

CULCYT

CULTURA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA • ISSN 2007-0411



VOLUMEN 21 | NÚMERO 1

ENERO - ABRIL 2024

Directorio Institucional

Mtro. Juan I. Camargo Nassar
RECTOR

Dr. Daniel Constandse Cortez
SECRETARIO GENERAL

Dr. Juan F. Hernández Paz
DIRECTOR DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Dr. Jesús Meza Vega
DIRECTOR GENERAL DE COMUNICACIÓN UNIVERSITARIA

Dra. Nelly Gordillo Castillo
COORDINADORA DE APOYO AL DESARROLLO DE
LA INVESTIGACIÓN Y AL POSGRADO DEL IIT

Comité Editorial

Dra. Nelly Gordillo
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ
Editora en Jefe

Mtro. Raúl Alfredo Meza González
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ
Coordinador Editorial

Dr. Víctor Manuel Castaño Meneses
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Dr. Ramón Gerardo Guevara González
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

Dr. Klavdia Oleschko Lutkova
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Dr. Abdiel Ramírez Reyes
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Dra. Santos Adriana Martel Estrada
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Dr. David Cortés Sáenz
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Dr. David Ortega Gaucín
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

CULCYT se fundó en diciembre de 2003 como parte del programa para la formación de investigadores del Instituto de Ingeniería y Tecnología. Lanzó su primer número en abril de 2004. Fundador: Dr. Victoriano Garza Almanza. A partir de 2019, ha fungido como Editora en Jefe la Dra. Nelly Gordillo Castillo.

CULCYT. CULTURA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Vol. 21, núm. 1, enero-abril 2024, es una publicación académica, editada de manera cuatrimestral por la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, a través del Instituto de Ingeniería y Tecnología.

D.R. © UACJ, Avenida del Charro núm. 619 norte, C. P. 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

Editora responsable: Dra. Nelly Gordillo Castillo.

Reserva de derechos al uso exclusivo núm.
04-2022-101711332100-102.

ISSN (electrónico): 2007-0411.

Sitio OJS: erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt. Correo electrónico: culcyt@uacj.mx. Teléfono +52 (656) 6884848.

DOI: 10.20983/culcyt.2024.1

Modalidad de publicación continua. Tan pronto como un artículo ha sido preparado, se publica en línea.

Los trabajos a publicar en CULCYT deben ser originales e inéditos. En este momento, la revista no tiene costos de publicación para los autores.

El acceso a la revista es libre, sin requerimientos, bajo lo establecido en la normatividad mexicana de acceso abierto, y se da a través de su sitio

<https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt>

o mediante el Repositorio Institucional de la UACJ

<http://ri.uacj.mx/vufind/>



Los artículos firmados son responsabilidad de sus autores.

Se autoriza la reproducción total o parcial, siempre y cuando se cite la fuente.

Información para autores:

<https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/autores>

Los contenidos e imágenes de la publicación están sujetos a una licencia CC 4.0 internacional BY NC.



Contenido
CONTENTS

Artículos de investigación / Research articles

Identificación algebraica de los parámetros físicos de un sistema rotor-cojinete simplificado de dos grados de libertad **4**

Algebraic identification of the physical parameters of a simplified two-degrees-of-freedom rotor-bearing system

Eduardo Barredo Hernández, José Gabriel Mendoza Larios, Luis Alberto Baltazar Tadeo, Saulo Jesús Landa Damas

Aplicabilidad de sensores electroquímicos de bajo costo como alternativa para medir material particulado en calidad del aire **13**

Applicability of low-cost electrochemical sensors as an alternative to measure particulate matter in air quality

Yeimer Danian León Salas, José Alejandro Murad Pedraza

Edición especial Investigaciones y Soluciones en Ergonomía Ocupacional / Special edition Research and Solutions in Occupational Ergonomics

Presentación **E1**

Organización del tiempo durante el teletrabajo como riesgo psicosocial en docentes **E2**

Teleworking: College teachers' organization of time as a psychosocial risk

Mónica Gabriela Gutiérrez-Hernández, Aidé Aracely Maldonado-Macías, Beatriz Sibaja Terán

