operación a 20 min.

Este proceso aún debe ser perfeccionado por lo que las pruebas de depósito se seguirán repitiendo; probando distintas láminas de materiales como objetivos, tiempos más extensos de funcionamiento y regiones de descarga en el plasma. Además, una vez encontrados los valores de trabajo óptimos, se empezarán a realizar depósitos sobre un ambiente completamente lleno de argón con el fin de no comprometer la pureza de esta película de material y comenzar a medir su grosor. Para esto se tiene propuesto utilizar un método de medición eléctrico. Este método parte de la idea de que la resistencia eléctrica de un material depende directamente del coeficiente de resistividad del elemento por el que se compone, de su longitud y de su área transversal. Utilizando un arreglo de resistencias en una configuración de puente de Wheatstone, es posible determinar la resistencia eléctrica del depósito generado sobre las láminas de cristal por más pequeña que esta pueda llegar a ser. Una vez conocida esta resistencia, el material depositado y sus dimensiones se podrá determinar su área transversal y así caracterizar al sistema con base a su tiempo de operación y al material depositado. En estos momentos existen distintas áreas de oportunidad que serán abordadas en futuros proyectos. Entre estos se encuentran: la implementación de un sistema de control que automatice al proceso y permita al usuario elegir el grosor que desea depositar, diseñar un sistema de atracción magnética que utilice únicamente electroimanes para evitar el desgaste sobre tiempo en el imán permanente y modificar la base del sistema para utilizar un cilindro de pírex en lugar de una campana de vacío con el fin de tener una mejor distribución de mangueras y alejar a las terminales de voltaje una de la otra para evitar cortocircuitos. Este sistema fue capaz de generar plasma en un ambiente contaminado y de erosionar con este una superficie metálica de aluminio; generando así un depósito visible sobre sustratos de cristal. El perfeccionamiento de esta máquina puede elevar el nivel de las investigaciones a nivel universitario debido a su fácil implementación y las múltiples aplicaciones que se le pueden dar a los depósitos por PVD.

#### IV. DISCUSIÓN

Al realizar procesos de PVD existen dos ramas que lo involucran, la deposición por erosión catódica y por evaporación térmica. Ambas son realizadas bajo un diferente principio físico y tienen diferentes resultados. En la Tabla 1 [7], se encuentra una comparación que muestra los diferentes parámetros técnicos en cada uno de estos métodos.

TABLA 1  
COMPARACIÓN ENTRE MÉTODOS DE PVD

Parámetro del proceso	Erosión catódica	Evaporación térmica
Vacío	Bajo	Alto
Partículas atomizadas	Dispersas	Direccionadas
Adhesión	Alta	Baja
Uniformidad del depósito	Alto	Baja
Tamaño del grano	Pequeño	Grande
Velocidad del depósito	Lento	Alto

Con esto se puede saber que los métodos de erosión catódica generan depósitos más densos y no son dependiente del tipo de objetivo utilizado por lo que se pueden usar objetivos metálicos o cerámicos sin importar su temperatura de evaporación. De igual manera la adhesión de estos depósitos es mayor por lo que las propiedades superficiales brindadas a los sustratos son diferentes a aquellas conseguidas con el método de evaporación. Una vez analizadas las ventajas y desventajas de ambos métodos debemos también se debe de realizar una comparación con las máquinas de PVD existentes en el mercado. Para este trabajo vamos a comparar a la máquina realizada en este documento contra aquellas tanto creadas con fines industriales, así como aquellas más pequeñas creadas con fines educativos o para su uso en laboratorios. Para esto vamos a usar a las máquinas de *Kolzer* [8], *Safematic* [9] y aquella realizada por el colectivo de investigación *The Thought Emporium* [10]. Esta comparación se encuentra en la Tabla 2.

TABLA 2  
COMPARACIÓN ENTRE MÁQUINAS

	Este trabajo	The Thought Emporium	Safematic CCU-010 HV	Kolzer MK63"
Dimensiones	d.140*150mm	d120*140 mm	570*360*350 mm	d1600*1450 mm
Portátil	Sí	Sí	Sí	No
Objetivos	Metales y cerámicos	Metales y cerámicos	Metales y cerámicos	Metales y cerámicos
Corriente permitida	2A	2A	10-100 mA	10-100 mA
Vacío	400 micrones	100 micrones	0.015 micrones	1 micron
Interfaz gráfica	No	No	Sí	Sí

Como se puede observar, la máquina de PVD desarrollada en este documento es similar a aquella desarrollada por el grupo de *The Thought Emporium* debido a que ambas se diseñaron considerando el uso de

materiales abiertos al público, así como su uso para aplicaciones básicas de recubrimientos. En comparación con máquinas destinadas a la industria como es el caso de la *Kolzer*, se puede apreciar que la principal diferencia se presenta en las dimensiones debido a que la *Kolzer* se utiliza para el recubrimiento de piezas grandes y al mayoreo. Debido a las dimensiones de esta máquina, esta suele estar fija en algún espacio dentro del cuarto en el que se tiene resguardada a diferencia de los otros ejemplos en los cuales la máquina puede ser montada y desmontada sin ninguna complicación para ahorrar espacio. Finalmente, si comparamos al sistema desarrollado en este trabajo contra una de la empresa *Safematic* la principal diferencia se verá reflejada en el sistema de vacío, así como en su interfaz gráfico debido a que este tipo de máquina está destinada para su uso dentro de laboratorios y suelen presentar menores tolerancias para realizar trabajos más específicos.

## V. CONCLUSIONES

Se espera que en un futuro este diseño sea mejorado y presente una mayor eficiencia para explorar nuevos métodos de focalización de partículas erosionadas, así como el depósito de aleaciones utilizando mezclas de gases a la par que una mezcla de objetivos dentro de una misma cámara. A pesar de tener las distintas áreas de oportunidad antes mencionadas, este prototipo logró demostrar que es posible generar tecnología enfocada al recubrimiento de materiales a pequeña escala que también es fácil de replicar. Después de analizar los resultados, se puede concluir que este sistema fue capaz de generar depósitos de aluminio de tipo PVD sobre sustratos de aluminio. La acumulación de material depositado es dependiente del tiempo por lo que se propone a futuro modelar una caracterización en términos de este con el fin de determinar el grosor de la película de material creada y posteriormente un sistema de control automático para la generación de películas de grosores específicos. Este sistema aún se encuentra con variaciones entre pruebas. Estas variaciones se deben a que no se encuentra en condiciones perfectas todo el tiempo y factores como la presión o la temperatura de los electrodos hacen el proceso pueda variar. Por esta razón se considera que este trabajo tiene un avance en pruebas experimentales de concepto y se tiene considerado también realizar su validación en condiciones de laboratorio.

## REFERENCIAS

- [1] L. A. Pothan, S. Thomas, "Polarity parameters and dynamic mechanical behavior of chemically modified banana fiber reinforced polyester composites," *Composites Science and Technology*, vol. 63, no. 9, pp. 1231-1240, Jul. 2003.
- [2] K. Hans, "Optical coatings deposited by ion and plasma PVD processes," *Surface and Coatings Technology*, vol. 112, no. 1-3, pp. 250-256, 1999, doi: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(98\)00764-6](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(98)00764-6)
- [3] K. Bouzakis, "Physical Vapor Deposition (PVD)", In Chatti S., Tolio T. (eds) *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2018, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7\\_6489-5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_6489-5)
- [4] A. Iqbal, N. Sakiba, D. M. Nuruzzamana, "Graphene-based nanocomposites and their fabrication, mechanical properties and applications", *Materialia*, vol. 12, 100815, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2020.100815>
- [5] K. Wasa, *Handbook of sputter deposition technology*, New Jersey, EEUU, Noyes Publications, 1992.
- [6] K. Heon, K. Sang, "Indoor Radon and Lung Cancer: Estimation of Attributable Risk, Disease Burden, and Effects of Mitigation" *Yonsei Medical Journal*, Nov; vol. 59, no. 9, pp. 1123-1130, 2018, doi: <https://doi.org/10.3349/ymj.2018.59.9.1123>
- [7] A. Baptista, "On the Physical Vapour Deposition (PVD): Evolution of Magnetron Sputtering Process for Industrial Applications", *Procedia Manufacturing*, Vol. 17, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.125>
- [8] Kolzer. *Machines*. Kolzer. <https://kolzer.com/es/maquinas> (accessed Dec 10, 2020).
- [9] Safematic GmbH. "CCU-010 LV Low Vacuum". Kolzer. <https://www.safematic.ch/ccu-010-lv-sputter-coater-vacuum-coating-system-switzerland.php> (accessed Dec 10, 2020).
- [10] The Thought Emporium." Vacuum Sputtering With A Homemade Magnetron". Hackaday. <https://hackaday.com/2019/07/23/vacuum-sputtering-with-a-homemade-magnetron/> (accessed Dec 10, 2020).

## Ergophthalmology around COVID-19

La ergoftalmología entorno a la COVID-19

Edgar Omar **López-de-León**<sup>1</sup>, Ángel **Morales-González**<sup>2</sup>, Flavio Arturo **Domínguez-Pacheco**<sup>3</sup>  
Alfredo **Cruz-Orea**<sup>4</sup>, Claudia **Hernández-Aguilar**<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO

<https://orcid.org/0000-0002-5880-8243> | [optoedg@gmail.com](mailto:optoedg@gmail.com)

<sup>2</sup>Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO

<https://orcid.org/0000-0003-2920-8078> | [anmorales@ipn.mx](mailto:anmorales@ipn.mx)

<sup>3</sup>Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO

<https://orcid.org/0000-0003-3561-7257> | [fartur@hotmail.com](mailto:fartur@hotmail.com)

<sup>4</sup>Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados, MÉXICO

<https://orcid.org/0000-0002-4329-5449> | [orea@fis.cinvestav.mx](mailto:orea@fis.cinvestav.mx)

<sup>5</sup>Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO

<https://orcid.org/0000-0002-0952-1510> | [\\*clhernandez@ipn.mx](mailto:*clhernandez@ipn.mx) (autor de correspondencia)

Recibido 17-03-2021, aceptado 03-06-2021.

### Abstract

Due to the confinement at home that is lived in various countries by the pandemic of the new coronavirus COVID-19 in Wuhan, China and its spread worldwide. Changes have been brought about in the daily life of the population, for example the way of carrying out academic and professional work. Work hours increased and with it the use of various visual devices to carry out activities. Therefore, the objective of this research was to evaluate the state of visual health and ergonomics by the population during the health contingency. An evaluation instrument generated in the "Microsoft Forms" software was applied to evaluate ergophthalmology and visual health. An absolute positive correlation was found in the symptoms of blurred vision and muscle pain in the male gender, while for the female gender an absolute correlation was reported in the glare symptom and a positive correlation in dry eye, red eye, burning, tearing and muscle pain. Therefore, it is of utmost importance to disseminate ergophthalmic measures to reduce the visual symptoms of the population.

**Index terms:** Visual health, ergonomics, COVID-19

### Resumen

Debido al confinamiento en casa que se vive en diversos países por la pandemia del nuevo coronavirus COVID-19 en Wuhan, China y su propagación a nivel mundial. Se han provocado cambios en la vida cotidiana de la población, por ejemplo, la forma de realizar las labores académicas y profesionales. Aumentaron las horas de trabajo y con ello el uso de diversos dispositivos visuales para efectuar las actividades. Por lo que, el objetivo de esta investigación fue evaluar el estado de salud visual y ergonomía de la población durante la contingencia sanitaria. Se aplicó un instrumento de evaluación generado en el software "Microsoft Forms" para evaluar la ergoftalmología y salud visual. Encontrando una correlación positiva absoluta en los síntomas de visión borrosa y dolor muscular en el género masculino, mientras que por el género femenino se reportó una correlación absoluta en el síntoma de deslumbramiento y una positiva en el ojo seco, ojo rojo, ardor, lagrimeo y dolor muscular. Por lo que, es de suma importancia difundir las medidas ergoftálmicas para aminorar la sintomatología visual de la población.

**Palabras clave:** Salud visual, ergonomía, COVID-19

## I. INTRODUCCIÓN

Faced with the outbreak of the new coronavirus COVID-19 in Wuhan, China, and its expansion to several countries around the world, the WHO (2020) at the beginning of December confirmed more than 66 million infected people and more than a million deaths [1]. Since the first positive cases appeared in China and later in different countries, preventive measures were disseminated to reduce infections in the population such as: use of masks, antibacterial gel, aerosols, continuous hand washing, keeping distance from people, monitoring of new cases and quarantines [2], [3], [4], [5].

The latter being a beneficial measure showing that it is an effective activity to reduce the infection rate, as long as it is applied in a compulsory and massive way, respecting preventive measures. Currently, the health contingency that is experienced has caused the confinement of millions of families in the world, which has modified habits of students and workers, for example changes in academic and work activities; which have been supported by various visual devices such as computers, electronic tablets, smartphones and high-resolution screens [6], [7]. Taking classes and sessions through video calling platforms such as zoom, skype and teams, in addition to using social networks and apps for continuous communication for longer. These new routines can cause damage to people's health, for example cardiovascular problems, obesity, mental, stress, muscular, visual, among others [8], [9], [10], [11].

For this reason, the new lapses to satisfy work and academic needs have reduced the visual health of the population that spends a lot of time in front of the screen of visual devices. It is estimated that between 50 and 90% of users suffer from some of the following symptoms: headache, red eye, eye fatigue, irritation, dry eye, burning, glare, excessive tearing, blurred vision, difficulty in focusing on distant objects and muscle pain, which is already associated with computer vision syndrome [12], [13], [14], [15]. These repercussions on vision are caused mainly by prolonged use of at least 1 visual device in a period of at least 3 hours per day. Excessive use, whether due to long hours of work or many hours of entertainment, generates that little by little symptoms begin to be detected in the body and as the hours go by, the symptoms become more acute. Being dry eye one of the main symptoms and a trigger for others [16], [17], [18], [19], [20], [21].

Some authors have reported a direct relationship between dry eye and exposure to blue light emitted by the screens of visual devices such as computers, electronic tablets and mobile phones [22], [23], [24], [25]. Dry eye in users of these electronic devices is a very common symptom and has been linked to reduced tear film break-up time. Either due to poor tear production or rapid evaporation of it, due to long hours of work in front of the visual screen [26], [27], [28], [29].

On the other hand, the blue light emitted by visual devices through their screens also affects the sleep cycle or circadian rhythm. Due to the over-excitation of the photoreceptors of the eye by the screens with high resolution, causing the secretion of melatonin to be inhibited and, likewise, sleep time is delayed. Another collateral damage with respect to the short time of sleep, is that the cellular re-epithelialization of the cornea is prevented since you do not sleep enough for this to occur normally [30], [31].

Therefore, in these times the importance of maintaining good ergonomics is accelerating, *i.e.* it is a discipline that is responsible for establishing an optimal workplace, where comfort, satisfaction and job security are sought; in order to maintain a good state of physical and psychological health as a beneficial factor to reduce eye and body symptoms when facing visual devices [32]. Since having a correct posture of the head, hands, arms and spine in front of the visual device can help the muscular and visual symptoms to appear less frequently [33-35]. The word *ergophthalmology*, which is a word composed of the words ergonomics and ophthalmology and refers to the study and investigation of eye discomfort caused in the workplace, by a physical or chemical agent [36].

As well as having adequate lighting in the work area, maintaining a correct distance between vision and the screen of the device in use, etc. [37], [38], [39].

Due to the changes made in the way of working in the face of the pandemic that is currently being experienced throughout the world, having school activities and workdays at home supported by the internet, multiple applications and various electronic devices. The objective of the research is to find the relationship

between ergonomic measures and visual symptoms of users of visual devices during the pandemic in population of Mexico City and its metropolitan area, in order to observe if the population presents changes in visual health given the new measures of academic and work during quarantine.

## II. MATERIAL AND METHODS

In this research, a form was applied that was generated in the software "Microsoft Forms" and was disseminated through the following link:

[https://forms.office.com/Pages/ResponsePage.aspx?id=DQSIkWdsW0yxEjajBLZtrQAAAAAAAAAAAAa\\_ZoH60VURVdTQ0IMNIVNVzdVRIQwUDJPVkw1VEE1Uy4u](https://forms.office.com/Pages/ResponsePage.aspx?id=DQSIkWdsW0yxEjajBLZtrQAAAAAAAAAAAAa_ZoH60VURVdTQ0IMNIVNVzdVRIQwUDJPVkw1VEE1Uy4u)

It was also disclosed through a Word document with the aim of knowing the visual health status of visual device users before and during the COVID-19 pandemic. It was applied to the student and work population (mainly teachers) of Mexico City and the metropolitan area that met the evaluation criteria described in Table 1. Inclusion criteria included individuals of any gender, aged 15 years and older and who use one or more visual devices during the health contingency, and as exclusion criteria, people suffering from an uncontrolled chronic or autoimmune disease, due to since some symptoms are part of the pathology and could be confused by the one caused at the time of being in front of the visual devices [31].

The form is made up of 5 sections. Starting with the personal data information. The second section covers knowledge about optimal ergonomic measurements during working time with visual devices (amount of luminance in the work area, working distance, body position and working angles). The third section evaluates the ocular symptomatology presented while working in front of the device screens, considering 2 times (before and during the health contingency). Continuing the section on eye care and finally, closing with a thank you section. The questionnaire was conducted based on the LEST method, which is designed to evaluate ergonomic measures [40].

TABLE 1  
EVALUATION CRITERIA

Inclusion criteria	Exclusion criteria
Any gender	People with autoimmune disease
Age 15 and over	People with uncontrolled chronic disease
User of 1 or more visual devices	

The questionnaire was based on the LEST method, which reports the established recommended ergonomic ranges [40]. We also used the likert scale to evaluate the qualitative and quantitative data on the questions regarding the state visual health of visual device users, the measurement scales are described in Table 2 [41].

TABLE 2  
ASSESSMENT SCALES

Variable	Sub variable	Method	Measurement scale
Visual device usage time	Hours	LEST method	0-2 h
			2-4 h
			4-6 h
			6-8 h
			+ 8 h
Ergonomic measurements	Illumination	Método method	200 lux
			350 lux
			400 lux
	Working distance		20-30 cm
		31-40 cm	
		41-50 cm	

4

	Viewing angle	51cm -more 5° 10° 20° 40°
	Arms and legs angle	30° 45° 90°
Visual symptomatology	Redness Tearing Burning Dry eyes Blurred vision Glare Headache Skeletal muscle pain	Likert Scale Null (0)- mild (1)- moderate (2)- severe (3)

A. STATISTIC ANALYSIS

The principal components analysis was applied, where the average variabilities of each of the components were determined [42]. Correlation of variables using Fitopac (version 2.1).

III. RESULTS

The number of participants who answered the form in both genders was 102 people (62 men and 60 women). In Fig. 1, the relationship between gender and age of the participants can be observed, with the greatest number of male participants being found in the age range of 21 to 30 years. The number of women is homogeneous in all ranks. On the other hand, academic work is performed between the ages of 15 to 40 years, highlighting more specifically between 15-20 years. While professional work is performed by users 21 years of age and older, highlighting the age of 41 and over. Finally, the performance of both jobs (professional and academic) is most practiced, between the ages of 21 to 40 years.

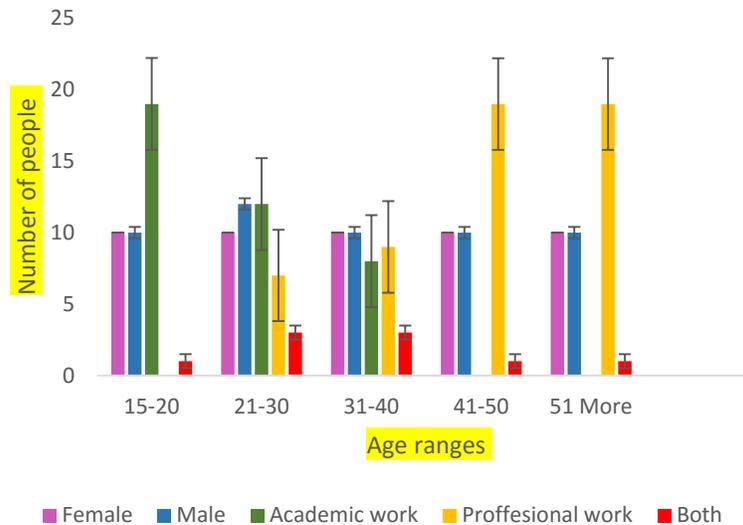


Fig. 1. Age groups of visual device users by gender and work activity

Table 2 shows the symptoms evaluated through the form, before and during the health contingency. It is shown in a comparative way between the male and female gender. Finding on the part of the male sex a greater increase in symptoms such as tearing, burning, dry eye, glare, headache and muscle pain during the health contingency that is currently experienced, going to a moderate state of 8, 2, 10, 5, 5 and 7% respectively. While for the female gender, the symptoms with the greatest change during quarantine are burning, glare and muscle pain at a severe level with 2, 5 and 5% respectively.

5

TABLE 3  
VISUAL SYMPTOMS BEFORE AND DURING THE HEALTH CONTINGENCY

Gender	Age range	Before the Pandemic							During the Pandemic								
		Redness	Tearing	Burning	Dry eyes	Blurred vision	Glare	Headache	Skeletal muscle pain	Redness	Tearing	Burning	Dry eyes	Blurred vision	Glare	Headache	Skeletal muscle pain
M A L E	15 a 20	0.3	0	0.4	0.3	0.3	0.5	0.4	0	0.9	0.2	1	0.7	0.7	0.6	1.1	0.4
	21 a 30	0.25	0.16	0.5	0.58	0.08	0.25	0.16	0.33	1.25	0.33	0.75	1.16	0.25	0.66	0.75	0.83
	31 a 40	0.3	0.1	0.6	0.5	0.4	0	0.3	0.7	1.2	0.5	1	1.2	0.9	1	1.3	1.4
	41 a 50	0.6	0.4	0.6	0.9	0.5	0.3	0.5	0.6	0.8	0.7	1.2	1.4	0.8	0.4	0.7	1.1
	51 More	0.2	0.1	0.2	0.3	0.8	0.1	0.4	0.8	0.6	0.6	0.8	0.9	1.2	0.6	0.9	1.5
F E M A L E	15 a 20	0.5	0.5	0.8	0.4	0.7	0.5	0.4	0.4	0.6	0.8	1.4	1.3	1.2	1.1	0.6	1.3
	21 a 30	0.4	0.4	0.3	0.6	0.4	0.5	0.4	0.2	1.2	1.2	1.6	1.3	1.3	1.8	1.5	1.6
	31 a 40	0.6	0.3	0.4	0.5	0.7	0.5	0.6	0.8	1.1	0.4	1.1	1.2	1	1.7	1	1.6
	41 a 50	0.6	0.3	0.5	0.8	0.7	0.2	0.4	0.6	1.5	0.7	1.1	1.3	1.5	0.7	1.4	1.5
	51 More	0.4	0.3	0.2	0.7	0.2	0.2	0.2	0.6	0.8	0.9	1.2	1.7	0.8	0.6	1.3	1.6

In Fig. 2, it can be observed that most of the users of visual devices are unaware of the optical measures to carry out their activities in their work area.

It is observed that 10% only know the position of the light when they are working, only 1% know that 500 lux is the amount of light that the work area must maintain. On the other hand, only 10% know the angle at which the arms and legs should be (90°). The ergonomic measure that the least population has knowledge of the working distance in front of the device screen (50 cm), since 40% know that it is between 50 cm.

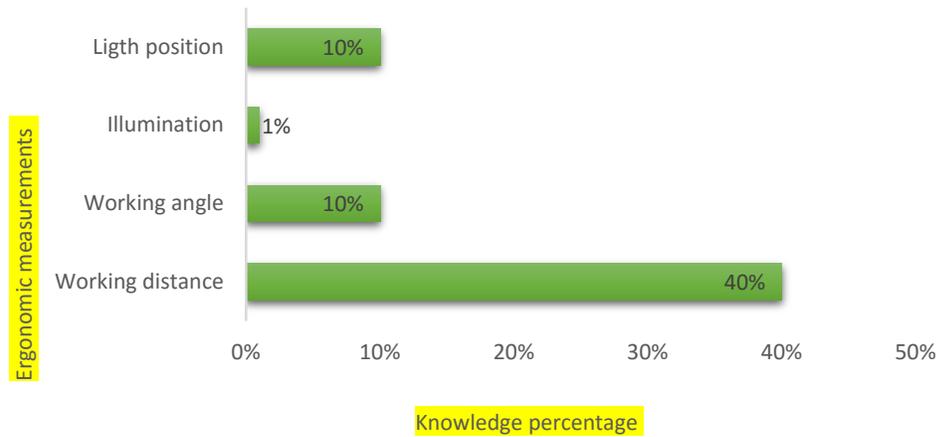


Fig. 2. Knowledge of ergonomic measurements

Fig. 3, shows the results on the use of visual devices in the female gender, before (left image) and during (right image) the COVID-19 pandemic. It is observed that the computer and the mobile phone maintain constant use before and during the pandemic. But the tablet increased use during the pandemic. On the other hand, the use of the image projector presented a decline in use, since they are more occupied in the classrooms generally.

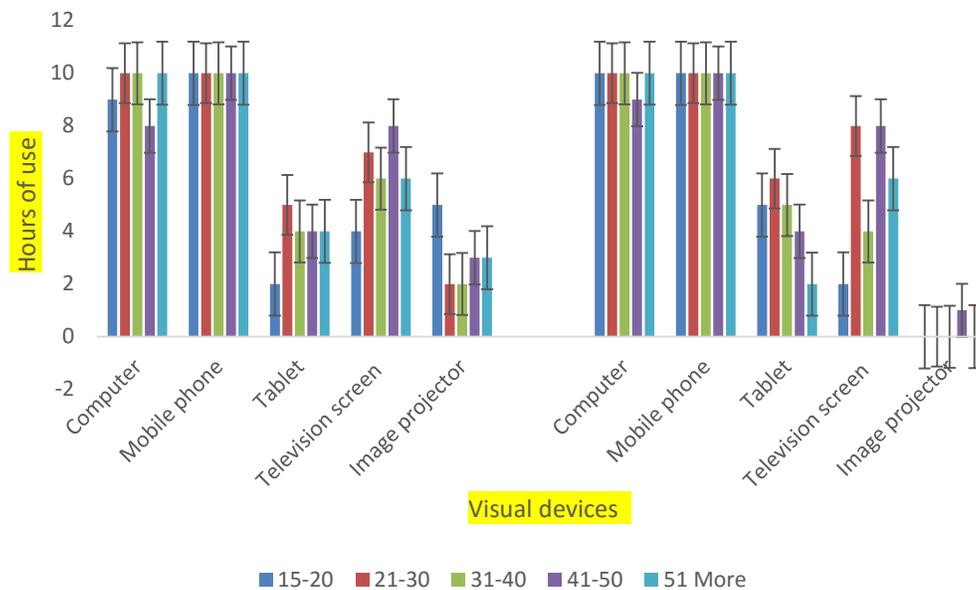


Fig. 3. Use of visual devices by age range before and during the COVID-19 pandemic, female gender

Fig. 4 shows the main component analysis of each of the elements and the correlation between the variables: Red eye, excessive tearing, burning, dry eye, blurred vision, glare, headache and muscle pain. The analysis was carried out by female and male gender and according to the age range of 15-20, 21-30, 31-40, 41-50 and 51-plus.

Regarding the evaluation of the male gender, it is observed that the symptoms with the greatest change before and during quarantine are: red eye from 3 to 15% in the age range of 21-30, headache from 3 to 11% in the range of 31-40 years. Likewise, an absolute positive correlation was found in the symptom of muscle pain and blurred vision (The angle formed between them is less than  $15^\circ$ , so the  $\cos \Phi > 0.96-1$ , where  $\Phi$  is the angle formed between the two vectors of the correlated variables, located in quadrant IV). Also, a moderate positive correlation was observed in the dry eye symptom (located in quadrant I). In addition to a positive correlation in tearing and burning (located in quadrant III and IV).

On the other hand, in the data of the female gender, the symptoms with the greatest change before and during the quarantine was observed, headache of 3 to 10% in the age range of 21-30 years. On the other hand, an absolute positive correlation was found in the glare symptom. (The angle formed between them is less than  $15^\circ$ , so the  $\cos \Phi > 0.96-1$ , where  $\Phi$  is the angle formed between the two vectors of the correlated variables, located in quadrant IV). A positive correlation was also found between the symptoms of dry eye, burning, muscle pain, tearing, and red eye (located in all quadrants). Being the most reported symptoms by the female population.

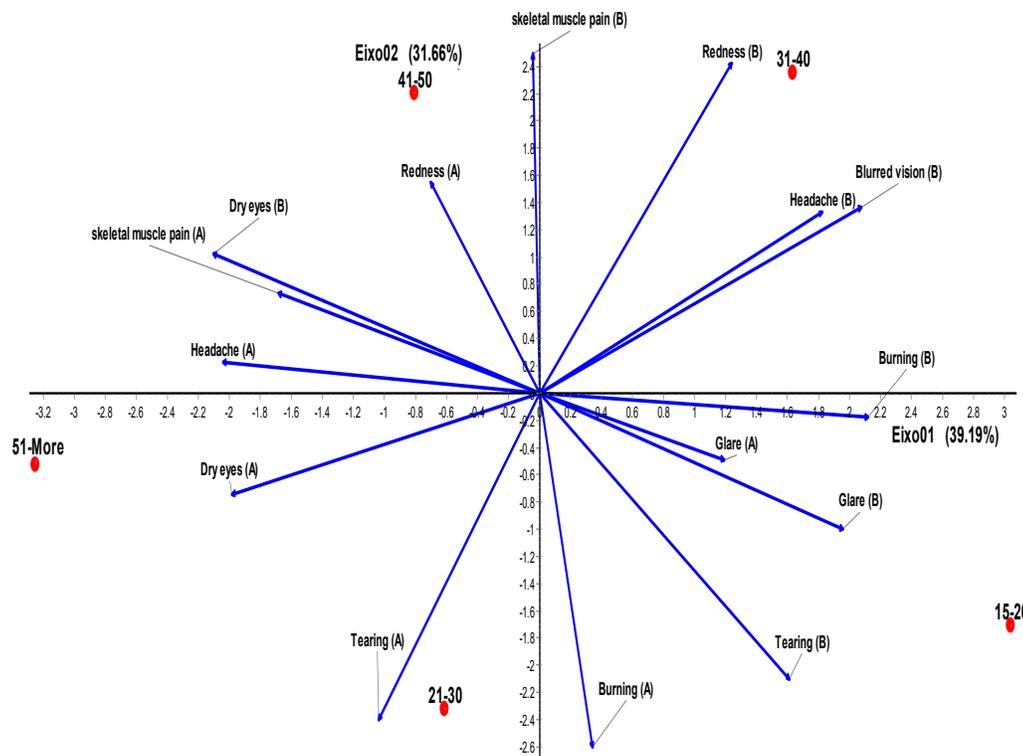


Fig. 4a. Analysis of principal components and correlation of variables before and during the health contingency: Female gender.

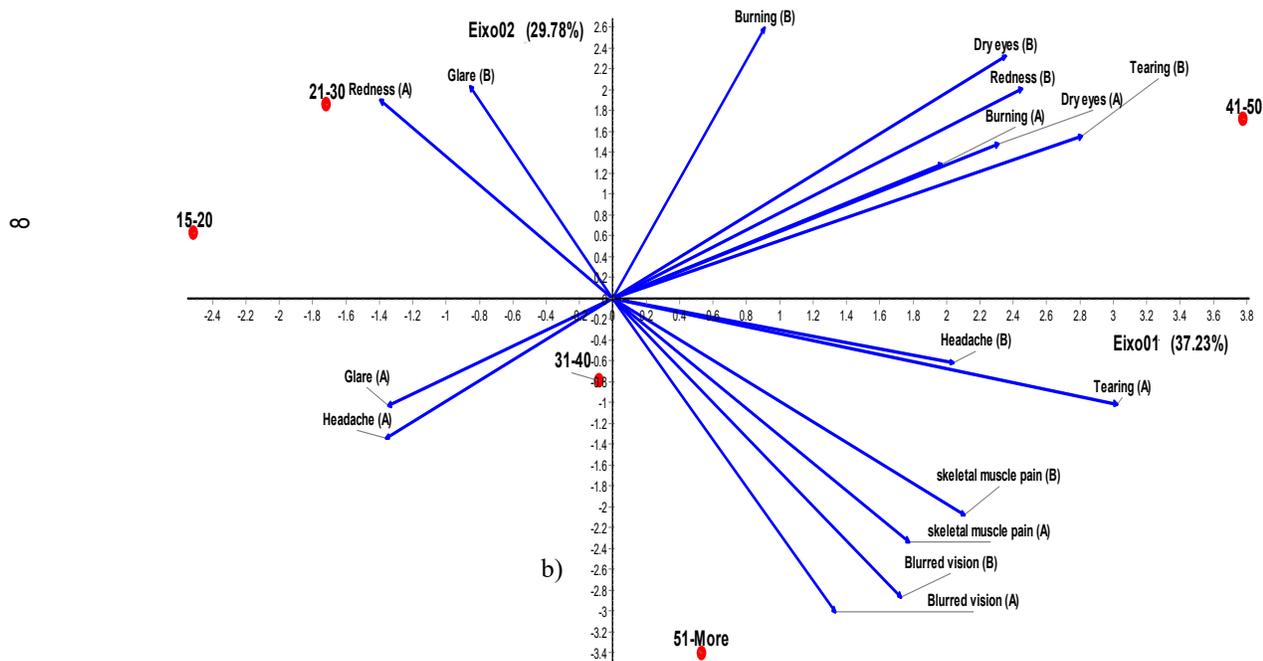


Fig. 4b. Analysis of principal components and correlation of variables before and during the health contingency: Male gender.

#### IV. DISCUSSION

According to the results found in this research, it is reflected that confinement at home due to the COVID-19 pandemic has influenced the time of use of visual devices to perform professional and academic work. Finding a relationship between ignorance of recommended ergonomic measures at the time of academic or work tasks and the increase in working hours per day, supported by various visual devices such as mobile phones, computers, screens and tablets. Highlighting the absolute positive correlations of burning symptoms, blurred vision and muscle pain in the male gender. While the female gender reflected a moderate positive correlation between the symptoms of red eye, dry eye and muscle pain. Men being the gender with the greatest damage to visual health.

These deductions can be supported by the results of Carroll (2020), who, together with his work team, reported changes in habits among the Canadian population during quarantine. They applied an online form to various families to evaluate their daily life, which reported changes in unhealthy diet, increased stress and the propitious of a more sedentary life due to the excessive use of screens [43].

On the other hand, Von Gaudecker (2020) who together with his collaborators applied a form to the Dutch population, with the intention of identifying the modification of working hours from home according to the preventive measures imposed by the country. They observed that working hours decreased for those with a low academic degree compared to those with a higher education degree [44]. Regarding the part of ocular symptoms, the results are similar to those reported by Boadi-Kusi (2020) and collaborators, who applied a questionnaire to evaluate the work area and carried out a visual health study on employees of the administrative area of the University of the Cape Coast, where they found the presence of computer vision syndrome in just over half of the users of this visual device, since the majority used the computer for 6 hours or more [45].

Likewise, other works reflect that a large part of the ocular symptoms such as irritation, headache, dryness, photophobia, eye pain, red eye, excessive blinking and difficulty in focusing on objects is associated with the use of visual devices and erroneous ergonomic measures. As demonstrated by Atalhi (2020), Kharel and Khatri (2018) and their group of researchers respectively, who evaluated these characteristics in university students, also reporting an increase in visual symptoms among users of electronic devices [46], [47]. Highlighting the presence of the most common symptoms of computer vision syndrome such as headache and dry eye, which worsens as hours go by working in front of the computer screen [48], [49], [50].

As mentioned previously, some of these symptoms presented an absolute positive correlation in the male gender, during the work at home that is currently carried out. In other words, men presented greater damage to visual health compared to women. This could be because women are more careful with their health in general, as demonstrated by Unden and Elofsson (2006), when assessing different factors to self-assess the health of men and women. Reporting that both genders care about their health, but with the difference that the female gender gives priorities to aspects such as sleep and visits to the doctor. While the male gender leans towards physical and cultural activities [51].

Due to all of the above and in the face of new forms of professional and academic work, new measures have been taken to continue producing in the workplace and continue learning in the educational area. For example, the population has been re-educating itself to a new way of carrying out activities in these areas remotely, supported by new tools and virtual applications that facilitate group communication with school or work colleagues, bosses and teachers [52], [53]. Thus, this research work, comparing the results found by other authors, proposes taking recommended ergophthalmic measures together to modify and educate a new way of working at home, helping to reduce the visual and muscular symptoms that occur after working long hours. Such measures are to have lighting of 500 lux in the activity area, maintain a working distance between the view and the screen of the device in use, of 50 cm [54], [55]. In addition to maintaining a body position of legs and arms at an angle of  $90^\circ$  -  $110^\circ$  and an angle of gaze towards the screen  $20^\circ$  (see Fig. 5) [56], [57].

Finally, it is recommended to include in the daily diet, foods rich in vitamins A, C, D and E, Lutein and Zeaxanthin. Since these nutrients help protect visual health against pathologies such as: cataract, dry eye syndrome and macular degeneration. Most of these nutrients act as antioxidants, that is, they protect cells from free radicals and the damage they generate. Some foods that contain these nutrients are: carrots, broccoli, cabbage, spinach, melon, mango, milk, beef, chicken, salmon, potatoes, tomatoes, kiwi and red-green peppers [58].

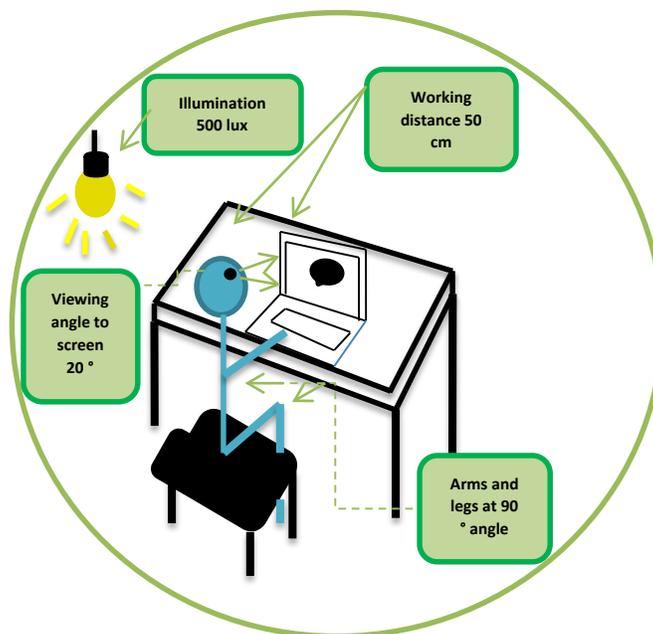


Fig. 5. Recommended ergophthalmological measures.

## V. CONCLUSIONS

The research work through field research showed no knowledge of ergonomic measures by the population and allowed to know the continuous suffering of ocular symptoms in long hours during professional and academic work from home during the health contingency by the COVID-19. Likewise, it reflects an absolute positive correlation between the symptoms of burning, vision and muscle pain in the male gender. For the female gender, a moderate positive correlation between dry eye, red eye and muscle pain.

On the other hand, through the photoacoustic spectroscopy test it was observed that all the screens of the visual devices meet their objective of protection against blue light, although there are some that protect in a greater range than others, which may depend on the material with which they are manufactured since the black hue of the screen can interfere with the absorption and transmission of blue light.

Therefore, it is of utmost importance to implement recommended ergophthalmic measures during work at home in front of visual devices during quarantine. Likewise, in the office and schools when normality is returned after the current pandemic. In addition to acquiring lenses with filters, anti-reflective or blue ray to protect the eyes against the blue light emitted by electronic devices and to consume foods rich in vitamin A in the daily diet.

## GLOSSARY

*Ergophthalmology*: New interdisciplinary area of study and investigation of eye discomfort caused in the workplace, by a physical or chemical agent.

*Tearing*: Much tear production

*Lux*: International System lighting intensity unit

## ACKNOWLEDGEMENTS

Supported by Postgraduate in Systems Engineering SEPI-ESIME-Zacatenco, IPN, CONACYT y BEIFI.

## REFERENCES

- [1] OMS. *Coronavirus disease 2019 (COVID-19) Situation report – 52*. (accessed Dec. 9, 2020). [https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/20200312-sitrep-52-covid-19.pdf?sfvrsn=e2bfc9c0\\_2](https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/20200312-sitrep-52-covid-19.pdf?sfvrsn=e2bfc9c0_2)
- [2] S. P. Adhikari, S. Meng, Y. J. Wu, Y. P. Mao, R. X. Ye, Q. Z. Wang, Q. Z. H. Zhou, "Epidemiology, causes, clinical manifestation and diagnosis, prevention and control of coronavirus disease (COVID-19) during the early outbreak period: a scoping review," *Infectious diseases of poverty*, 2020, vol. 9, pp. 1-12.
- [3] European Centre for Disease Prevention and Control, *Guidelines for the use of non-pharmaceutical measures to delay and mitigate the impact of 2019-nCoV*, 2020.
- [4] P. A. Mackowiak, "The origin of quarantine," *Clin Infect Dis.*, 2002, vol. 35, pp. 1071-1072.
- [5] W. E. Parmet, M. S. Sinha, "Covid-19 he law and limits of quarantine," *New England Journal of Medicine*, 2020, vol. 382, pp. e28.
- [6] S. Agarwal, N. S. Punn, S. K. Sonbhadra, P. Nagabhusan, K. K. Pansian, P. Saxena, "Unleashing the power of disruptive and emerging technologies amid COVID 2019: A detailed review", 2020, pp. 11507.
- [7] R. Sánchez, C. Pérez, C. Juárez, N. M. Vélez, M. Jiménez, "Risk factors for asthenopia among computer terminal operators," *Salud pública de México*, 1996, vol. 38, pp. 189-196.
- [8] A. V. Mattioli, M. Ballerini Puviani, "Lifestyle at time of COVID-19, how could quarantine affect cardiovascular risk," *Am J lifestyle*, 2020, vol.14, pp. 240-242.
- [9] S.K. Brooks, R. K. Webster, L. E. Smith, L. Woodland, S. Wessely, N. Greenberg, "The psychological impact of quarantine and how to reduce it: rapid review of the evidence" *Lancet*, 2020, vol. 395, pp. 912-920.
- [10] H. Fadinger, J. Schymik, "The costs and benefits of home office during the covid-19 pandemic: Evidence from infections and an input-output model for germany," *COVID Economics: Vetted and Real-Time Papers*, 2020, vol. 9, pp. 107-134.
- [11] B. Sen-Crowe, M. McKenney, A. Elkbuli, "Social distancing during the COVID-19 pandemic: Staying home save lives," *Am J Emerg Med.*, 2020, vol. 38, pp. 1519-1520.

- [12] M. M. Robertson, V. M. Ciriello, A. M. Garabet, "Office ergonomics training and a sit-stand workstation: Effects on musculoskeletal and visual symptoms and performance of office workers," *Appl Ergon.*, 2013, vol. 44, pp. 73-85.
- [13] J. C. Read, I. Bohr. "User experience while viewing stereoscopic 3D television," *Ergonomics*, 2014, vol. 57, pp. 1140-1153.
- [14] A. Abeeli A, S. B. M. Tamrin, N. Y. Guan, K. Karupphiah, "Potential of participatory ergonomic intervention approaches to reduce work-related musculoskeletal disorders among office workers: a review," *Malay J Human Factors Ergon.*, 2017, vol. 2, pp. 1-14.
- [15] L. Zhang, Y. Q. Zhang, J. S. Zhang, L. Xu, J. B. Jonas, "Visual fatigue and discomfort after stereoscopic display viewing," *Acta ophthalmol.* 2013, vol. 91, pp. e149-e153.
- [16] A. Sen, S. A. Richardson, "Study of computer-related upper limb discomfort and computer vision syndrome," *J human ergol.*, 2007, vol. 36, pp. 45-50.
- [17] J. Bali, N. Navin, B. R. Thakur, "Computer vision syndrome: A study of the knowledge, attitudes and practices in Indian Ophthalmologists," *Indian J Ophthalmol.*, 2007, vol. 55, pp. 289.
- [18] D. J. Bhandari, S. Choudhary, V. G. Doshi, "A community-based study of asthenopia in computer operators," *Indian J Ophthalmol.* 2008, vol. 56, pp. 51.
- [19] M. Logaraj, V. Madhupriya, S. K. Hegde, "Computer vision syndrome and associated factors among medical and engineering students in Chennai" *Ann Med Health Sci Res.*, 2014, vol. 4, pp. 179-185.
- [20] S. H. Al Rashidi, H. Alhumaidan, "Computer vision syndrome prevalence, knowledge and associated factors among Saudi Arabia University Students: Is it a serious problem?," *Int J Health Sci.*, 2017, vol. 11, pp. 17.
- [21] P. E. Garcia, D. García, "Factors Associated to the Computer Vision Syndrome Due to the Use of Computers," *Investig Andina.*, 2010, vol. 12, pp. 42-52.
- [22] S. Jaiswal, L. Asper, J. Long, A. Lee, K. Harrison, B. Golebiowski, "Ocular and visual discomfort associated with smartphones, tablets and computers: what we do and do not know," *Clin Exp Optom.*, 2019, vol. 102, pp. 463-477.
- [23] E. O. López, J. A. Morales, E. Madrigal, E. Madrigal, I. Álvarez, M. T. Sumaya, A. Morales, "Efficacy of predictive holistic indicator for prevention of damage to visual health" *Int J Clin Exp Med.*, 2017, vol. 10, pp. 12525-12531.
- [24] M. M. Maducdoc, A. Haider, A. Nalbandian, J.H. Youm, P. V. Morgan, R. W. Crow, "Visual consequences of electronic reader use: A pilot study," *Int Ophthalmol.*, 2016, vol. 37, pp. 433-439.
- [25] P. Ranasinghe, W. S. Wathurapatha, Y. S. Perera, D. A. Lamabadusuriya, S. Kulatunga, N. Jayawardana, P. Katulanda, "Computer vision syndrome among computer office workers in a developing country: an evaluation of prevalence and risk factors," *BMC Research Note*, 2016, vol. 9, pp. 150.
- [26] M. M. Van Tilborg, P. J. Murphy, K. S. Evans, "Impact of dry eye symptoms and daily activities in a modern office," *Optom. Vis. Sci.*, 2017, vol. 94, pp. 688-693.
- [27] N. Yokoi, M. Uchino, Y. Uchino, M. Dogru, M. Kawashima, A. Komuro, S. Kinoshita, "Importance of tear film instability in dry eye disease in office workers using visual display terminals: the Osaka study," *American Journal of Ophthalmology*, 2015, vol. 4, pp. 748-754.
- [28] T. Schlote, G. Kadner, N. Freudenthaler. "Marked reduction and distinct patterns of eye blinking in patients with moderately dry eyes during video display terminal use," *Graefe's archive for clinical and experimental ophthalmology*, 2004, vol. 242, pp. 306-312.
- [29] T. Hikichi, A. Yoshida, Y. Fukui, T. Hamano, M. Ri, K. Araki, Y. Danjo, "Prevalence of dry eye in Japanese eye centers," *Graefe's archive for clinical and experimental ophthalmology*, 1995, vol. 233, pp. 555-558.
- [30] E. Arnault, C. Barrau, C. Nanteau, P. Gondouin, K. Bigot, F. Viénot, J. A. Sahel, "Phototoxic action spectrum on a retinal pigment epithelium model of age-related macular degeneration exposed to sunlight normalized conditions," *PloS one.*, 2013, vol. 8, pp. e7139.
- [31] J. J. Kanski, *Clinical Diagnosis in Ophthalmology*, Mosby-Year Book, USA, 2016.
- [32] S. I. Samaei, A. Tirgar, N. Khanjani, M. Mostafaei, M. Bagheri Hosseinabadi, M. Amrollahi, "Assessment of ergonomics risk factors influencing incidence of musculoskeletal disorders among office workers," *Health and Safety at Work*, 2015, vol. 5, pp. 1-12.
- [33] M. B. Abelson, G. W. Ousler III, "How to fight computer vision syndrome," *Review Ophthalmol.*, 1999, vol. 6, pp. 114-116.
- [34] M.M. Robertson, V. M. Ciriello, A. M. Garabet, "Office ergonomics training and a sit-stand workstation: Effects on musculoskeletal and visual symptoms and performance of office workers," *Appl Ergon.*, 2013, vol. 44, pp. 73-85.
- [35] J. K. S. Parihar, V. K. Jain, P. Chaturvedi, J. Kaushik, G. Jain, A. K. Parihar, "Computer and visual display terminals (VDT) vision syndrome (CVDTs)," *Med J Armed Forces India.*, 2016, vol. 72, pp. 270-276.
- [36] R. Facci, "Ergofthalmología", *Cienc. Trab.*, 2004, pp. 94-99.
- [37] R. A. Burgess, A. Plooy, D. Ankrum, "The Effect of Imposed and Self-selected Computer Monitor Height on Posture and Gaze Angle," *Clin Biomech.*, 1998, vol. 13, pp. 584-592.
- [38] H. M. S. Thorud, M. Helland, A. Aaras, T. M. Kvikstad, L.G. Lindberg, G. Horgen, "Eye-related pain induced by visually demanding computer work," *Optom. Vis. Sci.*, 2012, vol. 89, pp. E452-E464.
- [39] J. Bali, N. Navin, B. R. Thakur, "Computer vision syndrome: A study of the knowledge, attitudes and practices in Indian Ophthalmologists," *Indian J Ophthalmol.*, 2007, vol. 55, pp. 289.

- [40] Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de proyectos de ingeniería. *e-LEST versión 1.1*. [programa computacional]. España.
- [41] H. N. Boone, D. A. Boone, "Analyzing likert data," *Journal of extension.*, 2012, vol. 50, pp. 1-5.
- [42] W. Tadesse, E. Bekele, "Factor analysis of yield in grasspea (*Lathyrus sativus* L.)," *Lathyrus Lathyrism Newsletter*, 2001, vol. 2, pp. 416-421.
- [43] N. Carroll, A. Sadowski, A. Laila, V. Hruska, M. Nixon, D. W. Ma, J. Haines, "The impact of COVID-19 on health behavior, stress, financial and food security among middle to high income Canadian families with young children," *Nutrients*, 2020, vol. 12, pp. 2352.
- [44] H. Von Gaudecker, M. Holler, R. Janys, L. Siflinger, C. Zimpelmann, "Labour supply in the early stages of the CoViD-19 Pandemic: Empirical Evidence on hours, home office, and expectations," *Social Science Research Network*, 2020.
- [45] S. B. Boadi-Kusi, S. L. Abu, G. O. Acheampong, P. O. Adueming, E. K. Abu, "Association between Poor Ergophthalmologic Practices and Computer Vision Syndrome among University Administrative Staff in Ghana," *J Environ Public Health*, 2020, pp. 7516357.
- [46] A. Altalhi, W. Khayyat, O. Khojah, M. Alsalmi, H. Almarzouki, "Computer Vision Syndrome Among Health Sciences Students in Saudi Arabia: Prevalence and Risk Factors," *Cureus*, 2020, vol. 12, pp. e7060-e7066.
- [47] R. Kharel Sitaula, A. Khatri, "Knowledge, Attitude and practice of Computer Vision Syndrome among medical students and its impact on ocular morbidity," *J Nepal Health Res Counc.*, 2018, vol. 16, pp. 291-296.
- [48] C. Blehm, S. Vishnu, A. Khattak, S. Mitra, R. Yee, "Computer vision syndrome," *Survey of ophthalmology*, 2005, vol. 50, pp. 253-262.
- [49] L. Mowatt, C. Gordon, A. B. R. Santosh, T. Jones, "Computer vision syndrome and ergonomic practices among undergraduate university students," *Int J Clin Pract.*, 2017, pp. 1-7.
- [50] M. Rosenfield, R. Gurevich, E. Wickware, M. Lay M, "Computer vision syndrome: accomodative and vergence facility," *J. Behav Optom.*, 2010, vol. 21, pp. 119-22.
- [51] A. L. Undén, S. Elofsson, "Do different factors explain self-rated health in men and women?," *Gend med.*, 2006, vol. 3, pp. 295-308.
- [52] C. Aldama-Reyna, J. Aldama-Guardia, L. Zelada-Abanto, "AMPLITUD FOTOACÚSTICA DE UN PZT IRRADIADO CON PULSOS LÁSER UV-VIS DE DIFERENTE ENERGÍA," *Sciéndo*, 2015, vol. 17, pp. 70-79.
- [53] J. M. Clausen, B. Bunte, E. T. Robertson, "Professional Development to Improve Communication and Reduce the Homework Gap in Grades 7-12 during COVID-19 Transition to Remote Learning," *Journal of Technology and Teacher Education*, 2020, vol. 28, pp. 443-451.
- [54] E. Janosik, J. Grzesik, "Influence of different lighting levels at workstations with video display terminals on operators work efficiency," *Med Pr.*, 2003, vol. 54, pp. 123-132.
- [55] M. Logaraj, V. Madhupriya, S. K. Hegde, "Computer vision syndrome and associated factors among medical and engineering students in Chennai," *Ann Med Health Sci Res.*, 2014, vol. 4, pp. 179-185.
- [56] S. Yano, M. Emoto, T. Mitsuhashi, "Two factors in visual fatigue caused by stereoscopic HDTV images," *Displays*, 2004, vol. 25, pp. 141-150.
- [57] L. Mowatt, C. Gordon, A. B. R. Santosh, T. Jones, "Computer vision syndrome and ergonomic practices among undergraduate university students," *Int J Clin Pract.*, 2018, vol. 72, pp. 1-7.
- [58] D. Hodelin-Fuentes, "Nutrition in Our Visual Health," *Peer Res Nest.*, 2019, vol. 1, pp. 1-2.

## Mantenimiento centrado en la confiabilidad a equipos en industria de conservas de atún

Maintenance focused on reliability of equipment in the tuna canning industry

Jorge Luís Muñoz Cevallos<sup>1</sup>, Manuel Cantos Macías<sup>2</sup>

Universidad Técnica de Manabí, ECUADOR

<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9502-3779> | [jorgmu--990@hotmail.com](mailto:jorgmu--990@hotmail.com)

Estudiante de la maestría en mantenimiento Industrial,  
mención gestión eficiente del mantenimiento, Instituto de Posgrado.

<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0001-7589-0210> | [mcantos@utm.edu.ec](mailto:mcantos@utm.edu.ec)

Docente del departamento de Mecánica de la Facultad  
de Ciencias Matemáticas, Física y Química.

Recibido 17-03-2021, aceptado 03-06-2021.

### Resumen

El presente trabajo tiene la finalidad identificar y solucionar los problemas específicos que se encuentran en una línea de producción de conservas de atún de la Empresa EUROFISH de Manta, mediante la implementación del programa de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) en las máquinas presentes en la línea en mención. En la industria de las conservas, el RCM a menudo se considera la demanda recursos. Sin embargo, es posible hacer que el proyecto sea manejable comenzando con un sistema de evaluación de los equipos críticos. Para llevar a cabo este proceso, se aplicaron los métodos: análisis de criticidad y el análisis de efectos y modos de fallas (AMEF). Se diseñó el plan de mantenimiento de acuerdo a lo detallado por el AMEF y el Diagrama de Pareto, donde se especifican tareas de prevención que no solo se concentran en operaciones de lubricación o engrase, sino el empleo de procesos de inspección y control en todas las medidas de mantenimiento que se han propuesto. Se encontró que el mejor indicador para medir la confiabilidad es el tiempo promedio entre paradas (MTBF) que indica un incremento en la confiabilidad del equipo y una mejora en la calidad de los trabajos de mantenimiento a 3,59, lo que se refleja en la disponibilidad de los equipos de la línea de producción. Pues al aplicar el plan de mantenimiento propuesto se logra un 87%, lo que se considera un porcentaje aceptable dada la situación de la empresa.

**Palabras clave:** confiabilidad, mantenimiento, análisis de efectos, modo de fallas, industria, conservas de atún.

### Abstract

The purpose of this work is to identify and solve the specific problems found in a canned tuna production line of the Manta EUROFISH Company, through the implementation of the maintenance program focused on reliability (RCM) in the machines present. On the line in question. In the canning industry, RCM is often considered resource demanding. However, it is possible to make the project manageable starting with a critical equipment evaluation system, to carry out this process, the methods were applied: criticality analysis and analysis of effects and failure modes (FMEA). The maintenance plan was designed according to the detailed by the FMEA and the Pareto Diagram, where prevention tasks are specified that not only concentrate on lubrication or greasing operations, but the use of inspection and control processes in all the maintenance measures that have been proposed. It was found that the best indicator to measure reliability is the mean time between stops (MTBF), which indicates an increase in the reliability of the equipment and an improvement in the quality of maintenance work to 3.59, which is reflected in the availability of production line equipment. Well, when applying the proposed maintenance plan, 87% is achieved, which is considered an acceptable percentage given the situation of the company.

**Keywords:** reliability, maintenance, effects analysis, failure mode, industry, canned tuna.

## I. INTRODUCCIÓN

Los programas de mantenimiento actuales deben garantizar la confiabilidad y el tiempo de funcionamiento del equipo, con el fin de alcanzar los objetivos y parámetros predefinidos. En muchos entornos de fabricación, la condición del equipo o proceso tiene un impacto significativo en la cantidad y calidad de las unidades producidas. [1]. Los investigadores de todo el mundo se esfuerzan por desarrollar y aplicar nuevas técnicas y metodologías para mejorar los procesos de mantenimiento. El objetivo es usarlos para políticas de mantenimiento óptimas, impactando positivamente los KPI (Indicadores Claves de Desempeño), aumentando la calidad, la productividad y reduciendo los costos [2].

La metodología RCM aparece proporcionando un marco idóneo en reducir las actividades de mantenimiento y costos relacionados en lo posible, sin afectar el rendimiento general de la planta, la calidad del producto, la seguridad o la integridad ambiental [3], teniendo como criterio general el mantenimiento prioritario de los componentes asumidos como críticos para el funcionamiento de la instalación [4].

Bajo este contexto, se propone un plan de mantenimiento enfocado en la confiabilidad de los equipos de toda una línea de producción de conservas de atún con la finalidad de mejorar la gestión de mantenimiento controlada por el software Sismac encargado actualmente de registrar el historial de fallos de cada máquina que interviene en la línea de producción seleccionada.

Esta investigación tiene su origen en el deficiente plan de mantenimiento preventivo con el que la industria atunera trabaja, puesto que, las medidas preventivas que se ejecutan en la línea de producción de conservas de atún son simples y totalmente básicas, por lo que no se ajusta al correcto desempeño del software que aplica la empresa, evitando una correcta planificación de actividades, cuyo principal objetivo debe ser el de reducir los costes por mantenimiento, mitigar la presencia de paralizaciones e incrementar la vida útil de los equipos presentes en la línea de producción seleccionada para el estudio..

## II. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

### A. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA A RESOLVER

La empresa EUROFISH en 1998 inició sus operaciones con una capacidad de producción de 50 toneladas métricas (TM) de lomos precocidos por día. Tres años después inicia las operaciones de enlatado de conservas de atún, con la ampliación en la actualidad la empresa tiene una producción de 45000 TM. Esta posee una amplia gama de maquinarias, su gestión de mantenimiento es controlada por el sistema de mantenimiento asistido por computadora Sismac, donde están registrados los equipos con su respectivo historial de fallos.

El plan de mantenimiento preventivo actual de la empresa presenta una deficiente planificación para el mantenimiento en la línea de producción de conservas de atún, esto se debe a que, las acciones preventivas y correctivas están conformadas por tareas básicas de lubricación y engrase. Además, no existe una metodología establecida para la gestión de mantenimiento por parte de la empresa que permita prevenir futuras averías, daños irreparables en la línea de producción, paralizaciones y productos de baja calidad.

En este sentido, la falta de un plan de mantenimiento preventivo pone en riesgo la operatividad de la empresa objeto de estudio, además de representar fuertes gastos por mantenimiento correctivo.

3

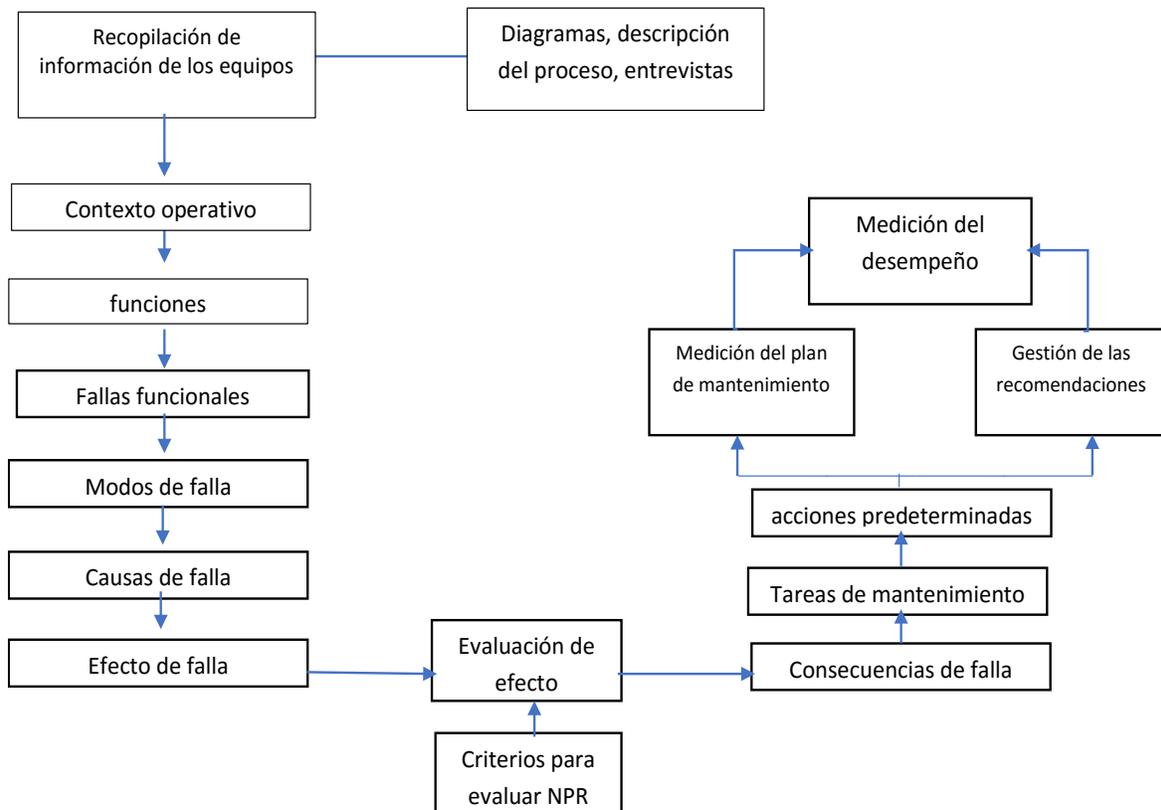


Fig. 1. Metodología RCM [5].

Al hacer referencia a la metodología, en la figura 1 se observa cada uno de los puntos o pasos a seguir para la implementación del mantenimiento centrado en la confiabilidad de equipos (RCM), [5]. Considerada como una guía de estrategias para el mantenimiento preventivo, correctivo y predictivo en el funcionamiento del equipo [6]. Este esquema permite, además, emplear procesos de control, ya que mide el desempeño del método aplicado con la finalidad de demostrar su efectividad en la línea de producción de conservas de atún en la empresa objeto de estudio. Esta metodología fue la considerada más viable para seguir en el desarrollo del presente trabajo de investigación.

Los instrumentos utilizados fueron: programa Sismac, hoja de registro de todos los fallos identificados por los operarios, registros de paralizaciones y la observación directa.

No hay una ruta establecida para implementar RCM con éxito porque este método es más que simplemente realizar un Análisis de Modos y Efectos de Fallas (AMEF), adoptar técnicas de monitoreo de condición y optimizar el programa de mantenimiento y revisión a través de la aplicación de un proceso de exploración de edad. El RCM se conoce como una técnica que se implementa en la gestión de mantenimiento con el fin de desarrollar planes y programas centrados en la confiabilidad [7]. Su implementación se basa en la garantía de la seguridad y la reducción del riesgo que pueden impactar en la producción, ayudando así a la disminución del costo y mantenimiento de la operación [8].

La evaluación de la criticidad proporciona los medios para cuantificar la importancia de una función del sistema en relación con la misión identificada [9] Esta metodología permite definir una jerarquización de prioridades en el proceso, los equipos y el sistema, facilitando la toma eficaz y efectiva de decisiones [10].

Los indicadores clave de rendimiento (KPI) son una parte integral de cualquier Carta del Equipo, ya que permiten al Equipo y a la Administración determinar las prioridades del Equipo y medir la productividad.

(1) *Análisis de criticidad por Número de Prioridad de Riesgo (NPR)*

Con el objetivo de garantizar un panorama rápido sobre cada efecto de falla identificado por el RCM, la categorización de estos efectos se basa en el Número de Prioridad de Riesgo (NPR) asignado, dicho parámetro está en función de tres criterios cualitativos:

- Severidad
- Detectabilidad
- Ocurrencia
- Criterio

$$\text{NPR} = \text{Severidad (S)} \times \text{Detectabilidad (D)} \times \text{Ocurrencia (O)}$$

Se diseñó un criterio de semaforización para los efectos de falla con base en el valor del NPR, este criterio se observa en la tabla 1.

TABLA 1

CRITERIO DE SEMAFORIZACIÓN DE ACUERDO CON EL VALOR DEL NPR.

Tipo de riesgo	Valor del NPR
Crítico (riesgo intolerable)	$\text{NPR} \geq 36$
Semi Crítico (riesgo moderado)	$7 < \text{NPR} < 36$
No crítico (riesgo bajo)	$\text{NPR} \leq 7$

(2) *Análisis de modo y efecto de fallas (AMEF)*

El AMEF consiste definir el modo de falla como un efecto por el cual una falla es estudiada o analizada, por lo que es un evento que indica la ocurrencia de una falla en los equipos.

Para el presente trabajo se realizó una plantilla AMEF, la cual contiene varios campos de evaluación de modos y efectos de fallos, campos que se ajustan al contexto en el que operan los equipos de la línea de producción de la empresa EUROFISH.

(3) *Indicadores de desempeño*

(3.1) *Tiempo medio de reparación*

Es una medida de mantenimiento que mide el tiempo promedio requerido para solucionar problemas y reparar equipos con fallas. Refleja la rapidez con que una organización puede responder a averías no planificadas y repararlas, se calcula según la fórmula (1):

$$\text{MTTR} = \frac{\text{Tiempo en reparación}}{\text{Total de reparaciones}} \quad (1)$$

### (3.2) Tiempo medio de falla

La confiabilidad de la máquina se define como la capacidad de operar durante largos periodos de tiempo sin detenerse por mantenimiento o reparaciones [11]. La confiabilidad a menudo se expresa (en términos de ingeniería) como el "Tiempo medio entre fallas" (MTBF), expresada en la fórmula (2).

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo total disponible} - \text{tiempo de inactividad}}{\text{total de paradas}} \quad (2)$$

### (3.3) Disponibilidad del equipo

La disponibilidad del sistema es una métrica utilizada para medir el porcentaje de tiempo que un activo puede usarse para la producción. Calcula la probabilidad de que un sistema no esté averiado para el mantenimiento preventivo cuando sea necesario para la producción, este se calcula a través de la fórmula (3):

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo total disponible}}{\text{Tiempo total disponible} + \text{Tiempo en reparación}} \times 100 \quad (3)$$

## III. DESARROLLO

En el siguiente trabajo, seguidamente se evalúa toda la línea de producción de conservas de atún de la empresa EUROFISH, las máquinas a evaluar son:

- Cerradora de latas VARIN 400
- Máquina Luthi
- Dosificadora de líquidos
- Lavadora de latas
- Despaletizador de latas
- Encestador hidráulico

Durante los meses de enero a junio del 2020, se realiza el trabajo de investigación, enfocado en la planificación de un programa de mantenimiento centrado en la confiabilidad del equipo, con el objetivo de mitigar las paralizaciones de producción, averías en las máquinas y equipos, defectos en el producto final lo que representa pérdidas significativas en la empresa objeto de estudio.

### A. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CRITICIDAD EN LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DEL ÁREA DE ENLATADOS

#### (1) Registro de paralizaciones

En la tabla 2 se detalla la cantidad de paralizaciones que se dan por mes en la línea de producción de la industria procesadora de conservas de atún.

TABLA 2  
PRINCIPALES FALLOS Y AVERÍAS DE UNA LÍNEA DE PRODUCCIÓN

Paradas no programados (Min) en los 6 meses del 2020							
Principales fallos en la línea	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Total min.
Fallos en el despaletizador	99	136	86	146	125	182	774
Avería de cerradora de latas	646	1561	879	676	699	1023	5484
Avería de empacadora Luthi	388	663	534	539	404	356	2884
Fallos en encestador de latas	32	82	134	29	137	73	487
Fallos en lavadora de latas	37	137	72	84	63	137	530
Fallos en transportadores de latas	50	27	20	25	35	62	219
Fallos en dosificador de líquidos	31	76	191	82	92	104	576

El software de mantenimiento Sismac de acuerdo con lo revisado solo disponía del historial de trabajos correctivos realizados, por otro lado, el historial de averías no es debidamente detallado debido a la falta de métodos de evaluación de fallos más eficientes. Esto deja como conclusión previa que el programa Sismac no se está utilizando con eficiencia al registrar los fallos para evaluar el estado de los equipos y arrojar un plan de mantenimiento preventivo con el que sea posible mantener la disponibilidad de toda la línea de producción.

El nivel de criticidad de los equipos de la línea de producción del área del enlatado es presentado en la tabla 3, estos costos se expresan en dólares.

TABLA 3  
ANÁLISIS DE CRITICIDAD DE ACUERDO CON LAS PÉRDIDAS POR PARALIZACIONES DE ENERO A JUNIO

Tipo de máquina	Costo por hora (US\$)	Horas paradas por fallos	Costo de máquina por Horas (US\$)	Jornadas de trabajo	Criticidad del equipo en obra
Despaletizador de latas	5687,5	12,9	73368,75	Doble jornada	Semi crítico
Máquina Luthi	5687,5	48,07	273398,12	Doble jornada	Crítico
Transportador	5687,5	3,65	20759,37	Doble jornada	No crítico
Dosificador de líquidos	5687,5	9,6	54600	Doble jornada	Semi crítico
Cerradora de latas	5687,5	91,4	519837,5	Doble jornada	Crítico
Lavadora de latas	5687,5	8,8	50050	Doble jornada	Semi crítico
Encestador hidráulico	5687,5	8,1	46068,75	Jornada simple	Semi crítico

FUENTE: DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO DE EUROFISH

Tal como se aprecia en la tabla 3, la información referente al costo por hora fue otorgada por el departamento de mantenimiento de las empresas. Se puede observar que todos los de la línea de producción del área de enlatado trabajan a doble jornada, la cerradora de latas trabaja a un promedio de 16 horas, el costo por paradas no programadas en esta máquina es de \$519837,5, siendo el mayor de toda la línea de producción.

Al paralizarse la máquina cerradora, significa que la empresa no cumple con su capacidad de producción, poniéndose en riesgo la producción de conservas de atún, debido a esto, la cerradora de latas se considera la máquina con un nivel de criticidad alto durante todo el proceso de enlatado. Cabe mencionar que este análisis también se aplica a la máquina Luthi (empacado y llenado), el cual comprende un alto costo de máquina por fallos durante la producción (\$273398,12), además, la labor desempeñada por esta máquina es uno de los más importantes junto al cerrado de lata por lo que, prevenir futuras paralizaciones por avería en esta máquina, hace que se le considere un equipo crítico.

El transportador no es considerado equipo crítico porque las medidas correctivas se pueden realizar de forma rápida, incluso, la empresa cuenta con un cordón volta de repuesto para el transportador en caso de que se arranque y requiera una reparación o cambio.

El encestador hidráulico pese a que, contiene componentes que no están exentos de presentar fallas o averías como los motores eléctricos, cilindros hidráulicos, entre otros, que requieren de constantes tareas de inspección, es un equipo al que fácilmente se le pueden realizar dichas tareas sin afectar la producción ya que, las horas de trabajo representan una jornada completa.

En cuanto a la lavadora de latas y dosificador de líquidos presentan problemas en común, como las fallas en los tableros de control debido a la presencia de humedad que se concentran dentro de estos componentes generando desgaste y posteriormente fallos al sistema del equipo. Bajo este contexto son considerados equipos semicríticos.

## B. ANÁLISIS DE MODOS DE EFECTOS Y FALLOS (AMEF)

### (1) Análisis de modos de efectos y fallos (AMEF) en la máquina cerradora de latas VARIN 400

La máquina cerradora de latas encabeza la lista de los equipos críticos. Cabe recalcar que los efectos potenciales de la gravedad del modo de falla en esta máquina generan problemas en el producto final, comprometiendo toda una producción, lo que representa serias pérdidas económicas para la empresa, donde incurren costos de mano de obra, costos de maquinaria, pérdida de recursos, y en el peor de los casos, la pérdida de clientes potenciales.

Luego de establecer el nivel de criticidad de acuerdo con el NPR, se procede a realizar el diagrama de Pareto en la máquina cerradora de latas.

TABLA 4  
ANÁLISIS DEL DIAGRAMA DE PARETO A MÁQUINA CERRADORA DE LATAS

Componentes	Promedio NPR	% Acumulado
Cabezal	42	29%
Lifter	36	54%
Rulinas 1ª operación	31.2	75%
Mandriles	18	88%
Sistema de transmisión	18	100%

Luego del análisis de Pareto se observa que el 75% son los componentes por fallar y los que se deberían de atender lo más pronto posible.

Se muestra la figura 2 correspondiente a los resultados mostrados en la tabla 4 para indicar las tres zonas que caracterizan el análisis de criticidad por NPR de las partes que afectan la confiabilidad de la máquina cerradora.

8

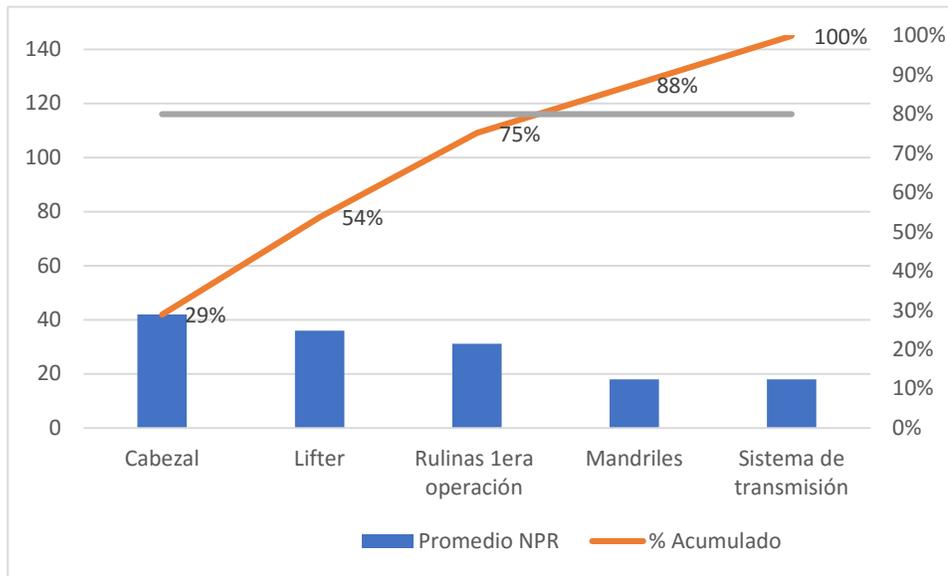


Fig. 2. Diagrama de Pareto a máquina cerradora de latas.

Luego de analizar la gráfica se puede afirmar que, los 4 cabezales de la cerradora, el plato de Lifter y las rulinas de operación (primera y segunda operación), se encuentran altamente críticos, los cuales disminuyen la confiabilidad de la máquina, representando el 75% del total, en donde se debe enfocar las tareas de mantenimiento preventivo.

## (2) Análisis de modos de efectos y fallos (AMEF) en la máquina Luthi

La máquina Luthi también es considerada un equipo crítico, debido a las diversas funciones que realiza en el proceso de enlatado. El sistema de empacado y llenado de la máquina presenta componentes sumamente críticos que pueden afectar al sistema completo, incluso puede generar afectaciones a otros equipos en la línea de producción dado que la máquina Luthi se sitúa en el centro de toda la línea, por lo que depende de la alimentación de los demás equipos y de la entrada de materia, la cual proviene de los equipos que lo antecedan.

Por ende, es necesario el un plan de mantenimiento eficiente para garantizar correcto funcionamiento de la máquina Luthi puesto que su principal efecto de falla es la paralización total del área de enlatado. Dependiendo del promedio, de acuerdo con el NPR de cada modo de falla del nivel 2, se realiza el análisis de Pareto en la máquina Luthi.

TABLA 5  
ANÁLISIS DEL DIAGRAMA DE PARETO A MÁQUINA LUTHI SP

Componentes	Promedio NPR	% Acumulado
Sistema de empacado	39	43%
Sistema de llenado	30	77%
Sistema de transmisión	21	100%

9

Luego del análisis de Pareto se observa que el 77% son los componentes de la máquina Luthi a fallar y los que se deberían atender lo más pronto posible.

Se muestra la figura 3 correspondiente a los resultados mostrados en la tabla 5 para indicar las tres zonas que caracterizan el análisis de criticidad por NPR son de las partes que afectan la confiabilidad de la máquina Luthi.

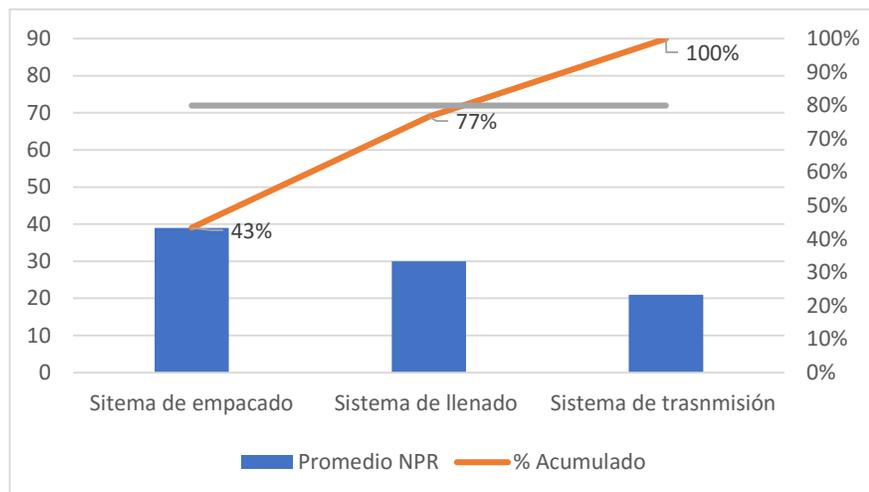


Fig. 3. Diagrama de Pareto a máquina Luthi SP.

Después de analizar la gráfica se puede afirmar que, el sistema de empacado y el sistema de llenado se encuentran altamente críticos, los cuales hace que se disminuya la confiabilidad de la máquina en mención, representando el 77% del total, donde se debe enfocar las tareas de mantenimiento preventivo.

### (3) Análisis de modos de efectos y fallos (AMEF) en la máquina dosificador de líquido.

El dosificador de líquido se considera una máquina semicrítica, debido a que la mayoría de las fallas y averías recaen en las válvulas, por donde fluye el líquido y en las bombas que generan el flujo, al presentar apenas dos componentes considerados para el plan de mantenimiento. Las acciones o medidas para contrarrestar la veracidad de los problemas presentados son labores de cambio de componentes o la limpieza de estos.

Pese a que son modos de fallas de fácil control, los efectos que pueden provocar en la línea de enlatado pérdidas económicas considerables, averías irreparables en el sistema de la máquina, como fallas fulminantes en las bombas del dosificador lo que trae como consecuencia horas perdidas por la paralización de la máquina.

Dependiendo del promedio de acuerdo con el NPR de cada modo de falla del nivel 2, se realiza el análisis de Pareto en el dosificador.

TABLA 6  
ANÁLISIS DEL DIAGRAMA DE PARETO A DOSIFICADORA DE LÍQUIDOS

Componentes	Promedio NPR	% Acumulado
Dosificación del sistema	18	37%
Bomba de presión	16	69%
Tuberías de impulso	9	88%
Sistema de válvulas	6	100%

Luego del análisis de Pareto, se observa que el 69% son los componentes del dosificador a fallar y los que se deberían atender lo más pronto posible.

Seguidamente, se muestra la figura 4, correspondiente a los resultados mostrados en la tabla 6 para indicar las tres zonas que caracterizan el análisis de criticidad por NPR son de las partes que afectan la confiabilidad del dosificador de líquidos.

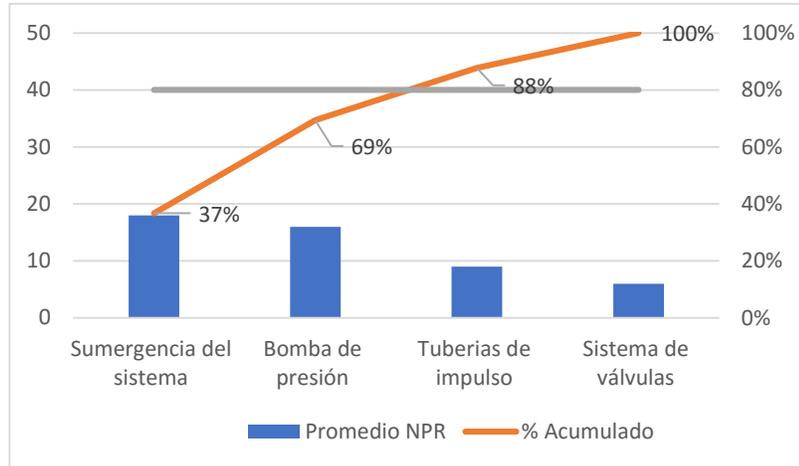


Fig. 4. Diagrama de Pareto a la dosificadora de líquidos.

Luego de analizar la figura 4, se puede afirmar que, la dosificación del sistema y la bomba de presión se encuentran altamente críticos, los cuales disminuyen la confiabilidad de la máquina referida, representando el 69% del total, en donde se debe enfocar las tareas de mantenimiento preventivo.

(4) Análisis de modos de efectos y fallos (AMEF) en la máquina lavadora de latas

El principal fallo recae sobre las bombas de la lavadora, ya que permite el flujo de agua a presión y desengrasante es la tarea fundamental de esta máquina, la prevención de estos equipos es importante cuando las medidas a ejecutar son de manera periódica, un mantenimiento por inspección cada cierto tiempo permite detectar e impedir futuras averías, como el daño inminente en las válvulas o una sobrecarga en todos los motores, consecuencias con alto grado de severidad, lo cual se refleja en tiempos de producción perdidos, ya que se requerirá de horas laborales para poner nuevamente en marcha esta máquina.

Al presentar fallas, en relación con los componentes de la lavadora de latas, existe la probabilidad de que el producto final sea rechazado y nuevamente se presenten fuertes pérdidas económicas, incluso con mayor seriedad puesto que, si las latas están con residuos de grasa no se puede codificar ni etiquetar para que el producto final, representando pérdidas económicas para la empresa.

Al igual que en el dosificador de latas y en la máquina Luthi, la lavadora de latas presenta fallos en el sistema de transmisión, el cual permite la entrada y salida de latas en la máquina; como también en el tablero de operaciones. Bajo este contexto, se deben aplicar las mismas medidas que se detallan en el AMEF respectivo de cada máquina.

Dependiendo del promedio de acuerdo con el NPR de cada modo de falla del nivel 2, se realiza el análisis de Pareto en la lavadora de latas.

TABLA 7  
ANÁLISIS DEL DIAGRAMA DE PARETO A LA LAVADORA DE LATAS.

Fallos	Promedio NPR	% Acumulado
Tablero de mando	36	40%
Motorreductor	18	60%
Sistema de lavado	12	73%
Bomba de presión	12	87%
Sistema de transmisión	12	100%

Luego del análisis de Pareto, se observa que el 73% son los componentes de la lavadora de latas a fallar y los que se deberían atender lo más pronto posible.

Se muestra la figura 5, correspondiente a los resultados mostrados en la tabla 7, en el cual se indican las tres zonas que caracterizan el análisis de criticidad por PR, estas son de las partes que afectan la confiabilidad de la lavadora de latas.

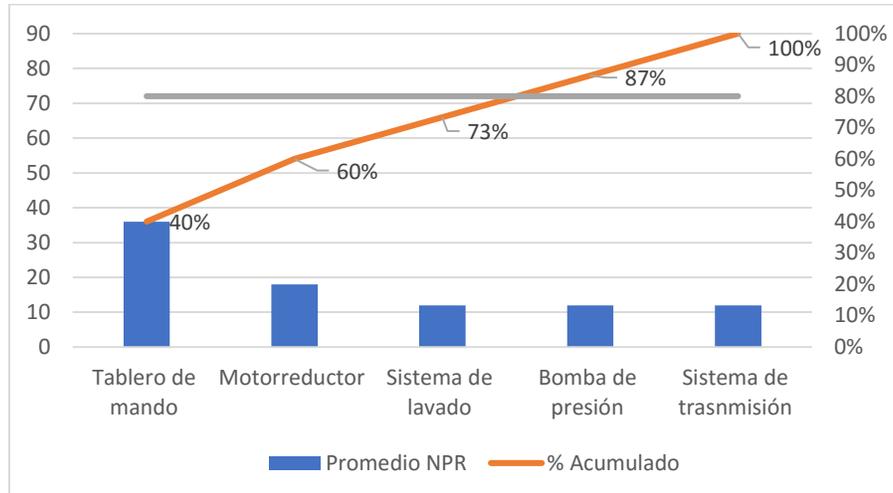


Fig. 5. Diagrama de Pareto a la lavadora de latas

Luego de analizar la figura 5 se puede afirmar que, el tablero de mando, el motorreductor y el sistema de lavado, se encuentran altamente críticos, los cuales permiten evidenciar, que disminuyen la confiabilidad de la máquina, representando el 73% del total, en donde se debe enfocar las tareas de mantenimiento preventivo para la posterior planificación.

(5) *Análisis de modos de efectos y fallos (AMEF) en la despaletizador de latas*

El AMEF realizado a la despaletizador revela fallos en el tablero de mando, sistema de transmisión y en los motores. En ese sentido, al existir varios modos de fallos en los sistemas de la máquina se clasifica como semi crítico, esto se debe principalmente al alto riesgo que puede ocasionar un corto circuito en el tablero de mando, lo que puede producir que la máquina pueda operar e incluso representa un riesgo eléctrico para el operario, la excesiva presencia de humedad en el área de enlatado afecta directamente a los componentes eléctrico, por tal motivo se debe aplicar impermeabilizadores a todos los componentes electrónicos, incluyendo los tableros de mando.

Los modos de fallos en los motores de la despaletizador provocan un bajo rendimiento en la máquina, saliéndose del tiempo estándar, lo que representa un 20% de retraso referente al tiempo empleado para la producción de conservas de atún, sin embargo, los efectos potenciales que la falla en los motores puede ocasionar no son considerados severos o perjudiciales, esto también se refleja en las tareas a realizar, las cuales consisten en labores de reemplazo y engrase.

Siendo la alimentación de la máquina el principal modo de fallo a considerar, se debe tomar en cuenta los efectos potenciales que esto puede generar, tal es el caso de la acumulación de latas en la banda transportadora, generando obstrucción en la sección en mención, las abolladuras en las latas se deben a que al momento de trazar el camino de las latas chocan con los filos de los rieles que se encargan de guiar las latas hasta la empacadora de atún.

Dependiendo del promedio de acuerdo con el NPR de cada modo de falla del nivel 2, se realiza el análisis de Pareto en el despaletizador de latas.

TABLA 8  
ANÁLISIS DEL DIAGRAMA DE PARETO A LA DESPALETIZADOR

Fallos	Promedio NPR	% Acumulado
Tablero de mando	10	41%
Alimentación de la paletizadora	7.3	71%
Motor despaletizador	7	100%

13

Luego del análisis de Pareto, se observa que el 71% son los componentes del despaletizador a fallar y los que se deberían atender lo más pronto posible.

Se muestra la figura 6, correspondiente a los resultados mostrados en la tabla 8 para indicar las tres zonas que caracterizan el análisis de criticidad por NPR son de las partes que afectan la confiabilidad de la despaletizador.

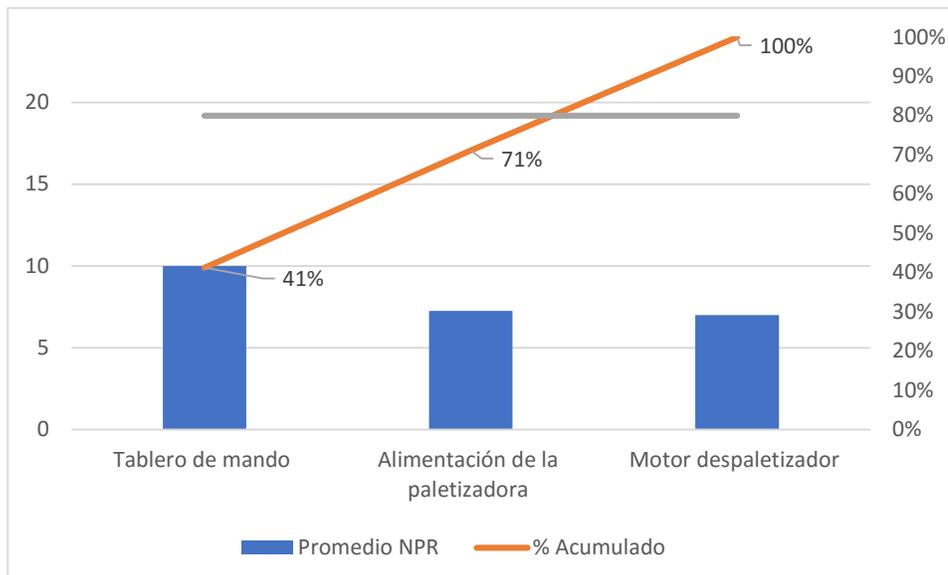


Fig. 6. Diagrama de Pareto al despaletizador de latas.

Luego de analizar la gráfica se puede afirmar que, el tablero de mando y la alimentación de entrada, se encuentran altamente críticos, los cuales disminuyen la confiabilidad de la máquina en mención, representando el 71% del total y en donde se debe enfocar las tareas de mantenimiento preventivo.

(6) *Análisis de modos de efectos y fallos (AMEF) en encestador hidráulico*

El principal modo de falla en el encestador hidráulico se centra en el sistema hidráulico, los elementos del cilindro impiden un correcto flujo a presión del líquido el cual permite el accionar del encestador hidráulico, al no existir buena presión, los elementos de trabajo del sistema hidráulico, como el vástago de los pistones no realizan correctamente sus funciones, generando un sobre esfuerzo en cada uno de estos componentes, trayendo

como consecuencia desgaste en los pistones o engranajes, fuga de los retenes, pistones y cilindros pandeados, consecuencias que afectan al cilindro hidráulico limitando su función principal.

Dependiendo del promedio de acuerdo con el NPR de cada modo de falla del nivel 2, se realiza el análisis de Pareto en el encestador hidráulico de latas.

TABLA 9  
ANÁLISIS DEL DIAGRAMA DE PARETO EN EL ENCESTADOR HIDRÁULICO

Componentes	Promedio NPR	% Acumulado
Depósito de aceite	20	51%
Cilindro hidráulico	9.7	76%
Motor despaletizador	9.33	100%

Luego del análisis de Pareto, se observa que el 76% son los componentes cilindro hidráulico a fallar, los que se deberían atender lo más pronto posible, por el elevado porcentaje de falla demostrado.

Seguidamente, se muestra la figura 7 correspondiente a los resultados mostrados en la tabla 9 para indicar las tres zonas que caracterizan el análisis de criticidad por NPR son de las partes que afectan la confiabilidad del encestador.

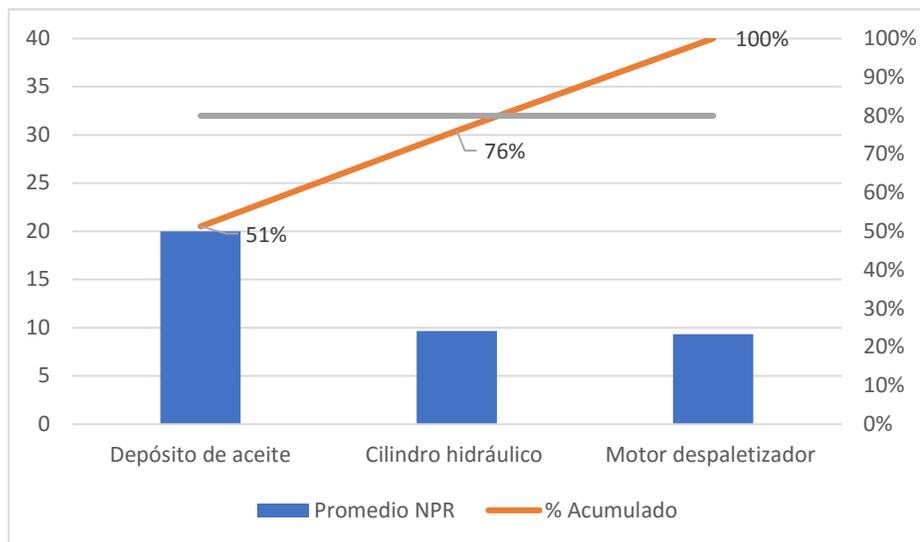


Fig. 7. Diagrama de Pareto para el encestador hidráulico

Luego de analizar la gráfica 7, se puede afirmar que, el depósito de aceite y el cilindro hidráulico, se encuentran altamente críticos, los cuales hacen que se disminuya la confiabilidad de la máquina, representando el 76% del total, en la cual se debe enfocar principalmente en las tareas de mantenimiento preventivo.