Integración y validación de una encuesta para evaluar cultura corporativa y productividad en trabajadores administrativos **E9**

Integration and validation of a survey to assess the corporative culture and productivity among administrative workers

Adriana Camargo Gómez, Juan Luis Hernández Arellano, Ángel Fabián Campoya Morales

Las mejores prácticas de colaboración en la cadena de suministro para la gestión de ergonomía **E16**

The best collaborative practices in the supply chain for ergonomics management

Iván Francisco Rodríguez-Gámez, Aidé Aracely Maldonado-Macías, Arnulfo Aurelio Naranjo Flores

Mejora ergonómica y productiva en prensa CNC en empresa manufacturera **E30**

Ergonomic and productive improvement in CNC bending machine in manufacturing company

Rigoberto Zamora Alarcón, Christian Axel Contreras Peñuelas, Jesús Rene Valencia Lara, Acela Castellón Barraza, Arturo Sinue Ontiveros Zepeda

Rediseño de estación de trabajo mediante simulación Humano Digital y Diseño de Experimentos **E39**

Workstation redesign through digital human simulation and design of experiments

Jesús José Aguirre-Solís, Rosalba Angélica Chávez Portillo, Mónica Gabriela Gutiérrez Hernández, Paulina Rocío Gutiérrez Hernández, Gabriel Ibarra-Mejía, Luis Gonzalo Guillén Anaya

Mejoras ergonómicas para puestos de trabajo de oficina aplicando el Cuestionario Nórdico y el Método ROSA **E54**

Ergonomic improvements for office workplaces applying the Nordic Questionnaire and the ROSA Method

Christian Cisneros-Cervantes, Ismael Mendoza-Muñoz, Mildrend Montoya-Reyes, Gabriela Jacobo-Galicia, Olivia Yessenia Vargas-Bernal

Identificación algebraica de los parámetros físicos de un sistema rotor-cojinete simplificado de dos grados de libertad

Algebraic identification of the physical parameters of a simplified two-degrees-of-freedom rotor-bearing system

Eduardo Barredo Hernández¹ , José Gabriel Mendoza Larios¹ ✉ , Luis Alberto Baltazar Tadeo² ,
Saulo Jesús Landa Damas³ 

¹Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM), México

²UPIIP/Instituto Politécnico Nacional, México

³Tecnológico Nacional de México – CENIDET, México

RESUMEN

En este trabajo se propone el desarrollo de identificadores de los parámetros de masa, rigidez y amortiguamiento de un sistema rotor-cojinete simplificado de dos grados de libertad. La técnica utilizada para el desarrollo de los identificadores se conoce en la literatura como: técnica de identificación algebraica. Para el desarrollo de los identificadores paramétricos, se utilizó el modelo matemático de un sistema rotor-cojinete que considera los efectos de inercia traslacional y rotacional, así como, los efectos giroscópicos. Los identificadores algebraicos desarrollados determinan los valores de los parámetros físicos del sistema, para dos condiciones diferentes de velocidad de operación del rotor: velocidad constante y velocidad variable. La evaluación numérica de los identificadores muestra que, es posible determinar los valores de los parámetros de masa, amortiguamiento y rigidez del sistema rotor-cojinete en un pequeño intervalo de tiempo que va de los 0.1 a 0.28 segundos.

PALABRAS CLAVE: sistema rotor-cojinete; identificación algebraica; parámetros físicos; vibración.

ABSTRACT

In this work we propose the development of identifiers for the mass, stiffness and damping parameters of a simplified rotor-bearing system with two degrees of freedom. The technique used for the development of the identifiers is known in the literature as: algebraic identification technique. For the development of the parametric identifiers, the mathematical model of a rotor-bearing system that considers translational and rotational inertia effects, as well as gyroscopic effects, was used. The developed algebraic identifiers determine the values of the physical parameters of the system for two different rotor operating speed conditions: constant speed and variable speed. Numerical evaluation of the identifiers shows that it is possible to determine the values of the mass, damping and stiffness parameters of the rotor-bearing system in a small-time interval ranging from 0.1 to 0.28 seconds.

KEYWORDS: rotor-bearing system; algebraic identification; physical parameters; vibration.