C. PLAN DE MANTENIMIENTO

(1) Plan de mantenimiento recomendado para la cerradora de latas VARIN 400

TABLA 10  
1 PLAN DE MANTENIMIENTO MÁQUINA CERRADORA DE LATAS

PLAN DE MANTENIMIENTO					
Área:	Enlatado		Línea: Cerradoras VARIN 400		
Máquina	Componente	Clase	Trabajo	Tipo	Frec. en horas
Sistema de Alimentación	Cadenas de Rodillo	Revisión 1		Mecánico	300
	Cadenas de Rodillo	Cambio de Cadenas		Mecánico	17280
	Chumaceras	Revisión 1/ Cambio		Mecánico	250
	Sensor de Presencia de Latas	Revisión 3/ Alineación		Electrónico	250
Sistema de Alimentación de Tapas	Sensor Entrada de Tapas	Revisión 3/ Alineación		Electrónico	250
	Sensor de Presencia de Tapas	Revisión 3/ Alineación		Electrónico	250
	Actuadores Neumáticos	Revisión Estado		Mecánico	400
	Actuadores Neumáticos	Limpieza		Mecánico	2000
	Electroválvula alimentadora de tapas (2)	Revisión 3/ Limpieza		Mecánico	400
	Alimentador de tapas	Lubricación		Mecánico	50
	Separador de tapas (entrada)	Revisión 3/ Ajuste		Mecánico	50
	Lifters	Revisión 3/ Ajuste		Mecánico	200
	Rulinas 1ra Operación	Revisión 2/ Ajuste		Mecánico	200
	Resortes Rulinas 1ra Operación	Revisión 1/ Cambio		Mecánico	50
	Rulinas 2da Operación	Revisión 2/ Ajuste		Mecánico	200
	Resortes Rulinas 2da Operación	Revisión 2/ Ajuste		Mecánico	50
	Mandriles	Revisión 1/ Ajuste		Mecánico	200
	Seguidores de Leva Rulinas de 1ra Operación	Revisión 1 Estado		Mecánico	200
	Seguidores de Leva Rulinas de 2da Operación	Revisión 1 Estado		Mecánico	200
	Seguidores de Leva Lifters	Revisión 1 Estado		Mecánico	200
Sistema Cerradora	Leva Rulinas de 1ra Operación	Revisión 3 / Cambio		Mecánico	400
	Leva Rulinas de 2da Operación	Revisión 1 / Cambio		Mecánico	400
	Transmisión (Salida)	Revisión 1/ Tensionar		Mecánico	200
	Transmisión (Salida)	Cambio		Mecánico	17280
	Correa para levante de cabeza	Revisión 2 / Cambio		Mecánico	8640
	Cabezal de volanta	Revisión Nivel Aceite		Mecánico	100
	Codificador (Código en la Tapa)	Revisión 1 / Ajuste		Mecánico	100
	Rodamientos del Codificador	Revisión 1/ Lubricación		Mecánico	100
	Columnas (3 en el cabezal)	Engrasar		Mecánico	200
	Motor	Revisión Freno		Electrónico	1000
	Motor	Revisión de Amperaje		Electrónico	750
	Motor	Revisión 3		Electrónico	3600
	Eje Cerradora	Revisión 1 Acoples		Mecánico	200
	Eje Cerradora	Cambio Acoples		Mecánico	1000
Reductor a Llenadora	Revisión Nivel Aceite		Mecánico	200	
Reductor a Llenadora	Cambio de Aceite		Mecánico	1000	
Dispositivo de Sincronización	Revisión 3		Mecánico	200	
Dispositivo de Sincronización	Cambio de Aceite		Mecánico	1000	

Sistema de Salida de Latas Cerradas	Banda Transportadora (Salida)	Revisión 2/ Cambio	Mecánico	300
	Motorreductores de la banda de salida	Cambio de Aceite	Mecánico	1000
	Motorreductores de la banda de salida	Revisión 3	Mecánico	250
	Chumaceras banda de salida	Revisión 3/ Cambio	Mecánico	250
	Foto sensor Banda de Salida	Revisión 4/ Alineación	Electrónico	250

(2) Plan de mantenimiento recomendado para máquina Luthi (llenadora)

16

TABLA 11  
PLAN DE MANTENIMIENTO MÁQUINA LLENADORA LUTHI

PLAN DE MANTENIMIENTO					
Área:	Enlatado		Línea: Máquina SP		
Máquina	Componente	Clase	Trabajo	Tipo	Frec. en horas
Sistema de Alimentación de Envases	Bandas de Transporte 1 y 2 (Doble Direccionada)	Revisión 2/ Cambio	Mecánico		300
	Disco Giratorio y Guías	Revisión 1 / Ajuste	Mecánico		300
	Motorreductor Banda 1	Cambio de Aceite	Mecánico		1000
	Motorreductor Banda 1	Revisión 3	Mecánico		200
	Motorreductor Banda 2	Cambio de Aceite	Mecánico		1000
	Motorreductor Banda 2	Revisión 3	Mecánico		200
	Motorreductor del Disco	Cambio de Aceite	Mecánico		1000
	Motorreductor del Disco	Revisión 3	Mecánico		200
	Sensor Estrella de entrada	Revisión / Alineación	Electrónico		250
	Tornillo Sinfin Alimentación	Revisión 3	Mecánico		250
	Reductor Tornillo Sinfin	Cambio de Aceite	Mecánico		1000
	Reductor Tornillo Sinfin	Revisión 3	Mecánico		200
	Estrella de alimentación	Revisión 3	Mecánico		250
	Fotosensor Banda de Entrada	Revisión 3/ Alineación	Electrónico		250
	Sensor banda 1	Revisión 4	Electrónico		250
	Fotosensor Can-Stop	Revisión 4 / Alineación	Electrónico		250
Sistema de Llenado Líquido de Cobertura	Cilindro No can-No fill	Revisión 1 Estado	Mecánico		400
	Cilindro No can-No fill	Limpieza	Mecánico		2000
	Electroválvula activadora del embolo no Can no Fill (5)	Revisión 4/ Limpieza	Mecánico		400
	Electroválvula activadora del embolo no Can no Fill (5)	Revisión 4	Electrónico		300
	Tanque liquido Cobertura	Limpieza 3	Mecánico		50
	Válvula Principal (llenado Aceite)	Revisión 4	Mecánico		400
	Flotador control de llenado	Revisión 3 Revisión 3/	Mecánico		200
	Gomas de sellado	Cambio			50
	Electroválvula para llenado del filtro ppal. (4)	Revisión 4/ Limpieza	Mecánico		400
	Electroválvula para llenado del filtro ppal. (4)	Revisión 4	Electrónico		300
	Válvula Paso Llenado	Revisión 3/ Limpieza	Mecánico		1000
	Estrellas Ciclo de Llenado	Revisión 1	Mecánico		250
	Cabezas articuladas	lubricación (grasa)	Mecánico		500
	Bujes	Lubricación (grasa)	Mecánico		150
	Válvulas Ciclo de Llenado	Revisión 1 (limpieza)	Mecánico		1000

(3) Plan de mantenimiento recomendado para máquina Luthi (empacadora)

TABLA 2  
PLAN DE MANTENIMIENTO MÁQUINA EMPACADORA LUTHI

PLAN DE MANTENIMIENTO					
Área:	Enlatado	Línea: Empacadora Luthi SP			
Máquina	Componente	Clase	Tipo	Frec. en horas	Trabajo
Carro	Tornillería	Revisión 1 / Cambio	Mecánico	50	
	Cojinete 4-2	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	50	
	Rueda dentada y cadena	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	50	
	Rodamientos 6204	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	50	
	Maza rueda dentada y Disco embrague	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	50	
	Bujes	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	50	
	Crucetas	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	50	
	Frentera, Uñas y Ejes de Uñas	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	50	
Motorreductor	Rueda Dentada y cadena	Revisión 3/ Cambio	Mecánico	480	
	Eje 3-11	Revisión 3/ Cambio	Mecánico	480	
	Base motorreductor	Revisión 3/ Reparación	Mecánico	480	
	Rodamientos internos NJ208	Revisión 2/ Cambio	Mecánico	480	
Caja de Excéntricas	Rodamientos NJ2209 y 6205	Revisión 2/ Cambio	Mecánico	240	
	Sellado de caja	Revisión 2/ Reparación	Mecánico	240	
	Sprockets y cadena	Revisión 2/ Cambio	Mecánico	240	
	Rodamientos 51209 y 6309	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	
	Seguidores 40S	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	
	Retenedores	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	
	Tornillería	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	
	Mandos	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	
	Bufin	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	
	Ejes 2-6, 2-8, 2-9 y 2-10	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	
Aceite Caja	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	400		
Sistema de cortes	Cuchilla (1)	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	100	
	Mec. Formato Buje 9-31	Revisión 2/ Cambio	Mecánico	240	
	Mec. cuchilla Buje 10-2	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	
	Mec. cuchilla Buje 10-8	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	
	Mec. cuchilla rod 32005	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	
	Mec. Fill Buje 8-3	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	
	Mec. Fill Buje 8-6	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	
	Mec. Fill Buje 8-7	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	
	Mec. Fill Buje 8-9	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	
	Mec. Fill Buje 8-12	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	
	Mec. Rod. 30205	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	
	Mec. formato rodamientos 6205	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	
	Mec. formato guías cuchillas	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	
	Mec. formato guías formato	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	
Sistema Expulsor de Atún	Tornillería	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	50	
	Seguidores 40S	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	50	
	Guías de bronce	Revisión 1/ Reparación	Mecánico	50	
	Émbolos	Revisión 3/ Cambio	Mecánico	50	
	Rodamientos RAE 35	Revisión 3/ Cambio	Mecánico	50	
	Rodamientos NJ 206	Revisión 3/ Cambio	Mecánico	50	
	Buje 12-6	Revisión 3/ Cambio	Mecánico	50	
	Bujes 12-15	Revisión 3/ Cambio	Mecánico	50	
Cojinete 12 -13	Revisión 3/ Cambio	Mecánico	50		

Caja de Piñones Cónicos	Cojinetes laterales 5-4	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	480	
	Bujes 5-19	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	
	Bujes 5-22	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	
	Bujes 5-23	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	
	Piñones 6-1,6-4, cadena 5/8 6-3	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	480	
	Embrague de rodillo 8-25	Revisión 1/ Reparación	Mecánico	480	
	Ejes 5-10	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	480	
	Cojinetes inferiores 5-5	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	480	
	Rod. 60-11Reten.40X65X10	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	
	Piñones cónicos	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	480	
	Bujes 5-15	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	
	Bujes 5-16	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	
	Sistema de Bandas	Ejes poleas verticales 5-12	Revisión 1/ Reparación	Mecánico	240
		Rotulas Tornillería	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240
	Biela 7-5	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	
	Bujes 7-15	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	
	Banda vertical derecha	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	
	Banda vertical Izquierda	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	
	Eje polea htal. Trasero	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	
	Roda. 6008, 6206, Reten. 608010	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	
	Bujes 6-17	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	240	

(4) Plan de mantenimiento recomendado para Dosificadora de líquidos.

TABLA 13  
PLAN DE MANTENIMIENTO DOSIFICADORA DE LÍQUIDOS

PLAN DE MANTENIMIENTO					
Área:	Enlatado		Línea: Dosificadores de líquidos		
Máquina	Componente	Trabajo Clase	Tipo	Frec. en horas	
Dosificador	Motorreductor Banda Dosificador	Revisión de Amperaje	Electrónico	750	
	Motorreductor Banda Dosificador	Revisión 3	Electrónico	3600	
	Motorreductor Banda Dosificador	Cambio de Aceite	Mecánico	1000	
	Motorreductor Banda Dosificador	Revisión 3	Mecánico	200	
	Cadena Transmisión Motorreductor	Revisión 2/ Ajuste	Mecánico	200	
	Ejes Dosificador (3)	Revisión 3	Mecánico	200	
	Chumaceras Ejes Dosificador (6)	Revisión 3/ Cambio	Mecánico	200	
	Piñones Naranja Banda Plástica (3)	Revisión 3/ Cambio	Mecánico	200	
	Banda Plástica	Revisión 2/ Cambio	Mecánico	200	
	Flauta (s) Dosificación	Revisión 1	Mecánico	200	
	Tuberías Entrada Líquido Dosificador	Revisión Fugas	Mecánico	100	
	Válvulas Tubería Entrada Líquido Dosificador	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	200	
	Tubería Retorno Líquido Dosificador	Revisión Fugas	Mecánico	100	
	Válvulas Tubería Retorno Líquido Dosificador	Revisión 1 / Cambio	Mecánico	200	
	Motor Bomba Retorno Agua	Revisión de Amperaje	Electrónico	750	
	Motor Bomba Retorno Agua	Revisión 3	Electrónico	3600	
	Bomba Retorno Agua	Revisión 1/ Limpieza	Mecánico	500	
	Motor Bomba Retorno Aceite	Revisión de Amperaje	Electrónico	750	
	Motor Bomba Retorno Aceite	Revisión 3	Electrónico	3600	
	Bomba Retorno Aceite	Revisión 3/ Limpieza	Mecánico	500	
Bomba Neumática Llenado Vinagre	Revisión 3 / Limpieza	Mecánico	500		
Tanque Elevado Dosificación Vinagre	Revisión Fugas	Mecánico	200		
Tubería y Válvulas Tanque Vinagre	Revisión Fugas	Mecánico	200		

Dosificador 1 Lb	Motorreductor Banda Dosificador	Revisión de Amperaje	Electrónico	750
	Motorreductor Banda Dosificador	Revisión 3	Electrónico	3600
	Motorreductor Banda Dosificador	Cambio de Aceite	Mecánico	1000
	Motorreductor Banda Dosificador	Revisión 3	Mecánico	200
	Cadena Transmisión Motorreductor	Revisión 2/ Ajuste	Mecánico	200
	Ejes Dosificador (2)	Revisión 3	Mecánico	200
	Chumaceras Ejes Dosificador (4)	Revisión 3/ Cambio	Mecánico	200
	Piñones Naranja Banda Plástica (2)	Revisión 3/ Cambio	Mecánico	200
	Banda Plástica	Revisión 2/ Cambio	Mecánico	200
	Flauta (s) Dosificación	Revisión 1	Mecánico	200
	Tuberías Entrada Líquido Dosificador	Revisión Fugas	Mecánico	100
	Válvulas Tubería Retorno Líquido Dosificador	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	200
	Motor Bomba Retorno Agua	Revisión de Amperaje	Electrónico	750
	Motor Bomba Retorno Agua	Revisión 3	Electrónico	3600
Bomba Retorno Agua	Revisión 1/ Limpieza	Mecánico	500	
Motor Bomba Retorno Aceite	Revisión de Amperaje	Electrónico	750	
Motor Bomba Retorno Aceite	Revisión 3	Electrónico	3600	
Bomba Retorno Aceite	Revisión 1 / Limpieza	Mecánico	500	
Dosificador 4 Lbs	Motorreductor Banda Dosificador	Revisión de Amperaje	Electrónico	750
	Motorreductor Banda Dosificador	Revisión 3	Electrónico	3600
	Motorreductor Banda Dosificador	Cambio de Aceite	Mecánico	1000
	Cadena Transmisión Motorreductor	Revisión 2/ Ajuste	Mecánico	200
	Ejes Dosificador (2)	Revisión 3	Mecánico	200
	Chumaceras Ejes Dosificador (4)	Revisión 3/ Cambio	Mecánico	200
	Piñones Naranja Banda Plástica (2)	Revisión 3/ Cambio	Mecánico	200
	Banda Plástica	Revisión 2/ Cambio	Mecánico	200
	Flauta (s) Dosificación	Revisión 1	Mecánico	200
	Tuberías Entrada Líquido Dosificador	Revisión Fugas	Mecánico	100
	Válvulas Tubería Entrada Líquido Dosificador	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	200
	Tubería Retorno Líquido Dosificador	Revisión Fugas	Mecánico	100
	Válvulas Tubería Retorno Líquido Dosificador	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	200
	Motor Bomba Retorno Agua	Revisión de Amperaje	Electrónico	750
Motor Bomba Retorno Agua	Revisión 1	Electrónico	3600	
Bomba Retorno Agua	Revisión 1/ Limpieza	Mecánico	500	
Motor Bomba Retorno Aceite	Revisión de Amperaje	Electrónico	750	
Motor Bomba Retorno Aceite	Revisión 3	Electrónico	3600	
Bomba Retorno Aceite	Revisión 1/ Limpieza	Mecánico	500	
Dosificador Ventresca	Moto reductor Banda Dosificador	Revisión de Amperaje	Electrónico	750
	Motorreductor Banda Dosificador	Revisión 3	Electrónico	3600
	Motorreductor Banda Dosificador	Cambio de Aceite	Mecánico	1000
	Motorreductor Banda Dosificador	Revisión 3	Mecánico	200
	Cadena Transmisión Motorreductor	Revisión 2/ Ajuste	Mecánico	200
	Ejes Dosificador (2)	Revisión 3.4	Mecánico	200
	Chumaceras Ejes Dosificador (4)	Revisión 3/ Cambio	Mecánico	200
	Piñones Naranja Banda Plástica (2)	Revisión 3/ Cambio	Mecánico	200
	Banda Plástica	Revisión 2/ Cambio	Mecánico	200
	Flauta (s) Dosificación	Revisión	Mecánico	200
	Tuberías Entrada Líquido Dosificador	Revisión Fugas	Mecánico	100
	Válvulas Tubería Entrada Líquido Dosificador	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	200
	Tubería Retorno Líquido Dosificador	Revisión Fugas	Mecánico	100
	Vál. Tubería Retorno Líq. Dosificador	Revisión 1 / Cambio	Mecánico	200
Motor Bomba Retorno Aceite	Revisión de Amperaje	Electrónico	750	
Motor Bomba Retorno Aceite	Revisión 3	Electrónico	3600	
Bomba Retorno Aceite	Revisión / Limpieza	Mecánico	500	

(5) Plan de mantenimiento recomendado a la lavadora de latas.

TABLA 14  
PLAN DE MANTENIMIENTO EN LA LAVADORA DE LATAS

PLAN DE MANTENIMIENTO					
Área:	Enlatado		Línea: Lavadoras		
Máquina	Componente	Trabajo Clase	Tipo	Frec. en horas	
Sistema Bomba No. 1	Motor Bomba No. 1	Revisión de Amperaje	Electrónico	750	
	Motor Bomba No. 1	Revisión 3	Electrónico	3600	
	Bomba No. 1	Revisión 3/ Limpieza	Mecánico	500	
	Acople Motor – Bomba No. 1	Revisión 3	Mecánico	200	
	Pozo No. 1 (Agua Jabón)	Inspección – Limpieza	Mecánico	100	
	Rejillas Pozo No. 1	Inspección/Reparación	Mecánico	200	
	Termómetro Pozo No. 1	Revisión 3/ Cambio	Mecánico	200	
	Tubería Entrada Vapor Pozo No. 1	Revisión Fugas	Mecánico	100	
	Válvula Control Entrada Vapor Pozo No.1	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	100	
	Tubería Succión Bomba No. 1	Revisión Fugas	Mecánico	200	
	Válvula Cebado Bomba No. 1	Revisión / Cambio	Mecánico	200	
	Tubería Descarga Bomba No. 1	Revisión Fugas	Mecánico	200	
	Válvula Antes Filtro Salida Ppal. Bomba No. 1	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	200	
	Filtro Salida Ppal. Bomba No. 1	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	200	
Válvula Cheque Salida Ppal. Bomba No. 1	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	200		
Válvula Antes Filtro Salida Aux. Bomba No. 1	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	200		
Filtro Salida Aux. Bomba No. 1	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	200		
Válvula Después Filtro Salida Aux. Bomba No. 1	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	200		
Manómetro Presión Agua Bomba No. 1	Revisión 1 / Cambio	Mecánico	200		
Sistema Bomba No. 2	Motor Bomba No. 2	Revisión de Amperaje	Electrónico	750	
	Motor Bomba No. 2	Revisión 3	Electrónico	3600	
	Bomba No. 2	Revisión 3/ Limpieza	Mecánico	500	
	Acople Motor – Bomba No. 2	Revisión 1	Mecánico	200	
	Tubería Succión Bomba No. 2	Revisión Fugas	Mecánico	200	
	Válvula Cebado Bomba No. 2	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	200	
	Tubería Descarga Bomba No. 2	Revisión Fugas	Mecánico	200	
	Válvula Antes Filtro Salida Principal Bomba No. 2	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	200	
	Filtro Salida Principal Bomba No. 2	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	200	
	Válvula Cheque Salida ppal. Bomba No. 2	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	200	
	Motorreductor Banda Lavadora No. 1	Revisión de Amperaje	Electrónico	750	
	Motorreductor Banda Lavadora No. 1	Revisión 1	Electrónico	3600	
	Motorreductor Banda Lavadora No. 1	Cambio de Aceite	Mecánico	1000	
	Motorreductor Banda Lavadora No. 1	Revisión 1	Mecánico	200	
	Cadena Transmisión Motorreductor	Revisión 2 / Ajuste	Mecánico	200	

Lavadora No. 1 (1/2 Lb)	Válvula Paso Entrada Agua Jabón (Amarilla)	Revisión 1 / Cambio	Mecánico	200
	Flauta (s) Dosificación Agua Jabón	Revisión 1	Mecánico	200
	Tubería Retorno Agua Jabón	Revisión Fugas	Mecánico	200
	Tubería Entrada Agua Enjuague	Revisión Fugas	Mecánico	200
Lavadora No. 2 (1/2 Lb)	Válvula Paso Entrada Agua bomba 1	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	200
	Flauta (s) Dosificación Agua Enjuague	Revisión 1	Mecánico	200
	Tubería Retorno Agua Enjuague (Naranja)	Revisión Fugas	Mecánico	200
	Estructura Metálica Lavadora No. 1	Revisión 1 / Reparación	Mecánico	200
Lavadora No. 2 (1/2 Lb)	Motorreductor Banda Lavadora No. 2	Revisión de Amperaje	Electrónico	750
	Motorreductor Banda Lavadora No. 2	Revisión 3	Electrónico	3600
	Motorreductor Banda Lavadora No. 2	Cambio de Aceite	Mecánico	1000
	Motorreductor Banda Lavadora No. 2	Revisión 3	Mecánico	200
	Cadena Transmisión Motorreductor	Revisión 1 / Ajuste	Mecánico	200
	Tubería Entrada Agua Jabón	Revisión Fugas	Mecánico	200
	Válvula Paso Entrada Agua bomba 2	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	200
	Flauta (s) Dosificación Agua Jabón	Revisión 1	Mecánico	200
Tubería Retorno Agua Jabón (Amarilla)	Revisión Fugas	Mecánico	200	

(6) Plan de mantenimiento programado para despaletizador

TABLA 15  
PLAN DE MANTENIMIENTO DESPALETIZADOR

PLAN DE MANTENIMIENTO				
Área:	Enlatado	Línea: Despaletizador		
Máquina	Componente	Trabajo Clase	Tipo	Frec. en horas
Alimentación y Ascensor Estibas	Motorreductor Avance Alimentación de Estibas	Revisión de Amperaje	Electrónico	750
	Motorreductor Avance Alimentación de Estibas	Revisión 3	Electrónico	3600
	Motorreductor Avance Alimentación de Estibas	Cambio de Aceite	Mecánico	1000
	Motorreductor Avance Alimentación de Estibas	Revisión 3	Mecánico	200
	Cadena Paso 120 – 1 (Avance de Estibas)	Revisión 2/ Ajuste	Mecánico	200
	Chumaceras 1.1/4 (12)	Revisión 3/ Cambio	Mecánico	200
	Motorreductor Accionamiento Ascensor	Revisión de Amperaje	Electrónico	750
	Motorreductor Accionamiento Ascensor	Revisión 3	Electrónico	3600
	Motorreductor Accionamiento Ascensor	Cambio de Aceite	Mecánico	1000
	Motorreductor Accionamiento Ascensor	Revisión 3	Mecánico	200
Transporte Envases a Elevador Magnético	Balineras Ascensor (4)	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	200
	Estructura General Paletizador	Pintura	General	1200
	Motorreductor Banda Intralox (Principal)	Revisión de Amperaje	Electrónico	750
	Motorreductor Banda Intralox (Principal)	Revisión 3	Electrónico	3600
	Motorreductor Banda Intralox (Principal)	Cambio de Aceite	Mecánico	1000
	Motorreductor Banda Intralox (Principal)	Revisión 3	Mecánico	200
	Banda Intralox (Principal)	Revisión 2/ Cambio	Mecánico	200
Sprockets Banda Intralox (Principal)	Revisión 1/ Cambio	Mecánico	200	

	Chumaceras Banda Intralox (Principal)	Revisión 1 / Cambio	Mecánico	200
	Motorreductor Banda Intralox (Auxiliar)	Revisión de Amperaje	Electrónico	750
Transporte	Motorreductor Banda Intralox (Auxiliar)	Revisión 3	Electrónico	3600
Envases a	Motorreductor Banda Intralox (Auxiliar)	Cambio de Aceite	Mecánico	1000
Elevador	Motorreductor Banda Intralox (Auxiliar)	Revisión 3	Mecánico	200
Magnético	Cadena de Transmisión Banda Intralox	Revisión 2 / Ajuste	Mecánico	200
	Auxiliar			
	Banda Intralox Auxiliar	Revisión 2/ Cambio	Mecánico	200
	Sprockets Banda Intralox Auxiliar	Revisión 3/ Cambio	Mecánico	200

22

#### D. INDICADORES DE DESEMPEÑO

##### (1) Tiempo medio de reparación

Para el cálculo del MTTR se tomará en consideración el año 2019, donde se reportó un total de 227 horas en reparación a toda la línea de producción del área de enlatado, registrando un total de 62 reparaciones en todos los equipos que conforman esta línea.

Partiendo de estos datos, al aplicarse un caso ideal para el cálculo del MTTR, se estima que, con la implementación del plan de mantenimiento preventivo propuesto para la empresa EUROFISH, tanto el tiempo empleado en reparación y el total de arreglos en cada equipo, presentando una disminución del 12% y 15% respectivamente. Luego se procede a realizar el cálculo del MTTR:

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo en reparación}}{\text{Total de reparaciones}}$$

$$MTTR = \frac{200}{53}$$

$$MTTR = 3,77$$

##### (2) Tiempo medio de falla

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo total disponible} - \text{tiempo de inactividad}}{\text{total de paradas}}$$

$$MTBF = \frac{1320 - 227}{304}$$

$$MTBF = 3,59$$

(3) Disponibilidad del equipo

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo total disponible}}{\text{Tiempo total disponible} + \text{Tiempo en reparación}} \times 100$$

$$MTBF = \frac{1320}{1320 + 200} \times 100$$

$$MTBF = 87\%$$

23

#### IV. CONCLUSIONES

Se logra diseñar un plan de mantenimiento eficiente basado en el método RCM a toda la línea de producción del área de enlatado de la industria de conservas de atún de la Empresa EUROFISH de Manta.

El análisis de criticidad por NPR demostró que los equipos más críticos son la cerradora de latas y la máquina Luthi. En ese sentido, la cerradora de latas es considerada crítica debido al constante desgaste que presenta en sus componentes internos.

De igual forma, se realizó el análisis del diagrama de Pareto para identificar cuáles son los sistemas de cada equipo presentes en la línea de producción que están próximos a generar un fallo o avería y requieren de medidas tanto correctivas como preventivas.

Se encontró que el mejor indicador para medir la confiabilidad es el tiempo promedio entre paradas (MTBF) que indica un incremento en la confiabilidad del equipo y una mejora en la calidad de los trabajos de mantenimiento a 3,59, lo que se refleja en la disponibilidad de los equipos de la línea de producción.

El plan de mantenimiento propuesto se logra un 87%, lo que se considera un porcentaje aceptable dada la situación de la empresa.

Se le propuso a la dirección de la empresa EUROFISH la aplicación de este modelo de mantenimiento centrado en la confiabilidad en las otras cinco líneas de producción y en toda la planta por los resultados obtenidos en esta investigación, demostrando que su aplicación puede expandirse o replicarse en cualquier industria atunera.

Es importante destacar, por otro lado, la relación del plan de mantenimiento centrado en confiabilidad RCM y el programa Sismac para la adecuada gestión de las actividades dentro de la planta, pero no solo a este software sino a cualquiera relacionado con la gestión de mantenimiento. Por ser esta metodología ampliamente aplicable en sistema de equipos industriales, teniendo gran reconocimiento en el mundo [12].

En correspondencia con los beneficios económicos que se pueden obtener con la implementación de este plan de mantenimiento centrado en confiabilidad, estos se obtienen sobre todo en la reducción de tiempos muertos en producción y pasar de mantenimiento correctivo a preventivo. Significa tener confiabilidad en la máquina al momento de producir, sin tener fallos imprevistos. Ejemplo: en la línea corren 150 latas de atún por minuto, si se detiene un minuto, la selladora por fallas imprevistas dejará de producir 150 latas de atún, que tienen un valor de pérdida o más bien de no ganancia de aproximadamente unos \$110.00 USD, ese es el costo real de la fábrica cuando la línea para un minuto.

#### REFERENCIAS

- [1] B. Kazaz, T. Sloan, "The impact of process deterioration on production and maintenance policies," *European Journal of Operational Research*, vol. 227, no. 1, pp. 88-100, 2013.

- [2] Integra Markets, *Gestión y planificación del mantenimiento industrial*, Lima: Escuela de Gestión Empresarial, 2017.
- [3] O. Campos-López, G. Tolentino-Eslava, M. Toledo-Velázquez, "Metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) considerando taxonomía de equipos, base de datos y criticidad de efectos," *Científica*, vol. 23, n° 1, pp. 51-59, 2019.
- [4] A. Díaz-Concepción, L. Villar-Ledo, J. Cabrera-Gómez, A. S. Gil-Henríquez, R. Mata-Alonzo, A. J. Rodríguez-Piñero, "Implementación del Mantenimiento Centrado en la confiabilidad en empresas de transmisión eléctrica," *Ingeniería Mecánica*, vol. 19, n° 3, pp. 137-142, 2016.
- [5] C. R. Vishnu, V. Regikumar, "Reliability based maintenance strategy selection in process plants: a case study," *Procedia technology*, vol. 25, n° 1, pp. 1080-1087, 2016.
- [6] Y. Alfonso-Padura, A. E. García-Tol, A. Díaz-Concepción, A. J. Rodríguez-Piñero, M. B. Hourné-Calzada, G. Cedrón-Pérez, "Análisis de criticidad en los sistemas mecánicos de los grupos electrógenos," *Revista de Ingeniería Energética*, vol. 48, n° 3, pp. 224-230, 2017.
- [7] J. Barrios, "Análisis y diagnóstico de los tipos de mantenimiento en la pequeña y gran minería aurífera en la subregión del Bajo Cauca, Antioquia," *Servicio Nacional de Aprendizaje SENA*, vol. 1, n° 1, pp. 17-24, 2018.
- [8] G. A. Mora, *Mantenimiento estratégico para empresas generales o de servicio*, Medellín: AMG, 2008, pp. 30-130.
- [9] A. Daquinta-Gradaille, C. Pérez-Olmo, "Metodología de Análisis de criticidad integral de las cosechadoras de caña de azúcar CASE IH," *Revista Ingeniería Agrícola*, vol. 8, n° 2, pp. 55-61, 2018.
- [10] A. Enríques-Gaspar, A. Díaz-Concepción, L. Villar-Ledo, A. Castillo-Serpa, A. J. Rodríguez-Piñero, A. Alfonso-Álvarez, "Tecnología para el análisis de criticidad de los sistemas tecnológicos en empresas biofarmacéuticas," *Ingeniería Mecánica*, vol. 23, n° 1, pp. 1-11, 2020.
- [11] E. Zambrano, A. T. Prieto, R. Castillo, "Indicadores de gestión de mantenimiento en las instituciones públicas de educación superior," *Telos: Revista de Estudios Interdisciplinarios en Ciencias Sociales*, vol. 17, n° 3, pp. 495-511, 2015.
- [12] O. Campos-López, G. Tolentino-Eslava, M. Toledo-Velázquez, R. Tolentino-Eslava, "Metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) considerando taxonomía de equipos, base de datos y criticidad de efectos," *Científica*, vol. 23, n° 1, pp. 51-59, 2019.

## Optimización del mecanismo de elevación de una cama robótica hospitalaria

Optimization of a lift mechanism for a hospital robotic bed

Ixhel Jhoselyn **Foster-Vázquez**<sup>1</sup>, Rogelio de Jesús **Portillo-Vélez**<sup>2</sup>, Eduardo Filemón **Vázquez-Santacruz**<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma del Carmen, MÉXICO  
<https://orcid.org/0000-0002-0735-9003> | [ixshell@gmail.com](mailto:ixshell@gmail.com)

<sup>2</sup>Universidad Veracruzana, MÉXICO  
<https://orcid.org/0000-0001-8290-617X> | [rportillo@uv.mx](mailto:rportillo@uv.mx)

<sup>3</sup>Universidad Autónoma Metropolitana, MÉXICO  
<https://orcid.org/0000-0002-7493-4450> | [evazquez.santacruz@izt.uam.mx](mailto:evazquez.santacruz@izt.uam.mx)

Recibido 21-05-2021, aceptado 23-06-2021.

### Resumen

El CamaBot es una cama de hospital robótica compuesta por cuatro mecanismos básicos (soporte del colchón, mecanismo de giro, respaldo y mecanismo de elevación). El mecanismo de elevación consta de dos sistemas de deslizamiento de manivela (MC) que juntos forman un sistema cinemático de seis barras. El problema que existe en el mecanismo de elevación es que debido a la fuerza que ejercen los actuadores sobre las correderas, los apoyos y juntas del mecanismo de elevación, el mecanismo presenta fallas mecánicas por desgarro en las uniones soldadas. Para resolver la problemática presentada en este artículo, se usó una técnica de optimización numérica basada en algoritmos genéticos utilizando el Matlab® Genetic Algorithm ToolBox, para optimizar la geometría del mecanismo de elevación de CamaBot, minimizando la fuerza ejercida por los actuadores para solucionar el problema de desgarro en las uniones soldadas.

**Palabras clave:** Optimización numérica, algoritmos genéticos, mecanismos, actuadores.

### Abstract

CamaBot is a robotic hospital bed composed of four basic mechanisms (mattress support, panning mechanism, bed base and lifting mechanism). The lifting mechanism consists of two crank-sliding (CS) systems that together form a six-bar kinematic system. The problem that exists in the lifting mechanism is that due to the force exerted by the actuators on the slides, the supports and joints of the lifting mechanism presented mechanical failures due to tearing in welded joints. Currently, CamaBot is in operation from a redesign carried out at that stage. To solve the problematic presented in this article, we have applied a numerical optimization technique based on genetic algorithms using the Matlab® Genetic Algorithm ToolBox, to optimize the geometry of the CamaBot lifting mechanism by minimizing the force exerted by the actuators, aiming at solving the tearing problem at the welded joints.

**Index terms:** Numerical optimization, genetic algorithms, mechanisms, actuators.

## I. INTRODUCCIÓN

El problema de movilidad en personas de edad avanzada y personas con discapacidad motriz implica soluciones utilizando dispositivos con un grado de inteligencia en asistencia para que el paciente logre un movimiento autónomo sin complicación; por ejemplo, sin que el paciente haga esfuerzo excesivo o movimientos innecesarios.

La CamaBot es una cama hospitalaria y es un dispositivo inteligente basado en la robótica para el cuidado de la salud de pacientes. Consiste en un sistema mecatrónico y de monitoreo de movimientos automáticos de una cama robótica de hospital, que se apoya de la clasificación de posturas mediante el reconocimiento de patrones. La cama soporta un peso máximo de 300 kg [1].

En la actualidad el dispositivo se encuentra funcional de manera parcial para realizar pruebas operacionales en el Hospital Juárez de México. Sin embargo, fue necesario un rediseño en el mecanismo de elevación dado que en las uniones y en los soportes de los actuadores se presentó una falla mecánica por desgarro (véase Figs. 3 y 5), debido a la fuerza que ejercen estos mismos. La fuerza que ejercen los actuadores en el mecanismo de elevación se distribuye en los diversas articulaciones y puntos de apoyo del mecanismo, como se muestra en la sección III. Por esta razón, se asume que, al minimizar la fuerza requerida por los actuadores, implícitamente se están minimizando las fuerzas de reacción del mecanismo y por tanto los esfuerzos producidos en las uniones soldadas, sin considerar un cambio de sección transversal del elemento mecánico, también se minimiza. De esta observación se plantea usar *algoritmos genéticos* (AG) para minimizar la fuerza ejercida por los actuadores en las uniones del mecanismo de elevación, por medio de la selección de las dimensiones óptimas de sus eslabones, por lo tanto, es necesario plantear un problema de optimización.

Los conceptos básicos relacionados con la optimización matemática fueron establecidos en los siglos XVIII y XIX con los trabajos de Lagrange [2] y Euler [3] respectivamente, pero no fue hasta el siglo XX que Dantzing [4] definió los principios de la programación matemática; estos métodos clásicos y entre otros no mencionados inicialmente fueron utilizados para la optimización de estructuras, como en [5], Pauli Pedersen, propuso una solución al problema del diseño de masa mínima de armazones de usos múltiples utilizando un método de gradiente con límites de movimiento. Reinschmidt *et al.* aplicaron técnicas de programación lineal para encontrar diseños de armaduras con pesos mínimos para satisfacer condiciones de estabilidad [6]. También, Lipson y Gwin [7] aplicaron el método simplex para la optimización al diseño de peso mínimo de las estructuras de armazón tridimensional. Los métodos de optimización clásica han sido remplazados por un conjunto de técnicas metaheurísticas, entre ellas se encuentran los algoritmos genéticos. Los AG son técnicas de solución de problemas de optimización utilizados en diversas áreas como en informática, medicina, ingeniería, entre otras, para resolver problemas de búsqueda y optimización. En esta última área se aplica AG para encontrar diseños óptimos en estructuras mecánicas como en [8], Jenkins demostró el éxito de utilizar técnicas de optimización con algoritmos genéticos para obtener una masa óptima. Annicchiarico y Cerrolaza [9] aplicaron técnicas de optimización basadas en algoritmos genéticos para estructuras bidimensionales de elementos finitos, sujeto a restricciones de tensión, desplazamiento y pandeo. También Coello y Christiansen [10] propusieron el uso de algoritmos genéticos como una herramienta para resolver problemas de optimización multiobjetivo en estructuras mecánicas usando el concepto de mínimo y máximo. El problema de síntesis de mecanismos con algoritmos genéticos está siendo estudiado recientemente [11], incluso con aplicaciones a la rehabilitación de [12]. En este trabajo se plantea el problema de diseño del mecanismo de elevación de la CamaBot como un problema de optimización numérica utilizando AG para minimizar las fuerzas ejercidas por los actuadores.

En este trabajo se desarrolla como sigue. En la sección 2, se presenta una descripción en general del mecanismo de elevación y la problemática actual. En la sección 3 se introduce al problema de síntesis del mecanismo de elevación, se obtiene la cinemática del mecanismo y en la sección 4 se muestra el cálculo de las fuerzas en los actuadores. En la sección 5, se ofrece una breve explicación de un algoritmo genético y de las partes que lo conforman. En la sección 6, se plantea el problema de síntesis como un problema de optimización numérica (estrategia de optimización). En la sección 7, se describe la metodología utilizada en este trabajo, y en la sección 8 se presentan los resultados. En la sección 9 se presentan las conclusiones del trabajo y, finalmente, se muestran las referencias.

## II. MECANISMO DE ELEVACIÓN

El mecanismo de elevación consta de dos mecanismos manivela-corredera (MC) acoplados a un mecanismo de seis barras que permite el desplazamiento vertical y longitudinal de la sección, este se muestra en la Fig. 1.

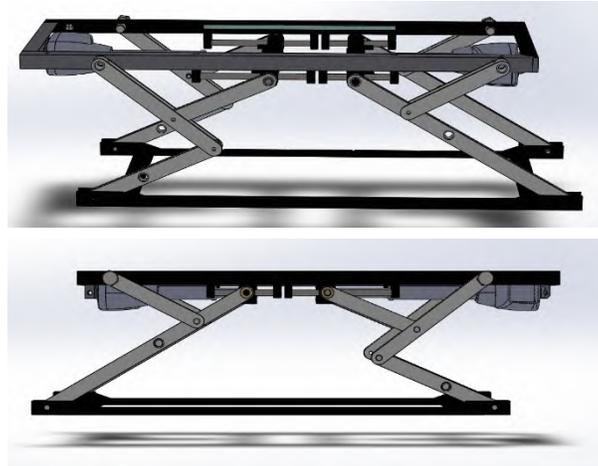


Fig. 1. Mecanismo de elevación.

### A. Problema del mecanismo de elevación

La CamaBot es un dispositivo mecatrónico integrado por diferentes partes mecánicas con la finalidad de brindar asistencia a personas con problemas motrices. En la etapa de pruebas y manufactura; la sección del mecanismo de elevación presentó una falla mecánica por desgarre en las uniones y soporte de los actuadores, esta falla fue debido a la fuerza ejercida por estos mismos. En la Fig. 2 se muestra el armado del mecanismo de elevación, en la Fig. 3 una parte de uno de los dos mecanismos manivela corredera, y en la Fig. 4 se presenta un acercamiento de las uniones.



Fig. 2. Armado del mecanismo de elevación.



Fig. 3. Acercamiento de las uniones de los eslabones del mecanismo de elevación.



Fig. 4. Acercamiento de las uniones de los eslabones del mecanismo de elevación.

En la Fig. 5 se presenta el soporte de la corredera, esta parte se acopla con los actuadores y en la Fig. 6 se observan como parte del armado final de la sección de elevación.



Fig. 5. Soporte de la corredera del mecanismo de elevación.

### III. SÍNTESIS DE MECANISMOS

A continuación, se brinda una breve explicación del problema de síntesis de mecanismos, [13], [14]. El término síntesis en mecánica, se refiere al diseño o creación de un mecanismo para obtener un movimiento deseado. La síntesis o el problema de síntesis se divide en tres partes, síntesis de tipo, síntesis de número y síntesis dimensional. La síntesis de tipo se refiere a la clase de mecanismo seleccionado, por ejemplo, un sistema de levas, bandas, poleas o mecanismos planares. La síntesis de número se ocupa del número de eslabones y de articulaciones o pares que se requieren para obtener una movilidad determinada. La síntesis dimensional es la encargada de determinar las dimensiones de los eslabones de forma individual. El problema de síntesis dimensional se subdivide en 3 categorías: generación de funciones, guiado de sólidos y generación de trayectoria.

En la categoría de generación de funciones, se trata de que un elemento de salida gire, oscile, o tenga un movimiento alternativo, según una función del tiempo, o bien, una función del movimiento de entrada especificada. La categoría de guiado de sólidos reside en mover un objeto de una posición a otra. Por último, en la categoría de generación de trayectoria implica lograr que un punto del acoplador genere una trayectoria previamente establecida, [11].



Fig. 6. Armado final de la sección de elevación.

#### A. Problema de síntesis de mecanismo de elevación

Para el problema de síntesis, se presenta en la Fig. 7 el diagrama vectorial del mecanismo de elevación que es un acoplamiento de dos mecanismos manivela corredera y un mecanismo de 6 barras (M6B), las partes que lo componen son: para los mecanismos MC,  $\bar{r}_{11}$  y  $\bar{r}_{12}$  son los eslabones de referencia,  $\theta_{11}$ ,  $\theta_{12}$  son sus respectivos ángulos,  $\bar{r}_{21}$  y  $\bar{r}_{22}$  son los eslabones de la manivela,  $\theta_{21}$ ,  $\theta_{22}$  son sus respectivos ángulos,  $\bar{r}_{31}$  y  $\bar{r}_{32}$  son los eslabones del acoplador,  $\theta_{31}$ ,  $\theta_{32}$  son sus respectivos ángulos, por último se tienen  $\bar{r}_{41}$  y  $\bar{r}_{42}$  son los eslabones de la corredera,  $\theta_{41}$ ,  $\theta_{42}$  son sus respectivos ángulos. Para el M6B se tienen los eslabones restantes  $P_a$  (eslabón soporte) con su respectivo ángulo  $\theta P_a$ ,  $P_b$  (eslabón base de la cama) con su respectivo ángulo  $\theta P_b$ ,  $P_c$  (eslabón soporte) con su respectivo ángulo  $\theta P_c$ ,  $P_d$  (eslabón soporte) con su respectivo ángulo  $\theta P_d$ , y D (eslabón base del colchón) con su respectivo ángulo  $\theta_d$ . Es importante mencionar que, para simplificar el análisis se invirtió el mecanismo girándolo 180 grados.

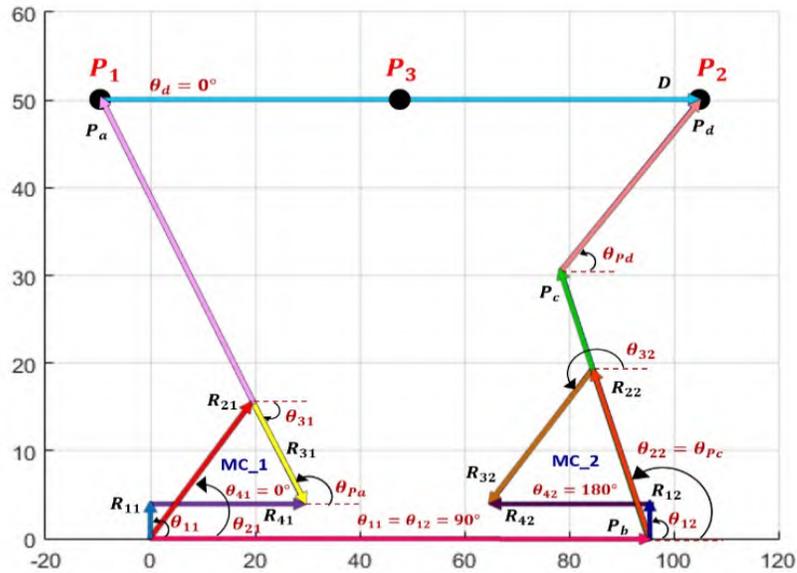


Fig. 7. Diagrama vectorial del mecanismo de elevación.