Correspondencia:

DESTINATARIO: José Gabriel Mendoza Larios.

INSTITUCIÓN: Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM).

DIRECCIÓN: Carretera a Acatlima km. 2.5, Huajuapán de León, Oaxaca, México.

CORREO ELECTRÓNICO: jgml@mixteco.utm.mx

Fecha de recepción: 9 de septiembre de 2023. **Fecha de aceptación:** 7 de febrero de 2024. **Fecha de publicación:** 19 de febrero de 2024.



I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas físicos se pueden representar por medio de modelos matemáticos que sirven para capturar ciertas características esenciales del sistema que se quiere estudiar. La ecuación general de movimiento de un sistema rotor-cojinete se utiliza para conocer y predecir el comportamiento dinámico del sistema bajo la acción de diferentes condiciones de operación. Sin embargo, resulta imposible desarrollar un modelo matemático que describa exactamente el comportamiento dinámico de un sistema real. En consecuencia, el modelo es hasta cierto punto una aproximación del sistema real y su exactitud dependerá de la cercanía entre la respuesta medida del sistema y la respuesta calculada.

De acuerdo con Moreno y Thomson ^[1], estas diferencias entre las respuestas se conocen como incertidumbres y se deben principalmente a la existencia de variaciones asociadas a parámetros geométricos, propiedades mecánicas de los materiales, dinámicas no modeladas y la presencia de ruido en la señal experimental y, por lo tanto, estos fenómenos afectan directamente la respuesta dinámica del sistema.

Por otro lado, si el modelo matemático del sistema se construye a partir de un número finito de variables y parámetros, este se denomina *modelo paramétrico* ^[2]. En consecuencia, identificar correctamente los parámetros del sistema contribuirá a la construcción de un modelo matemático más preciso. En la literatura existe una amplia gama de métodos de estimación e identificación de parámetros ^{[3]-[6]}, sin embargo, por la naturaleza de estos métodos se dificulta su aplicación en sistemas más realistas.

Actualmente, en la literatura ha ganado popularidad una técnica de identificación diferente a los métodos clásicos. Esta técnica se denomina *técnica de identificación algebraica* ^[7], que sirve para el desarrollo de identificadores que determinan los valores de parámetros desconocidos del sistema a partir de su modelo matemático. Asimismo, la identificación algebraica se puede implementar a partir de dos criterios que son equivalentes: el criterio en el dominio del tiempo que funciona tanto para sistemas lineales y no lineales, y el criterio en el dominio de la frecuencia mediante el cálculo operacional que es aplicable solo a sistemas lineales. Por otro lado, esta técnica posee algunas características que la hacen atractiva para la comunidad científica,

entre las cuales destacan la velocidad de identificación, el desarrollo de identificadores independientes de las condiciones iniciales del sistema, la identificación de parámetros en línea y, además, presenta buenas propiedades de robustez ante dinámicas no modeladas, incertidumbre paramétrica y ruido de media cero. La técnica de identificación algebraica ya se ha utilizado para identificar parámetros de desbalance en sistemas rotor-cojinete ^{[8]-[12]}, coeficientes rotodinámicos ^{[13], [14]} y parámetros en diversos sistemas mecánicos, eléctricos y señales ^{[15]-[20]}.

Por lo tanto, con la finalidad de lograr un modelo matemático hasta cierto punto simplificado, que logre capturar de una manera más precisa el comportamiento dinámico de una máquina rotatoria real, en este trabajo de investigación se propone el uso de la técnica de identificación algebraica para la identificación de los parámetros de masa, amortiguamiento y rigidez de un modelo de rotor-cojinete simplificado de dos grados de libertad.

II. METODOLOGÍA

La realización de este trabajo de investigación se llevó a cabo al dar seguimiento a cada punto de la metodología que se presenta a continuación:

1. Revisión del estado del arte.
2. Definición del problema y obtención del modelo matemático del sistema rotor-cojinete simplificado de dos grados de libertad.
3. Implementación de la técnica de identificación algebraica en el dominio del tiempo, para el desarrollo de los modelos matemáticos de identificación de los parámetros de masa, amortiguamiento y rigidez del sistema rotor-cojinete simplificado de dos grados de libertad. Cabe señalar que los modelos de identificación se realizaron al considerar dos condiciones de operación del sistema rotor-cojinete: velocidad constante y velocidad variable.
4. Programación y puesta a prueba en simulación de los modelos de identificación paramétrica.
5. Análisis, discusión de los resultados obtenidos y conclusiones.