*B. Modelo cinemático del mecanismo de elevación.*

Para obtener el modelo cinemático del mecanismo de elevación, primero se determina el modelo cinemático del mecanismo manivela corredera 1 (MC\_1) como un mecanismo independiente, se tomó como referencia el cálculo de la cinemática del MC estándar establecido en la referencia [15] pero con algunas modificaciones. Como primer paso se obtiene la ecuación de circuito cerrado descrita por la ecuación (1).

$$r_{21} + r_{31} = r_{11} + r_{41} \tag{1}$$

Aplicado la forma polar a cada uno de los elementos de la ecuación (1), se obtiene la ecuación (2):

$$r_{21}e^{j\theta_{21}} + r_{31}e^{j\theta_{31}} = r_{11}e^{j\theta_{11}} + r_{41}e^{j\theta_{41}} \tag{2}$$

Aplicando la ecuación de Euler a la ecuación (2) y separando la parte real de la imaginaria se obtiene la ecuación (3):

$$\begin{aligned} r_{21}\cos\theta_{21} + r_{31}\cos\theta_{31} &= r_{11}\cos\theta_{11} + r_{41}\cos\theta_{41} \\ r_{21}\sin\theta_{21} + r_{31}\sin\theta_{31} &= r_{11}\sin\theta_{11} + r_{41}\sin\theta_{41} \end{aligned} \tag{3}$$

Los pasos anteriores son igual al cálculo de la cinemática de un mecanismo de cuatro barras, sin embargo, para un MC el ángulo  $\theta_{11}$  se sustituye por  $(\theta_{41} - 90)$  ecuación (4), esta parte define la configuración del mecanismo MC, para esta parte se hace el cálculo para una configuración abierta.

$$r_{21}\cos\theta_{21} + r_{31}\cos\theta_{31} = r_{11}\cos(\theta_{41} - 90) + r_{41}\cos\theta_{41} \tag{4}$$

$$r_{21} \sin \theta_{21} + r_{31} \sin \theta_{31} = r_{11} \sin(\theta_{41} - 90) + r_{41} \sin \theta_{41}$$

Simplificando la ecuación (4) queda el sistema de ecuaciones (5):

$$r_{21} \cos \theta_{21} + r_{31} \cos \theta_{31} = r_{11} \cos(\theta_{41} - 90) + r_{41} \cos \theta_{41} \quad (5)$$

$$r_{21} \sin \theta_{21} + r_{31} \sin \theta_{31} = r_{11} \sin(\theta_{41} - 90) + r_{41} \sin \theta_{41}$$

7

Para obtener la posición angular de  $\theta_{31}$ , el lado izquierdo del sistema de ecuaciones (5) debe expresarse en términos de  $\theta_{21}$ , como la ecuación (6):

$$r_{21} \cos \theta_{21} = r_{11} \sin \theta_{41} + r_{41} \cos \theta_{41} - r_{31} \cos \theta_{31} \quad (6)$$

$$r_{21} \sin \theta_{21} = -r_{11} \cos \theta_{41} + r_{41} \sin \theta_{41} - r_{31} \sin \theta_{31}$$

Elevando al cuadrado y sumando sus términos de la ecuación 6, se obtiene la ecuación (7):

$$A \cos \theta_{31} + B \sin \theta_{31} + C = 0 \quad (7)$$

Donde:

$$A = -2(r_{11}r_{31} \sin \theta_{41} + r_{41}r_{31} \cos \theta_{41})$$

$$B = 2(r_{11}r_{31} \cos \theta_{41} - r_{41}r_{31} \sin \theta_{41})$$

$$C = r_{11}^2 - r_{21}^2 + r_{31}^2 + r_{41}^2$$

La ecuación (7) presenta una única incógnita  $\theta_4$ , pero es argumento de dos funciones diferentes, por lo tanto, se deben aplicar las siguientes identidades trigonométricas ecuación (8):

$$\cos \theta = \frac{1 - \tan^2 \frac{\theta}{2}}{1 + \tan^2 \frac{\theta}{2}} \quad (8)$$

$$\sin \theta = \frac{2 \tan \frac{\theta}{2}}{1 + \tan^2 \frac{\theta}{2}}$$

Sustituyendo la ecuación (8) en la ecuación (7), se obtiene la ecuación lineal de segundo orden ecuación (9):

$$(C - A) \tan^2 \frac{\theta_{31}}{2} + 2B \tan \frac{\theta_{31}}{2} + (A + C) = 0 \quad (9)$$

Resolviendo la ecuación (9), se obtiene la posición angular de  $\theta_{31}$  ecuación (10):

$$\theta_{31} = 2 \tan^{-1} \left( \frac{-B \pm \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{C - A} \right) \quad (10)$$

Para obtener  $\theta_{21}$  se debe de realizar un procedimiento similar al anterior, por lo tanto, de la ecuación (5) se obtiene la ecuación de Freudenstein en forma compacta ecuación (11).

$$D \cos \theta_{21} + E \sin \theta_{21} + F = 0 \quad (11)$$

Donde:

$$\begin{aligned} D &= -2(r_{11}r_{21} \sin \theta_{41} + r_{41}r_{21} \cos \theta_{41}) \\ E &= 2(r_{11}r_{21} \cos \theta_{41} - r_{41}r_{21} \sin \theta_{41}) \\ F &= r_{11}^2 + r_{21}^2 - r_{31}^2 + r_{41}^2 \end{aligned}$$

Por lo tanto,  $\theta_{21}$  está dado por la ecuación (12):

$$\theta_{21} = 2 \tan^{-1} \left( \frac{-E \pm \sqrt{D^2 + E^2 - F^2}}{F - D} \right) \quad (12)$$

El cálculo realizado anteriormente fue para un mecanismo MC con una configuración abierta, sin embargo, la configuración que se requiere es una configuración cruzada, para lograr esta configuración véase en la Tabla 1 los signos que deben adoptar los radicales de la ecuación (10) y ecuación (12) y el eslabón  $r_{11}$ .

TABLA 1  
SELECCIÓN DEL SIGNO PARA UNA CONFIGURACIÓN CRUZADA

Configuración del mecanismo MC	$r_{41}$	$\theta_{31}$	$\theta_{21}$
Cruzada	-1	$-\sqrt{\quad}$	$+\sqrt{\quad}$

Como segunda parte del procedimiento para el cálculo de la cinemática del mecanismo de elevación se calcula el ángulo de  $\theta_{Pa}$  a partir de  $\theta_{31}$ , por lo tanto, se obtiene la ecuación (13):

$$\theta_{Pa} = \theta_{31} + \pi \quad (13)$$

Se define el ángulo  $\theta_d = 0$ , ya que, el eslabón del soporte del colchón se desea mantener siempre en esa posición.

La cinemática del mecanismo manivela corredera 2 (MC\_2) se obtiene a partir de la formulación de ecuaciones que describen la posición de  $P_2$ . Partiendo de la posición (0,0) se puede seguir diferentes caminos para llegar al punto  $P_2$ , se describen 3 ecuaciones a continuación, ecuación (14), ecuación (15) y ecuación (16):

$$P_2 = r_{11} + r_{41} + P_a + D \quad (14)$$

$$P_2 = P_b + P_c + P_d \quad (15)$$

$$P_2 = P_b + r_{12} + r_{42} - r_{32} - r_{22} + P_c + P_d \quad (16)$$

Descomponiendo las ecuaciones anteriores por sus componentes cartesianos, obtenemos el sistema de ecuaciones (17), el sistema de ecuaciones (18) y el sistema de ecuaciones (19):

$$P_{2x} = r_{41} + P_a \cos \theta_{Pa} + D \quad (17)$$

$$P_{2y} = r_{11} + p_a \sin \theta_{Pa}$$

$$P_{2x} = P_b + P_c \cos \theta_{22} + P_d \cos \theta_{Pd} \quad (18)$$

$$P_{2y} = P_c \sin \theta_{22} + P_d \sin \theta_{Pd}$$

$$P_{2x} = P_b - r_{42} - r_{32} \cos \theta_{32} - r_{22} \cos \theta_{22} + p_c \cos \theta_{22} + P_d \cos \theta_{Pd} \quad (19)$$

$$P_{2y} = r_{12} - r_{32} \sin(\pi - \theta_{32}) - r_2 \sin \theta_{22} + P_c \sin \theta_{22} + P_d \sin \theta_{Pd}$$

Todas las partes de la ecuación (17) son conocidas a partir de la cinemática de MC\_1, por lo tanto, esta ecuación será la coordenada deseada de  $P_2$ . Utilizando cinemática inversa, el sistema de ecuaciones (17) (punto deseado), el sistema de ecuaciones (18) y el sistema de ecuaciones (19) se obtiene el modelo cinemático del MC\_2 y del resto del mecanismo de elevación.

Utilizando la ecuación (18), llevando del lado izquierdo a  $\theta_{22}$  ecuación (20), elevando al cuadrado y sumando sus términos se obtiene la ecuación (21).

$$P_c \cos \theta_{22} = P_{2x} - P_b - P_d \cos \theta_{Pd} \quad (20)$$

$$P_c \sin \theta_{22} = P_{2y} - P_d \sin \theta_{Pd}$$

$$G \cos \theta_{Pd} + H \sin \theta_{Pd} + I = 0 \quad (21)$$

Donde:

$$G = 2(P_b P_d - P_{2x} P_d)$$

$$H = -2P_{2y} P_d$$

$$I = P_{2x}^2 + P_{2y}^2 + P_b^2 + P_d^2 - P_c^2 - 2P_{2x} P_b$$

Por lo tanto,  $\theta_{Pd}$  está dado por la ecuación (22):

$$\theta_{Pd} = 2 \tan^{-1} \left( \frac{-H \pm \sqrt{G^2 + H^2 - I^2}}{I - G} \right) \quad (22)$$

Tomando en cuenta el sistema de ecuaciones (18), llevado a la izquierda a  $\theta_{Pd}$  y siguiendo los pasos anteriores se obtiene la ecuación (23) y ecuación (24):

$$P_d \cos \theta_{Pd} = P_{2x} - P_b - P_c \cos \theta_{22} \quad (23)$$

$$P_d \sin \theta_{Pd} = P_{2y} - P_c \sin \theta_{22}$$

$$J \cos \theta_{22} + K \sin \theta_{22} + L = 0 \quad (24)$$

Donde:

$$J = 2(P_b P_c - P_{2x} P_c)$$

$$K = -2P_{2y} P_c$$

$$L = P_{2x}^2 + P_{2y}^2 + P_b^2 + P_c^2 - P_d^2 - 2P_{2x} P_b$$

Por lo tanto,  $\theta_{22}$  está dado por la ecuación (25).

$$\theta_{22} = 2 \tan^{-1} \left( \frac{-K \pm \sqrt{J^2 + K^2 - L^2}}{L - J} \right) \quad (25)$$

De la ecuación (19), se obtiene  $\theta_{32}$  ecuación (26) de  $P_{2y}$  y  $r_{42}$ , la ecuación (27) se obtiene de  $P_{2x}$ :

$$\theta_{32} = -\sin^{-1} \left( \frac{r_{12} - P_{2y} - r_{22} \sin \theta_{22} + P_c \sin \theta_{22} + P_d \sin \theta_{Pd}}{r_{32}} \right) \quad (26)$$

$$r_{42} = P_b - P_{2x} - r_{32} \cos \theta_{32} + \cos \theta_{22} (P_c - r_{22}) + P_d \cos \theta_{Pd} \quad (27)$$

#### IV. CÁLCULO DE FUERZAS

El objetivo de este trabajo es la minimización del cálculo de las fuerzas ejercidas por los actuadores por medio de la selección óptima de la longitud de sus eslabones. Para determinar las fuerzas ejercidas en los actuadores, es necesario realizar un diagrama de cuerpo libre con las fuerzas internas y externas del mecanismo (véase Fig. 8). En este caso se considera que la fuerza ejercida por el peso del paciente es  $W$  y se encuentra aplicada al centro del eslabón horizontal de la cama, en el punto  $P_3$  de la Fig. 7.

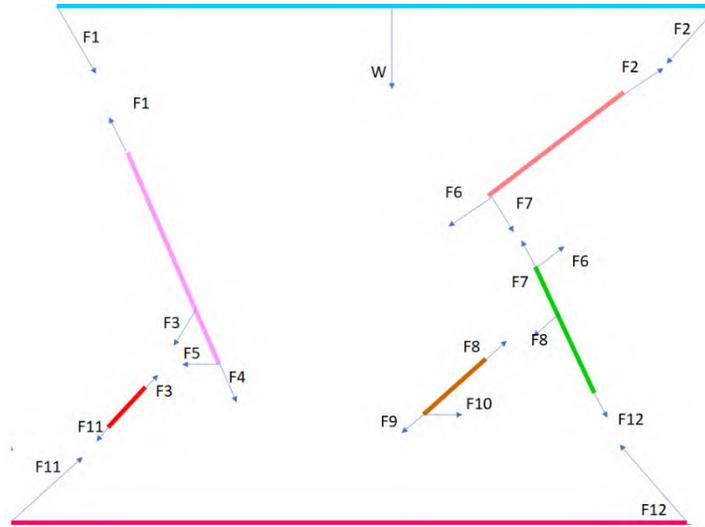


Fig. 8. Diagrama de cuerpo libre del mecanismo de elevación.

La cinemática del mecanismo en general influye en el cálculo de las fuerzas en  $r_{41}$  y  $r_{42}$ . Al considerar las fuerzas mostradas en la Fig. 8 bajo la condición de equilibrio, se puede plantear el siguiente sistema de ecuaciones.

$$\begin{bmatrix}
 A & B & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 C & D & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 E & 0 & F & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 G & 0 & H & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & I & J & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K & L & M & 0 & 0 & N \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N & O & Q & 0 & 0 & R \\
 0 & K & 0 & 0 & 0 & B & N & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & O & 0 & 0 & 0 & D & R & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & H & R
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 F_1 \\
 F_2 \\
 F_3 \\
 F_4 \\
 F_5 \\
 F_6 \\
 F_7 \\
 F_8 \\
 F_9 \\
 F_{10} \\
 F_{11} \\
 F_{12}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0 \\
 W \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 W \\
 0
 \end{bmatrix}$$

Donde:

$$\begin{aligned}
 A &= \cos \theta_{pa} \\
 B &= \cos \theta_{pd} \\
 C &= \sin \theta_{pa} \\
 D &= \sin \theta_{pd} \\
 E &= \cos(\theta_{pa} + \pi) \\
 F &= \cos \theta_{21} \\
 G &= \sin(\theta_{pa} + \pi) \\
 H &= \cos \theta_{21} \\
 I &= \cos(\theta_{21} + \pi) \\
 J &= \cos \theta_{21} \\
 K &= \cos(\theta_{pd} + \pi) \\
 L &= \cos(\theta_{22} + \pi)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M &= \cos(\theta_{32} + \pi) \\
 N &= \cos \theta_{22} \\
 O &= \sin(\theta_{pd} + \pi) \\
 P &= \sin(\theta_{22} + \pi) \\
 Q &= \sin(\theta_{32} + \pi) \\
 R &= \sin \theta_{22} \\
 S &= \cos \theta_{32} \\
 T &= \sin \theta_{32}
 \end{aligned}$$

Por lo tanto, las ecuaciones que se obtienen son: para la fuerza en el primer actuador es  $F_5$  dada por la ecuación (29) y la ecuación (30) para la fuerza  $F_{17}$  en el segundo actuador.

$$F_5 = -\frac{W(\cos \theta_{pa} \cos \theta_{pd} - \cos \theta_{21} \cos \theta_{pd} \cos \theta_{pa} + \cos \theta_{pa} \cos \theta_{pd} \sin \theta_{21})}{(\cos \theta_{pa} \sin \theta_{pd} - \cos \theta_{pd} \sin \theta_{pa} + \cos \theta_{pa} \sin \theta_{21} \sin \theta_{pd} - \cos \theta_{pd} \sin \theta_{21} \sin \theta_{pa})} \quad (28)$$

$$F_{10} = -\frac{W(\cos \theta_{22} \cos \theta_{32} \cos \theta_{pa} \sin \theta_{pd} - \cos \theta_{32} \cos \theta_{pa} \cos \theta_{pd} \sin \theta_{22})}{\left( \begin{aligned} &\cos \theta_{22} \cos \theta_{pa} \sin \theta_{32} \sin \theta_{pd} - \cos \theta_{22} \cos \theta_{pd} \sin \theta_{32} \sin \theta_{pa} - \cos \theta_{32} \cos \theta_{pa} \sin \theta_{22} \sin \theta_{pd} + \dots \\ &\dots + \cos \theta_{32} \cos \theta_{pd} \sin \theta_{22} \sin \theta_{pa} \end{aligned} \right)} \quad (29)$$

Donde  $r_{41}$  corresponde a la fuerza  $F_1$  y  $r_{42}$  a la fuerza  $F_2$ .

## V. ALGORITMOS GENÉTICOS

Los algoritmos genéticos (AG) son métodos estocásticos que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización, están basados en la teoría de la selección natural y fueron desarrollados por John H. Holland a principios de los años sesenta [17].

Un esquema reducido del funcionamiento de un AG es el siguiente:

1. El AG comienza creando una población inicial aleatoria
2. Calcula la aptitud de cada individuo
3. Hace una selección probabilística del individuo basándose en la aptitud.
4. Aplica operadores genéticos para crear la siguiente población.
5. Se repiten los puntos 2 al 4 hasta que el AG satisfaga cierta condición.

En la Fig. 8 se presenta un diagrama de flujo del esquema reducido del funcionamiento de los AG.

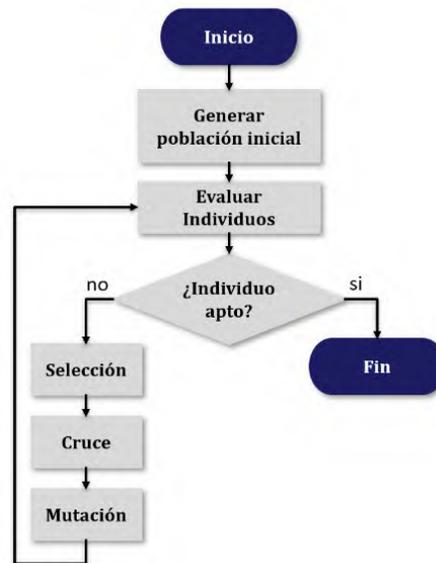


Fig. 8. Diagrama de flujo del funcionamiento de un AG.

El algoritmo genético está conformado por un conjunto  $P$  (población) de  $N$  individuos, esta población es evaluada por una serie de operadores descritos seguidamente.

Los operadores básicos de un AG son:

- Selección: La función de selección elige a los individuos (padres) para formar la próxima generación en función del valor aptitud.
- Cruce: La cruce ocurre cuando los individuos padres intercambian genes para crear un nuevo individuo (hijo).
- Mutación: La mutación se realiza después del cruce (el intercambio de genes) y es la variación de los genes del individuo de forma aleatoria.

## VI. ESTRATEGIA DE OPTIMIZACIÓN

Como se ha mencionado a lo largo de este artículo el objetivo de este trabajo es minimizar las fuerzas ejercidas por los actuadores por medio de la selección óptima de sus eslabones, aunque no se plantea un problema de seguimiento de trayectoria se tomó como referencia la trayectoria producida por el punto  $P_1$  en un desplazamiento de 21 puntos desde una altura máxima hasta una altura mínima de la cama original (CamaBot) como trayectoria deseada, las coordenadas de los 21 puntos se describen en la Tabla 2.

TABLA 2  
COORDENADAS DE LA TRAYECTORIA DESEADA

$P_{1x}$	-9.277	-10.625	-11.827	-12.904	-13.873	-14.748	-15.538	-16.251	-16.893	-17.471	-17.988
	-18.488	-18.855	-19.210	-19.516	-19.774	-19.987	-20.155	-20.280	-20.361	-20.401	-
$P_{1y}$	50.000	47.950	45.900	43.850	41.800	39.750	37.700	35.650	33.600	31.550	29.500
	27.450	25.400	23.350	21.300	19.250	17.200	15.150	13.100	11.050	9.000	-

El problema de síntesis de la CamaBot se establece como un problema de optimización numérica [16], en donde la función objetivo, las variables de diseño y las restricciones son detalladas seguidamente.

#### A. Función objetivo

Se establece como función objetivo la ecuación (30), donde  $x_{sis}(i)$ ,  $Y_{sis}(i)$  son las coordenadas  $x$ ,  $y$  de la trayectoria del sistema,  $(P_{1x}(i), P_{1y}(i))$ , son las coordenadas de la trayectoria del punto  $P$  de la CamaBot (trayectoria de referencia),  $N$  es la última posición de la cama y  $e$  es el error cuadrático.

$$e = \sum_{i=1}^{N=21} \left[ (x_{sis}(i) - P_{1x}(i))^2 + (Y_{sis}(i) - P_{1y}(i))^2 \right] \quad (30)$$

#### B. Vector de variable de diseño

Se establece el vector de diseño  $x_c$ , donde las variables de diseño  $r_{11}, r_{21}, r_{31}, r_{12}, r_{22}, r_{32}, P_a, P_c, P_d$ , son longitudes de los eslabones del mecanismo de elevación y  $r_{41\_min}$  es un valor arbitrario para la configuración de  $r_{41}$ .

$$x_c = [r_{11}, r_{21}, r_{31}, r_{12}, r_{22}, r_{32}, P_a, P_c, P_d, r_{41\_min}] \quad (32)$$

#### C. Restricciones

Se establece como restricciones de desigualdad las siguientes ecuaciones. Ecuación (32), Ecuación (33) y Ecuación (34):

$$P_{1y} \leq 10 \quad (33)$$

$$F_5 \leq 11000 \quad (34)$$

$$F_{10} \leq 11000 \quad (35)$$

Donde la ecuación (32) es una restricción para que no exceda la altura mínima de la CamaBot, la ecuación (33) y (34) son las restricciones para el límite de las fuerzas de  $r_{41}$  y  $r_{42}$ , donde no debe exceder de 11000 N.

#### D. Problema de optimización general

Un problema de optimización general se puede escribir como [16]:

$$\min \text{ o } \max f(x) \quad (36)$$

Sujeto a:

$$g(x) \leq 0 \quad \in \mathbb{R}^m \quad (37)$$

$$h(x) = 0 \quad \in \mathbb{R}^k \quad (38)$$

$$x_{min} < x < x_{max} \quad \in \mathbb{R}^p \quad (39)$$

Donde:

$x$  es un vector de diseño n-dimensional.

$f(x)$  es la función objetivo.

$g(x)$  son las restricciones de desigualdad.

$h(x)$  son las restricciones de igualdad.

1) *Problema de optimización del mecanismo de elevación*

Sea el problema de optimización numérica descrito por la ecuación (39), donde se minimiza la ecuación (30) (función objetivo).

$$\min f(x_c) = \sum_{i=1}^{N=21} \left[ (x_{sis}(i) - P_{1x}(i))^2 + (Y_{sis}(i) - P_{1y}(i))^2 \right] \quad (40)$$

Sujeto a:

$$g_1: -P_{1y} + 10 \leq 0 \quad (41)$$

$$g_2: F_1 - 11000 \leq 0 \quad (42)$$

$$g_2: F_1 - 11000 \leq 0 \quad (43)$$

Con

$$x_{c\min} < x_c < x_{c\max} \quad (44)$$

TABLA 3  
LÍMITES DE LAS VARIABLES DE DISEÑO.

	$r_{11}$	$r_{21}$	$r_{31}$	$r_{12}$	$r_{22}$	$r_{32}$	$P_a$	$P_c$	$P_d$	$r_{4\min}$
$x_{c\max}$	5	30	20	5	30	25	70	40	30	35
$x_{c\min}$	3	20	10	3	20	20	50	30	25	15

VII. METODOLOGÍA A DESARROLLAR

La metodología que se utilizó para resolver el problema de síntesis dimensional para minimizar las fuerzas ejercidas por los actuadores se describe a continuación:

1. Determinar la cinemática del mecanismo de elevación:
  - a. Calcular la cinemática del MC\_1.
  - b. Calcular el punto deseado  $P_2$  con base en la cinemática calculada para MC\_1.
  - c. Calcular la cinemática del mecanismo MC\_2 por cinemática inversa.
2. Hacer el análisis de fuerzas para el cálculo de las fuerzas ejercidas por los actuadores.
3. Establecer la estrategia de optimización.

4. Definir las partes matemáticas que conforman la estrategia de optimización:
  - a. Función objetivo.
  - b. Vector de variables de diseño.
  - c. Restricciones.
5. Definir el problema de optimización.
6. Hacer el código utilizando AG.
7. Comparar los resultados con los valores anteriores de la CamaBot.
8. Regresar a alguno de los puntos si es necesario.

16

En la Fig. 9, se presenta el diagrama de flujo de los pasos presentados anteriormente.

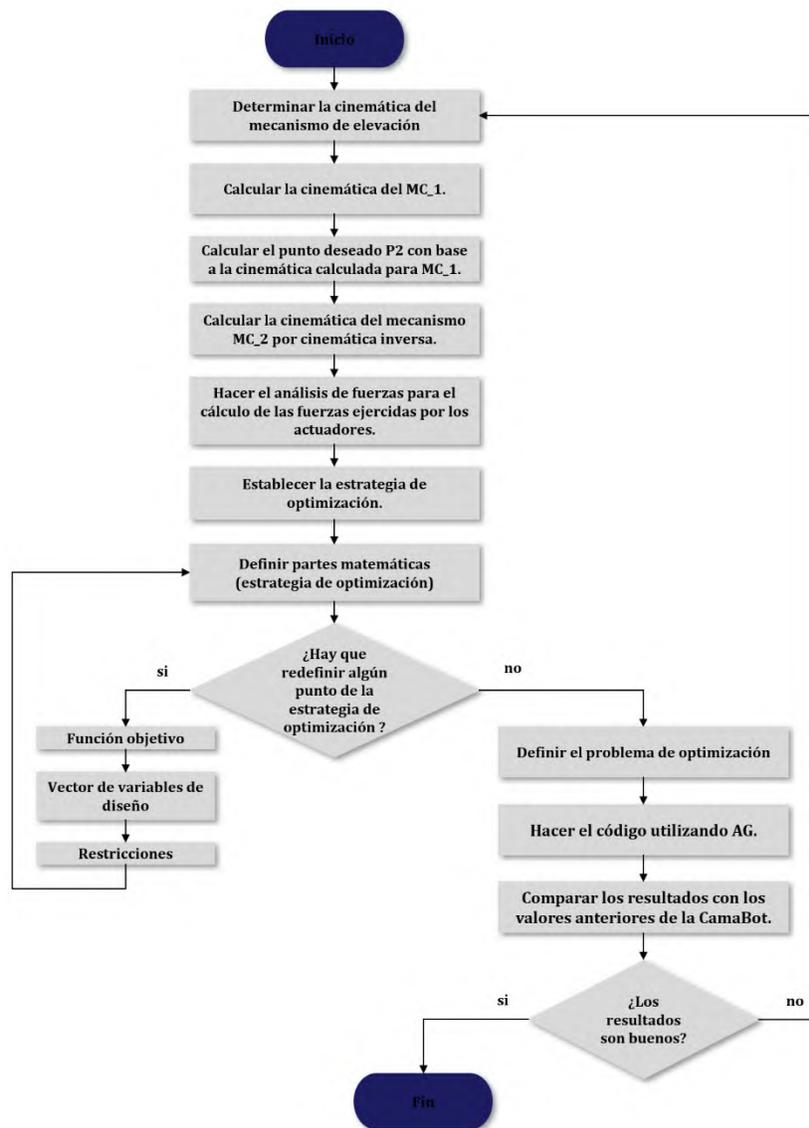


Fig. 9. Diagrama de flujo de la metodología desarrollada.

### VIII. RESULTADOS

Se realizaron un total de 10 corridas, los valores del vector de diseño, las fuerzas de los actuadores y el resultado del error se encuentran en la Tabla 4.

En la Tabla 5 se muestran los valores actuales de la CamaBot y las fuerzas aplicadas en los actuadores en la posición 21 (posición mínima de la cama).

En la Tabla 4 se muestra con rojo el mejor valor según el resultado de las fuerzas y no en cuanto al resultado del error.

En la Fig. 10, se muestra el diagrama de la CamaBot actual con sus 21 posiciones. En la Fig. 11, se muestra el diagrama de la cama de la corrida 5.

17

TABLA 4  
RESULTADOS OBTENIDOS EN EL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN.

# de corrida	$r_{11}$	$r_{21}$	$r_{31}$	$r_{12}$	$r_{22}$	$r_{32}$	$P_a$	$P_c$	$P_d$	$r_{4\ min}$	$F_5$	$F_{10}$	error
1	4.7938	22.3546	18.5008	3.0062	29.9999	20.0026	57.1296	31.9721	29.8835	28.5130	10999.752	7999.983	878.2505
2	3.3192	21.1739	18.7201	3.0029	29.9999	20.0566	57.6050	32.6645	29.9357	27.8022	10999.798	7999.599	836.4086
3	3.8292	20.6195	17.7509	3.0329	29.9994	20.0366	54.8557	30.6694	29.1502	26.3653	10999.083	7999.664	814.8621
4	3.9525	20.2502	17.7719	3.0040	29.9996	20.0111	55.7787	32.6342	29.6832	25.8066	10999.418	7996.680	847.5612
5	3.5361	20.2406	18.1832	3.0017	29.9975	20.0029	56.1547	32.6884	29.9763	26.2814	10970.024	7993.098	844.9389
6	4.7979	21.7429	18.1365	3.0010	30.0000	20.0072	56.5299	31.9140	29.4846	27.5342	10999.991	7999.949	859.6657
7	3.9166	20.0930	17.3988	3.0206	30.0000	20.0084	55.0800	32.6845	29.9982	25.2980	10997.550	7994.223	833.6928
8	4.6918	20.4549	16.9870	3.0007	29.9997	20.0237	54.3943	32.1017	29.6268	25.1174	10999.407	7999.898	838.6987
9	4.5249	20.9178	17.8960	3.0085	29.9999	20.0028	55.9787	32.6230	29.9043	26.4577	10999.113	7999.878	869.3413
10	3.2065	21.0076	18.5565	3.0017	29.9998	20.0092	56.8052	31.7016	29.5851	27.5867	10999.809	7999.952	808.8039

TABLA 5  
VALORES ACTUALES DEL CAMABOT.

$r_{11}$	$r_{21}$	$r_{31}$	$r_{12}$	$r_{22}$	$r_{32}$	$P_a$	$P_c$	$P_d$	$r_{4\ min}$	$F_5$	$F_{10}$
4	25	15.021	4	22.5	25.013	60.010	35	32.502	29.2613	26667	11549

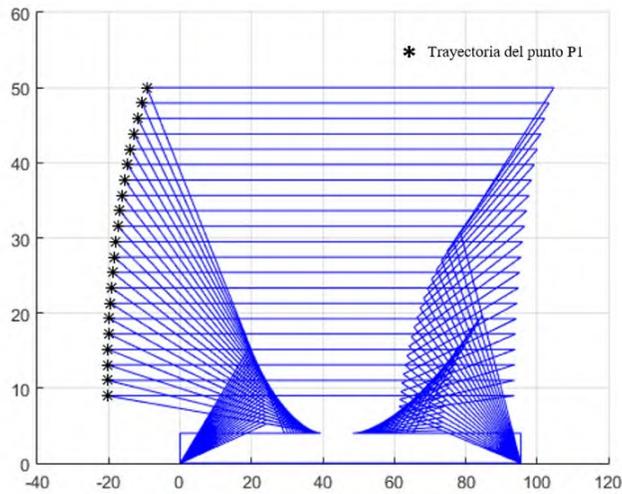


Fig. 10. Diagrama de movimiento de la CamaBot actual.

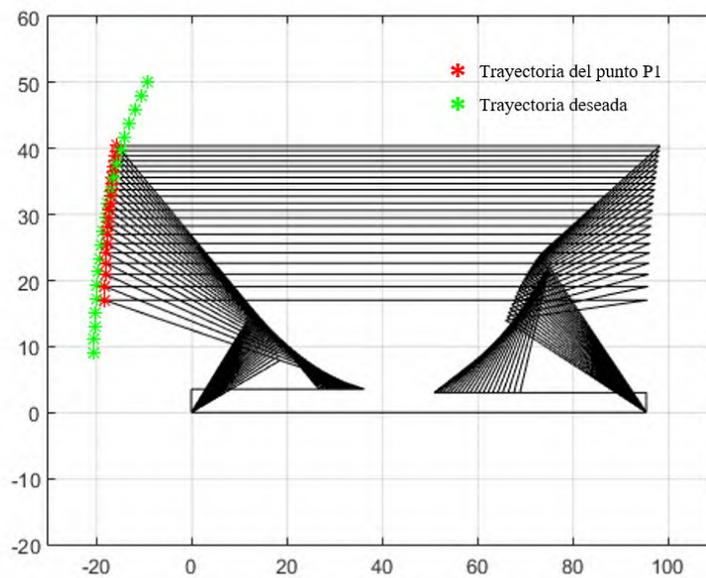


Fig. 11. Diagrama de la corrida de la cama 5.

### IX. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta los resultados de la minimización de las fuerzas del mecanismo de elevación de la CamaBot. Aunque se propone la trayectoria de la cama actual como referencia para la nueva cama, el enfoque del trabajo es la minimización de las fuerzas en los actuadores. Los errores presentados en la tabla 4 son resultados numéricos que si bien no son cercanos a cero cumplen con los requerimientos de movimiento y

fuerza. Además, el problema se puede replantear para buscar mejores soluciones en el espacio de diseño de Camabot.

De las tablas 4 y 5 se concluye que se encontró un resultado en donde las fuerzas disminuyeron notablemente, pero no significa que exista un mejor valor. Este documento muestra algunos de los resultados del presente trabajo realizado hasta el momento, se continúa trabajando para aportar más en el contexto de la minimización de las fuerzas del problema del mecanismo de elevación.

#### REFERENCIAS

- [1] E. Vázquez Santacruz *et al.* (2015), "Mechatronic Approach to an Intelligent Machine: the Case of an Assistive Device," *Research in Computing Science*, 2015, vol. 100, pp. 115-127.
- [2] J. Lagrange, *Obras de Lagrange*, Gauthier-Villars, 1882.
- [3] L. Euler, "Leonhard Euler y los puentes de Königsberg," *Scientific American*, vol. 189, no. 1, 1953, pp. 66-72.
- [4] D. J. Albers, C. Reid, "An interview with George B. Dantzig: The father of linear Programming," *The college mathematics journal*, vol. 17, no. 4, 1986, pp. 292-314.
- [5] P. Pedersen, "On the optimal layout of multi-purpose trusses," *Computers & Structures*, vol. 2, no. 5-6, 1972, pp. 695-712.
- [6] K. F. Reinschmidt, A. D. Russell, "Applications of linear programming in structural layout and optimization," *Computers & Structures*, vol. 4, no. 4, 1974, pp. 855-869.
- [7] S. L. Lipson, L. B. Gwin, "The complex method applied to optimal truss configuration," *Computers & Structures*, vol. 7, no. 3, 1977, pp. 461-468.
- [8] H. Ramírez, R. Márquez, F. Echeverría, O. Santiago, *Control de Sistemas no Lineales*, México: Pearson - Prentice Hall, 2005.
- [9] W. M. Jenkis, "On the application of natural algorithms to structural design optimization," *Engineering structures*, vol. 19, no. 4, 1997, pp. 302-308.
- [10] W. Annicchiarico, M. Cerrolaza, "Optimization of finite element bidimensional models: an approach based on genetic algorithms," *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 29, no. 3-4, 1998, pp. 231-257.
- [11] C. A. Coello, A. Christiansen, "Multiobjective optimization of trusses using genetic algorithms," *Computers & Structures*, vol. 75, no. 6, 2000, pp. 647-660.
- [12] A. Rodríguez-Molina, M. G. Villarreal-Cervantes, M. Aldape-Pérez, "Indirect adaptive control using the novel online hypervolume-based differential evolution for the four-bar mechanism," *Mechatronics*, vol. 69, 2020.
- [13] J. Muñoz-Reina, M. G. Villarreal-Cervantes, L. G. Corona-Ramírez. "Empirical Study of Constraint-Handling Techniques in the Optimal Synthesis of Mechanisms for Rehabilitation," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 18, 2021.
- [14] R. L. Norton, *Diseño de maquinaria: Una introducción a la síntesis y al análisis de mecanismos y maquinas*, México; McGraw-Hill 1994.
- [15] J. Shigley, J. Uicker, J. Pérez, H. C. de Contín, *Teoría de máquinas y mecanismos*, México; McGraw-Hill. 1983.
- [16] R. P. Moreno, *Análisis de mecanismos y problemas resueltos*, España: Alfaomega, 2006.
- [17] S. C. Chapra, R. P. Canale, *Métodos numéricos para ingenieros*, México: McGraw-Hill, 2007.

## Sistema inteligente de monitoreo para condiciones ambientales en Industria 4.0

Intelligent monitoring system for environmental conditions in Industry 4.0

Manuel Luna-López<sup>1</sup>, Minerva Hernández-Lozano<sup>2</sup>, Rosario Aldana-Franco<sup>3</sup>, Ervin Álvarez-Sánchez<sup>4</sup>  
José Gustavo Leyva-Retureta<sup>5</sup>, Francisco Ricaño-Herrera<sup>6</sup>, Fernando Aldana-Franco<sup>7</sup>

Universidad Veracruzana, MÉXICO

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0001-5454-1740>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-11248103>

<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0002-0503-6024>

<sup>4</sup><https://orcid.org/0000-0002-0790-0429>

<sup>5</sup><https://orcid.org/0000-0001-5123-0111>

<sup>6</sup><https://orcid.org/0000-0002-0151-7146>

<sup>7</sup><https://orcid.org/0000-0003-4532-8782> | [faldana@uv.mx](mailto:faldana@uv.mx)

Recibido 14-05-2021, aceptado 30-08-2021.

### Resumen

La revolución tecnológica que implica la implementación de Industria 4.0 obliga a utilizar la tecnología a monitorear las condiciones en las que la producción se lleva a cabo. Esto repercute en los productos obtenidos, pero sobre todo en la salud del personal que labora en las industrias. Lo cual tiene como principal beneficio la reducción de los accidentes de trabajo y las enfermedades producidas por las condiciones ambientales desfavorables. Uno de los gases más peligrosos en el sector industrial es el Monóxido de Carbono, cuyo efecto en el cuerpo humano es el intoxicar los sistemas. Así se presenta un sistema que permite monitorear cuatro variables ambientales (humedad relativa, monóxido de carbono, radiación térmica, luminosidad) que son variables importantes en ambientes industriales en donde se emplean motores. El sistema opera de forma inteligente mediante una herramienta de inteligencia artificial que permite clasificar (tomar decisiones) llamada árbol de decisión. Empleando WEKA, se probaron tres algoritmos para la construcción del árbol de decisión: J.48, Random Forest y Random Tree. El experimento arrojó que el algoritmo J.48 obtuvo un promedio 99.86% de aciertos en la clasificación de todas las repeticiones. El algoritmo de Random Forest obtuvo 99.31% de la clasificación correcta. Mientras que Radom Tree tuvo 95.07% de clasificación correcta. Este sistema permite modificar el estado de un sistema de ventilación, refrigeración, semáforo de variables y lámpara de emergencia. Además, el sistema envía los datos colectados mediante Internet de las Cosas (IoT) a un cliente quien puede consultar la información en tiempo real.

**Palabras clave:** Industria 4.0, internet de las cosas, control inteligente, árbol de decisión.

### Abstract

The technological revolution that implies the implementation of Industry 4.0 forces the use of technology to monitor the conditions in which production takes place. This has repercussions on the products obtained, but above all on the health of the personnel working in the industries. Which has as its main benefit the reduction of work accidents and diseases caused by unfavorable environmental conditions. One of the most dangerous gases in the industrial sector is Carbon Monoxide, whose effect on the human body is to poison the systems. This is how a system is presented that allows monitoring four environmental variables (relative humidity, Carbon monoxide, Thermal radiation, luminosity) which are important variables in industrial environments where motors are used. The system operates intelligently through an artificial intelligence tool that allows classifying (making decisions) called the decision tree. Using WEKA, three algorithms were tested for the construction of the decision tree: J.48, Random Forest, and Random Tree. The experiment showed that the algorithm J.48 obtained an average 99.86% of correctness in the classification of all the reviews. The Random Forest algorithm obtained 99.31% of the correct classification. While Radom Tree had a 95.07% correct rating. This system allows modifying the status of a ventilation, cooling, variable traffic light and emergency lamp system. In addition, the system sends the data collected through the Internet of Things (IoT) to a client who can consult the information in real time.

**Index terms:** Industry 4.0, internet of things, intelligent control, decision tree.

## I. INTRODUCCIÓN

Las condiciones ambientales desfavorables en la industria acarrear problemas como accidentes laborales o enfermedades para el personal que interviene en el proceso de fabricación. Lo que repercute en gastos para la empresa o en la baja de personal que impacta al proceso industrial.

Los problemas que se pueden presentar varían de acuerdo con los elementos que forman parte del medio ambiente industrial. Un ejemplo son los motores, que producen monóxido de carbono (CO) que es tóxico para los seres humanos [1]. Se trata de un gas incoloro, inodoro, insaboro e insípido. Los efectos de la intoxicación por este gas son permanentes y en el medio ambiente se encuentra a razón de 0ppm a 1ppm. Para que un ambiente se considere sano, el nivel máximo del monóxido de carbono es de 9ppm, aunque se puede estar expuesto a 50ppm por no más de 8 horas. Los efectos de intoxicación pueden ir desde dolores de cabeza, náusea, vómito hasta la muerte [2].

Otro problema que se puede presentar en ambientes en donde están involucrados motores es la alta humedad en el ambiente. El calor (radiación térmica) que se genera produce que la humedad aumente en el ambiente y el efecto sobre las personas es la deshidratación, efectos sobre el sistema respiratorio y circulatorio.

Industria 4.0 es una nueva tendencia en la industria que presupone una revolución industrial enmarcada por los sistemas ciberfísicos. Este tipo de sistemas requieren del componente físico y un componente en el ciberespacio. Lo que permite interconectar los componentes e intercambiar información para la toma de decisiones [3].

El propósito fundamental es lograr aumentar la producción reduciendo los costos para aumentar las ganancias. Pero este enfoque también implica la transformación de puestos de trabajo y la mejora de las condiciones operativas de las fábricas. Por lo que es importante el diseño y creación de sistemas que incorporen la visión de la Industria 4.0 para la mejora de las condiciones en que los empleados de la industria se encuentran inmersos [4].

Los sistemas que emplean herramientas de Industria 4.0 para el monitoreo de variables han sido aplicados a diferentes ramas. Por ejemplo, el uso de la arquitectura IoT para el monitoreo de las condiciones en la agricultura [5], en donde se busca la mejora de las condiciones en donde se desarrollan los cultivos [6]. Otro ejemplo de sistemas IoT es el monitoreo de las condiciones de los ríos y prevenir desastres sobre comunidades cercanas [7]. También permiten el monitoreo de variables biomédicas en tiempo real para conocer el estado de físico de las personas [8] o de componentes de automóviles [9].

En el caso de la industria, los sistemas de monitoreo de señales basados en componentes de Industria 4.0 se emplean en diferentes aplicaciones. Lo que demuestra la flexibilidad y poder de aplicación de este tipo de tecnología. Por ejemplo, para el monitoreo de gases, fugas de combustible, temperatura de una caldera [10]. Este sistema envía alertas de seguridad sobre presencia de gases tóxicos o fugas de combustible en ambientes industriales a los gerentes mediante una plataforma de servicios Cloud. Esto se realiza mediante una red de sensores inteligentes, que envían la información para ser procesada en un servidor remoto. El disparo de las alertas tiene que ver con los niveles de seguridad establecidos por cada empresa.

En ese mismo sentido, se han creado sistemas que permiten monitorear un conjunto de variables ambientales mediante topologías diversas aplicadas a la red de sensores. Un ejemplo es la topología estrella que enlaza información mediante el protocolo ZigBee [11]. Para este sistema se emplean sensores de gas MQ4 y MQ7, además de un sensor de fuerza resistivo. La información se concentra en un microcontrolador Arduino y se utiliza el protocolo de comunicación IEE 802.15.4. También se emplea el sistema que reduce el tamaño de los mensajes MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Los datos son manejados mediante un servicio IaaS (Infraestructura como servicio) y puede ser visualizados mediante gráficas.

Otro ejemplo se presenta en un sistema de administración de energía [12]. Se trata de un sistema basado en una tarjeta Raspberry Pi y un servidor Cloud aplicado a una compañía manufacturera. El sistema se complementa con sensores para medir la energía existente en la planta. Este sistema tiene el propósito de optimizar el manejo de la energía mediante el análisis histórico y actual del consumo.

De este modo, el propósito de este trabajo implementar un sistema ciberfísico inteligente para el monitoreo de las condiciones ambientales en la industria. Este sistema debe funcionar como apoyo para monitorear las condiciones ambientales respecto a las variables: ppm de monóxido de carbono en el aire, humedad relativa, radiación térmica y luminosidad. Lo que contribuye al cuidado de la salud de los operadores involucrados en este tipo de ambientes.

En la primera sección de este artículo se presenta el problema a resolver junto con las generalidades de la investigación. En la sección de Antecedentes se muestran los conceptos mediante los cuales se plantea la solución del problema presentado. En la sección Propuesta de solución se muestra el proceso de diseño y prueba del sistema resultante. En la sección de Resultados se muestran los datos que validan el funcionamiento del sistema. En la sección de Discusión se abordan los aspectos destacados del sistema diseñado. Finalmente, en la última sección se muestran las conclusiones de la investigación.

3

## II. ANTECEDENTES

El término Industria 4.0 aparece por primera vez en Alemania en el año 2013. En dicho concepto, la mayoría de los componentes de un sistema de producción tienen una entidad cibernética, lo que les permite enviar datos y comunicarse con el resto de los dispositivos [13]. Lo que implica existan mecanismos de coordinación entre ellos, principalmente basados en técnicas de análisis de datos y toma de decisiones en forma autónoma, apoyados por la Inteligencia Artificial [14].

Esta perspectiva implica una amplia transformación de los mecanismos de producción, con la finalidad de reducir los costos de producción y aumentar las ganancias. Esto se logra ya que las máquinas no dependen del factor humano, por lo que no existe la necesidad de detener la producción. Es decir, se trata de la automatización total de los procesos industriales.

Lo que conlleva un proceso de adaptación de los empleos, en donde el personal pasa de tareas en la línea de producción a tareas que implican supervisión y mantenimiento de los equipos. Además de puestos nuevos para mejorar los procesos de toma de decisiones y análisis de datos. Que impacta a las condiciones de seguridad a los que los seres humanos se verán expuestos.

La Industria 4.0 utiliza las siguientes herramientas computacionales: Big Data, Cloud Computing, Ciberseguridad, Robótica, Realidad virtual y aumentada, Visión Computacional e Internet de las Cosas. El Big Data es utilizado para el análisis masivo de los datos que provienen de cada componente de la fábrica, así como los datos que se obtienen de los productos, distribuidores y clientes. Dichos datos se guardan en servidores que no necesariamente son comprados por la empresa, ya que se espera que se utilicen los servicios de almacenamiento masivo del Cloud Computing. Por lo que la Ciberseguridad resulta fundamental para evitar el robo de información y el espionaje [15]. En el caso de la robótica, se emplea tanto la rama de control como la autónoma para realizar los procesos de producción, abastecimiento, empaquetado, distribución y almacenamiento de los productos. La realidad virtual y la realidad aumentada permiten un nuevo esquema de entrenamiento para el personal, que no compromete el sofisticado equipo de la fábrica, pero también permite la sustitución de tableros de control y otros dispositivos [16]. La visión computacional permite el monitoreo de los procesos en tiempo real mediante componentes de imagen y video. El Internet de las Cosas es el mecanismo que dota a los componentes de una fábrica de identidad ciber-física, permitiendo interconectarse [17].

IoT es una arquitectura que consiste únicamente en la conexión a Internet (ver figura 1). Esta arquitectura consta de cuatro capas (Soumyal: sensor, red, cloud y aplicación). La capa de sensor contiene los componentes de medición y la tarjeta que adquiere las señales que se miden. La segunda capa es la de red e involucra la infraestructura de conexión, que típicamente se trata de una red inalámbrica de área local. La capa de almacenamiento de datos involucra la infraestructura para almacenar los datos, generalmente esta característica se encuentra en una nube de cómputo o algún dispositivo físico como memorias SD. Finalmente, la capa de aplicación aloja los mecanismos de decisión o que provee la autonomía al sistema de IoT y se comunica con los actuadores.