En la siguiente sección de este artículo se presenta el modelo matemático del sistema rotor-cojinete simplificado utilizado en este trabajo de investigación.

MODELADO MATEMÁTICO DEL SISTEMA ROTOR-COJINETE

En la [Figura 1](#) se muestra un esquema del modelo de rotor-cojinete simplificado de dos grados de libertad que se utilizó para el desarrollo de esta investigación. El sistema rotor-cojinete se compone de un eje sólido flexible, de sección transversal simétrica y uniforme de longitud L , un disco inercial ubicado a una distancia l_1 del extremo izquierdo, un par de cojinetes en sus extremos que proporcionan amortiguamiento y rigidez al sistema y un parámetro de desbalance $m_u d$.

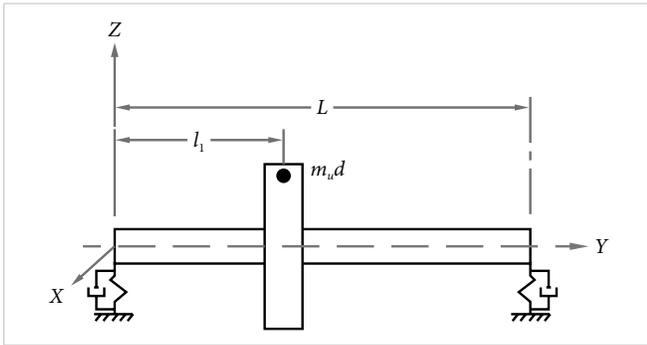


Figura 1. Modelo de rotor-cojinete simplificado.

El modelo matemático del sistema rotor-cojinete de dos grados de libertad ([Figura 1](#)) se obtiene fácilmente siguiendo la metodología presentada por Lalanne y Ferraris ^[21]. Asimismo, este modelo considera los efectos de la inercia traslacional y rotacional, además de los efectos giroscópicos, y se expresa en forma matricial como sigue:

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\delta}\} + [\mathbf{C}(\dot{\phi})]\{\dot{\delta}\} + [\mathbf{K}(\ddot{\phi})]\{\delta\} = \{\mathbf{F}\} \quad (1)$$

con

$$[\mathbf{M}] = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix}$$

$$[\mathbf{C}(\dot{\phi})] = [\mathbf{C}_1 + \dot{\phi}\mathbf{C}_2] = \begin{bmatrix} c_x & 0 \\ 0 & c_z \end{bmatrix} + \dot{\phi} \begin{bmatrix} 0 & -a \\ a & 0 \end{bmatrix}$$

$$[\mathbf{K}(\ddot{\phi})] = [\mathbf{K}_1 + \ddot{\phi}\mathbf{K}_2] = \begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_z \end{bmatrix} + \ddot{\phi} \begin{bmatrix} 0 & -a \\ 0 & 0 \end{bmatrix} y$$

$$\{\mathbf{F}\} = \begin{bmatrix} f_x \\ f_z \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} m_u d [\dot{\phi}^2 \sin(\phi + \alpha) - \ddot{\phi} \cos(\phi + \alpha)] \\ m_u d [\dot{\phi} \sin(\phi + \alpha) + \phi^2 \cos(\phi + \alpha)] \end{bmatrix}$$

donde los parámetros de masa, amortiguamiento y rigidez del sistema rotor-cojinete están representados por m , c y k , respectivamente. El vector de vibración que contiene los desplazamientos que corresponden a las direcciones x y z se define como $\{\delta\}$, los efectos

giroscópicos del sistema están especificados por el término $\dot{\phi}a$ y, adicionalmente, el término $-\dot{\phi}a$ representa el efecto de la aceleración angular del rotor en la rigidez del sistema. Por otro lado, el vector de fuerza $\{\mathbf{F}\}$ se genera por efecto del parámetro de desbalance $m_u d$, el cual está constituido por una masa de desbalance m_u , ubicada a una distancia radial d con una posición angular α sobre el disco inercial y constituye la excitación del sistema. Finalmente, los términos de desplazamiento, velocidad y aceleración del rotor en función del tiempo están asociados a las variables ϕ , $\dot{\phi}$ y $\ddot{\phi}$, respectivamente.

En el siguiente apartado se presenta el desarrollo matemático de los identificadores algebraicos para determinar los parámetros de masa, amortiguamiento y rigidez del sistema rotor-cojinete simplificado que se muestra en la [Figura 1](#). Los estimadores se desarrollaron bajo dos condiciones diferentes de operación del rotor: velocidad constante y velocidad en función del tiempo mediante una rampa de excitación de tipo lineal.

IDENTIFICADOR A VELOCIDAD CONSTANTE

La aplicación de la técnica de identificación algebraica requiere el modelo matemático del sistema, a partir del cual se desarrollan los identificadores correspondientes. El modelo matemático del sistema rotodinámico que considera como fuente de excitación una masa de desbalance y opera a velocidad constante, se obtiene a partir de la Ecuación (1) y se expresa como sigue:

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\delta}\} + [\mathbf{C}(\Omega)]\{\dot{\delta}\} + [\mathbf{K}_1]\{\delta\} = m_u d \Omega^2 [\sin(\Omega t + \alpha) + \cos(\Omega t + \alpha)] \quad (2)$$

donde Ω es la velocidad de operación del rotor y se considera constante. A continuación, el esquema de identificación en el dominio del tiempo requiere que la Ecuación (2) se multiplique por el término t^2 y, posteriormente, el resultado se integre dos veces con respecto al tiempo t con la finalidad de obtener una ecuación en función únicamente del desplazamiento del sistema. Por lo tanto, la Ecuación (2) se transforma en:

$$\int^{(2)} [[\mathbf{M}]\{\ddot{\delta}\} + [\mathbf{C}_1 + \Omega\mathbf{C}_2]\{\dot{\delta}\} + [\mathbf{K}_1]\{\delta\}] t^2 = \int^{(2)} m_u d \Omega^2 \{\sin(\Omega t + \alpha) + \cos(\Omega t + \alpha)\} t^2 \quad (3)$$

donde las integrales que aparecen en la Ecuación (3) están expresadas en un formato simplificado, es decir, la integral $\int^{(2)} \psi(t)$ expresa una doble integración itera-

da en el tiempo, cuya forma completa se expresa como $\int_0^t \int_0^{\sigma_1} \psi(\sigma_2) d\sigma_2 d\sigma_1$ con $\int \psi(t) = \int_0^t \psi(\sigma) d\sigma$. Por otro lado, los términos a identificar de masa, amortiguamiento y rigidez del sistema rotor-cojinete se encuentran en las matrices $[M]$, $[C_1]$ y $[K_1]$, respectivamente. Por lo tanto, después de la integración por partes del miembro izquierdo de la Ecuación (3) y de algún tratamiento algebraico se obtiene:

$$\begin{aligned} [M] \left[t^2 \{\delta\} - 4 \int t \{\delta\} + 2 \int^2 \{\delta\} \right] + \\ [C_1] \left[\int t^2 - 2 \int^2 t \right] \{\delta\} + [K_1] \int^2 t^2 \{\delta\} = \\ \Omega [C_2] \left[- \int t^2 \{\delta\} + 2 \int^2 t \{\delta\} \right] + \\ m_u d \Omega^2 \int^2 \{\text{sen}(\Omega t + \alpha) + \text{cos}(\Omega t + \alpha)\} t^2 \end{aligned} \quad (4)$$