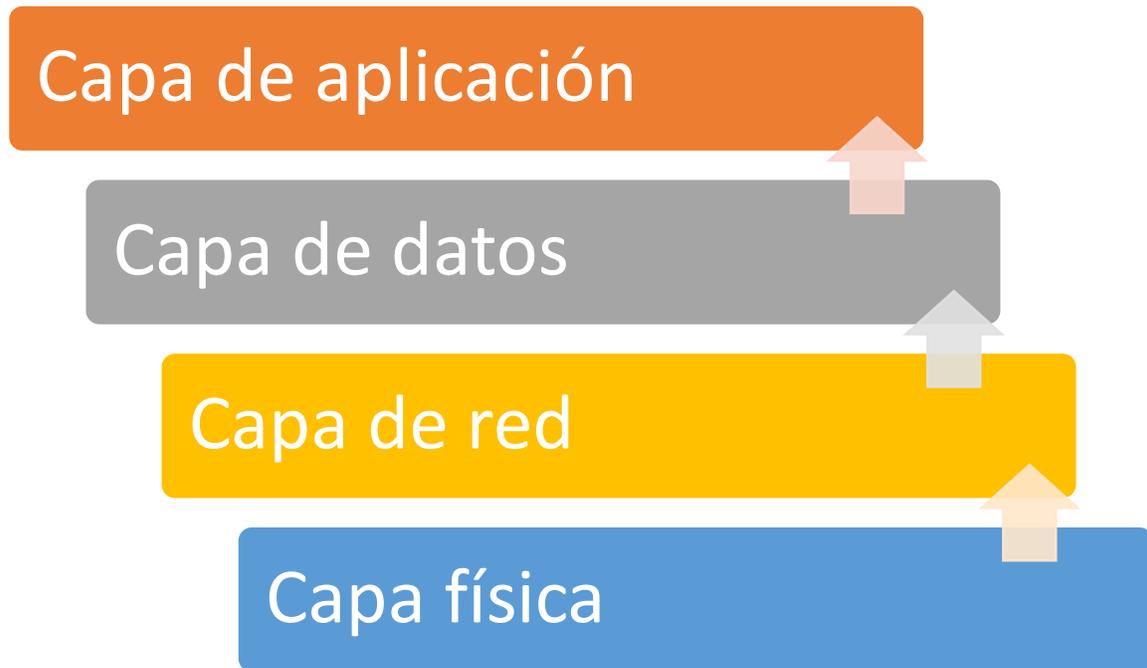


Figura 1. Arquitectura IoT.

Así, la capa de aplicación requiere de una herramienta que dote de autonomía a los sistemas. Estas herramientas puede ser cualquier algoritmo de IA que funcionen como clasificadores como los Árboles de Decisión [18]. Estos mecanismos de clasificación son jerárquicos, secuenciales y explicativos que reciben un conjunto de datos de entrada (atributos) y devuelve un valor de clase. Los árboles de decisión reciben su nombre porque son estructuras que comienzan con un nodo raíz que se va dividiendo en ramas que producen nodos hijos hasta alcanzar los nodos hojas (valores de clase). De tal manera que las decisiones se toman recorriendo las diferentes ramas de acuerdo con las condiciones que se presentan.

Para producir un árbol de decisión es necesario contar con una base de conocimiento (también llamada base de datos). En dicha base se incluyen los diferentes casos a los que se puede enfrentar el árbol y sus soluciones. La base de conocimientos se puede crear a través de mediciones reales o por el conocimiento de un experto humano (ingeniería del conocimiento).

Con la base de datos, es necesario crear y probar el árbol de decisión mediante algún algoritmo de aprendizaje automático. Entre estos algoritmos se encuentra el J48, Random Forest y Random Tree. Estos algoritmos generan los árboles a través de la métrica de la Entropía de la Información, que sirve para determinar cuál de todos los atributos explica mejor una decisión.

De tal manera que los árboles de decisión son estructuras sencillas de programar mediante instrucciones sencillas. Estos pueden ser programados en computadoras y tarjetas empujadas. Esto permite incorporar sensores y actuadores de acuerdo con las necesidades del entorno y del sistema.

### III. PROPUESTA SOLUCIÓN

Se creó un sistema inteligente ciberfísico con la finalidad de monitorear las variables ambientales de un sistema de producción en el que están involucrados motores (véase figura 2). Este sistema está basado en IoT, empleando la tarjeta Arduino y un árbol de decisión como mecanismo de toma de decisiones. Las variables monitoreadas fueron: humedad relativa, radiación térmica, luminosidad, monóxido de carbono. Se construyó

una base de datos, mediante ingeniería del conocimiento, para entrenar el árbol en el software Weka [19]. El sistema fue dotado con la capacidad de modificar el funcionamiento de un sistema de ventilación, uno de refrigeración, semáforo y lámpara de emergencia. Por ello el sistema fue dividido en cinco etapas: bloque de senado y tarjeta de control, comunicación, almacenaje de datos y aplicación.

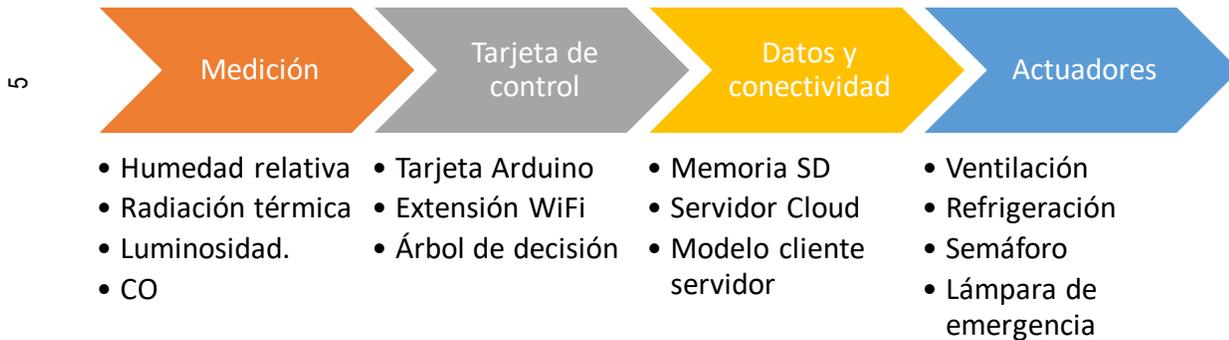


Figura 2. Funcionamiento de la propuesta.

El bloque de medición y tarjeta de control conjuga la adquisición y procesamiento de las señales. Para medir la radiación térmica se empleó el sensor SEN-09570, se trata de un sensor de efecto PIR. Existen tres niveles para la radiación térmica: Baja (menor a 15°C), normal (de 15°C a 25°C) y alta (mayor a 25°C). Para medir la humedad relativa. El sensor se conectó mediante el canal I2C.

La humedad relativa es la relación entre la humedad absoluta que se encuentra en el aire y la cantidad de vapor de agua que contiene el aire. Para medir la humedad relativa se empleó el sensor SEN-09569. La humedad relativa se cuantificó en tres niveles: baja (menor a 50%), aceptable (50% a 60%) y alta (mayor a 60%). El sensor fue conectado a la tarjeta adquisidora mediante un canal analógico.

En cuanto a la intensidad luminosa se utilizó el sensor TEMT-6000. Se emplearon dos niveles de detección: Insuficiente (menor a 300 luxes) e suficiente (superior a 300 luxes). Estos niveles son los recomendados para labores industriales ordinarias. El sensor se conecta mediante un canal analógico a la tarjeta adquisidora. La intensidad luminosa en una fábrica es importante ya que facilita el rango de visión de los procesos.

El último sensor empleado fue el MQ-07, que detecta diversos gases, entre ellos el monóxido de carbono. El sensor detecta la presencia o ausencia del gas, pero también puede ser configurado para medir la aproximación de ppm del gas en el aire. Para calibrar este sensor se realizaron pruebas en un medio controlado en donde se produjo el gas y se almacenó. Posteriormente se pesó y se obtuvo una relación de la cantidad de gas existente. Con este paso realizado, se sometió el sensor al espacio donde se almacenó el gas y se calibró la resistencia de ajuste de acuerdo con la tabla de la hoja de datos proporcionada por el usuario. El nivel de gas fue cuantificado en tres niveles: Aceptable (menores a 200ppm), Peligro medio (200ppm a 1200ppm), Peligro alto (mayores a 1200ppm). El sensor se conectó a un canal analógico de la tarjeta adquisidora.

Todas las mediciones fueron adquiridas y procesadas en una tarjeta Arduino ADK que fue programada con lenguaje C. Se empleó este modelo ya que brinda la posibilidad de usar la extensión de WIFI, que brindó conectividad al sistema. La adquisición de datos fue completada con una tarjeta SD incorporada a la extensión WIFI para almacenar los datos que fueron enviados posteriormente a un servidor Cloud.

Para la conectividad se empleó una red inalámbrica de área local y el modelo cliente servidor. El servidor es la tarjeta de adquisición de datos. El cliente es un navegador web en donde se muestra el valor de cada sensor en tiempo real.

Dentro de la tarjeta Arduino se programó un árbol de decisión. Este mecanismo de clasificación se entrenó mediante el software de licencia libre WEKA. Se trata de un programa que permite entrenar diferentes herramientas de clasificación, clustering, regresión y predicción. Consta de un entorno de exploración y uno de experimentación.

Para entrenar el árbol se utilizó una base de datos generada con todas las combinaciones posibles de las entradas. Por ello, la base de datos contenía 54 instancias con 4 atributos, 4 clases. Para determinar la salida correcta, se aplicó ingeniería del conocimiento. Es decir, la decisión en la base de datos la toma un ser humano en cada uno de los casos de la base.

Se probaron tres tipos de algoritmos para producir los árboles de decisión: J.48 [20], Random Forest [21], Random Tree [22]. Esto se hizo con la finalidad de conocer cuál de los algoritmos resuelve de mejor manera la base presentada. Se configuró un experimento con 90 repeticiones para cada tipo de árbol, empleando como mecanismo de validación cross-validation a 10 folds. Todos los árboles se configuraron como binarios. Se comparó la media de los porcentajes de acierto de los tres algoritmos para elegir la mejor opción. Finalmente se eligió el árbol que mayor porcentaje de clasificación obtuvo. Esto se realizó mediante el explorador de WEKA.

La respuesta del sistema se dio mediante cuatro sistemas de actuación: sistema de ventilación, sistema de refrigeración, Semáforo, Lámparas de emergencia. El sistema de ventilación tuvo la intención de evitar el paro del proceso productivo ante condiciones adversas de la calidad de aire. Este sistema de ventilación tuvo tres valores de salida: Apagado, Normal y Máximo. El sistema de refrigeración funciona para disminuir la humedad relativa y temperatura ambiente. Este sistema tuvo tres niveles de funcionamiento: Apagado, Normal, Máximo. El sistema de semáforo fue una alerta visual que muestra las condiciones del medio ambiente mediante tres leds de colores rojo, amarillo y verde. El color verde se asoció a condiciones óptimas de operación, mientras que el amarillo indica condiciones poco favorables, mientras que el rojo indicó condiciones no favorables. Finalmente, las lámparas de emergencia son dispositivos que fueron agregados al sistema para complementar el sistema de semáforo e indicar el paro necesario. Se generaron dos posibles estados para las lámparas: Apagado y Encendido. Todos los elementos de actuación se controlaron a través de la misma tarjeta Arduino y su valor depende de la decisión obtenida por el árbol. De tal manera que todos los actuadores se conectaron a relevadores. Esto permitió controlar sus diversos niveles a través de señales digitales.

Se probó el funcionamiento del sistema en forma física mediante la base de datos construida. Para ellos se manipularon las condiciones de los sensores y se contó la cantidad de aciertos que el sistema generó.

#### IV. RESULTADOS

El experimento para seleccionar al algoritmo que resolvió de mejor manera la base de datos presentada permitió establecer que el algoritmo J.48 es el que genera un mejor porcentaje de clasificación (ver tabla 1). Este resultado fue seguido del algoritmo Random Forest. El peor de los algoritmos de clasificación para esta base de datos fue el Random Tree. Es importante remarcar que el procedimiento experimental de esta fase del estudio está basado en la repetición de los algoritmos y la medición de su efectividad. Por lo cual se repitió el proceso de aprendizaje de cada algoritmo 90 veces, lo que asegura la fiabilidad de los resultados.

Tabla 1. Resultados del proceso experimental en Weka.

Algoritmo	J.48	Random Forest	Random Tree
Porcentaje de ejemplos bien clasificados	99.86%	99.31%	95.07%
Porcentaje de error en la clasificación	0.14%	0.69%	4.93%

Aunque los algoritmos J.48 y Random Forest tienen un rendimiento similar, el primero produce árboles más pequeños. Este es un factor importante porque determina el tamaño total de los árboles programados. Por ello se decidió emplear un árbol de decisión J.48 y se eligió para programar en la tarjeta Arduino el árbol de la semilla 6, que obtuvo 100% de clasificación de la base de datos (ver figura 3). La incertidumbre de casos fuera de la base de datos no se puede establecer en los modelos de clasificación presentados.

7

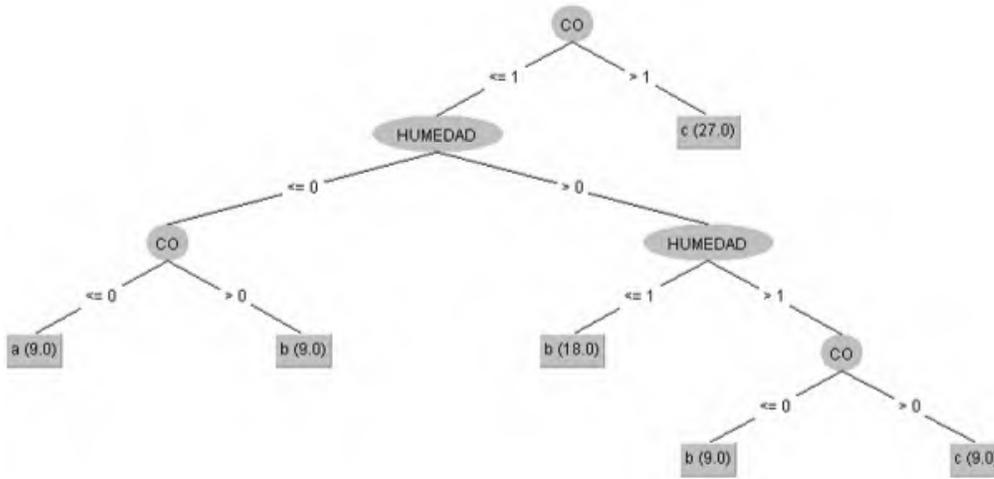


Figura 3. Vista del árbol de decisión programado.

Con ello se probó el sistema físico integrado por los sensores, actuadores, tarjeta de adquisición y procesamiento de datos, módulo de comunicación (véase figura 4). La prueba de la comunicación se realizó mediante un dispositivo móvil. Con esto se obtuvo las mediciones del sistema a petición del cliente.

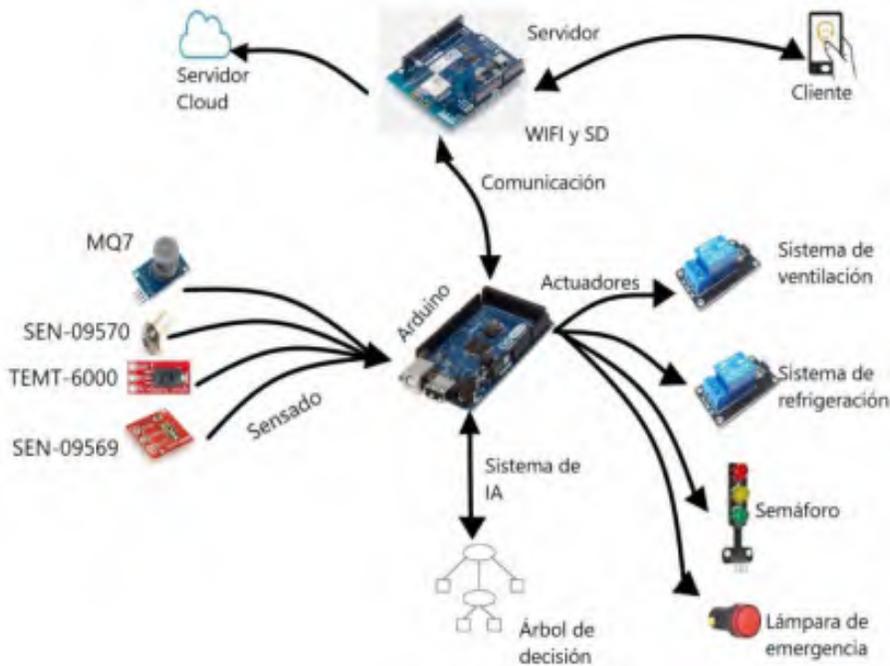


Figura 4. Diagrama electrónico y de flujo de señales del sistema prototipo.

Finalmente, la prueba realizada al sistema ciberfísico inteligente mediante la manipulación intencionada de las variables de entrada. Esto produjo que el 100% de las instancias presentadas fueran clasificadas de manera correcta. Es decir, el sistema clasificó de forma correcta las 54 instancias que componen la base de conocimiento.

## V. DISCUSIÓN

Se construyó un sistema ciberfísico inteligente basado en un árbol de decisión J.48 con la finalidad de monitorear las condiciones ambientales ante la presencia de motores en el marco de un entorno industrial. El sistema fue equipado con la capacidad de comunicación mediante una red WIFI y el modelo cliente servidor mediante la arquitectura de IoT, que forma parte del marco Industria 4.0 [23].

El sistema presentado cuenta con la capacidad de monitorear una variable ambiental muy importante como es la presencia del monóxido de carbono. Este gas en altas cantidades resulta tóxico para los seres humanos. En el caso de los motores, es producido por los efectos de calor que se generan en el funcionamiento. Dados los efectos de intoxicación no reversibles en el ser humano, el sistema construido trata de evitar accidentes en el entorno industrial sin interrumpir los procesos desarrollados. Por ello incorpora un sistema de ventilación y un sistema de refrigeración fueron incorporados al diseño para mejorar la calidad del aire.

Uno de los mayores desafíos que se presentaron en el desarrollo del sistema fue la calibración del sensor MQ7. Al no contar con un instrumento que permitiera medir la cantidad de partículas del gas en el aire, se recurrió a un proceso de producción del gas en un laboratorio para poder cuantificarlo. De esta manera, se obtuvo la calibración deseada.

Los altos niveles en las variables de humedad y temperatura en un ambiente industrial pueden llevar a los trabajadores a la deshidratación, y con ello a la disminución de las capacidades neuronales de los trabajadores. Por lo que resulta fácil de imaginar que algunos accidentes derivados de la falta de atención del personal pueden tener relación con dichas variables. Tanto la temperatura como la humedad pueden ser modificadas por el calor producido por los motores en durante su funcionamiento.

De este modo, el sistema ciberfísico inteligente incorporó estas variables para reducir los accidentes de trabajo. Esto es una prueba que los sistemas de industria 4.0 pueden mejorar los sistemas de producción a través del cuidado de la seguridad de los trabajadores [24]. Los mecanismos de actuación para el control de estas variables fueron el sistema de ventilación y el sistema de refrigeración.

La intensidad de la luminosidad en un ambiente industrial es una variable fundamental para que los procesos industriales sean exitosos y sin accidentes. Si la intensidad luminosa es inadecuada, la capacidad visual del personal se ve reducida. Lo cual resulta peligroso cuando en la fábrica existen motores.

De tal manera que el sistema propuesto no modifica la luminosidad del recinto, pero si tienen capacidad para avisar que los niveles de esta variable no cumplen con los valores requeridos. Esto se realiza mediante el sistema de señalización del semáforo.

En este sentido, el semáforo resulta importante para el sistema. La idea es detener la producción sólo en los casos en que las condiciones ambientales sean peligrosas para el personal involucrado. Lo que se complementa con el sistema de lámpara de emergencia, que se encienden cuando las condiciones son críticas, principalmente relacionadas con altos niveles de monóxido de carbono, temperatura y humedad.

El mecanismo que se utilizó para construir la base de datos se conoce como ingeniería del conocimiento. En dicho proceso, un experto humano se encarga de analizar las condiciones de la base de datos y producir una respuesta o salida deseada. Lo cual vuelve al sistema portable entre diferentes recintos.

Los árboles de decisión fueron elegidos como la herramienta de IA que brinda autonomía al sistema debido a su capacidad explicativa respecto a las salidas, la facilidad de entrenamiento y programación. Por lo que el mecanismo de toma de decisiones puede ser nuevamente entrenados en cualquier momento, incorporando casos nuevos sin necesidad de modificar profundamente el sistema. Inclusive permitiendo la incorporación de más variables.

La elección del mejor árbol de decisión se llevó a cabo mediante un proceso estadístico, en donde se repitieron los procesos de entrenamiento para tres algoritmos de entrenamiento: J.48, Random Tree y Random Forest. Se cuantificó la cantidad de aciertos del sistema mediante un mecanismo de validación robusto como Cross-Validation. Lo que brinda certeza de que la selección del mecanismo de autonomía no fue basada en una decisión personal. El mejor de los resultados para el caso probado fue el algoritmo J.48.

En las pruebas realizadas al sistema ciberfísico mostraron que el funcionamiento fue el deseado. Esto dado a que en las pruebas de manipulación de las variables de entrada se verificó que el árbol de decisión clasifica correctamente el total de las instancias de la base de conocimiento. Además, que se verificó la conexión con el cliente y la respuesta del servidor brindando los datos que se obtienen. En este sentido, como trabajo futuro se prevé la incorporación de un sistema de ciberseguridad que evite el uso inadecuado de los datos.

## VI. CONCLUSIONES

Se presenta la propuesta de un sistema ciberfísico inteligente para el monitoreo de cuatro variables ambientales (monóxido de carbono, humedad relativa, temperatura e intensidad luminosa) empleando el modelo de IoT en el marco de la Industria 4.0. Las condiciones ambientales monitoreadas se relacionan con la presencia de motores en la industria. El sistema tiene como núcleo de autonomía un árbol de decisión J.48, entrenado a partir de una base de datos. Dicha base de datos es creada a través de ingeniería del conocimiento, en donde un experto humano determina la respuesta deseada ante cada circunstancia presentada en cada instancia de la base de conocimiento. El sistema guarda los datos de las variables en una memoria SD, pero pueden ser enviados a un servidor Cloud. Además, a petición de un cliente, muestra las mediciones obtenidas en tiempo real. Finalmente, el sistema presentado es escalable ya que permite incorporar más variables y se puede adaptar a cualquier medio ambiente al modificar su base de conocimientos.

## REFERENCIAS

- [1] D. G. Chele Sancan, "Vehículos híbridos, una solución interina para bajar los niveles de contaminación del medio ambiente causados por las emisiones provenientes de los motores de combustión interna," *INNOVA Research Journal*, vol. 2, no. 12, 2017, pp. 1-10
- [2] R. Bakr, B. Ulaş, H. Kıvrak, "A mini review on health and environmental risks of oil and gas industry undesired products: hydrogen sulfide and carbon monoxide," *International Journal of Ecosystems and Ecology Science (IJEES)*, vol. 7, no. 4, 2017, pp. 883-894.
- [3] B. Nikolic, J. Ignjatic, N. Suzic, B. Stevanov, A. Rikalovic, "Predictive manufacturing systems in industry 4.0: trends, benefits and challenges," *Annals of DAAAM & Proceedings*, 28. 2017.
- [4] G. Manogaran, C. Thota, D. Lopez, R. Sundarasekar, "Big data security intelligence for healthcare industry 4.0," In *Cybersecurity for Industry 4.0*, (pp. 103-126). Springer, Cham. 2017.
- [5] S. R. Prathibha, A. Hongal, M. P. Jyothi, "IoT based monitoring system in smart agriculture," In *2017 international conference on recent advances in electronics and communication technology (ICRAECT)*, pp. 81-84. IEEE, 2017.
- [6] L. I. U. Dan, C. Xin, H. Chongwei, J. Liangliang, "Intelligent agriculture greenhouse environment monitoring system based on IOT technology," In *2015 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data and Smart City*, (pp. 487-490). IEEE, 2015.
- [7] T. Perumal, M. N. Sulaiman, C. Y. Leong, "Internet of Things (IoT) enabled water monitoring system," In *IEEE 4th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, (pp. 86-87). IEEE, 2015.
- [8] P. Valsalan, T. A. B. Baomar, A. H. O. Baabood, "IoT based health monitoring system," *Journal of critical reviews*, vol. 7, no. 4, pp. 739-743, 2020.
- [9] A. Srinivasan, "IoT cloud based real time automobile monitoring system," In *3rd IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE)*, (pp. 231-235). IEEE, 2018.
- [10] B. C. Kavitha, R. Vallikannu, "IoT based intelligent industry monitoring system," In *6th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, (pp. 63-65). IEEE, 2019.
- [11] G. S. C. Prasad, A. S. Pillai, "Role of Industrial IoT in Critical Environmental Conditions. In *2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)* (pp. 1369-1372). IEEE, 2018.
- [12] M. D. Mudaliar, N. Sivakumar, "IoT based real time energy monitoring system using Raspberry Pi," *Internet of Things*, no. 12, 2020.
- [13] M. Ghobakhloo, M. "Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability," *Journal of Cleaner Production*, no. 252, 2020.
- [14] A. Garrell, L. Guilera, *La industria 4.0 en la sociedad digital*. España: Marge Books, 2019.

- [15] L. X. Falconi Tello, J. F. López Aguirre, J. C. Pomaquero Yuquilema, J. L. López Salazar, "Habilidades gerenciales para la revolución industrial 4.0 en el ámbito del capitalismo consciente," *Revista Contribuciones a la Economía*, 2018.
- [16] J. P. Navarro Londoño, L. E. Vallejo Sánchez, *Realidad Virtual bajo una visión modular de Industria 4.0*. (online) 2020. Available: <http://hdl.handle.net/11371/3374>
- [17] P. Gokhale, O. Bhat, S. Bhat, "Introduction to IOT," *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 41-44. 2018.
- [18] R. R. Maaliw III, M. A. Ballera, *Classification of Learning Styles in Virtual Learning Environment Using J48 Decision Tree*, USA: International Association for Development of the Information Society. 2017.
- [19] R. R. Bouckaert, E. Frank, M. Hall, R. Kirkby, P. Reutemann, A., Seewald, D. Scuse, *WEKA manual for version 3-9-1*. University of Waikato, Hamilton, New Zealand. 2016.
- [20] W. Dai, W. Ji, "A mapreduce implementation of C4. 5 decision tree algorithm," *International journal of database theory and application*, vol. 7. no. 1, pp. 49-60. 2014.
- [21] C. Nguyen, Y. Wang, H. N. Nguyen, "Random forest classifier combined with feature selection for breast cancer diagnosis and prognostic," *Journal of Biomedical Science and Engineering*, vol. 6, no. 5, 2013.
- [22] C. Zhuge, J. Liu, D. Guo, Y. Cui, "Phototropism rapidly exploring random tree: An efficient rapidly exploring random tree approach based on the phototropism of plants," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 17, no. 5, 2020.
- [23] M. Alloghani, D. Al-Jumeily, A. Hussain, A. J. Aljaaf, J. Mustafina, E. Petrov, "Healthcare services innovations based on the state of the art technology trend industry 4.0," In *2018 11th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE)* (pp. 64-70). IEEE, 2018.
- [24] G. Aceto, V. Persico, A. Pescapé, "Industry 4.0 and health: Internet of things, big data, and cloud computing for healthcare 4.0," *Journal of Industrial Information Integration*, 18, pp. 100-129, 2020.

# Funcionalización de nanocelulosa a partir de rastrojo de piña y raquis de palma africana

Functionalized Nanocellulose Extracted from Pineapple Stubble and African Palm Rachis

Jairo Vargas Mesén<sup>1</sup>, Karina Rodríguez Mora<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Costa Rica, Sede del Caribe, Costa Rica

[jairo.vargasmesen@ucr.ac.cr](mailto:jairo.vargasmesen@ucr.ac.cr) | <https://orcid.org/0000-0001-7327-4991>

<sup>2</sup>Unidad de Recursos Forestales, Instituto de Investigaciones en Ingeniería, Universidad de Costa Rica, Costa Rica

[karina.rodriguez mora@ucr.ac.cr](mailto:karina.rodriguez mora@ucr.ac.cr) | <https://orcid.org/0000-0001-964623>

Recibido 14-05-2021, aceptado 30-08-2021.

## Resumen

Nanofibras de celulosa extraídas a partir de rastrojo de piña y raquis de palma africana, fueron sometidas a funcionalización con ácido cólico. La nanocelulosa se caracterizó por espectroscopia infrarroja, microscopía electrónica de barrido y ángulo de contacto. Posteriormente se evaluó mediante análisis estadísticos, la influencia de dicha funcionalización en la adsorción del cromo de una disolución de  $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ . De lo anterior se determinó que existe una mayor adsorción del metal si se utilizan nanofibras sin funcionalizar extraídas a partir de rastrojo de piña, mientras que para las fibras extraídas a partir de raquis de palma africana la funcionalización con ácido cólico genera mejores cargas de adsorción. Finalmente se realizaron curvas de adsorción y se acoplaron a 3 modelos de isoterms de adsorción, de las cuales se establece que el modelo de Sips describe de mejor manera el comportamiento de los datos experimentales, con cargas máximas de 8,605 mg Cr/g NCF (nanocelulosa fibrillar) para la nanocelulosa sin funcionalizar extraída a partir de rastrojo de piña y 5,638 mg Cr/g NCF para la nanocelulosa funcionalizada extraída a partir de raquis de palma africana.

**Palabras clave:** Adsorción, cromo, funcionalización, nanocelulosa fibrillar.

## Abstract

Cellulose nanofibers extracted from pineapple stubble and African palm rachis were subjected to functionalization with cholic acid. The nanocellulose was characterized by infrared spectroscopy, scanning electron microscopy, and contact angle. Subsequently, the influence of functionalized nanocellulose and non-functionalized nanocellulose, on the chromium adsorption of a  $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$  solution was evaluated by statistical analysis. It was determined that greater adsorption charges are obtained if non-functionalized nanofibers extracted from pineapple stubble are used, while for fibers extracted from African palm rachis, functionalization with cholic acid generates better adsorption charges. Finally, adsorption curves were made and coupled to 3 models of adsorption isotherms. It was established that the Sips model better describes the behavior of the experimental data, with a maximum charge of 8.605 mg Cr/g FNC (fibrillar nanocellulose) for the Non-functionalized nanocellulose extracted from pineapple stubble and a maximum charge of 5.638 mg Cr/g FNC for functionalized nanocellulose extracted from African palm rachis.

**Index terms:** Adsorption, chromium, functionalization, fibrillary nanocellulose.

## I. INTRODUCCIÓN

Gran cantidad de investigaciones buscan perfeccionar y descubrir nuevas técnicas que produzcan nanoestructuras. Las nanopartículas se están utilizando en varias industrias y se han expandido en diferentes ramas de la ciencia como en la electrónica [1], magnética [2], optoelectrónica [3], biomedicina [4], aplicaciones energéticas [5], catalíticas [6] y de materiales [7]. Dentro de los campos de estudio en los que se ha expandido la nanocelulosa, es posible encontrar la producción de hidrogeles con aplicaciones en biomedicina, así como la utilización de nanocelulosa como inhibidor de emulsiones. Pero se ha desarrollado con mayor fuerza en el área de tratamiento de aguas para la eliminación de bacterias [8], colorantes [9], materia inorgánica [10] y otros contaminantes.

La implementación de dicho nanomaterial como adsorbente ha sido estudiada tanto como en nanocristales de celulosa, así como en nanofibras de celulosa de procedencia vegetal y bacteriana [11] [12]. Diversas investigaciones han planteado la utilización de los compuestos de nanocelulosa en la adsorción de algunos metales como cobre o níquel [13], plomo [14], cobalto [15] y hasta algunos iones de fosfato o nitrato [11].

La captación de algunos iones metálicos, ha sido atribuida principalmente a la presencia de grupos OH en la estructura de su cadena polimérica [16]. Sin embargo, no solo permite la adsorción de iones metálicos como el cromo, también le brinda a la celulosa las propiedades reactivas de los alcoholes lo que permite que se pueda generar una funcionalización de la nanocelulosa con el fin de mejorar su capacidad adsorptiva. Y es precisamente la reactividad de dichos grupos funcionales lo que ha provocado que las investigaciones se hayan enrumado por el camino de la funcionalización de su estructura, con el fin de maximizar la capacidad de adsorción del nanomaterial [17] [18] [19].

Se ha demostrado que la modificación de la nanocelulosa produce afinidad hacia iones de ciertos metales en específico, generando mayor eficiencia en la adsorción de algunos metales en comparación con otros [20]. La implementación de nanocelulosa para la adsorción de cromo de diferentes valencias proveniente de diversas aguas residuales ha sido también estudiado por otros autores. La funcionalización de nanocelulosa microfibrilar con hidroxiapatita calcificada para la adsorción de Cr(VI) [21], la funcionalización de nanofibras de celulosa con amonio cuaternario para la adsorción de Cr(VI) [22], así como la utilización de aminas para funcionalizar nanocristales de celulosa en la adsorción de Cr(III) y Cr(VI) [23]. Estas son algunas de las investigaciones que se han efectuado respecto a la funcionalización de la nanocelulosa y la adsorción de cromo.

En el Costa Rica existe gran cantidad de fuentes de celulosa. Los cultivos de piña y palma africana, son 2 de los principales 5 cultivos a nivel nacional en lo que a territorio de siembra respecta. En los últimos años dichos cultivos han aumentado llegando a las 45 000 y 76 910 ha de cultivo de piña y palma africana, respectivamente [24]. Lo anterior ha generado consigo un aumento de los desechos de rastrojo de piña y raquis de palma africana, los cuales se han contabilizado, en cerca de 1,3 millones de toneladas y 55 000 toneladas, respectivamente [25]. Dichos desechos generalmente no poseen tratamiento, lo cual implica la pérdida de gran cantidad de material lignocelulósico, el cual puede ser empleado de otras investigaciones como la producción de nanocelulosa.

Es por ello que el desarrollo de dicho proyecto, busca no solo la incorporación de un nuevo método de producción de la nanocelulosa implementando desechos agroindustriales, sino que, persigue la idea de elaborar nuevos sistemas de tratamiento de aguas duras que permitan la recuperación de los contaminantes y su posterior aprovechamiento o tratamiento.

## II. METODOLOGÍA

### A. OBTENCIÓN DE NANOCELULOSA

Se extrajeron fibras de celulosa a partir de 2 fuentes de biomasa: Rastrojo de piña y Raquis de palma africana. La biomasa se secó, molió y tamizó con una malla de 0,5 mm de diámetro de poro.

Se realizó una degradación básica para ambas biomásas por separado, con NaOH al 2% y una proporción de 50 mL de reactivo por cada gramo de biomasa. Se llevó a un sistema de autoclave hasta 136 kPa durante 30 minutos, tras los cuales se realizaron lavados con agua e hipoclorito de sodio.

Para el caso del raquis de palma africana, se generó una degradación ácida con HOAc al 10%, posterior a la degradación básica. Se implementaron 50 mL de reactivo por cada gramo de fibras y se introdujo en una autoclave a 136 kPa por 60 minutos tras los cuales se realizaron lavados con agua.

Posteriormente, las fibras obtenidas a partir de ambas fuentes de biomasa por separado, se dispersaron en agua aproximadamente a 2,5 % y se sometió a ruptura en un ultrasónico de alta potencia a una frecuencia de 60 Hz y un período de 15 minutos.

3

## B. FUNCIONALIZACIÓN DE NANOCELULOSA

Para la funcionalización, se utilizó ácido cítrico como reactivo funcionalizante en una relación 1:0,7 de nanocelulosa: ácido cítrico, utilizando metanol como medio de disolución. La funcionalización se realizó a temperatura ambiente en una plantilla de agitación durante 2 horas tras las cuales se dejó en reposo durante 24 horas. Se centrifugó la nanocelulosa funcionalizada durante un periodo de 6 minutos a 10000 rpm y se hicieron lavados con metanol para eliminar el ácido cítrico remanente. Posteriormente, se volvió a dispersar la nanocelulosa funcionalizada en agua y se centrifugó durante 6 minutos a 10000 rpm hasta obtener un gel de nanocelulosa.

## C. CARACTERIZACIÓN MICROSCÓPICA Y ESPECTROSCÓPICA

### 1) Espectroscopia Infrarroja (FTIR)

Para obtener las bandas de los grupos funcionales asociados a los componentes de la fibra, así como ausencia y presencia de lignina se utilizó un equipo Perkin Elmer modelo Frontier FT-IR-ATR, se realizó un escaneo por muestra de 4000  $\text{cm}^{-1}$  a 450  $\text{cm}^{-1}$  sin supresión de atmósfera.

### 2) Análisis termogravimétrico (ATG)

Se utilizó un equipo ATG, marca TA Instruments, modelo Q5000, con atmósfera inerte utilizando una rampa de calentamiento de 5°C/min desde 25°C hasta 600°C para determinar el porcentaje de nanocelulosa funcionalizada.

### 3) Microscopía electrónica de barrido (MEB)

Se empleó un microscopio electrónico de barrido HITACHI modelo S3700-N para determinar cambios morfológicos según el tratamiento por medio de micrografías a las fibras.

## D. CURVAS DE ADSORCIÓN

### 1) Análisis estadístico en el proceso de adsorción

Se estudió la influencia de la funcionalización, la agitación y el pH de la disolución de  $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ . Para ello se realizó un diseño factorial  $2^3$  para la nanocelulosa obtenida a partir del rastrojo de piña y otro diseño factorial  $2^3$  para la nanocelulosa obtenida a partir del raquis de palma africana. Los factores se estudiaron bajo los niveles observados en la Tabla 1.

TABLA 1. NIVELES DE LOS FACTORES A ANALIZAR EN LA DEGRADACIÓN BÁSICA DE LAS BIOMASAS.

Factores	Nivel bajo (-)	Nivel Alto (+)
pH	Inferior a 3	4,85
Agitación	Sin Agitación	Con Agitación
Tipo NCF	Sin Funcionalizar	Funcionalizada

Para el sistema de adsorción se colocó en beaker de 25 mL, 5 mL de la disolución de  $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$  y 5 mL de la dispersión de nanocelulosa. Por otra parte, las corridas que requerían de agitación se colocaron en una plantilla de agitación a 300 rpm y se mantuvieron en agitación por 1 hora.

Una vez transcurrido el tiempo de adsorción establecido, se centrifugó cada una de las disoluciones de cromo tratadas con nanocelulosa a 10000 rpm por 6 minutos, se tomaron 3 muestras de 0,5 mL de la disolución tratada y se colocaron en microtubos de 2 mL. A cada microtubo se le agregó 0,5 mL de disolución EDTA (ácido etilendiaminotetraacético) 0,0199 mol/L y 0,5 mL de disolución patrón de Cr 200 mg/L. Se sellaron los microtubos y se llevaron a baño de agua a 100 °C durante una hora y luego se dejaron enfriar hasta temperatura ambiente. Se determinó la absorbancia de la muestra a una longitud de onda de 545 nm. La concentración de la disolución después de la adsorción se determinó a partir de curva de calibración, donde se obtuvo de forma indirecta la cantidad de cromo adsorbido por la nanocelulosa, así como la razón de cromo adsorbido entre la cantidad de adsorbente utilizado (mg Cr/g NC).

#### 2) *Curvas de adsorción*

Las curvas de adsorción se efectuaron con base en los resultados del diseño estadístico previo. Para las pruebas de adsorción se colocó en beakers de 25 mL, 5 mL de la disolución de  $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$  a diferentes concentraciones y 5 mL de la dispersión de nanocelulosa.

Una vez transcurrido el tiempo de adsorción establecido, se centrifugó cada una de las disoluciones de cromo tratadas con nanocelulosa a 10000 rpm por 6 minutos, se tomaron 3 muestras de 0,5 mL de la disolución tratada y se efectuó la quelación con EDTA, tal y como se describió con anterioridad. La concentración de la disolución después de la adsorción se determinó a partir de curva de calibración.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### A. *CARACTERIZACIÓN DE LAS FIBRAS*

##### 1) *Espectroscopia Infrarroja (FTIR)*

En la Fig. 1 se pueden observar los espectros característicos de las celulosas antes del proceso de funcionalización. En dichos espectros se divisa la presencia de bandas características de holocelulosa, como el pico fuerte y amplio alrededor de los  $3300\text{ cm}^{-1}$ , el cual es un estiramiento asociado con la vibración del enlace de hidrógeno de los grupos hidroxilo en holocelulosa; así como el pico a  $1030\text{ cm}^{-1}$  característico del enlace simple C-O, vibración de estiramiento que pertenece a los polisacáridos en la celulosa [26]. Por otra parte, en el intervalo entre los  $2000\text{ cm}^{-1}$  a los  $1200\text{ cm}^{-1}$ , se pueden encontrar bandas demarcadas en azul y verde, que son características de la presencia de holocelulosa y lignina, respectivamente [27]. En ambos espectros se puede notar como a las longitudes de onda características de holocelulosa (azules), los IR presentan bandas que indican la presencia de dicho material, mientras que, a las longitudes de onda demarcadas en verde, no se presentan bandas importantes. Lo anterior demuestra que el material con el que se trabaja está compuesto principalmente por materia holocelulósica, el cual es el material de interés.

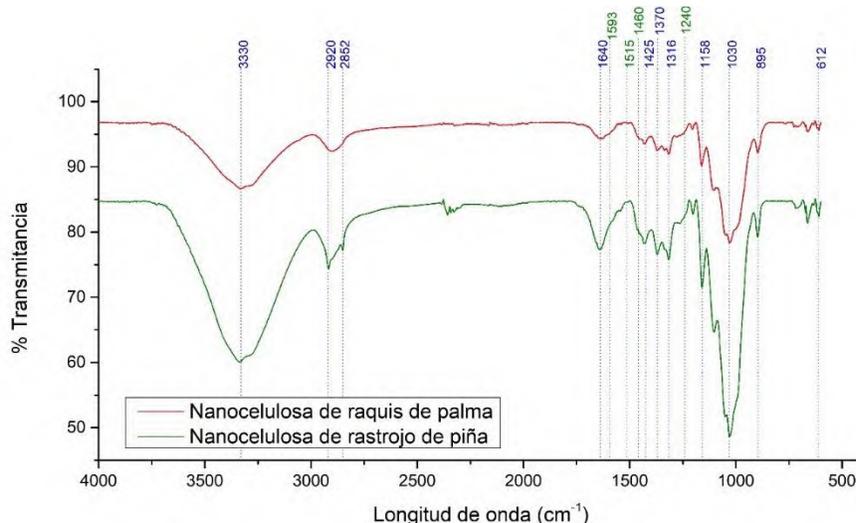


Fig. 1. Espectro FTIR de las celulosas sin funcionalizar.

La adsorción de iones por parte de la nanocelulosa se ha atribuido principalmente a la presencia de grupos OH en la estructura de celulosa lo que genera una capa parcialmente electronegativa en la superficie de su estructura y permite la adsorción de cationes metálicos [28]. A partir de lo anterior, se consideró la funcionalización de la nanocelulosa con ácido cólico, el cual, posee una estructura rica en grupos OH, como se observa en la Fig. 2, estos grupos pueden servir no solo como sitios activos para la adsorción de cationes metálicos, también como sitios de enlace con las cadenas poliméricas de celulosa.

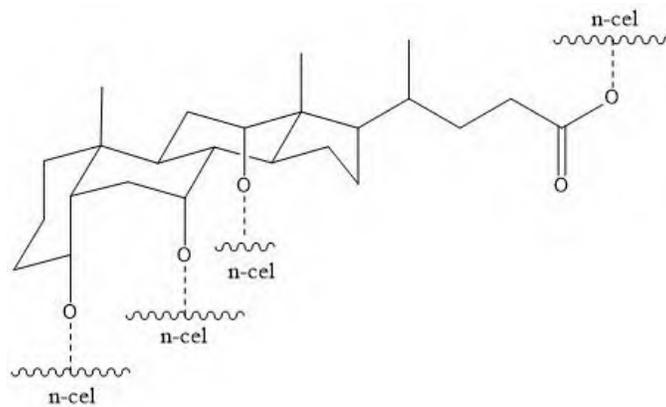


Fig. 2. Estructura del ácido cólico y las posibles regiones de enlace con la nanocelulosa.

El estudio del espectro IR del ácido cólico permite identificar las bandas características de los principales grupos funcionales de dicho reactivo y así poder hacer una comparación con el espectro de las nanocelulosas funcionalizadas. Dicho espectro se caracteriza principalmente por la presencia de picos causados por los grupos OH en el intervalo de los 3583-3022  $\text{cm}^{-1}$ , 3 picos de intensidad media en el intervalo de 3000-2800  $\text{cm}^{-1}$  a causa de los enlaces C-H, una banda intensa cerca de 1710  $\text{cm}^{-1}$  causada por la presencia de enlaces C=O del ácido cólico y una serie de bandas a bajas longitudes de onda causados por la presencia de grupos metil y metileno [29].

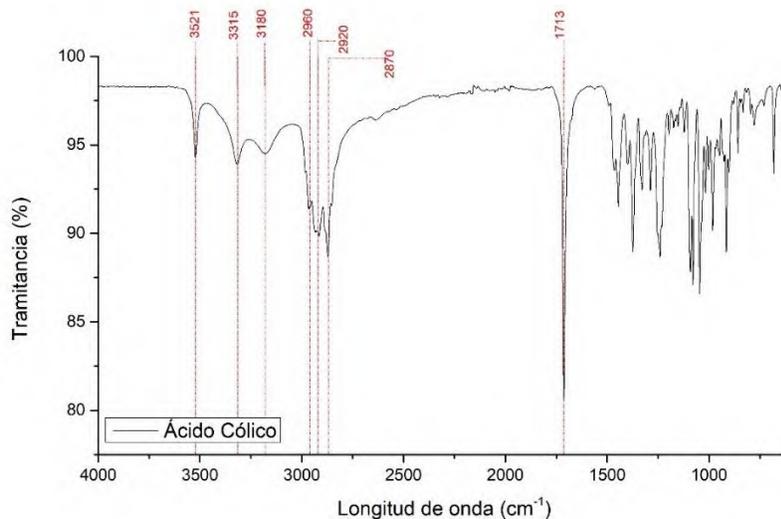


Fig. 3. Espectro FTIR del Ácido Cólico.

En la Fig. 3, se observa la espectroscopia infrarroja de un patrón de ácido cólico. En ella se muestran 3 picos característicos de la presencia de grupos OH en el ácido cólico a  $3521\text{ cm}^{-1}$ ,  $3315\text{ cm}^{-1}$  y  $3180\text{ cm}^{-1}$ . Por otra parte, los picos a  $2960\text{ cm}^{-1}$ ,  $2920\text{ cm}^{-1}$  y  $2870\text{ cm}^{-1}$  se pueden atribuir a los enlaces C-H en el ácido cólico. Y finalmente se puede observar un pico intenso a  $1713\text{ cm}^{-1}$  característico de los enlaces C=O. Por otra parte, para el caso de las nanofibras de celulosa funcionalizadas con ácido cólico, se obtiene el infrarrojo de transformada de Fourier de la Fig. 4, donde se puede observar cómo las bandas características de la nanocelulosa se ven opacadas por las señales del ácido cólico. Lo anterior se constata gracias a la presencia de las bandas características de los grupos OH, así como de los enlaces C=O y C-H del ácido cólico vistas previamente.

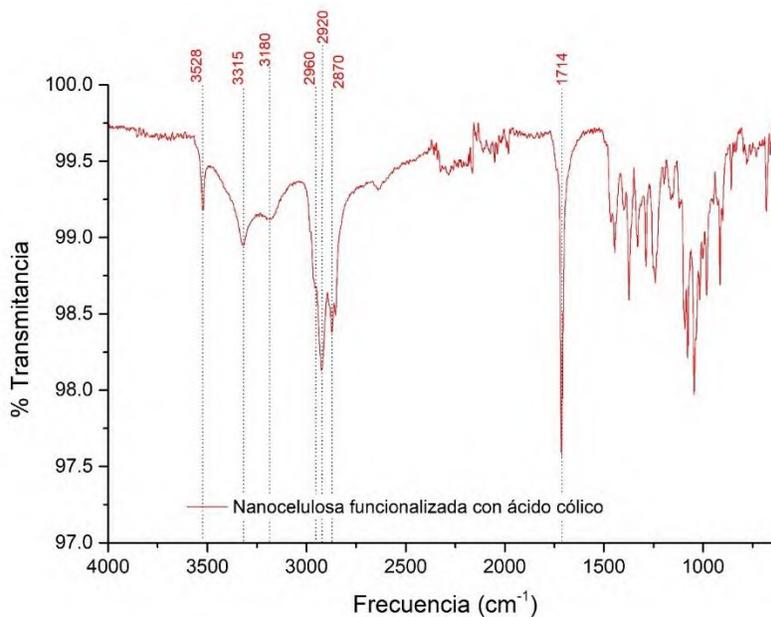


Fig. 4. Espectro infrarrojo de las fibras funcionalizadas con ácido cólico.

## 2) Análisis termogravimétrico

La materia vegetal y sobre todo la celulosa, se caracteriza por su afinidad al agua, por lo que es un excelente adsorbente de la misma. Dentro del ensayo termo gravimétrico, el agua presente en la muestra se suele evaporar en el rango de los 32°C y hasta los 115°C [30]. Otras investigaciones consideran un rango más amplio que toma en consideración el agua ocluida en la muestra, por lo cual se extiende hasta los 221°C [31]. Lo que ambas tienen en común es que establecen la temperatura final de pérdida de agua en un rango en donde la curva de la derivada del peso con respecto a la temperatura, presenta su punto mínimo. Es decir, donde la pérdida de masa es casi nula.

Al analizar las gráficas de pérdida de masa con respecto al tiempo de las nanocelulosas extraídas a partir de rastrojo de piña, se observó que la tasa mínima de pérdida de masa entre el rango de los 100°C y los 221°C, se da a los 175°C, lo que representa cerca del 3,27% y de 7,41% de humedad para las nanofibras extraídas a partir de rastrojo de piña antes y después de la funcionalización, respectivamente.

Por otra parte, la temperatura de degradación de los polímeros de holocelulosa presentes se han establecido según algunas investigaciones entre los 220°C y los 490°C [32] [33]. En el caso de las biomásas estudiadas en la presente investigación, se establece que el porcentaje de holocelulosa en base húmeda de las muestras son de 75,27% y 82,66% para las nanofibras de celulosa extraídas a partir de rastrojo antes y después de la funcionalización, respectivamente. Dicha diferencia en la pérdida de masa entre este intervalo de temperatura se puede evidenciar en la Fig. 5.

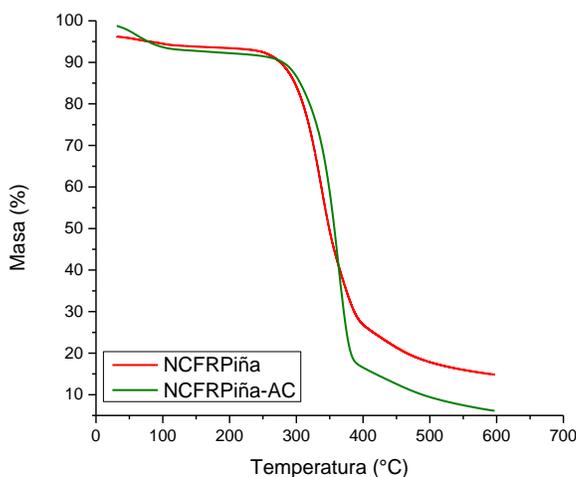


Fig. 5. Termograma de nanocelulosa extraída a partir de rastrojo de piña, antes y después de la funcionalización.

Al analizar las gráficas de pérdida de masa con respecto al tiempo de las nanocelulosas extraídas a partir de raquis de palma africana, se observa que la tasa de pérdida de humedad es cerca del 6,03% y de 8,38% para las nanofibras extraídas a partir de raquis de palma africana antes y después de la funcionalización, respectivamente. Además, el porcentaje de holocelulosa en las muestras son de 72,97% y 84,83% para las nanocelulosas antes y después de la funcionalización, respectivamente. Dicha diferencia en la pérdida de masa entre los 220 °C y los 490 °C se puede evidenciar en la Fig. 6.

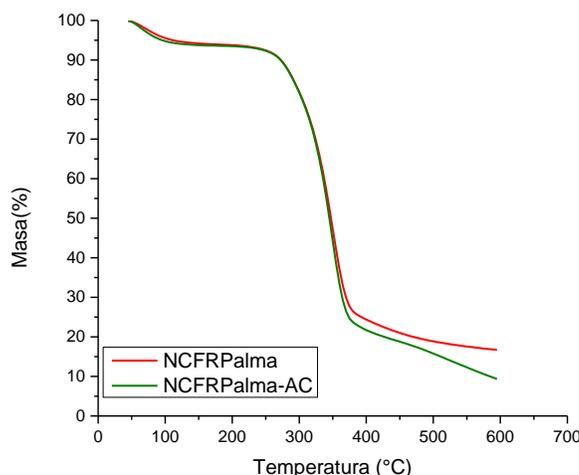


Fig. 6. Termograma de nanocelulosa extraída a partir de raquis de palma africana, antes y después de la funcionalización.

Como se explicó con antelación, los termogramas aplicados a las diferentes fibras vegetales se centran principalmente en la identificación de holocelulosa presente en la muestra. Lo anterior debido a que tanto la celulosa como la hemicelulosa presentan intervalos de degradación similares, por lo que solamente es posible cuantificar holocelulosa. Por otra parte, el ácido cólico (reactivo funcionalizante) también posee un intervalo de degradación similar al de la holocelulosa. Estudios termográficos del ácido cólico apuntan a que el rango de temperaturas específico de degradación de dicho reactivo se encuentra entre los 220 °C y los 420 °C [29] [34]. Por lo cual no se puede identificar la presencia de ácido cólico por sí sola, pero si es posible cuantificar la presencia de holocelulosa + ácido cólico.

$$\%Funcionalización = \frac{fm_1 - fm_0}{fm_1} * 100 \quad (1)$$

A partir de dicha ecuación y con base en los datos de la Tabla 2, se calculó el porcentaje de funcionalización de las fibras de nanocelulosa, que aparece en la Tabla 3. Como se puede observar en dicha tabla, el porcentaje de funcionalización de las fibras de nanocelulosa extraídas a partir de rastrojo de piña es más del doble en comparación con la otra fuente de biomasa. Ambas biomásas fueron sometidas a degradación y exposición de las fibras, mediante procesos de bajo insumo y bajo requerimiento energético. Por otra parte, la naturaleza de ambas fuentes de biomasa les brinda propiedades diferentes. El raquis de palma africana posee mayor rigidez y dureza en comparación con el rastrojo de piña, lo cual genera que este último tenga una exposición más favorable de las fibras de celulosa, mientras que el raquis de palma africana, al ser más rígido, presenta mayor resistencia a la exposición de las fibras con el tratamiento empleado. Lo anterior se infiere como una de las razones por las cuales los porcentajes de funcionalización varían, ya que la exposición de las fibras de celulosa es un factor importante para que existan regiones dentro de la matriz de celulosa, donde el ácido cólico pueda acoplarse y generar la funcionalización.

TABLA 2.  
DATOS PORCENTUALES EN BASE SECA DE LOS COMPONENTES DE INTERÉS EN LA NANOCELULOSA.

Fuente	Sin funcionalizar (fm <sub>0</sub> )	Funcionalizada (fm <sub>1</sub> )
Rastrojo de piña	77,81%	89,28%
Palma africana	77,65%	81,67%

TABLA 3.  
PORCENTAJES DE FUNCIONALIZACIÓN DE LAS FIBRAS DE NANOCELULOSA SEGÚN LA FUENTE DE LAS FIBRAS.

Fuente	Funcionalización (%)
Rastrojo de piña	12,85
Palma africana	4,92

### 3) Microscopía electrónica de barrido

El proceso de funcionalización de las fibras de celulosa, a pesar de mejorar los sitios de adsorción en el material, puede generar cambios en la distribución de las fibras. Durante el proceso de funcionalización, la naturaleza del material funcionalizante puede generar que las nanofibras de celulosa se acoplen entre sí, pudiendo llegar a generar aglomeraciones del material que pueden llegar a afectar el proceso de adsorción.

En la Fig. 7, se puede observar cómo las nanofibras de celulosa sin funcionalizar se distribuyen de forma tal que su macroestructura es de largas microfibras sueltas. Es decir, la distribución del nanomaterial, no presentó patrones de enlazamiento de las fibras o de aglomeración entre las mismas. Por otro lado, se puede comprobar que una vez funcionalizadas las fibras de celulosa, no se presentan cambios en dicha distribución. Es decir, el nanomaterial mantuvo su estructura de nanofibras libres sin acoplamiento específico o aglomeración entre ellas.

El mismo análisis se efectúa para las imágenes de la Fig. 8, donde las nanofibras antes y después de la funcionalización no presentan aglomeración o enlace entre las fibras.

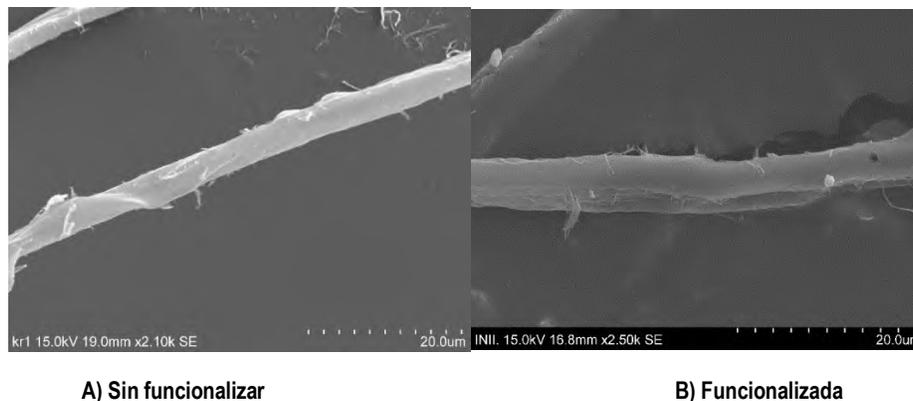


Fig. 7. Microscopía electrónica de barrido de la nanocelulosa extraída a partir de rastrojo de piña.

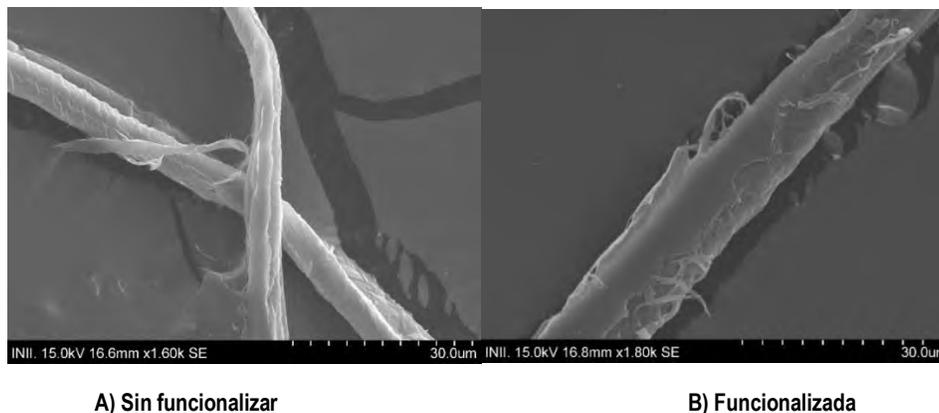


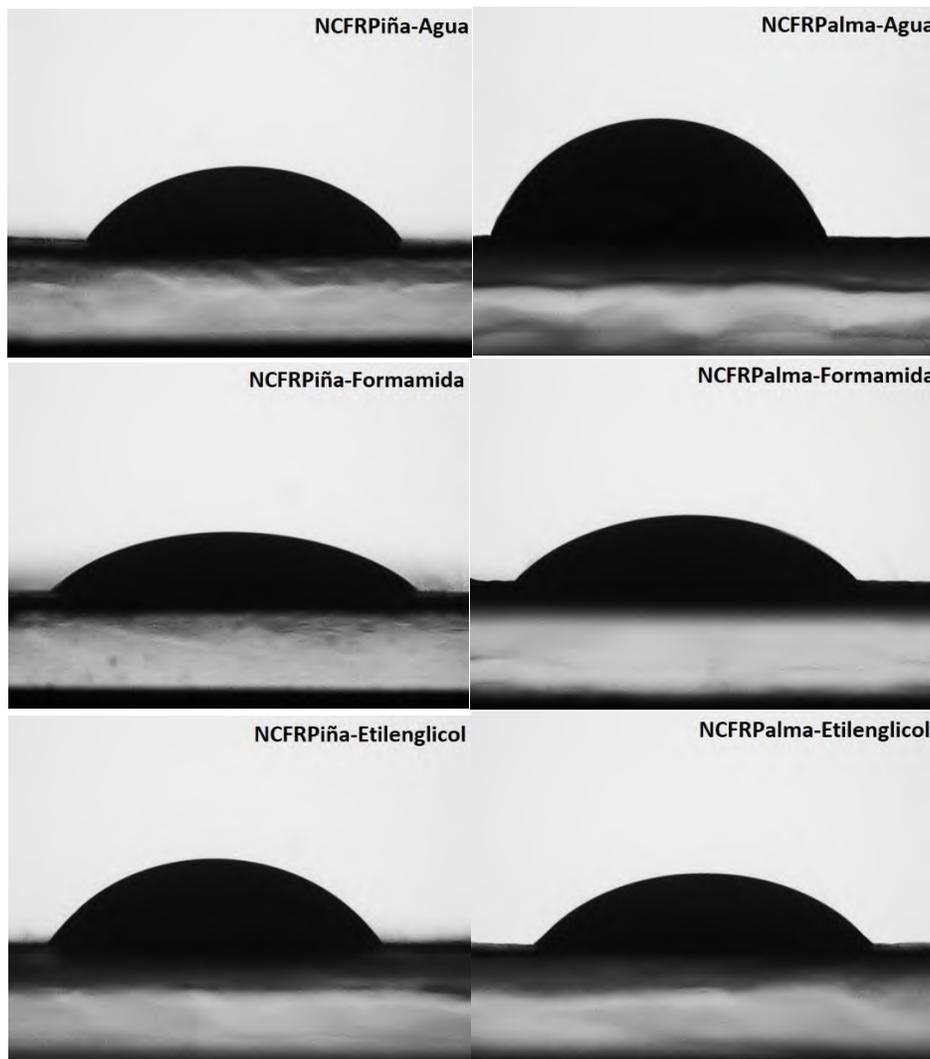
Fig. 8. Microscopía electrónica de barrido de la nanocelulosa extraída a partir de raquis de palma africana.

#### 4) Ángulo de contacto

Es importante comprender algunos comportamientos y características físicas de los materiales de adsorción con el fin de establecer las condiciones óptimas en las cuales se va a ensayar y evaluar un proceso de adsorción. La celulosa es un material que debido a su polaridad posee una elevada afinidad al agua. Sin embargo, algunas de las diferentes propiedades que tienen los materiales pueden llegar a cambiar cuando estos son llevados a nivel nanométrico. Algunas características como la rigidez, adsorción, la tensión, así como la polaridad superficial puede ser una de ellas.

En la Fig. 9 se pueden observar los ensayos realizados para determinar el ángulo de contacto entre la nanocelulosa y los 3 líquidos seleccionados. El ángulo de contacto obtenido en cada uno de dichos ensayos permitió determinar los valores de tensión superficial asociados a la nanocelulosa, dichos valores se pueden encontrar tabulados en la Tabla 4.

10



**Fig. 9.** Fotografías de ángulo de contacto entre la nanocelulosa y líquidos con diferentes polaridades. Donde se denota: NCFR Piña (Nanocelulosa fibrilar extraída a partir de rastrojo de piña) y NCFR Palma (Nanocelulosa fibrilar extraída a partir de raquis de palma africana)

TABLA 4.  
DATOS DE LA TENSIÓN SUPERFICIAL Y POLARIDAD SUPERFICIAL DE LAS NANOCELULOSAS.

Fuente de Nanocelulosa	Tensión Superficial	Polaridad Superficial
Rastrojo de Piña	34,83	0,44
Raquis de Palma	35,7	0,27

11

A partir del estudio del ángulo de contacto entre la superficie sólida de la nanocelulosa y los diferentes líquidos, se obtuvieron los componentes de dispersividad y polares de las nanofibras de celulosa estudiadas. Con dichos valores es posible efectuar no solo un análisis cuantitativo de la tensión superficial o el factor de cohesión del material, también es posible obtener conclusiones cualitativas del material como lo es la polaridad superficial [35].

La relación entre el componente polar y la energía superficial total ( $\gamma_S^P/\gamma_S^T$ ) permite determinar la polaridad superficial de la nanocelulosa. Como se observa en la

Tabla 4, los valores de polaridad superficial son menores a 0,5 lo que permite inferir el comportamiento no polar de las nanocelulosas [36]. Finalmente, los valores obtenidos de tensión superficial de las nanocelulosas son similares en magnitud, tal y como se puede observar en el

Tabla 4, por lo que es posible inferir que el nivel de polaridad del material se desliga del tipo de fuente de celulosa del que procede.

También se realizaron ensayos de ángulo de contacto para las nanocelulosas funcionalizadas con ácido cítrico, sin embargo, no resultaron ser ensayos de análisis cuantitativo, debido a que las diferentes gotas de líquidos de distintas polaridades fueron absorbidas por la superficie de cada una de las nanocelulosas funcionalizadas. Lo anterior permite inferir que la funcionalización genera un cambio parcial en la polaridad de la nanocelulosa, generando un material anfifílico, lo cual ocasiona que esta tenga un espectro más amplio de polaridad. Esto ocasiona que pueden existir secciones con mayor afinidad a los líquidos polares y otras más afines a los líquidos no polares.

A partir de lo anterior es que se decide efectuar un análisis de adsorción implementando nanocelulosa en dispersión y no como una membrana filtrante. Esto debido a que por las propiedades apolares de la nanocelulosa sin funcionalizar, la interacción sólido-líquido se vería afectada. Dicha afectación generaría que la comparación de la efectividad de adsorción entre la nanocelulosa sin funcionalizar y funcionalizada, se vea alterada a causa de las condiciones de análisis.

## B. ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA EL SISTEMA DE ADSORCIÓN

### 1. Adsorción con nanocelulosa obtenida a partir de rastrojo de piña

Del diseño factorial, se determinó que el tipo de nanocelulosa utilizada como adsorbente, así como el nivel de pH de la disolución son factores que influyen de forma significativa en la adsorción de cromo. Dicho análisis se obtiene a partir del estudio del diagrama de Pareto que se presenta en la Fig. 10, en donde se analizan los factores que intervienen en la adsorción de cromo implementando nanocelulosa extraída a partir de rastrojo de piña. La interacción entre dichos factores también es significativa por lo que el estudio de dicha interacción es de sumo interés para poder comprender bajo qué condiciones se deben realizar las adsorciones.

Debido a que el estudio de las interacciones entre los factores es de mayor importancia que el estudio de los factores por separado cuando estos son significativos, es que se estudia el gráfico de la interacción significativa en vez de los efectos por separado.

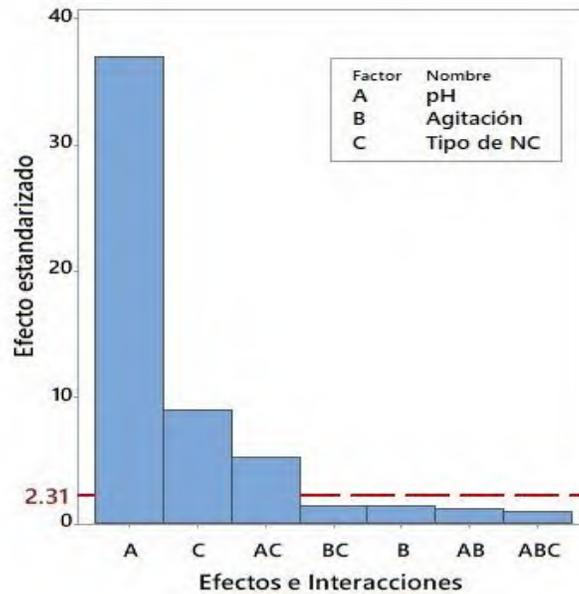


Fig. 10. Diagrama de efectos de los factores, en respuesta a la razón de adsorción de cromo (mg Cr/g NCF) utilizando celulosa extraída a partir de rastrojo de piña.

Si se analiza la Fig. 11, es posible observar cómo para la interacción entre el tipo de nanocelulosa y el pH, la adsorción se ve favorecida de forma significativa a pH con nivel alto (pH=4,85) y un nivel bajo de tipo de nanocelulosa (nanocelulosa sin funcionalizar).

Por otra parte, el factor “C” (agitación) no resultó significativo en el proceso de adsorción. Lo anterior permite que las condiciones de agitación sean elegidas de forma conveniente por lo que se establece un nivel bajo del factor “C”, ya que no implica la utilización de equipo adicional (sistema de agitación). Finalmente, según el análisis tanto estadístico como de la información aportada por el mismo, se elige un sistema de adsorción de la disolución de  $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$  a un pH de 4,85, implementando nanocelulosa sin funcionalizar extraída a partir de rastrojo de piña y en un medio sin agitación en donde la nanocelulosa se mantenga en suspensión.

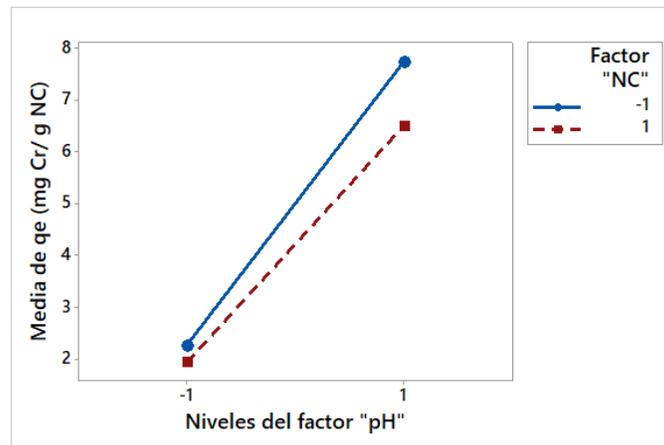


Fig. 11. Diagrama de las Interacciones entre los factores, en respuesta a la razón de adsorción de cromo (mg Cr/g NCF) utilizando celulosa extraída a partir de rastrojo de piña.

2. Adsorción con nanocelulosa obtenida a partir de raquis de palma africana.

Al estudiar los resultados obtenidos para el diseño factorial, se obtuvo el diagrama de Pareto de la Fig. 12, de donde se puede observar cómo el sistema de adsorción con nanocelulosa obtenida a partir de raquis de palma africana ve alterada su tasa de adsorción con la variación de los factores “A” y “B”. Es decir que el pH y el tipo de nanocelulosa utilizada son factores que afectan el proceso de adsorción de cromo. Sin embargo, en esta ocasión la interacción entre estos factores no es significativa por lo que se realiza el estudio de los factores por separado.

13

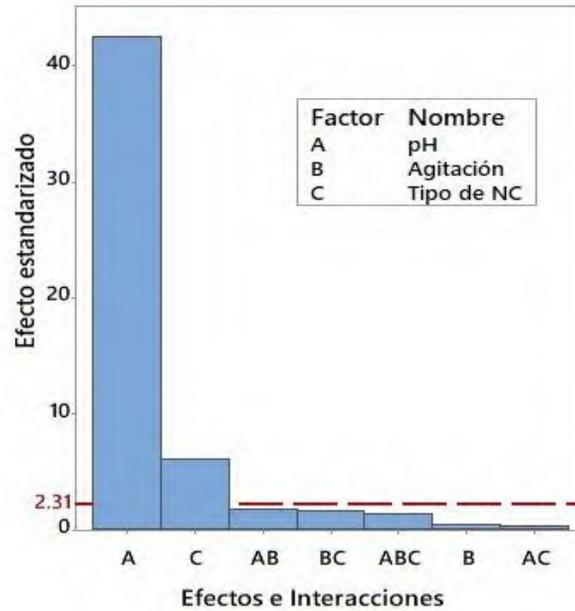


Fig. 12. Diagrama de efectos de los factores, en respuesta a la razón de adsorción de cromo (mg Cr/g NCF) utilizando celulosa extraída a partir de raquis de palma africana.

Si se observa la Fig. 13, tanto el nivel alto de pH (pH=4,85) así como el nivel alto del tipo de nanocelulosa (Nanocelulosa funcionalizada) favorecen de forma significativa el proceso de adsorción, por lo que se establecen dichos niveles para realizar la adsorción de cromo.

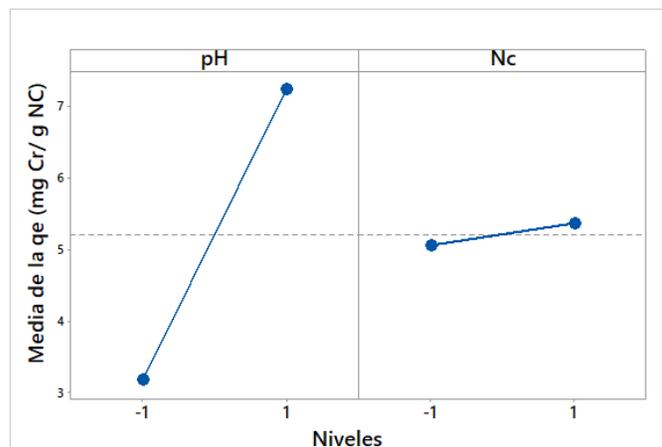


Fig. 13. Diagrama de efectos, en respuesta a la razón de adsorción de cromo (mg Cr/g NCF) utilizando celulosa extraída a partir de raquis de palma africana.

Por otro lado, el factor “C” (agitación) no resultó significativo por lo que se decide implementar el sistema en reposo para realizar las curvas de adsorción, ya que no implica la utilización de equipo adicional (sistema de agitación) por tiempo prolongado. Finalmente, según el análisis tanto estadístico como de la información aportada por el mismo, se elige un sistema de adsorción de la disolución de  $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$  a un pH de 4,85, que implemente nanocelulosa extraída a partir de raquis de palma africana, funcionalizada con ácido cítrico y en un medio sin agitación en donde la nanocelulosa se mantenga en suspensión.

### C. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

Las curvas de adsorción se efectuaron según las condiciones establecidas a partir del diseño estadístico. Los diferentes datos de equilibrio de adsorción obtenidos, fueron graficados y sometidos a ajuste de los modelos de Langmuir, Freundlich y Sips.

Los modelos de Freundlich y Langmuir, son de los principales modelos utilizados para describir de forma teórica diversos procesos de adsorción. El modelo de Sips por su parte, es un modelo empírico de uso muy común en la determinación del comportamiento de adsorción de metales pesados implementando nanocelulosa como adsorbente [37] [38] [39]. Dicho modelo es una combinación entre el modelo de Langmuir (Ecuación (2)) y el modelo de Freundlich (Ecuación (3)).

$$q_e = q_{max} \frac{K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2)$$

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (3)$$

Donde:

$C_e$ : Es la concentración en el equilibrio.

$K_F$ : Es la constante de Freundlich.

$K_L$ : Es la constante de Langmuir.

$n$ : Es una constante.

$q_e$ : Es la carga en el equilibrio.

$q_{max}$ : Es la carga máxima.

En la Tabla 5 se puede observar el valor de las diferentes constantes obtenidas para el sistema de adsorción de cromo (III) utilizando nanocelulosa extraída a partir de rastrojo de piña. En dicho cuadro se puede observar cómo los datos de equilibrio de adsorción obtenidos experimentalmente se ajustan de una mejor manera a la Isoterma de Sips, seguido por el ajuste de la Isoterma de Freundlich. Lo anterior se asevera gracias al valor del coeficiente de correlación que aparece en dicha tabla. Por su parte si se analiza la Tabla 5, se puede observar cómo el comportamiento de mejor ajuste es el mismo para la nanocelulosa extraída a partir de raquis de palma africana y funcionalizada con ácido cítrico.

El modelo de Sips, al ser un modelo derivado de otros 2 modelos, toma ciertas propiedades de los mismos y con sigo es capaz de predecir ciertas características del adsorbente y de la interacción entre este y el adsorbente como lo hacen los modelos de Freundlich y Langmuir. En el caso de la Isoterma de Langmuir, este modelo asume que las adsorciones se efectúan en una superficie de capa homogénea, pero la mayoría de los nanoadsorbentes son de superficie heterogénea [40]. Dicho lo anterior, cobra sentido el hecho de que la isoterma de Langmuir no se ajuste tan bien como lo hacen otros modelos, tal y como se observa en las Tablas 5 y 6.

Por otro lado, la constante “n” del modelo de Sips al igual que la constante “n” del modelo de Freundlich, describe la afinidad entre el adsorbente y el adsorbente en donde los valores entre 1 y 10 describen los procesos con mayor afinidad. Sin embargo, en el modelo de Sips, a diferencia del modelo de Freundlich, también describe la heterogeneidad de la matriz de forma tal que entre más elevado es dicho valor, más heterogéneo es el adsorbente y cuando este toma valor de 1, la ecuación de Sips se transforma en la Ecuación de Langmuir y

describe el comportamiento de un adsorbente de capa homogénea [41]. Dicho comportamiento se puede observar al analizar la Ecuación del modelo de Sips.

$$q_e = q_{max} \frac{K_L C_e^n}{1 + K_L C_e^n} \quad (4)$$

15

TABLA 5.  
DATOS DE LAS CONSTANTES DE LOS MODELOS ACOPLADOS A LA ISOTERMA DE ADSORCIÓN DE CROMO CON NANOCELULOSA EXTRAÍDA A PARTIR DE RASTROJO DE PIÑA.

Modelo	Constantes			R2
	qmax	K	n	
Langmuir	8,602	0,110	NA	0,830
Freundlich	NA	1,033	1,782	0,948
Sips	8,602	0,116	1,842	0,975

TABLA 6.  
DATOS DE LAS CONSTANTES DE LOS MODELOS ACOPLADOS A LA ISOTERMA DE ADSORCIÓN DE CROMO CON NANOCELULOSA FUNCIONALIZADA CON ÁCIDO CÓLICO, EXTRAÍDA A PARTIR DE RAQUIS DE PALMA AFRICANA.

Modelo	Constantes			R2
	qmax	K	n	
Langmuir	5,630	0,172	NA	0,779
Freundlich	NA	1,138	2,265	0,855
Sips	5,630	0,117	2,153	0,945

Se puede observar que los valores de la constante  $n$  para el modelo de Sips es mayor en el caso de las adsorciones realizadas con nanocelulosa extraída a partir de raquis de palma africana que para la nanocelulosa extraída a partir de rastrojo de piña. Lo anterior se podría acreditar precisamente a la diferencia de heterogeneidad de las nanocelulosas evaluadas, debido a que la nanocelulosa de raquis de palma africana que se utilizó en el proceso de adsorción se encontraba funcionalizada con ácido cólico, lo que puede generar una mayor heterogeneidad en la superficie del nanoadsorbente.

Al observar la Fig. 14 y Fig. 15, se puede notar el acoplamiento entre el modelo seleccionado y los valores de equilibrio encontrados en la práctica. En ambos casos se obtuvieron de forma experimental los valores de carga máxima, los cuales fueron de 8,602 mg/g en el caso de la nanocelulosa de rastrojo de piña y 5,630 mg/g para la nanocelulosa funcionalizada con ácido cólico, extraída a partir de raquis de palma africana. Ambos datos por encima de 2,88 mg/g, el cual es el valor de carga de adsorción máxima obtenido por [23], donde implementa nanocelulosa funcionalizada para la adsorción de Cr(III). Dichos valores también superan la carga máxima de adsorción de Cr(VI) reportado por otras investigaciones [21] [22]. Lo anterior permite demostrar que la nanocelulosa tanto funcionalizada como sin funcionalizar, es efectiva en el tratamiento de las aguas residuales del proceso de curtido de cuero, por lo que se podría implementar como una etapa terciaria del tren de tratamiento de las aguas residuales.

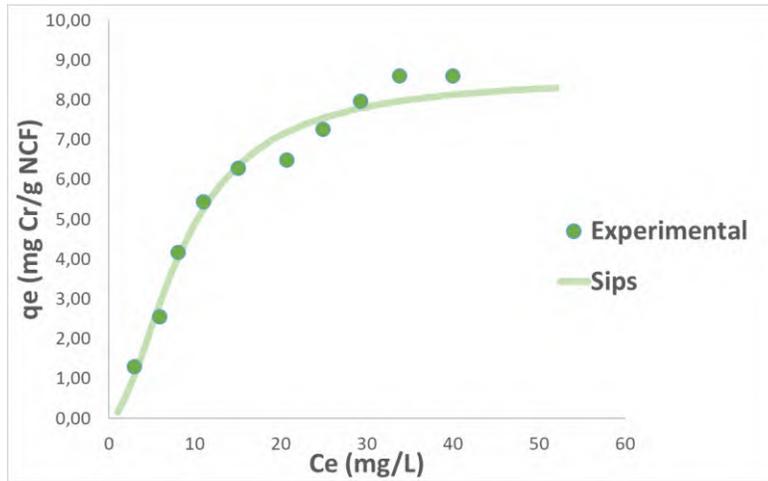


Fig. 14. Gráfico de la isoterma de adsorción de cromo y el ajuste del modelo de Sips, para la adsorción con nanocelulosa extraída a partir de rastrojo de piña.

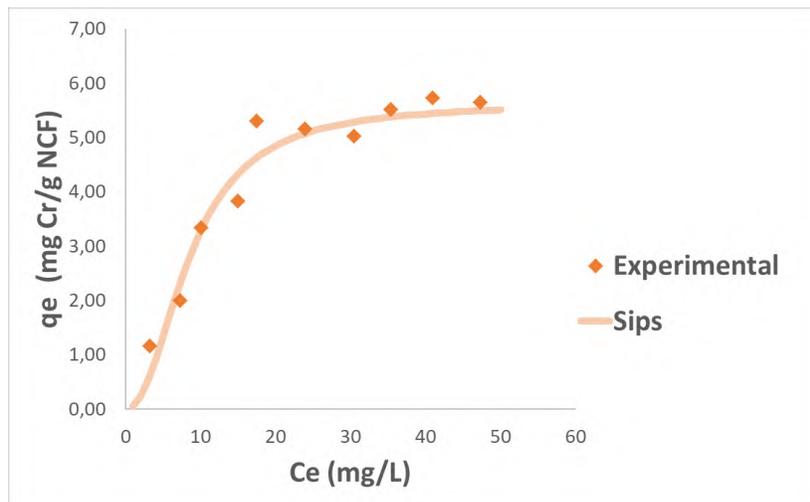


Fig. 15. Gráfico de la isoterma de adsorción de cromo y el ajuste del modelo de Sips, para la adsorción con nanocelulosa funcionalizada con ácido cólico, extraída a partir de raquis de palma africana.

## IV. CONCLUSIONES

Con el presente artículo se evidencia que el ácido cólico puede funcionar como reactivo funcionalizante en las nanofibras de celulosa, además se observa, que dicho nanomaterial funcionalizado, es capaz de adsorber iones de cromo (III). Gracias a esta investigación se obtiene información valiosa de cómo diferentes parámetros como la naturaleza de la biomasa utilizada, el pretratamiento al que fue sometida y el porcentaje de funcionalización, interfieren en la adsorción.

Se determina que el pretratamiento de las fibras puede influir en el porcentaje de funcionalización del nanomaterial, que para esta investigación fue de 12,85 % y 4,92% para las fibras extraídas a partir de rastrojo de piña y raquis de palma africana, respectivamente.

Por otro lado, se logra identificar que la funcionalización genera un cambio en las características polares del nanomaterial, en donde el ácido cólico contribuye en la formación de una superficie anfífila del material seco. Lo anterior mejora la interacción entre el agua y la nanocelulosa funcionalizada, por lo que amplía la aplicabilidad de dicho material a nivel investigativo, ya que brinda propiedades diferentes a las de la nanocelulosa sin funcionalizar.

De igual forma, se establece que gracias a las propiedades de defloculación que posee la nanocelulosa, existe una elevada superficie de contacto entre el adsorbente y el medio de dispersión del ion metálico, durante todo el ensayo de adsorción, lo cual genera que la agitación no tenga efecto significativo sobre la afectividad de la adsorción y por ende pueda ser despreciable.

Dentro del estudio de la adsorción se ha logrado establecer que el grado de funcionalización influye en las capacidades de adsorción del material, ocasionando que la funcionalización con ácido cólico no genere valor agregado en el proceso de retención de iones metálicos.

Se logra comprobar que el modelo de Sips genera un mejor modelaje de las isotermas de adsorción, tanto para el nanomaterial funcionalizado, como sin funcionalizar. Es decir, que con dicho modelo es posible describir las isotermas de adsorción implementando nanocelulosa cristalina, como lo hacen otras investigaciones, y nanofibras de celulosa como se presenta en esta investigación.

En general, se obtiene un nuevo nanomaterial funcionalizado, cuya efectividad en el proceso de adsorción permite abrir la posibilidad de probar dicho material en la adsorción de otros iones metálicos, cuyas propiedades y cargas iónicas pueden afectar la tasa de adsorción y saturación.

## REFERENCIAS

- [1] C. Cummins y M. Morris, "Using block copolymers as infiltration sites for development of future nanoelectronic devices: Achievements, barriers, and opportunities," *Microelectronic Engineering*, vol. 195, pp. 74-85, 2018.
- [2] D. D. Dixit y A. Pattamatta, "Effect of uniform external magnetic-field on natural convection heat transfer in a cubical cavity filled with magnetic nano-dispersion," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 146, January, 2020.
- [3] X. Zhang, D. Meng y Z. Tang, "Preparation of radial ZnSe-CdS nano-heterojunctions through atomic layer deposition method and their optoelectronic applications," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 777, pp. 102-108, 2019.
- [4] M. S. Amjad, N. Sadiq, H. Qureshi, G. Fareed y S. Sabir, "Nano particles: An emerging tool in biomedicine," *Asian Pacific Journal of Tropical Disease*, vol. 5, pp. 767-771, 2015.
- [5] J. Francis y P. A. Michael, "Investigation of micro/nano motors based on renewable energy sources," *Materials Today: Proceedings*, 2019.
- [6] X. Yan, C. Yi, Y. Wang y W. Cao, "Multi-catalysis of nano-zinc oxide for bisphenol A degradation in a dielectric barrier discharge plasma system: Effect and mechanism," *Separation and Purification Technology*, vol. 231, January 2020.
- [7] C. M. Hussain, *Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications*, Elsevier, 2018.
- [8] M. Maliha, M. Herdman, R. Brammananth y M. McDonald, "Bismuth phosphinate incorporated nanocellulose sheets with antimicrobial and barrier properties for packaging applications," *Journal of Cleaner Production*, 2019.

- [9] J. Luo, K. Huang, X. Zhou y Y. Xu, "Hybrid films based on holistic celery nanocellulose and lignin/hemicellulose with enhanced mechanical properties and dye removal," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 147, pp. 699-705 2020.
- [10] Q. Zhang, L. Zhang, W. Wu y H. Xiao, "Methods and applications of nanocellulose loaded with inorganic nanomaterials: A review," *Carbohydrate Polymers*, vol. 229, 2020.
- [11] S. Hokkanen, E. Repo, L. Westholm, S. Lou, T. Sainio y M. Silanpää, "Adsorption of Ni<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, PO<sup>3-</sup> and NO<sup>3-</sup> from aqueous solutions by nanostructured microfibrillated cellulose modified with carbonated hydroxyapatite," *Chem. Eng. J.*, vol. 252, pp. 64-74, 2014.
- [12] N. Najib y C. Christodoulatos, "Removal of arsenic using functionalized cellulose nanofibrils from aqueous solutions," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 367, pp. 256-266, 2019.
- [13] K. Xie, L. Jing, W. Zhao y Y. Zhang, "Adsorption removal of Cu<sup>2+</sup> and Ni<sup>2+</sup> from waste water using nanocellulose hybrids containing reactive polyhedral oligomeric silsesquioxanes," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 122, pp. 2864-2868, 2011.
- [14] X. Yu, S. Tong, M. Ge, L. Wu, J. Zuo, C. Cao y W. Song, "Adsorption of heavy metal ions from aqueous solution by carboxylated cellulose nanocrystals," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 25, n° 5, pp. 933 - 943, 2013.
- [15] T. Anirudhan, J. Deepa y J. Christa, "Nanocellulose/nanobentonite composite anchored with multi-carboxyl functional groups as an adsorbent for the effective removal of Cobalt(II) from nuclear industry wastewater samples," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 467, pp. 307-320, 2016.
- [16] S. Kamel, "Nanotechnology and its applications in lignocellulosic composites, a mini review," *Polym lett*, vol. 1, n° 9, pp. 546-575, 2007.
- [17] G. Cui, M. L. a. Y. Chen, W. Zhang y J. Zhao, "Synthesis of a ferric hydroxide-coated cellulose nanofiber hybrid for effective removal of phosphate from wastewater," *Carbohydrate Polymers*, pp. 40-47, 2016.
- [18] S. Tural, M. Ece y B. Tural, "Synthesis of novel magnetic nano-sorbent functionalized with N-methyl-D-glucamine by click chemistry and removal of boron with magnetic separation method," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 162, pp. 245-252, 2018.
- [19] B. Huang, Y. Liu, S. B. Lic y G. Zeng, "Effect of Cu (II) ions on the enhancement of tetracycline adsorption by Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub>-Chitosan/Graphene oxide nanocomposite," *Carbohydr. Polym.*, vol. 157, pp. 576-585, 2016.
- [20] P. Liu, P. F. Borrell, M. Božić y V. Kokol, "Nanocelluloses and their phosphorylated derivatives for selective adsorption of Ag<sup>+</sup>, Cu<sup>2+</sup> and Fe<sup>3+</sup> from industrial effluents," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 294, pp. 177-185, 2015.
- [21] S. Hokkanen, A. Bhatnagar, E. Repo, S. Lou y M. Sillanpää, "Calcium hydroxyapatite microfibrillated cellulose composite as a potential adsorbent for the removal of Cr (VI) from aqueous solution," *Chemical Engineering Journal*, vol. 283, pp. 445-452, 2016.
- [22] X. He, L. Cheng, Y. Wang, J. Zhao, W. Zhang y C. Lu, "Aerogels from quarternary ammonium-functionalized cellulose nanofibers for rapid removal of Cr(VI) from water.," *Carbohydr. Polym.*, vol. 111, pp. 683-687, 2014.
- [23] K. Singh, J. Arora, T. Sinha y S. Srivastava, "Functionalization of nanocrystalline cellulose for decontamination of Cr (III) and Cr (IV) from aqueous system: computational modelling approach.," *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 16, pp. 1179-1191, 2014.
- [24] S. M. Ramírez, "Boletín Estadístico Agropecuario," Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria, San José, Costa Rica, 2019.
- [25] P. B. Picado, "Universidad de Costa Rica," CICA. <http://cica.ucr.ac.cr/?p=5925> (accesed March, 2019)
- [26] S. Amroune, A. Bezazi, A. Belaadi, C. Zhu, F. Scarpa y S. Rahatekar, "Tensile mechanical properties and surface chemical sensitivity of technical fibres from date palm fruit branches (*Phoenix dactylifera* L.). *Composites Part A*," Applied Science and Manufacturing, pp. 98-106, 2014.
- [27] R. B. Saravanakumar y A. Kumaravel, "Characterization of a novel natural cellulosic fiber from *Prosopis juliflora* bark," *Carbohydrate Polymers*, pp. 1928-1933, 2013
- [28] A. Kardam, K. R. Raj, S. Srivastava y M. M. Srivastava, "Nanocellulose fibers for biosorption of cadmium, nickel, and lead ions from aqueous solution," *Clean Techn Environ Policy*, vol. 16, pp. 385-393, 2014.
- [29] L. M. Suta, G. V. a. A. Ledeti y T. Vlase, "Solid-State Thermal Behaviour of Cholic Acid," *Rev. Chim.*, vol. 67, n° 2, pp. 329-331, 2016.
- [30] A. Ahmad, H. Ahmad y A.-K. Khalifa, "Characterization of treated date palm tree fiber as composite," *Composites: Part B*, vol. 40, pp. 601-606, 2009.
- [31] A. Martina, M. A. Martins, O. d. Silva y L. Mattoso, "Studies on the thermal properties of sisal fiber and its constituents," *Thermochimica Acta*, vol. 506, pp. 14-19, 2010.
- [32] V. Fiore, T. Scalici y A. Valenza, "Characterization of a new natural fiber from *Arundo donax* L. as potential reinforcement of polymer composites," *Carbohydrate Polymers*, vol. 106, pp. 77-83, 2014.

- [33] R. Baskaran, A. Kumaravel, T. Nagarajan, P. Sudhakar y S. Saravanakumar, "Characterization of a novel natural cellulosic fiber from *Prosopis juliflora* bark," *Carbohydrate Polymers*, vol. 92, pp. 1928-1933, 2013.
- [34] N. Shopova y T. Milkova, "Thermochemical decomposition of cholic acid and its derivatives," *Thermochimica Acta*, vol. 255, pp. 211-220, 1995.
- [35] J. C. V. Oss y K. M. Chaudhury, "Interfacial Lifshitz-van der Waals and Polar Interactions in Macroscopic Systems," *Dow Corning Corporation*, 1988.
- [36] S. Dos-Santos y D. Goncalves, "Cambios en la mojabilidad en superficies de maderas tratadas térmicamente: Angulo de contacto y energía libre superficial," *Maderas, Cienc. tecnol.*, vol. 18, n° 2, 2016.
- [37] S. Hokkanen, E. Repo y M. Sillanpää, "Removal of heavy metals from aqueous solutions by succinic anhydride modified mercerized nanocellulose," *Chem. Eng. J.*, vol. 213, pp. 40-47, 2013.
- [38] L. Jin, Q. Sun, Q. Xu y Y. Xu, "Adsorptive removal of anionic dyes from aqueous solutions using microgel based on nanocellulose and polyvinylamine," *Bioresour. Technol.*, vol. 197, pp. 348-355, 2015.
- [39] T. Anirudhan y F. Shainy, "Adsorption behavior of 2-mercaptobenzamide modified itaconic acid-grafted-magnetite nanocellulose composite for cadmium(II) from aqueous solutions," *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 32, pp. 157-166, 2015.
- [40] K. Yang, X. Wang, L. Zhu y B. Xing, "Competitive Sorption of Pyrene, Phenanthrene, and Naphthalene on Multiwalled Carbon Nanotubes," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 40, n° 18, pp. 5804-5810, 2006.
- [41] J. N. Putro, A. Kurniawan, S. Ismadji y Y.-H. Ju, "Nanocellulose based biosorbents for wastewater treatment: Study of isotherm, kinetic, thermodynamic and reusability," *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, vol. 8, pp. 134-149, 2017.

## **Análisis de esfuerzos de tensión y presiones de contacto en prótesis tumoral de rodilla en la posición de 15 grados durante el ciclo caminata**

Analysis of the Applied Load of a Knee Tumor Prosthesis in Critical Point Condition of 15° in the Walking Cycle

Tomas **De la Mora-Ramírez**<sup>1</sup>, Elvis **Coutiño-Moreno**<sup>2</sup>, Daniel **Maldonado-Onofre**<sup>3</sup>, Carlos **León-Cruz**

Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, MÉXICO

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0001-6594-2777>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0003-2455-2574>

<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0002-6078-2206>

Recibido 14-05-2021, aceptado 30-08-2021.

### **Resumen**

El presente trabajo se realizó a solicitud de la empresa C.M.E ortopedia de Mexico para investigar el diseño y vulnerabilidad de la fabricación de una prótesis tumoral de rodilla elaborada con polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) del tipo GUR 1020 y aleación de titanio Eli grado 23 (Ti6AL4V), se tomo como actividad el ciclo caminata para análisis de la carga aplicada. Mediante un software de elemento finito, se analizaron las tensiones de von Mises, así como las presiones de Contacto (CPRESS). Se realizaron simulaciones en condición del punto crítico del ciclo caminata en las condiciones de 15° y con un peso promedio del paciente de 70 kg, dato específico proporcionado por la empresa. Se realizó una simulación estática bidimensional del ensamble del buje-perno y tridimensional de ensamble con los componentes de la prótesis. Los resultados que se obtuvieron nos predicen de una posible falla en la prótesis basada en el análisis de la distribución de tensiones y el esfuerzo de contacto del UHMWPE.

**Palabras clave:** análisis de elemento finito, presión de contacto, prótesis de rodilla, ciclo marcha y contacto de Hertz

### **Abstract**

The present investigation was carried out at the request of the company CME ortopedia de Mexico to investigate the design and vulnerability of the manufacture of a knee tumor prosthesis made of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) type GUR 1020 and titanium alloy Eli grade 23 (Ti6AL4V), was taken as an activity the walk cycle for analysis of the applied load. Using finite element software, von Mises stresses and contact pressures (CPRESS) were analyzed. Simulations were performed in critical point condition of the walking cycle in the conditions of 15° and with an average patient weight of 70 kg, specific data provided by the company. A two-dimensional static simulation of the bushing-bolt assembly and a three-dimensional simulation of the assembly with the prosthesis components were performed. The results obtained predict a possible failure of the prosthesis based on the analysis of the stress distribution and the contact stress of the UHMWPE.

**Index terms:** Finite element analysis, contact pressure, knee prosthesis, walking cycle and Hertz contact

## I. INTRODUCCIÓN

La mayoría de los sujetos sometidos a una prótesis total de rodilla son individuos con edades mayores de 65 años que presentan algún tipo de enfermedad, principalmente osteoartritis y artritis reumatoide, aunque también se da en adultos jóvenes como es el caso de esta investigación [1]. La rodilla realiza importantes esfuerzos debido al peso del cuerpo, adquiere una gran movilidad a partir de un determinado ángulo de flexión que es necesario para la óptima orientación del pie en relación con las irregularidades del terreno [2]. Fregly describe el desgaste como un factor crucial que reduce la vida útil de los implantes de rodilla y conduce al fracaso de las prótesis totales de rodilla [3]. Sathasivam consideró el conocimiento de las presiones de contacto como una herramienta fiable para determinar el desgaste potencial del UHMWPE [4].

El polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) se ha utilizado en ortopedia como uno de los materiales para las articulaciones artificiales en prótesis de rodilla, cadera y columna vertebral desde hace 50 años, la mayoría de las articulaciones implantadas están diseñadas para que el metal se articule contra un material polimérico, por lo que la interacción metal-polietileno en los reemplazos articulares es un estándar internacional para los trastornos articulares degenerativos [5]. Sin embargo, el principal problema de las prótesis de rodilla es la vida media de sus componentes fabricados con UHMWPE, que es de aproximadamente 15 años en condiciones de implantación adecuada y uso pasivo [6], [7], [8].

Las partículas de polietileno generadas por la fricción del metal sobre la unión del polímero son el inductor más común de la osteólisis, que lleva a un aflojamiento del implante que conduce a un fracaso inminente [9]. El desgaste del inserto de UHMWPE es la razón más común por la que las personas tienen que someterse a una cirugía de revisión o a la sustitución total de la prótesis [10].

Algunas de las actividades diarias determinantes que aceleran el proceso de desgaste del UHMWPE en una persona con prótesis son subir y bajar escaleras, caminar, ponerse en cuclillas, los deportes de alto impacto, el sobrepeso, la edad del paciente, el tipo de actividad laboral y las enfermedades degenerativas.

Además, la topografía de la superficie tiene un papel importante en multitud de fenómenos físicos y tribológicos como la mecánica de contacto, la fricción, la adhesión, la humedad y la lubricación. Berli llegó a la conclusión de que un factor considerable en el desgaste de las articulaciones artificiales es la rugosidad de la superficie del inserto de polietileno, que influye considerablemente en su desgaste, y verificó que el aumento de la tensión de contacto en el componente de cojinete tibial provocaba graves daños en los componentes tibiales totales de la rodilla [11].

Por tal motivo el objetivo principal de la investigación es la verificación de diseño de la prótesis tumoral de rodilla fabricada por la empresa C. M. E ortopedia de México para investigar el correcto diseño y vulnerabilidad de la prótesis de como soporte de evidencia para la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios, Cofepris.

## II. DESARROLLO

La prótesis utilizada para el proyecto de investigación es del tipo articulada y fue proporcionada por la empresa C.M.E. Ortopedia de México. Esta empresa es proveedora directa de prótesis articulares del Hospital de Ortopedia y Traumatología del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS). El Paciente de 59 años de edad, con 70 kg de peso, presentó un diagnóstico patológico de dolor en la rodilla derecha. Los estudios mostraron un crecimiento maligno en su tibia proximal derecha con una masa lateral de tejido blando. Se le diagnosticó osteosarcoma mediante una biopsia abierta, por lo que fue sometido a quimioterapia y reconstrucción quirúrgica de la extremidad mediante la colocación de una prótesis tumoral de rodilla. Los datos anteriores fueron proporcionados por la empresa.

El diseño de la prótesis tumoral de rodilla se basa en un producto comercial brasileño, por lo que se realizaron estudios para comprobar el éxito del diseño como requisito para seguir fabricando la prótesis. La prótesis de tipo bisagra tiene 7 partes hechas de polietileno y aleación de titanio como se indica en la tabla 1.

TABLA 1.  
COMPONENTES DE LA PRÓTESIS Y EL MATERIAL DE CADA UNO.

No. Parte	Descripción	Material
1	Buje	UHMWPE
2	Funda articulada	Ti4Al6V
3	Perno	Ti4Al6V
4	Platillo tibial	Ti4Al6V
5	Chaveta	UHMWPE
6	Funda	UHMWPE
7	Componente femoral	Ti4Al6V

La Fig. 1 muestra los componentes de la prótesis, el cubo ensamblado con el perno y la cubierta articulada, que soporta el inserto femoral que se coloca en el fémur del paciente. En el lado de la tibia se inserta la bandeja tibial.

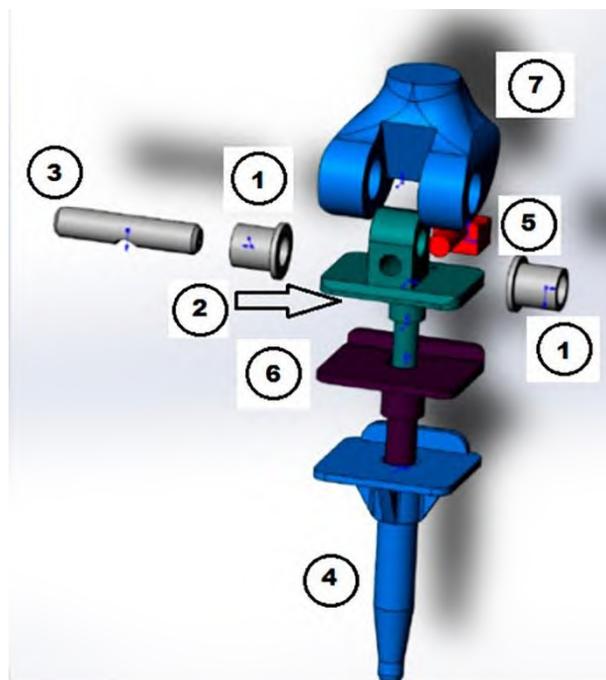


Fig. 1. Montaje total de los componentes de la prótesis de rodilla.

Se realizó un análisis estático durante la actividad diaria del ciclo de la caminata, resaltando los picos de fuerza que se producen en cada uno de los ciclos. Se definieron los rangos de movimientos producidos por la articulación en la rodilla, para poder obtener las concentraciones de fuerzas durante la actividad de caminata.

Se utilizó el plano sagital como referencia para obtener los ángulos generados por la flexión de la rodilla entre el fémur y la tibia (véase Fig. 2) [2]. Una persona sana tiene una flexión de cero grados, cuando la pierna está totalmente extendida hasta un ángulo de 130 grados cuando está en cuclillas.

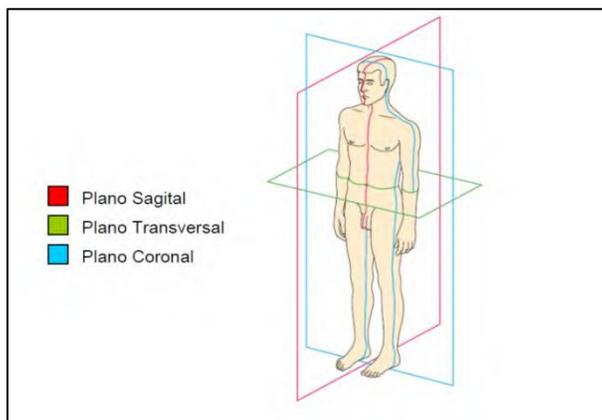


Fig. 2. Planos de División del cuerpo humano. En el plano sagital, en él se realizan los movimientos de flexo-extensión.

La Tabla 2 muestra los grados de flexión de la rodilla durante la actividad del ciclo de la marcha y su carga aplicada en el plano sagital tomada por los autores Mow y David [12].

TABLA 2.  
ACTIVIDAD DE MARCHA DE UN INDIVIDUO NORMAL CON SUS RESPECTIVOS GRADOS DE FLEXIÓN Y CARGA APLICADA DURANTE EL CICLO DE MARCHA [12], [13].

Actividad	Flexión de rodilla (grados)	Peso corporal (PC)
Ciclo caminata	0-67	3.2

Durante el ciclo de caminata se tomó la fuerza máxima, que se presenta a 15 grados con un valor de 2250 N como se muestra en la Fig. 3 [14].

Para el cálculo de la carga se utilizó como referencia al paciente mexicano de sexo masculino con un peso de 70 kg y una altura de 1,75 m, ya que antes de someterse a este tipo de cirugía, el paciente sigue una dieta equilibrada para alcanzar su peso ideal [15].

Schipplein interpretó el ciclo caminata como una función del peso corporal (PC), teniendo la carga máxima entre el período de respuesta del peso corporal y la posición media, aplicada a una articulación de la rodilla a 15 grados de flexión [16].

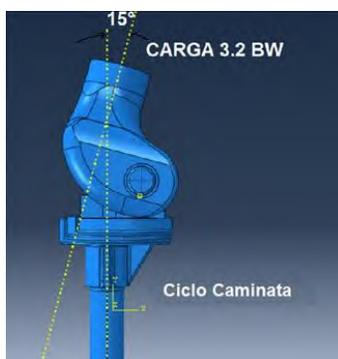


Fig. 3. Ángulos entre el fémur y la tibia, así como la carga aplicada.

La condición para el ciclo caminata basada en la información antes de los 15 grados es de 3.2 el peso del cuerpo. Por lo tanto, para la simulación en la Tabla 3 se consideran las principales propiedades mecánicas de los materiales involucrados.

TABLA 3.  
PROPIEDADES DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN EL ANÁLISIS ESTÁTICO EN EL CICLO CAMINATA PARA EL IMPLANTE DE PRÓTESIS DE RODILLA

Material	Modulo de elasticidad (MPa)	Relación de Poisson	Densidad (tn/mm <sup>3</sup> )	Límite de elasticidad (MPa)
Ti6Al4V	105 000	0.342	4.43 e-9	827
UHMWPE	1080	0.4	9.7 e-10	24

El valor del módulo de elasticidad se obtuvo a partir de pruebas de nanoindentación. Las propiedades como son la relación de Poisson, la densidad y el límite elástico provienen de referencias bibliográficas [17], [18], [19]. Los datos de las variables fueron colocados en el módulo de propiedades del material en el programa de cómputo por medio de elementos finitos.

Para el mallado de la pieza se utilizaron elementos hexaédricos tipo C3D8R, de ocho nodos, lineales con tres grados de libertad y tetraedros C3D4 de cuatro nodos con tres grados de libertad. Los elementos tetraédricos se utilizaron en piezas con geometrías complejas como la chaveta, el manguito articulado, el manguito de la tibia, la rodilla, el platillo de la tibia con un tamaño de elemento de 1 mm para cada una de las piezas mencionadas, el elemento hexaédrico se utilizó para los casquillos y para el perno, este tipo de elemento da mayor precisión en los resultados, se utilizó un tamaño de elemento de 0,5 mm, esto se muestra en la Fig. 4.

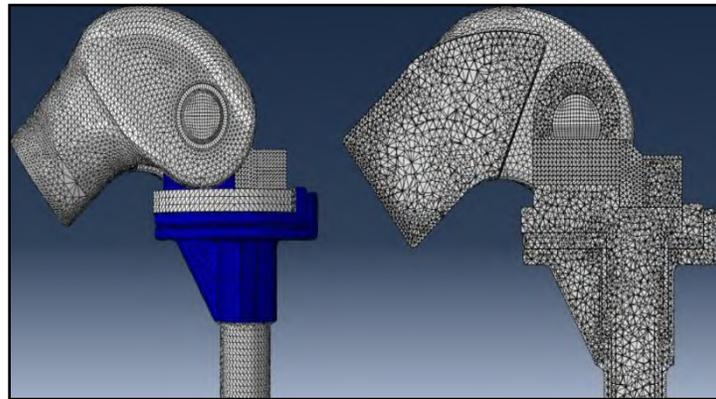


Fig. 4. Malla del modelo de prótesis de rodilla con elementos hexaédricos y tetraédricos en función de la geometría de la pieza.

Se realizó un análisis de convergencia para determinar el número de elementos para obtener resultados confiables y correctos. El gráfico de la Fig. 5 muestra que los elementos más adecuados son el cuadrado de 8 nodos y el triangular de 6 porque los resultados del esfuerzo de von Mises se estabilizan después de 300.000 elementos.

6

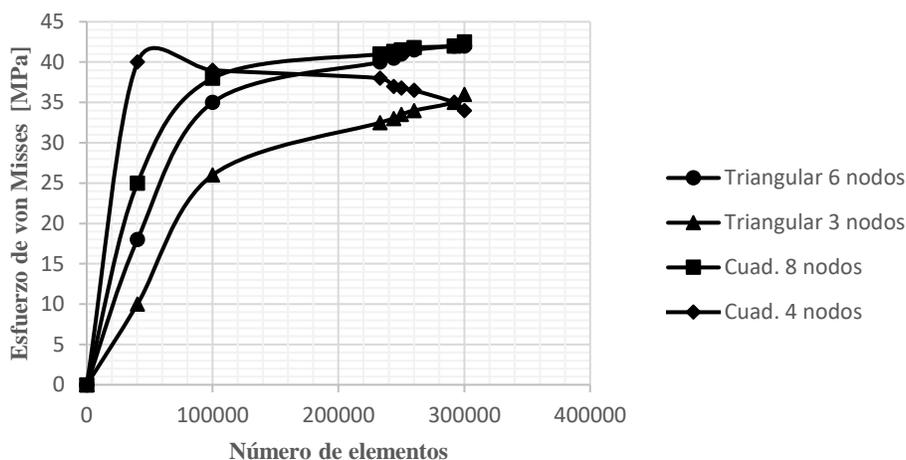


Fig. 5. Análisis de convergencia que indica que el elemento más adecuado es el triángulo de 6 nodos y el cuadrado de 8 nodos.

Se utilizaron interacciones entre cada una de las partes de la prótesis que estaban en contacto, utilizando el método de discretización de superficie a superficie con un coeficiente dinámico de fricción lubricada entre las partes de aleación de titanio de 0.275 [20], y las partes de polietileno con aleación de titanio de 0.056 [21]. La carga se aplicó en forma de presión en la parte superior de la rodilla y una restricción fija en la parte inferior de la bandeja tibial, como se muestra en la Fig. 6.

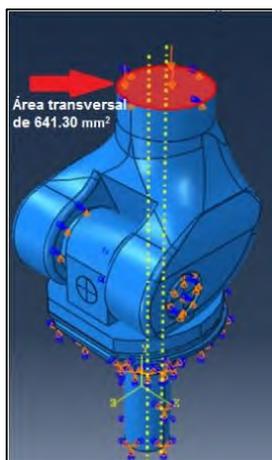


Fig. 6. Aplicación de carga en el corte transversal del componente femoral.

### III. RESULTADOS

La simulación se realizó en la condición crítica del ciclo de marcha con una carga de 3.2 del peso corporal, analizando principalmente los esfuerzos de von Mises para observar los concentradores de esfuerzos, los desplazamientos en la zona entre la rodilla y la funda articulada, así como las presiones de contacto en los componentes de pernos y casquillos.

La Fig. 7 indica las partes de la prótesis que se tomaron como referencia para obtener los desplazamientos entre la rodilla y la funda articulada. En este punto es importante evitar el contacto entre sus superficies, ya que habría fricción entre los materiales de aleación de titanio.

7

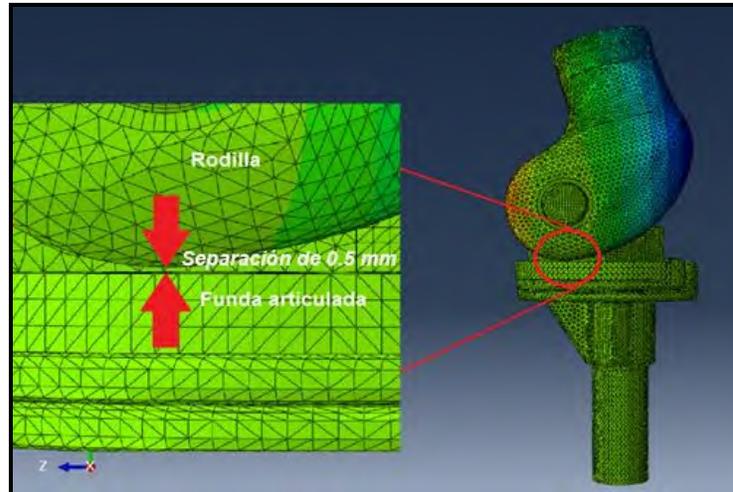


Fig. 7. Separación del componente femoral y funda articulada, ambos de aleación de titanio (Ti-6Al-4V).

La prótesis tiene una separación de 0.5 mm entre el componente femoral y la funda articulada cuando no se le aplica carga externa, esto sucede durante el ciclo caminata cuando la pierna se encuentra suspendida al momento de realizar el paso al caminar. Los desplazamientos al aplicar la carga externa, cuando la pierna que tiene la prótesis de rodilla soporta el peso total del paciente, se muestran en la Fig. 8, el gráfico muestra un gap de 0.0025 mm.

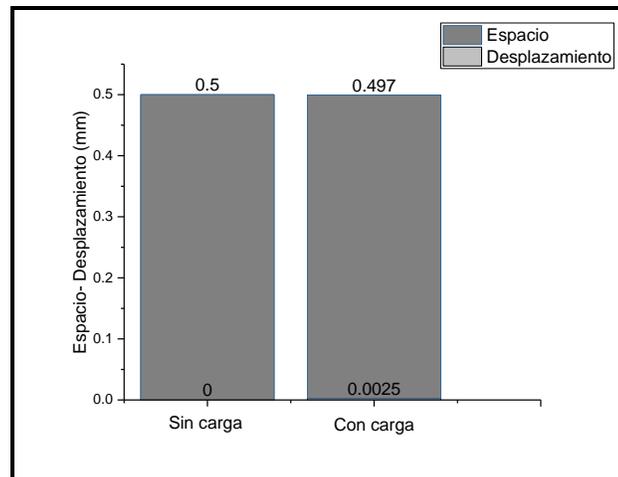
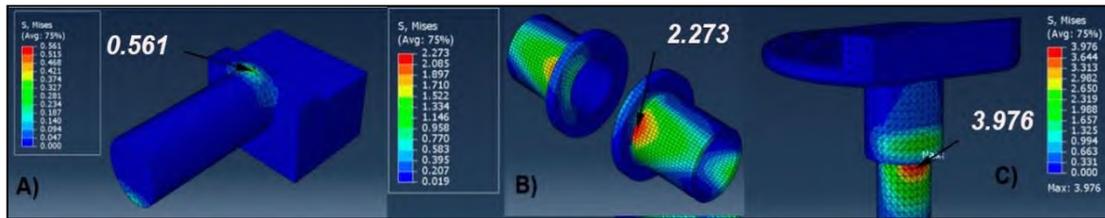


Fig. 8. Gráfico del espacio - desplazamientos en el ciclo de la marcha.

Las piezas de material de polietileno de ultra alto peso molecular de la prótesis son la chaveta, los casquillos y la cubierta tibial, el límite máximo de fluencia del polietileno es de 24 MPa como se muestra en la Tabla 3 de propiedades del material [22], la tensión máxima de von Mises es de 3,976 MPa en la cubierta tibial y un mínimo de 0,561 MPa en la chaveta, ambos no superan el límite máximo de fluencia del material (véase Fig. 9) por lo que no falla.



∞

Fig. 9. Esfuerzo máximo y mínimo de von Mises para el ciclo de marcha. A) Chaveta, B) Bujes, C) Funda tibial.

La parte crítica en la prótesis de rodilla son los casquillos debido al desgaste, lo que limita su vida útil, presentando una tensión máxima de von Mises de 8,97 MPa y una mínima de 2,273 MPa en condiciones de ciclo de cuclillas y de marcha respectivamente. Los gráficos de la Fig. 10 muestran los correspondientes gráficos de contorno de la tensión residual equivalente en la condición de ciclo de marcha.

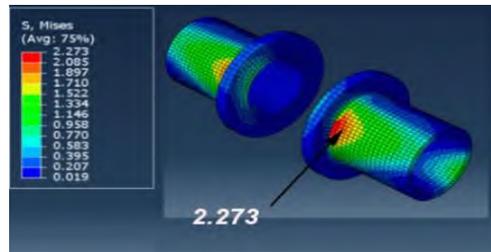


Fig.10. Esfuerzo máximo de von Mises en Bujes.

La Fig. 11 muestra el aumento de la tensión con respecto a la geometría del casquillo desde 0 hasta 17 mm de longitud, dando el valor máximo en el extremo del casquillo, donde hace que el ángulo cambie a 90 grados.

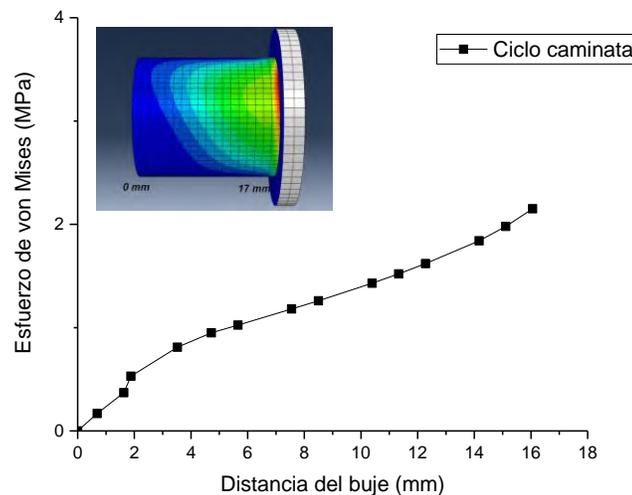


Fig. 11. Gráfico de la tensión superficial de los bujes en base a la distancia.

Las partes de la prótesis de material de aleación de titanio son el soporte tibial, el perno y el componente femoral, estos mostraron una tensión máxima de 42,665 MPa en la bandeja tibial muy por debajo del límite de fluencia del material (827 MPa) [23]. Y un mínimo de 18,624 MPa en el componente femoral, estos resultados indican un exceso de material muy considerable (ver Fig. 12 C). El perno mostró una tensión de 41,485 MPa muy por debajo del límite de fluencia del material de aleación de titanio.

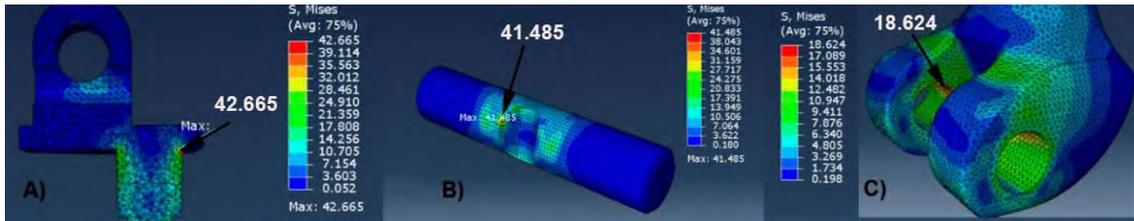


Fig. 12. Tensión máxima y mínima de von Mises. A) Soporte tibial, B) Perno, C) Componente femoral.

El parámetro que determina el posible desgaste y la zona de localización es la presión de contacto. Entre el casquillo y el perno la zona marcada en las Fig.13 A y 14 B es donde se producen los mayores valores de presión de contacto.

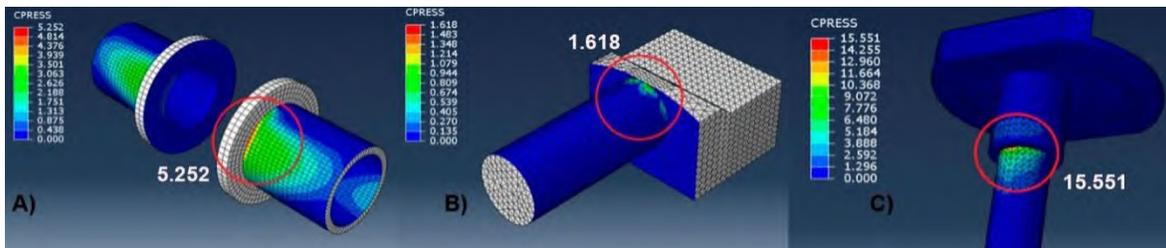


Fig. 13. Valores de CPRESS de las piezas fabricadas con UHMWPE, indicando la zona de mayor contacto entre superficies.

La Fig. 14 muestra las zonas de presión de contacto en el lado del pasador en los límites de colocación del casquillo y de la rodilla. El valor de 146,836 MPa indica que tiene una alta influencia de fricción en este caso debido a la fricción del polietileno del casquillo. Este es uno de los resultados que se verificará en el laboratorio para obtener el coeficiente de fricción entre ambos materiales y la tasa de desgaste.

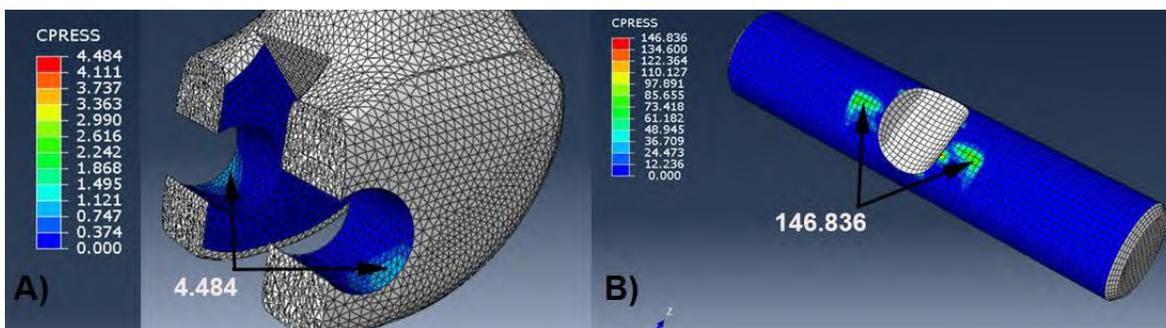


Fig. 14. Presiones de contacto en componente femoral y perno de material de aleación de titanio.

10

Como se muestra en la Fig. 11, la gráfica del perfil de contacto tiene una tendencia ascendente, alcanzando los valores máximos en el lado derecho del cubo, la zona en contacto con la rodilla. Los valores máximos de fricción no son significativos, pero aumentan mucho en la posición de cuclillas, provocando posibles fallos por fatiga debido a los ciclos de carga y descarga.

Como se muestra en la Fig. 14A. El componente femoral en la parte donde se integran los casquillos de UHMWPE presenta una presión de contacto 4,484 MPa, debido a que la reducen considerablemente, otro punto a tener en cuenta para la modificación de la geometría de la rodilla.

Con el análisis para obtener las tensiones máximas de von Mises y la presión de contacto, se identificó la parte más crítica, en el perno con una tensión máxima de contacto de 146,836 MPa.

La Fig. 15 muestra gráficamente los perfiles de presión de contacto en el perno, durante el ciclo de marcha hay una tendencia suave y sin picos por lo que en esta actividad no hay un desgaste considerable, no así en el caso de la subida de escaleras y la posición en cuclillas, principalmente en este último caso.

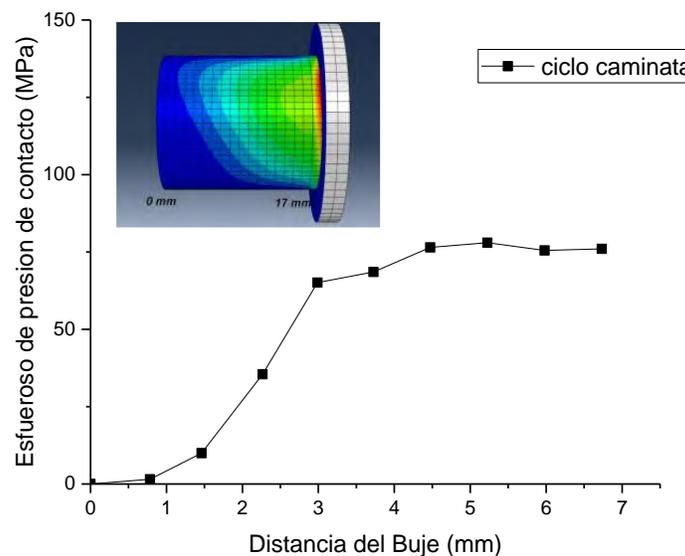


Fig. 15. Presiones de contacto en condición analizada.

La Tabla 4 muestra un resumen de las tensiones de von Mises y de las tensiones de contacto en cada una de las piezas de la prótesis tumoral de rodilla en la que se observa que el máximo de von Mises está en el manguito articulado. Con los resultados obtenidos.

TABLA 4.

RESULTADOS DE LAS TENSIONES DE VON MISES Y LAS PRESIONES DE CONTACTO EN CADA UNA DE LAS PIEZAS DE LA PRÓTESIS DURANTE EL CICLO DE MARCHA.

Actividad	Partes de la prótesis	Material de fabricación	Esfuerzo máximo de von Mises [MPa]	Máximo esfuerzo de contacto [MPa]
Ciclo caminata	Buje	UHMWPE	2.273	5.252
	Chaveta	UHMWPE	0.561	1.618
	Funda articulada	Ti4Al6V	42.665	78.24
	Platillo tibial	UHMWPE	3.976	15.551
	Perno	Ti4Al6V	41.485	146.836
	Componente femoral	Ti4Al6V	18.624	4.484

Los resultados siguientes se basan en la teoría de Hertz. Uno de los casos importantes es la situación geométrica entre los casquillos y el perno, por lo que se aplica esta teoría, que se refiere al contacto entre cilindros macizos. La configuración se conoce como cilindro convexo y cilindro cóncavo (cilindro dentro de un cilindro). En todos estos tipos de contacto existe la posibilidad tanto de deslizamiento como de rodadura en la interfaz. Para realizar el análisis de desgaste, se tomó únicamente la configuración buje-perno de la prótesis tumoral. Para obtener los resultados se utilizaron las ecuaciones de contacto de Hertz. La relación de Poisson, el módulo de elasticidad, la medida y las variables de fuerza del perno y del casquillo de la prótesis de rodilla se indican en la Tabla 5.

TABLA 5.  
VARIABLES PARA CALCULAR LA FUERZA DE CONTACTO DE HERTZ.

Parámetro	Variable	Perno	Buje	Unidades
Relación de Poisson	$\nu$	0.342	0.4	Sin unidades
Módulo de Elasticidad	$E$	105000	1080	MPa.
Diámetro	$D$	12.5	12.5476	mm
Fuerza	$F$		9817	N
Longitud	$L$		17.399	mm

Para la simplificación del análisis de contacto y la optimización de los recursos computacionales sólo se tomaron las partes involucradas en el análisis de contacto de Hertz, que fueron el buje y el pasador. Las partes se dibujaron en 2D como se muestra en la Fig. 16.

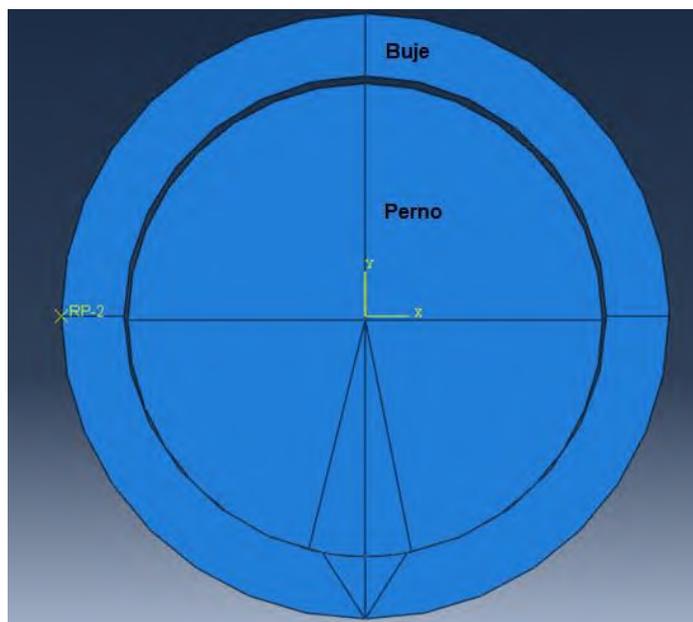


Fig. 16. Dibujo en dos dimensiones del buje y perno para la obtención de contacto de Hertz.

El valor máximo de la presión de contacto equivale a la tensión de contacto de Hertz, que es de 5,389 MPa en las superficies de contacto entre el casquillo y el perno (véase Fig. 17).

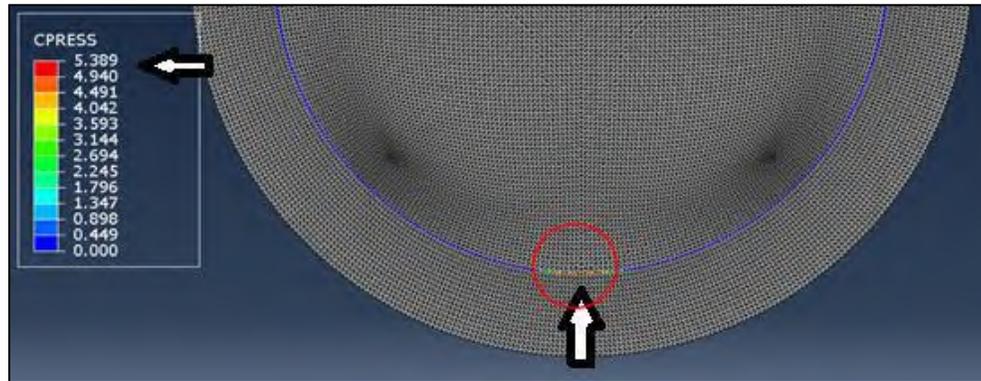


Fig. 17. Presiones de contacto en Buje y perno.

El esfuerzo cortante máximo viene dado por la variable  $S_{12}$  de los resultados del método de los elementos finitos que da un valor de 1,640 MPa (Fig. 18).

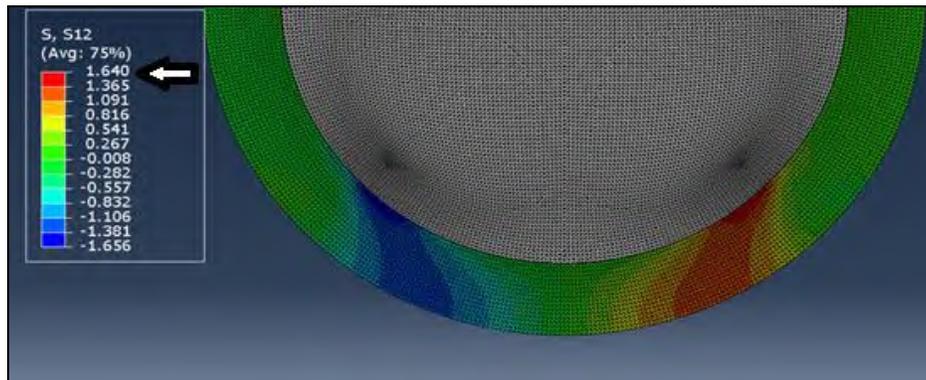


Fig.18. Máxima fuerza de corte en la dirección  $S_{12}$  entre el perno y el casquillo.

El desplazamiento (2b) se obtiene midiendo la distancia de contacto en los nodos implicados según la Fig. 19.

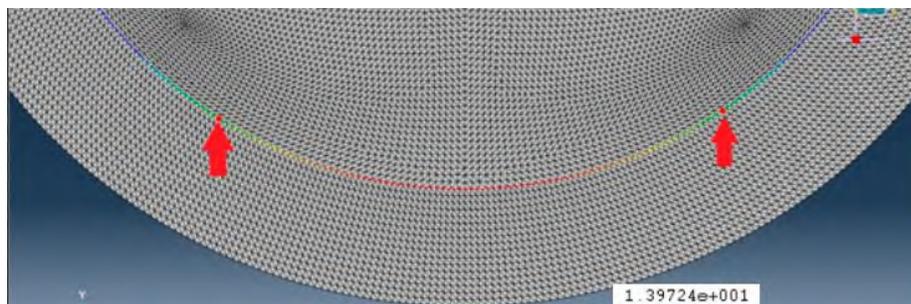


Fig. 19. Distancia b, anchura de contacto entre las piezas.

La Tabla 6 muestra los resultados obtenidos por la calculadora hertziana y por el análisis de elementos finitos comparándolos y obteniendo el porcentaje de error.

La máxima presión de contacto de Hertz o CPRESS en el software, que es la variable de presión de contacto cuyo valor refiere al contacto mecánico entre dos superficies que incluye la presión de contacto debido a la fuerza normal y esfuerzo cortante por fricción. El valor de 5,389 MPa, es un valor bajo con respecto a la tensión de fluencia del UHMWPE, por lo que se concluye que inmediatamente no se producirá un fallo por grieta o fisura, ya que las tensiones no están muy localizadas en una distancia pequeña, esto dado por el valor de la anchura de contacto que es de 27,94 mm. Por lo tanto, se sugiere un análisis de fatiga para determinar su ciclo de vida de la pieza.

TABLA 6.  
PORCENTAJE DE ERROR ENTRE LOS CÁLCULOS TEÓRICOS Y EL ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.

Parámetro	Datos de Calculadora	Calculo analítico	Datos obtenidos en elemento finito	Porcentaje de error
Máxima presión de contacto de Hertz [MPa]	5.4	5.392	5.389	0.02
Máxima fuerza cortante[MPa]	1.6	1.588	1.64	3.2
Ancho de contacto [mm]	27.94	13.970	13.97 (2) = 27.94	0

Como se describió al principio, la presente investigación fue realizada a petición de la empresa C. M. E. ortopedia ubicada en México para investigar el correcto diseño y vulnerabilidad de la prótesis de rodilla tumoral que fabrica, como soporte de evidencia para la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios, Cofepris. Además de que la industria de las prótesis en México aún se encuentra en una etapa inicial, careciendo de investigación y desarrollo en este campo, y las pocas empresas que comercializan y fabrican estos productos se están basando en forma y procesos de los implantes producidos en países líderes con altos niveles de certificación como India, China, Rusia, Alemania y Brasil. Adicionalmente, el ser humano es irrepetible, y cada país tiene sus propios rasgos y características de la población, esta condición genera un problema en cuanto a la creación de estos sistemas en línea, no siempre ajustados a las medidas requeridas, creando morbilidad en el paciente y generando mayores costos, tiempo de intervención quirúrgica y en casos extremos malas prácticas de fabricación por parte del traumatólogo. Teniendo en cuenta que el número de personas que necesitan una cirugía de reemplazo total de rodilla en las instituciones de salud pública es cada vez mayor.

Las limitaciones del proyecto estuvieron relacionadas con la cantidad de material proporcionado por la empresa fabricante de la prótesis, ya que proporcionaron pequeñas cantidades para realizar las muestras para las pruebas de nanoindentación, así como la poca información sobre la enfermedad y el tratamiento del paciente que se tomó como referencia.

Las ventajas de la prótesis están principalmente en el costo, ya que su fabricación es completamente en México, además de la disponibilidad inmediata del producto cuando se requiera y la muy probable fabricación a la medida de la prótesis con características adecuadas al paciente.

#### IV. DISCUSIÓN

El análisis del desplazamiento de la prótesis en la dirección del eje de aplicación de la carga del peso del paciente confirmó que no hay grandes desplazamientos y, en consecuencia, no hay fricción entre las partes metálicas.

El análisis de concentración de tensiones se realizó a petición de la empresa ya que no había forma de verificar el soporte de carga de la prótesis en uso, teniendo la incertidumbre por parte de la empresa fabricante de un posible fallo de alguna pieza en el momento de la actividad del ciclo de la marcha. Los resultados mostraron que el valor del límite elástico de los materiales está muy por encima de los valores de tensión máxima de von Mises en todas las piezas, y específicamente en el inserto femoral, que tiene una masa de 349,52 gramos de aleación de titanio. Por ello, se sugiere realizar un análisis topológico de la pieza.

La pieza crítica en el montaje por el estado del material, soportar el peso del paciente y la concentración de tensiones es el casquillo. Se sugiere rediseñar el buje para evitar el cambio de ángulo a 90 grados y colocar un redondeo para aliviar las concentraciones de tensiones y evitar las grietas que conducen a la falla por fatiga.

Los resultados mostrados en la tabla 6 del contacto Hertz indican que la presión de contacto entre el buje y el perno es baja comparada con el valor del límite elástico del material, así mismo el valor de la fuerza máxima de corte es de 1.640 MPa lo que indica que no habrá remoción inmediata de material (se sugiere el análisis de fatiga para determinar la vida útil de los bujes).

## V. CONCLUSIONES

- Se consideró al paciente mexicano de 70 kg, indicando que el pico máximo de carga se encuentra cuando el fémur con respecto a la tibia forma un ángulo de 15 grados, teniendo un valor de carga axial de 2250 N aplicado en la región transversal de 641.30 mm<sup>2</sup> del componente femoral.
- El análisis de convergencia muestra que a los 300.000 elementos el valor de von Mises se estabiliza y que los tipos de elementos más adecuados a utilizar son el triángulo de 6 nodos y el cuadrado de 8 nodos, esto con el fin de optimizar los recursos computacionales y el tiempo para el desarrollo de las pruebas de análisis de elementos finitos.
- El análisis estático del conjunto general de la prótesis con una carga normal de 3,2 BW da como resultado una separación en el eje y entre el componente femoral y la vaina articulada de 0,497 mm. Si la separación fuera nula habría un contacto metal-metal ya que ambas partes son de aleación de titanio y por tanto habría un desgaste por fricción.
- La actividad simulada del ciclo de marcha de von Mises no supera la tensión de fluencia del material UHMWPE y del Ti6AL4V, por lo que no hay fallo de material en ninguno de los componentes de la prótesis debido a la carga de peso del paciente.
- La tensión máxima en el inserto femoral de la prótesis es de 18,624 MPa, que está por debajo del límite elástico de la aleación de titanio.
- La zona articulada del casquillo-perno es la parte de mayor desgaste de la prótesis debido a los valores obtenidos en la prensa de contacto, ya que son piezas en constante movimiento, limitando la vida de la prótesis. Los resultados de la prensa de contacto en la actividad propuesta, el pasador es el que presenta la mayor influencia de la fricción por los casquillos de polietileno, siendo el valor máximo la actividad del ciclo de marcha con 146,836 MPa para el pasador y 5,252 MPa para el casquillo. Estos valores a largo plazo podrían producir fallos en la superficie de contacto con el casquillo debido a la generación de grietas, fisuras o desprendimiento de partículas del material.
- Los resultados de la tensión de von Mises para el inserto femoral en la actividad del ciclo de marcha es de 18,624 MPa, que está muy por debajo de la tensión de fluencia del material de aleación de titanio. Por lo tanto, se concluye que el inserto femoral tiene un considerable exceso de material y se sugiere realizar un análisis topológico para un rediseño y optimización del material.
- El valor máximo de la presión de contacto entre el casquillo y el perno es el equivalente al contacto de Hertz de 5,389 MPa, un valor bajo con respecto a la tensión de fluencia del UHMWPE, por lo que se concluye que inmediatamente no se producirá un fallo por grieta o fisura, ya que las tensiones no están muy localizadas en una distancia pequeña, esto dado por el valor de la anchura de contacto que es de 27,94 mm. Por lo tanto, se sugiere un análisis de fatiga para determinar su ciclo de vida.
- Se da como conclusión final a la empresa C.M.E ortopedia que el diseño de la prótesis tumoral brasileña se excede en material en su parte del componente femoral, se sugiere rediseñar la pieza y restar material de aleación de titanio. También se concluye que la prótesis para el paciente mexicano de 70 kg no presenta fallas ni grandes desplazamientos debido a la carga durante el pico mayor del ciclo de la marcha. Y finalmente, debido a los resultados de contacto de Hertz, se recomienda realizar análisis de fatiga para determinar el tiempo de vida del buje.
- Los estudios dinámicos se considerarán para futuros trabajos, con el objetivo de presentar resultados que aporten información al diseño de las prótesis tumorales de rodilla.

- Se considera para futuros trabajos la realización de ensayos de microabrasión para ver el comportamiento de desgaste del polietileno mediante el uso de lodos (slurry).

#### AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento al Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán por el apoyo para la realización de la presente investigación, al Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería de la Universidad de Guadalajara por el uso del equipo de laboratorio, a la Red de Ingeniería y Tribología del Área (REDISYT) por la vinculación y a la empresa C.M.E ortopedia de México por el material y uso de la prótesis para el proyecto de investigación.

15

#### REFERENCIAS

- [1] C. J. Lavernia, "Artroplastía Total de rodilla," *Contribución de los líderes de opinión*, vol. 13, no. 12, Jul. 2008.
- [2] A. I. Kapandji, *Fisiología articular*, Editorial Médica Panamericana, 1997.
- [3] B. J. Fregly, Y. Bei, M. E. Sylvester, "Experimental evaluation of an foundation model to predict contac pressures in replacements," *Journal of Biomechanic*, p. 36, 2003.
- [4] S. Sathasivam, P. Walker, P. A. Campbell, K. Rayner, "The effect of contact are on wear in relation to fixed bearing and mobile bearing knee replacements", *Journal biomedical materials Research*, vol. 58, no. 3, pp. 282-290, 2001.
- [5] M. Kurtz, "Advances in the processing, sterilization, and crosslinking of ultra-high molecular weight polyethylene for total joint arthroplasty," *Biomaterials*, vol. 20, no. 18, pp. 1658-1688, 1999, doi: [https://doi.org/10.1016/s0142-9612\(99\)00053-8](https://doi.org/10.1016/s0142-9612(99)00053-8)
- [6] J. C. Baena, Wear performance of UHMWPE and reinforced UHMWPE composites in arthroplasty applications: a review. *Lubricants*, 413-436, 2015, available: <https://doi.org/10.3390/lubricants3020413>
- [7] Buehler, "The press-fit condylar total knee system: 8- to 10-year results with a posterior cruciate-retaining design.", *J Arthroplasty.*, pp. 698-701, 2000, doi: <https://doi.org/10.1054/arth.2000.8189>
- [8] S. M. Patrick, "Lubrication Enhancement for UHMWPE sliding contacts through surface texturing," *Tribology Transactions*, pp. 79-86, 2015, doi: <https://doi.org/10.1080/10402004.2014.933935>
- [9] Ulrich-Vinther, Recombinant adeno-associated virus-mediated osteoprotegerin gene therapy inhibits wear virus-mediated osteoprotegerin gene therapy inhibits wear. *J. Bone Joint Surg. Am.*, pp.1405-12, 2002, doi: <https://doi.org/10.2106/00004623-200208000-00016>
- [10] Ali M. Alsamhan, "Rationale analysis of human artificial knee replacements," *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, pp. 49-54, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2011.12.002>
- [11] M. Berli, Influencia de la rugosidad superficiales en el desgaste de las prótesis de rodilla. *XV Congreso Argentino de Bioingeniería*, p. 69, (2005), available: <http://ingenieria.uner.edu.ar/index.php/2-uncategorised/164-participaciones-congresos-2005>
- [12] Mow, Van C., *Basic Orthopedic Biomechanics*. New York: Reven press, 1991.
- [13] D. Darryl, "In Vivo Tibial Force Measurement After Total Knee Arthroplasty," *Bioengineering*, pp. 37-55, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.arth.2005.07.011>
- [14] Mulholland, "Activities of daily living in non-Western cultures: range of motion requirements for hip and knee joint implants," *International Journal of Rehabilitation Research*, pp. 191-198, 2001, doi: <https://doi.org/10.1097/00004356-200109000-00004>
- [15] M. Sánchez, *Artrosis de rodilla. Cirugía Ortopédica Mc Graw Hill*, 340-48, 2004.
- [16] Schipplein. (1991). The influence of initial horizontal weight placement on the lumbo-sacral spine moment. *Presented at the Orthopaedic Research Society*, 907-912, doi: <https://doi.org/10.1097/00007632-199509000-00010>
- [17] Collings, *Materials Propierties handbook: Titanium Alloys*. USA: ASM International, 1994.
- [18] C. Veiga, P. Davim, "Properties and Applications of titanium Alloys: A brief Review," *Tatanium Alloys*, pp. 133-148, 2012, available: [https://www.researchgate.net/publication/283863116\\_Properties\\_and\\_applications\\_of\\_titanium\\_alloys\\_A\\_brief\\_review](https://www.researchgate.net/publication/283863116_Properties_and_applications_of_titanium_alloys_A_brief_review)
- [19] Rong-Sen, "Contact Stress on Polyethylene components of a new rotating hinge with a spherical contact surface," *Clinical Biomechanics*, pp. 540-546, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/s0268-0033\(01\)00024-9](https://doi.org/10.1016/s0268-0033(01)00024-9)
- [20] Rodney Boyer Gerhar Welsh, *Materials Propierties Handbook: Titanium Alloys*. Estados Unidos de America: ASM international, 2010.
- [21] Joon Park, *Bioceramics, Properties, Cahracterizations and aplicaciones*. USA: Springer, 2008.
- [22] Ph.D. M. Steven, Kurtz, *The UHMEPE Handbook*. USA: Elsevier, 2004.
- [23] RMI Titanium, *Titanium Alloy Guide*. USA: International Metal, 2013.

## Diseño de un dispositivo wearable para la traducción del lenguaje de señas mexicano

Design of a Wearable Device to Translate Mexican Sign Language

Luis Manuel **Valverde-Cedillo**<sup>1</sup>, Geny Itzamar **Ochoa-Rodríguez**<sup>2</sup>, Cristian Vicente **Salazar-Hernandez**<sup>3</sup>

Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Chalco, MÉXICO

<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1204-883X> | [luis\\_vc@tesch.edu.mx](mailto:luis_vc@tesch.edu.mx)

<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8928-883X> | [geny\\_or@tesch.edu.mx](mailto:geny_or@tesch.edu.mx)

<sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1016-9005> | [cristian\\_sh@tesch.edu.mx](mailto:cristian_sh@tesch.edu.mx)

Recibido 14-05-2021, aceptado 30-08-2021.

### Resumen

El trabajo presentado muestra el desarrollo de un prototipo que permite captar e interpretar el lenguaje de señas mexicano (LSM) a través de un dispositivo wearable, en este caso un guante diseñado para personas que se comunican a través de este lenguaje de señas por presentar alguna dificultad del lenguaje y el habla así pueda comunicarse de manera efectiva con personas que no conocen este lenguaje.

El guante interpreta sus movimientos por que cuenta con 5 sensores flexibles, que están colocados en cada uno de los dedos: pulgar, índice, medio, anular, meñique. Con los cuales se censa la variación de resistencia (ohmios) y se compara la variación al flexionarse.

Los resultados son analizados en una interfaz de arduino, interpretados y posteriormente mostrados a través de una pantalla LCD. El dispositivo tiene de objetivo apoyar a una comunicación asertiva entre personas que usan el lenguaje de señas mexicano y aquellas que lo desconocen. El avance de nuestro proyecto promete disminuir las barreras de comunicación entre los sectores con discapacidad auditiva o verbal mejorando su calidad de vida y su interacción con la sociedad beneficiando en áreas académicas, laborales, sociales entre otras.

**Palabras clave:** discapacidad, tecnología, inclusión, innovación, lenguaje.

### Abstract

This paper presents the development of a prototype consist in a wearable device able to translate Mexican sign language (LSM) to phonetic, playing the sound and showing the phrases in a mobile phone. Using a glove, the disabled person can communicate naturally with people who do not know sign language.

The device consists of a glove, which is capable of interpreting movements due to 5 flexible sensors that possess, these sensors are placed on each finger of the hand: thumb, index, middle, ring and little finger. Those register the variation of resistance (ohms) and the variation when flexing is compared.

The results are analyzed in an arduino interface, interpreted and later displayed through an LCD screen. The device is intended to support assertive communication between people who use Mexican sign language and those who do not know it. The progress of our project promises to reduce communication barriers between sectors with hearing or verbal disabilities, improving their quality of life and their interaction with society, benefiting academic, work, social areas, among others.

**Index terms:** disability, technology, inclusion, innovation, language

## I. INTRODUCCIÓN

El prototipo que se presenta consiste en ser un traductor del lenguaje de señas mexicano (LSM) a través de un dispositivo wearable (guante) que permite traducir los mensajes de una persona con discapacidad de habla o lenguaje y así pueda comunicarse con personas oyentes.

El guante cuenta con 5 sensores flexibles que varían sus valores al ser doblados siendo colocados en cada uno de los dedos: pulgar, índice, medio, anular, meñique.

Cuyos resultados son recabados en nuestra base de datos que al tener una interfaz con arduino se puede visualizar en la LCD el mensaje que se quiere transmitir. La presente investigación tiene como foco de atención a la población mexicana que presenta, alguna discapacidad del habla o lenguaje y se comunica a través de lenguaje de señas mexicano. En México existen 6 179 890 personas con discapacidad donde 2,234,303 son personas que no pueden hablar o comunicarse, y otras 5,104,664 personas que no pueden escuchar. De acuerdo con el Censo General de Población y Vivienda 2020, "una persona con discapacidad es aquella que presenta una limitación física o mental de manera permanente o por más de seis meses que le impide desarrollar sus actividades en forma que se considera normal para un ser humano" [1].

TABLA 1.  
NÚMERO DE PERSONAS CON DISCAPACIDAD DE ACUERDO AL INEGI EN EL AÑO 2020.

Indicador	Personas en 2020
Caminar o moverse	8, 096, 386
Ver	12, 727, 653
Escuchar	5,104,664
Mental	1,590,583
Hablar o comunicarse	2,234,303
Atender el cuidado personal	2,430,290
Poner atención o aprender	4,956,420

Las discapacidades pueden limitar el llevar una vida cotidiana normal, se puede mermar su desempeño escolar o laboral, se tiende a segregarse a estos sectores de la población y ellos no sienten pertenecer a la sociedad, en el caso de una discapacidad del habla pueden sentir frustración ante la necesidad de comunicación debido a que gran parte de la población que no padece ninguna discapacidad desconoce el lenguaje de señas mexicano.

## II. ANTECEDENTES

Aprender un lenguaje es acceder de un modo distinto al mundo que todas y todos conformamos, forma parte de la diversidad, los ideales, los conceptos mediante los cuales nos reconocemos, nos relacionamos y en último de los casos nos reinventamos. Recordemos que el ser humano es un ser social. La comunicación ha sido esencial para lograr el desarrollo de las civilizaciones a lo que conocemos hoy en día.

Los medios de comunicación han evolucionado junto con el hombre; la escritura y la lengua han sido los más destacables e importantes para lograr el desarrollo de las civilizaciones, de estas, la lengua es la única que obtenemos en el núcleo social, nos permite interactuar con nuestros semejantes y se desarrolla desde temprana edad.

El lenguaje tiene la virtud de permitirnos transformar las concepciones que tenemos de nosotros mismos y de las y los demás. Las personas nos conocemos fundamentalmente por medio de procesos comunicativos; por ello, entre más amplios sean éstos más posibilidades tenemos de diversificar nuestro mundo y nuestros entornos sociales, con el consecuente enriquecimiento de nuestras vidas [2].

Juan Pablo de Bonet dedicó parte de su vida en escribir un libro dedicado a personas sordas que contenía el alfabeto manual, publicado en 1620 por la iglesia Cristian [3]. Años después en Francia, París, Abbe Charles de L'Épée fundó la primera escuela pública dirigida a personas sordas [4].

La historia ha visto avances en pro de las personas sordas desde el siglo XVI, sin embargo, México vio por primera vez esta inclusión a mediados del siglo XIX en el momento en que Benito Juárez fue Presidente Interino Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos (1861) cuando decreta en la Ley de Instrucción [5], artículo tercero, la creación de escuelas a nivel primaria para personas sordomudas.

#### A. Discapacidad en México

De acuerdo con los datos presentados por el INEGI en 2020, en los grupos de edad de 30 a 84 años se incrementa el porcentaje de personas con discapacidad. Por el contrario, los puntos más bajos se presentan en los grupos de edad de 0 a 4 años, de 15 a 29 años, así como en el grupo de 85 años y más.

Los porcentajes para las personas con discapacidades para hablar o comunicarse asciende al 15.3 % y con discapacidades para escuchar es del 21.9 % del total de la población con algún tipo de discapacidad (véase Fig.1.) [6]

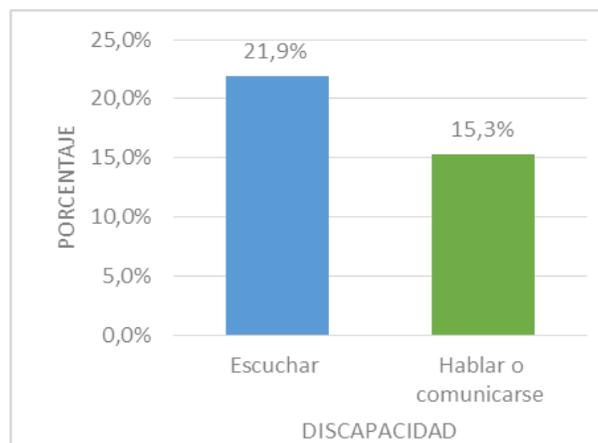


Fig. 1. Porcentaje de discapacidad de escuchar y de hablar o comunicarse de acuerdo con el censo de población realizado por el INEGI 2020.

Tras la consulta de los resultados publicados por la Encuesta Nacional de la Dinámica Demográfica (ENANID) en 2018, del número de personas mayores de 5 años que habitan en el país, 6.7% tienen algún tipo de discapacidad, es decir, de una serie de actividades que se les planteo, tienen un grado alto de dificultad para realizarlo [7].

#### B. Desempeño académico y laboral

A nivel nacional e internacional, existen organizaciones que trabajan en favor de que las personas con discapacidad tengan igualdad de oportunidades; por ello, se han obtenido grandes avances, como el acceso a la educación, que hace algunos años no era posible.

De acuerdo con los resultados del XII Censo General de Población y Vivienda 2010 mientras 91% del total de la población entre 6 y 14 años asiste a la escuela, entre las personas con discapacidad el número baja de forma considerable hasta 63 %.

De los jóvenes con discapacidad que tienen entre 15 y 29 años, sólo 15.5% asiste a la escuela. Casi 10 % de la población total del país mayor de 15 años no sabe leer ni escribir; en la población con discapacidad este dato representa el 32.9%. Como se aprecia en la Fig. 2.

De cada 100 personas de 15 años y más con discapacidad:

- 36 personas no cursan ningún grado escolar.
- 46 personas tienen educación básica incompleta.
- 7 personas tienen educación básica completa.
- 5 personas han cursado algún grado de educación media superior y cuentan con educación de nivel superior.

4

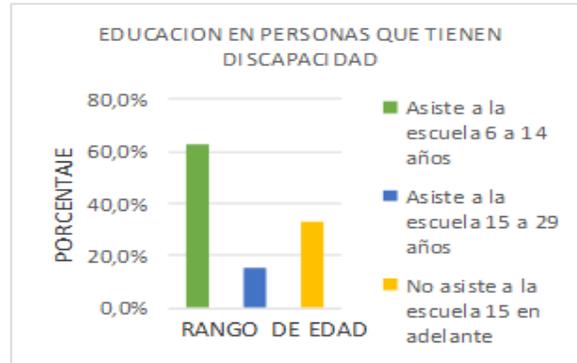


Fig. 2. Porcentaje de educación en personas con discapacidad.

Para el ámbito laboral, el sector que concentra a la mayor proporción de personas contratadas con discapacidad son: los servicios y el comercio con un 48.5% de empleados, seguido por la industria con 24.5% de empleados y la explotación forestal, agricultura, ganadería, pesca, extracción de minerales, etcétera cuenta con el 23.8% de empleados que padecen alguna discapacidad (véase Fig. 3).

De cada 100 personas con discapacidad:

- 27 dedican menos de 34 horas a la semana a su empleo.
- 39 trabajan entre 35 y 48 horas.
- 30 laboran más de 48 horas.

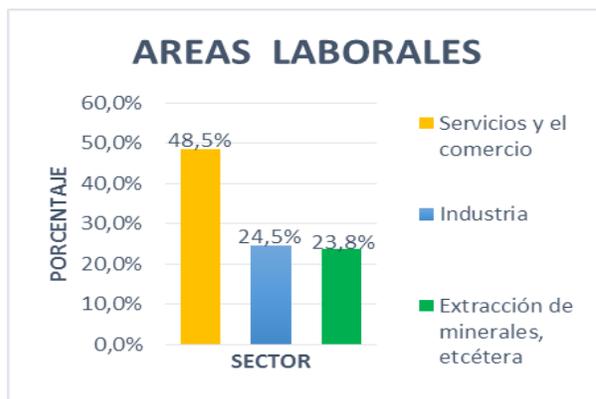


Fig. 3. Porcentaje de personas con discapacidad, que laboran en diferentes sectores.

### III. METODOLOGÍA

Se estableció una metodología de diseño basada en el modelo de la caja transparente, en la cual se establecen ciertos procesos que el diseñador, en este caso un equipo de trabajo, debe llevar a cabo para establecer el diseño que mejor cumpliera los requisitos con los que debería contar el prototipo [8].

El proceso de diseño es interactivo por lo cual está en constante evaluación y retroalimentación, para lograr encontrar la solución más óptima a un problema (véase Fig. 4).

5

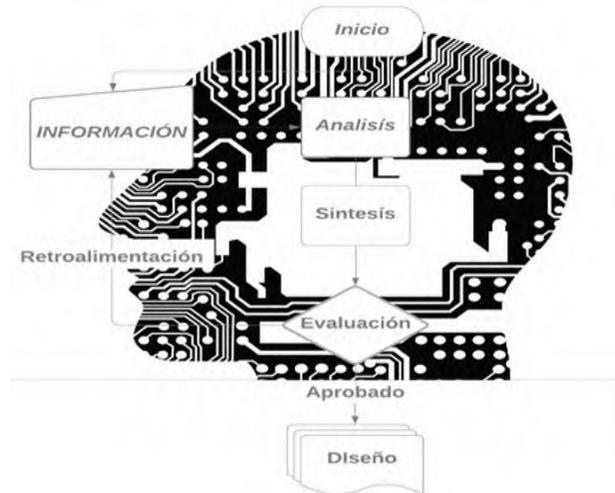


Fig. 4. Metodología del diseño.

Donde la planeación consiste en fijar el curso concreto de acción estableciendo los principios, la secuencia de operaciones y la determinación de tiempo y números necesarios para su realización.

La investigación previa nos permitió detectar el problema e identificar formas para confrontarlo. La población usante del lenguaje de señas mexicanas es de la más desentendida en el país debido a ser una problemática normalizada.

El objetivo es diseñar y fabricar un dispositivo wearable, capaz de traducir del lenguaje de señas mexicano a lenguaje oral y escrito de una manera eficiente.

La visión del dispositivo (guante) traductor de señas mexicano es que sea el instrumento líder que facilite la comunicación entre las personas usantes del lenguaje de señas mexicanas y personas que lo desconocen, que, además sea cómodo y fácil de operar; disminuyendo la barrera comunicativa que se forma a partir de la dificultad del habla y el desconocimiento de las personas oyentes por el lenguaje de señas mexicano.

Para lograr lo antes dicho la misión es diseñar un guante capaz de analizar los gestos manuales de una persona e interpretarlos con mínimos porcentajes de error al traducirlos.

#### A. Estado del arte

Durante los últimos años se han desarrollado diferentes aportaciones sobre la innovación e implementación tecnológica de dispositivos u aplicaciones para ayudar a la interpretación de la lengua de señas sin embargo la mayoría de los prototipos no se han culminado de una manera exitosa porque los dispositivos solo se han enfocado en la traducción del alfabeto dejando a un lado las palabras y oraciones del lenguaje de señas mexicano (LSM). Como se observa en la Tabla 2, Prototipos para la traducción del lenguaje de señas, existen diferentes dispositivos que son de uso comercial de costo elevado la mayoría de ellos no se ha desarrollado al 100 %.

TABLA 2. PROTOTIPOS PARA LA TRADUCCIÓN DEL LENGUAJE DE SEÑAS.

Dispositivo u prototipo	Ventajas	Desventajas	Autores /país año
Guante Electrónico para traducir de Lenguaje De Señas a Caracteres con Voz Artificial y Conexión Inalámbrica a Dispositivos Móviles para personas con Discapacidad Auditiva y de Lenguaje en la Universidad Técnica De Ambato	Debido a que el presente estudio se enfocó en el desarrollo de un sistema electrónico para asistencia de personas con discapacidad auditiva y de lenguaje, el Proyecto es de Investigación Aplicada y las modalidades empleadas.	Los usuarios deben evitar realizar movimientos bruscos puesto que pueden producirse daños en las conexiones de los sensores o en los elementos electrónicos del sistema. Al utilizar el modo de traducción local, evitar colocar el guante sobre una superficie plana porque se obstruye la salida de audio situada en la parte inferior del guante y no se podrá escuchar claramente la traducción.	Brito Giovanni, Guzmán Diego Ecuador, 2017
Guante traductor de lenguaje de señas mexicano para personas sordomudas	Logra el funcionamiento básico del guante. Tiene un costo económico.	Tiene un alcance mínimo del vocabulario de lenguaje de señas. No incluye un diseño del guante textil.	Álvaro Hernández Gilberto Díaz Collazo Fidel Alberto Trujillo Miceli José Ángel Zepeda Hernández Raúl Moreno Rincón Francisco Ronay López Estrada México, Chiapas, México.2017
Diseño E Implementación De Un Dispositivo Electrónico Mediante Sistemas Embebidos Para La Traducción Del Lenguaje De Señas A Palabras.	Analizar el Funcionamiento de los dispositivos electrónicos existentes en el mercado. • Diseñar el dispositivo de control para la adecuada detección de la señal de los sensores del dispositivo. •Obtener los datos del dispositivo para una adecuada interpretación de la señal. • Verificar el funcionamiento del dispositivo para la interpretación del lenguaje de señas	Los sistemas embebidos como raspberry son plataformas programables que nos permiten implementar dispositivos para dar solución a problemas complejos como lo es la comunicación con las personas sordas. El dispositivo DTS-ALPHABET puede conectarse a cualquier dispositivo que disponga conexión inalámbrica wifi y este en radio de 20 metros.	Alulema Aimara, Fanny Alexandra Loza Martínez, Klever Alejandro Ecuador ene-2017
Caracterización Visual De Un Conjunto De Señas De La Lengua De Señas Mexicana	Los archivos de las características obtenidos pueden ser fácilmente modificados para su uso con algún software de reconocimiento, ya que se guardan en un archivo de texto plano. El proceso de caracterización puede efectuarse manualmente o automáticamente con posibilidad a usar secuencias de imágenes de varios tipos de señas	Una vez obtenidos los vectores característicos de forma automática en un conjunto de señas, el siguiente proceso sería la etapa de reconocimiento de dichas señas para poder aplicarlo en un dialogo en la LSM. Además, se requiere de un estudio profundo y detallado de la estructura gramatical de la lengua de señas mexicana. Optimización de la extracción de las características para hacer un reconocimiento de las señas en tiempo real, ya que si se desea usar para una traducción en tiempo real se necesita mejorar el tiempo de procesamiento en todas las etapas.	Arturo Guzmán Obispo Cuernavaca, Morelos, México 2007
Diseño e Implementación De Un Par De Guantes Intérpretes Del Lenguaje De Señas Elementales A Lenguaje Escrito Mediante Software Libre Para Facilitar El Aprendizaje En La Unidad Educativa Especializada Cotopaxi	Los guantes intérpretes pueden ser utilizados en la mayoría de tamaño de manos de niños, jóvenes y adultos debido a que si se cambia el usuario siempre se debe inicializar los valores Se obtuvo una ergonomía aceptable de los guantes intérpretes por su flexibilidad, comodidad y hacen que el usuario se adapte físicamente	Para la mejora del presente proyecto se puede considerar implementación de una tarjeta arduino de características superiores y de igual tamaño con mayor espacio de almacenamiento. Para futuros proyectos se recomienda realiza un análisis físico de robustez y flexibilidad de cables para asegurar que el dispositivo no sufra fallas en el funcionamiento.	Almeida Pozo, Luis Cristobal Viteri Villacís, Paúl Antonio Ecuador 2016

### B. Diseño del guante traductor del lenguaje de señas

El diseño de un dispositivo wearable para la traducción del lenguaje de señas mexicano elaborado en el Tecnológico de Estudios Superiores de Chalco, consta de varias etapas como primera fase se desarrolló el prototipo en el software de Solidworks donde se pueden visualizar los componentes (sensor flexible, resistencia, Arduino) que lleva el dispositivo (véase Fig. 5).



Fig. 5. Prototipo en el software de solidword.

El modelo de diseño se estableció luego de la realización de diversos prototipos, en principio se optó por la elaboración de prototipos sencillos y con material casero, pensando en la economía y establecer el desempeño y en función de eso implementar mejoras.

En primera instancia se elaboró un dispositivo (Prototipo 0) como se observa en la Fig.6, que contaba con sensores realizados con grafito de 1 g por sensor y laminillas de aluminio de 10 cm de largo por 0.8 cm de ancho con un espesor de 0.0014 mm tomando en cuenta que el papel aluminio comercial es de 0.0007 mm de espesor, la desventaja era que censaban valores de resistencia de entre 50 y 800 Ohm por lo cual era difícil realizar la comparativa entre las diferentes letras sobre todo las que son muy parecidas en su gesticulación [5]. Los movimientos de la mano también fueron un reto a vencer ya que el movimiento hacia inestables las mediciones. Todo ello se montó en un guante de látex, el cual era muy incómodo para realizar la forma de los gestos.



Fig. 6. Prototipo 0: Consiste en un guante de látex con sensores flexible elaborados de grafito de manera casera.

El Prototipo 1 La creación del segundo prototipo se implementó en un guante textil de tela de algodón para lograr mayor confort en el usuario donde su uso era más cómodo y en lugar de colocar los sensores caseros se optó por laminillas de cobre de 10 cm por 0.5 cm de ancho y de 0.01 mm de espesor. Al final el guante no permitía la suficiente flexibilidad. Sin embargo, resultó ser más estético. Se puede apreciar en la Fig.7.



Fig. 7. Prototipo 1: guante textil de algodón con laminillas de cobre.

Para el siguiente prototipo se consideraron distintos tipos de telas textiles se optó por diseñar y elaborar el guante con licra que es un material ligero, transpirable y que permite realizar la gesticulación de manera cómoda. Se implementaron los sensores flexibles comerciales ya que la medición arrojada por ellos es mucho más estable al dar los valores entre x, y, z, dando un resultado más confiable: el Prototipo 2 (véase Fig. 8).

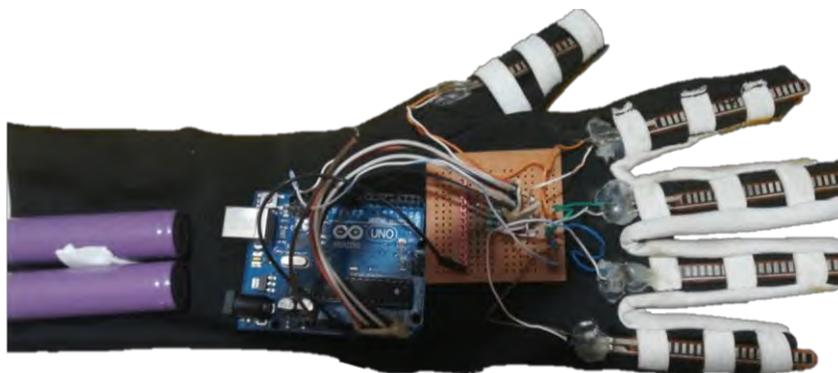


Fig. 8. Prototipo 2: guante de licra, con sensores flexibles comerciales.

### C. Electrónica y programación, simulación

La programación se realizó en Arduino IDE, este programa ocupa un lenguaje C++, adaptado para cargarse en las placas propias de este desarrollador, dado que se ocupó una placa Arduino UNO [9]. Debido a que el código es abierto permite la utilización de diversos componentes y librerías. Siendo la versatilidad, la principal razón de apoyo en la programación.

Se utilizan sensores flexibles que se acoplan fácilmente a la forma anatómica de cada uno de los 5 dedos de la mano, arrojando valores analógicos estables que se capturan y analizan en Arduino uno, donde la conexión se simula en el programa de computación PROTEUS, destinado al diseño y simulación de circuitos electrónicos, como se observa en la Fig. 9.

9

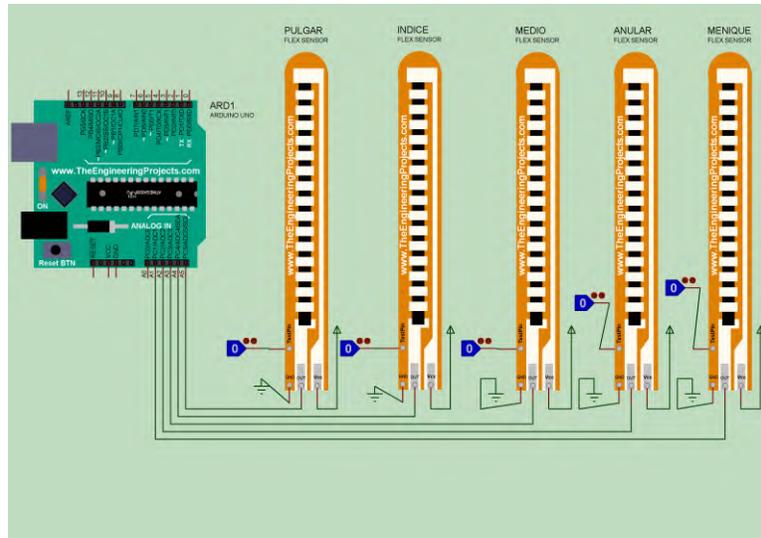


Fig. 8. Simulación en Proteus de los sensores flexibles conectados al Arduino UNO.

Una vez simulado el circuito deben analizarse los datos mostrados en la LCD para determinar si las conexiones son correctas y el resultado es el esperado

La redacción del código se inició con cada uno de los 5 dedos (pulgares, anular, índice, medio, meñique), el sensor flexible correspondiente debe ser declarado como entrada, la función de los sensores será leer la resistencia generadas al doblar los dedos, que tienen un rango de valores que oscila entre de 0 y 1000 Ohm, esto se puede observar en la pantalla del puerto de comunicación serial (véase Fig. 10). Este procedimiento se realizó para cada uno de los 5 dedos de la mano. Donde las combinaciones son distintas en el momento que se introducen las letras del abecedario la señal del serial plotter se modifica.

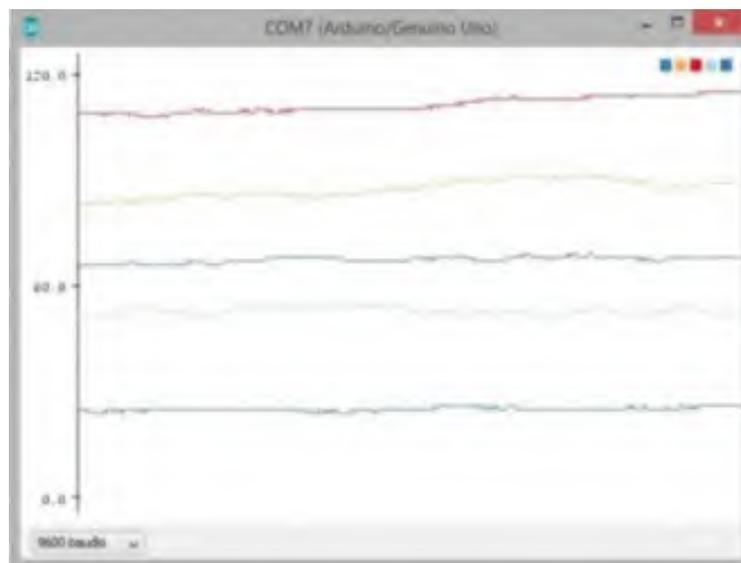


Fig. 9. Impresión de pantalla del puerto serial de 0 a 1000 Ohm.

Donde las combinaciones son distintas en el momento que se introducen las letras del abecedario la señal del serial plotter se modifica. En la Fig. 11, se muestra una parte del código donde se programa, la sintaxis para leer los valores e imprimir en pantalla la letra “a” o “b”.

```

Serial.print(lecturaAnular);
Serial.print("anular:");
Serial.print(lecturaMenique);
Serial.println("menique:");
delay(1500);

//a//
if (lecturaPulgar>=6 && lecturaIndice<=5 && lecturaMedio<=5 && lecturaAnular<=25 && lecturaMenique<=5)
  lcd.print("A");
  delay(1000);
  lcd.clear();
  delay(900);

//b//
if (lecturaPulgar<=50 && lecturaIndice>=8 && lecturaMedio>=6 && lecturaAnular>=6 && lecturaMenique>=6)
  lcd.print("B");
  delay(1000);
  lcd.clear();
  delay(900);
    
```

Fig. 10. Parte de la programación en arduino para que muestre la letra "a" y "b".

Se determinó mediante simulaciones que el programa trabaja de manera adecuada, donde los valores de los sensores flexibles analógicos se convertirán en señal digital para visualizarlo en la LCD. En el diagrama de flujo que se observa (véase Fig. 12), cómo interactúa cuando se introducen más de una letra en el código.

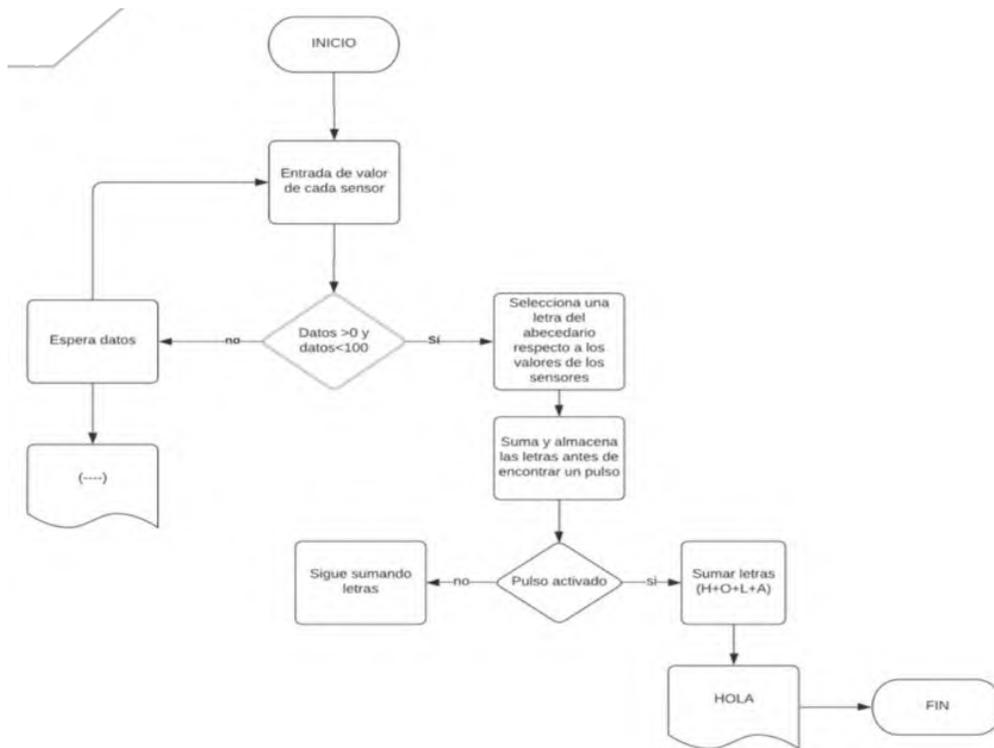


Fig. 11. Diagrama de flujo de la interacción del código al introducir más de una letra del alfabeto.

#### IV. RESULTADOS

A diferencia del modelo presentado por Álvarez Torres [10], el diseño propuesto en este trabajo aún no cuenta con un módulo bluetooth, esto lo hace robusto por el uso de cables de comunicación, pero a la vez lo mantiene en un rango de costos económico, la implementación de esta tecnología en un futuro haría posible la lectura de datos con acelerómetro y así tener una mayor posibilidad de lectura de gestos, además de ello se podrían generar una base general de datos y de esta manera prepararlo para el uso de distintas leguas de señas adaptada a cada región.

El siguiente diagrama facilita la comprensión acerca del funcionamiento y estructura del “Diseño de un dispositivo wearable para la traducción del lenguaje de señas mexicano” el cual contiene los diferentes subsistemas que conforman el prototipo (véase Fig.13).

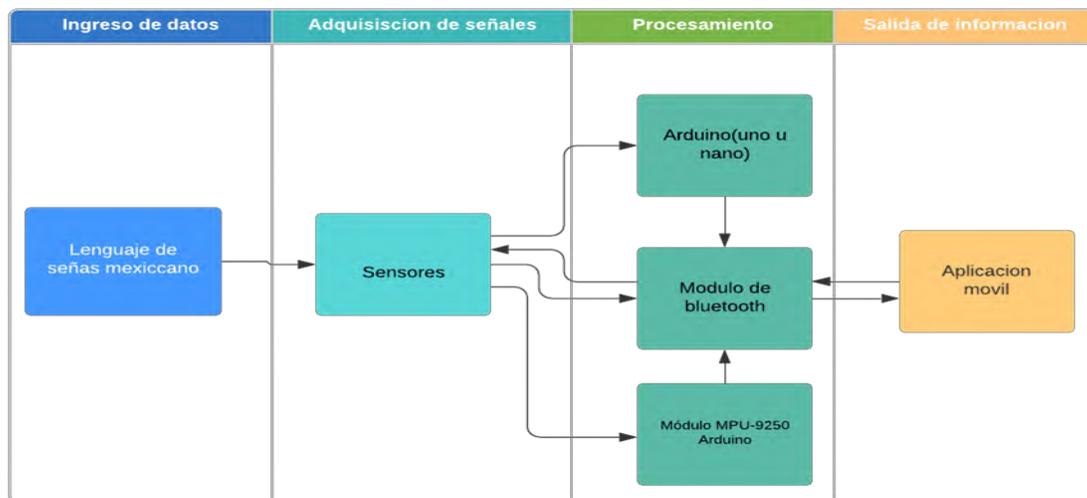


Fig. 12. Diagrama de bloques del funcionamiento del dispositivo wearable para la traducción de lenguaje de señas mexicano.

El funcionamiento de un dispositivo wearable para la traducción del lenguaje de señas mexicano:

- El proceso inicia en la traducción del lenguaje de señas mexicano con el ingreso de estos datos.
- Se realiza la adquisición de las señales de los sensores flexibles.
- Cuando entra a la etapa de procesamiento recibe los datos de los sensores y este a su vez realiza la programación que se da cuando se traduce el lenguaje de señas mexicano a caracteres.
- Los caracteres son enviados mediante el modulo bluetooth a un dispositivo móvil y paralelamente desde la aplicación desarrollada se pueden enviar mensajes que son visualizados y reproducidos en el móvil.

Teniendo el dispositivo wearable (guante) se realizan una serie de pruebas equivalentes a 4050 en la introducción del alfabeto y las palabras que garantizan una traducción del 99.6% de exactitud de esta manera el usuario logra tener una comunicación más fluida con las personas oyentes. Se muestra a continuación los resultados de las pruebas de manera aleatoria.

A continuación se muestra cómo se elabora la seña de la letra “a” en la Fig. 14a de manera simulada en solidworks y de manera física. Donde de 150 pruebas realizadas al interpretar la letra “a” la exactitud de cada uno de los movimientos efectuados por los dedos: pulgar, índice, medio, anular y meñique (véase Fig. 14b) que equivale a un 99.4% efectividad en la traducción del lenguaje de señas mexicana.



Fig. 13a. Simulación en solidworks y de manera física de cómo se realiza la letra "a", en el lenguaje de señas mexicano.

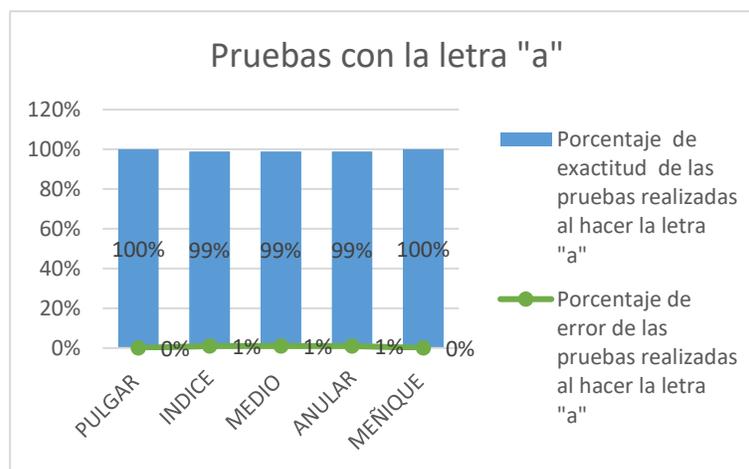


Fig. 14b. Pruebas realizadas de la letra "a" de las 150 veces que se interpretó.

En la siguiente prueba se elabora la seña de la letra "e" en la Fig. 15a donde se simuló en solidworks y de manera física. Demostrando una efectividad del 99.4% de traducción del lenguaje de señas mexicana de 150 pruebas realizadas al interpretar la letra "e" de cada uno de los movimientos efectuados por los dedos: pulgar, índice, medio, anular y meñique (véase Fig. 15b).



Fig. 15a. Simulación en solidworks y de manera física de cómo se realiza la letra "e", en el lenguaje de señas mexicano.

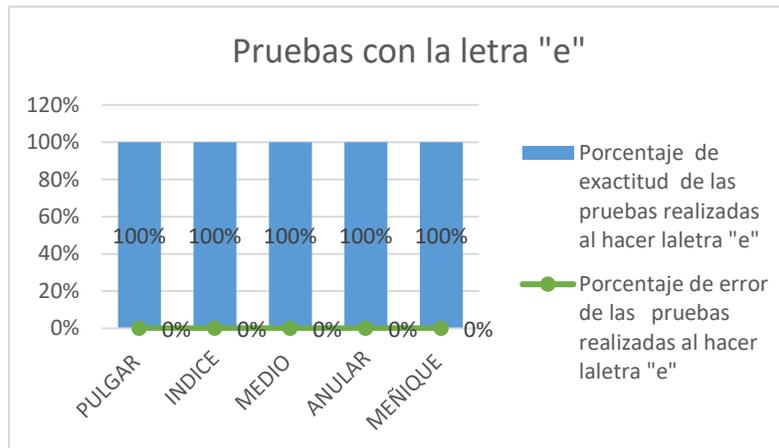


Fig. 15b. Pruebas realizadas de la letra "e" de las 150 veces que se interpretó.

En seguida la prueba de la seña de la letra "i" en la Fig.16a donde se simuló en solidworks y de manera física. Demostrando la traducción del lenguaje de señas mexicana de un 99.6% de efectividad de las 150 pruebas realizadas al interpretar la letra "i" donde cada uno los dedos: pulgar, índice, medio, anular y meñique (véase Fig 16b) realizan una serie de movimientos para efectuar la letra.



Fig. 16a. Simulación en solidworks y de manera física de cómo se realiza la letra "i", en el lenguaje de señas mexicano.

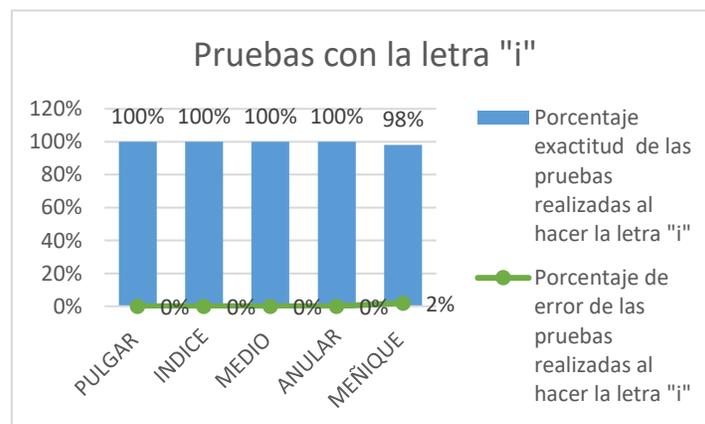


Fig. 16b. Pruebas realizadas de la letra "i" de las 150 veces que se interpretó.

A continuación se muestra cómo se elabora la seña de la letra “o” en la Fig. 17a de manera simulada en solidworks y de manera física. Donde de 150 pruebas realizadas al interpretar la letra “o” la exactitud de cada uno de los movimientos efectuados por los dedos: pulgar, índice, medio, anular y meñique (véase Fig. 17b) equivale a un 99.4% efectividad en la traducción del lenguaje de señas mexicana.



Fig. 17a. Simulación en solidworks y de manera física de cómo se realiza la letra “o”, en el lenguaje de señas mexicano.

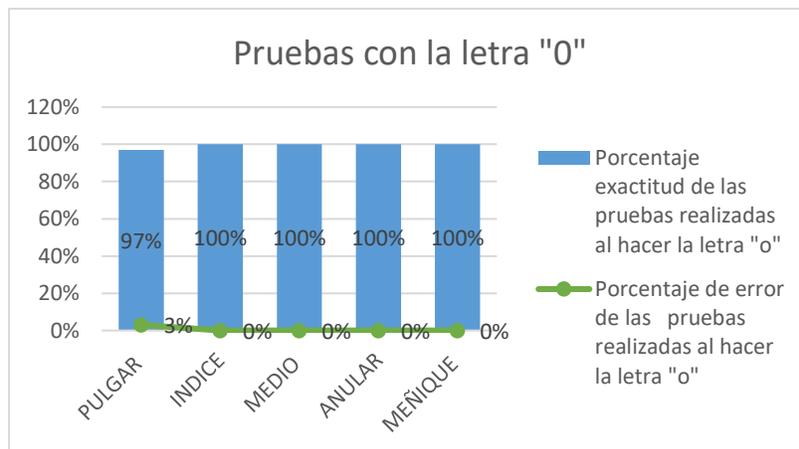


Fig. 17b. Pruebas realizadas de la letra “o” de las 150 veces que se interpretó.

## V. CONCLUSIÓN

En la actualidad está comprobado que hay un gran sector de la población que tiene alguna discapacidad, lo que puede generar una disminución en su calidad de vida. La creación de un dispositivo, portátil y de bajo costo, que les permita comunicarse puede ayudarles a contrarrestar la segregación sufrida por este padecimiento. Lo anterior debido a que es más fácil que las personas que sepan utilizar el lenguaje de señas mexicano pueda comunicarse con las personas oyentes que no tienen conocimiento de este.

Este primer acercamiento al desarrollo de un dispositivo que pudiera realizar la traducción entre lenguaje de señas y lenguaje escrito, logro su cometido, aunque es importante planear a la implementación de un altavoz que pueda arrojar la fonética del gesto que se está interpretando.

La creación de una app, que hoy en día es un implemento de fácil acceso, contribuiría a que las personas con discapacidad de lenguaje puedan tener una mayor calidad de vida e integración a la sociedad.

## RECONOCIMIENTO

Se agradece al Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Chalco, a los docentes de esta casa de estudios y a las autoridades correspondientes las facilidades obtenidas y apoyo para la generación de este proyecto.

## REFERENCIAS

15

- [1] INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, [En línea]. Available: [https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ccpv/2020/doc/Censo2020\\_Principales\\_resultados\\_EUM.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ccpv/2020/doc/Censo2020_Principales_resultados_EUM.pdf) [Último acceso: 12 Septiembre 2020].
- [2] G. Pérez, *Manos con voz. Diccionario de lengua de señas mexicana*, Distrito Federal: Libre Acceso AC, 2011.
- [3] M. I. C. Giner, *Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes*, 2008. [En línea]. Available: [http://www.cervantesvirtual.com/obra-visor/la-enseanza-de-los-sordomudos-en-espaa-en-los-siglos-xvii-y-xviii-analisis-comparativo-de-las-obras-de-j-p-bonet-y-l-hervs-y-panduro-0/html/01be6600-82b2-11df-acc7-002185ce6064\\_5.html](http://www.cervantesvirtual.com/obra-visor/la-enseanza-de-los-sordomudos-en-espaa-en-los-siglos-xvii-y-xviii-analisis-comparativo-de-las-obras-de-j-p-bonet-y-l-hervs-y-panduro-0/html/01be6600-82b2-11df-acc7-002185ce6064_5.html)
- [4] A. Oviedo, *Cultura sorda*, 2007. [En línea]. Available: <https://cultura-sorda.org/abad-de-lepee/>
- [5] P. Hernández, dis-capacidad.com, *Benito Juárez, el presidente que luchó por los sordos*, 21 marzo 2014. [En línea]. Available: <http://www.cucsh.udg.mx/noticia/benito-juarez-el-presidente-lucho-por-los-sordos>
- [6] INEGI, Encuesta Nacional de Población y Geografía, [En línea]. Available: [https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/poblacion/2010/perfil\\_socio/uem/702825047610\\_1.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/poblacion/2010/perfil_socio/uem/702825047610_1.pdf)
- [7] ENADID, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2018. [En línea]. Available: [https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/enadid/2018/doc/resultados\\_enadid18.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/enadid/2018/doc/resultados_enadid18.pdf)
- [8] J. C. JONES, *Métodos de diseño*, Barcelona: Gustavo Gili, 1976.
- [9] Arduino, *Foro y librerías*, [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/ENTUTORIAL/LIBRARYEXAMPLE>
- [10] V. A. Álvarez-Torres, “Guante multisensorial para dactilología con respuesta mejorada mediante el empleo de bluetooth y regresión lineal,” *Revista de Prototipos Tecnológicos*, vol. 4, n° 13, pp. 23-31, 2018.