La Ecuación (4) no se puede resolver debido a que para cada dirección (x y z) se tiene una ecuación con tres incógnitas, por lo que es necesario obtener dos ecuaciones más que sean linealmente independientes y que relacionen los parámetros de masa, amortiguamiento y rigidez del sistema. Las ecuaciones faltantes se obtienen al integrar la Ecuación (4) sucesivamente dos veces, las cuales se escriben como sigue:

$$\begin{aligned} [M] \left[\int t^2 \{\delta\} - 4 \int^2 t \{\delta\} + 2 \int^3 \{\delta\} \right] + \\ [C_1] \left[\int^2 t^2 - 2 \int^3 t \right] \{\delta\} + [K_1] \int^3 t^2 \{\delta\} = \\ \Omega [C_2] \left[- \int^2 t^2 \{\delta\} + 2 \int^3 t \{\delta\} \right] + \\ m_u d \Omega^2 \int^3 \{\text{sen}(\Omega t + \alpha) + \text{cos}(\Omega t + \alpha)\} t^2 \\ [M] \left[\int^2 t^2 \{\delta\} - 4 \int^3 t \{\delta\} + 2 \int^4 \{\delta\} \right] + \\ [C_1] \left[\int^3 t^2 - 2 \int^4 t \right] \{\delta\} + [K_1] \int^4 t^2 \{\delta\} = \\ \Omega [C_2] \left[- \int^3 t^2 \{\delta\} + 2 \int^4 t \{\delta\} \right] + \\ m_u d \Omega^2 \int^4 \{\text{sen}(\Omega t + \alpha) + \text{cos}(\Omega t + \alpha)\} t^2 \end{aligned} \quad (5)$$

A partir de la Ecuación (4) y sus integraciones sucesivas, Ecuaciones (5) y (6), es posible formar un sistema de ecuaciones lineales para cada una de las direcciones coordenadas x y z . Estas ecuaciones toman esta forma:

$$[A(t)] \{\Theta\} = \{b(t)\} \quad (7)$$

donde $\{\Theta\} = \{m \ c \ k\}^T$ define el vector que contiene los parámetros desconocidos del sistema rotor-cojinete a

identificar y $[A(t)]$, $\{b(t)\}$ son matrices de 3×3 y 3×1 respectivamente, y se obtienen a partir de los términos de las integrales que conforman a las Ecuaciones (4), (5) y (6). Es importante especificar que tanto $[A(t)]$ como $\{b(t)\}$ están en función únicamente de la respuesta de vibración del rotor $\{\delta\}$. Asimismo, el vector de parámetros $\{\Theta\}$ es identificable algebraicamente si se satisface la condición $\det[A(t)] \neq 0$ establecida por Fliess y Sira-Ramírez [7]. En general, se ha demostrado ampliamente que esta condición se mantiene al menos en un intervalo pequeño de tiempo $(t_0, t_0 + \epsilon)$, donde ϵ es un valor positivo y suficientemente pequeño.

La solución de la Ecuación (7) produce el modelo matemático del identificador en línea de los parámetros de masa, amortiguamiento y rigidez del sistema.

$$\{\Theta\} = [A^{-1}] \{b\} \ \forall t \in (t_0, t_0 + \epsilon) \quad (8)$$

De la Ecuación (8) es importante especificar que la identificación algebraica de los parámetros de masa, amortiguamiento y rigidez del sistema rotor-cojinete es independiente de las condiciones iniciales del sistema y que solo depende del vector de desplazamientos para cada instante de tiempo. Cabe mencionar que los datos de entrada del modelo de identificación para una aplicación práctica se adquieren mediante sensores de desplazamiento que miden directamente la vibración del sistema.

IDENTIFICADOR A VELOCIDAD VARIABLE

Mediante un procedimiento similar al que se presenta en el apartado anterior es posible desarrollar el identificador algebraico de los parámetros de masa, amortiguamiento y rigidez asumiendo que la velocidad del rotor es variable. Considere el modelo matemático del sistema rotodinámico que se muestra en la [Figura 1](#) y que se representa por la Ecuación (1), al multiplicar dicha ecuación por el término t^2 e integrar el resultado dos veces con respecto al tiempo se tiene:

$$\begin{aligned} [M] \left[t^2 \{\delta\} - 4 \int t \{\delta\} + 2 \int^2 \{\delta\} \right] + \\ [C_1] \left[\int t^2 - 2 \int^2 t \right] \{\delta\} + [K_1] \int^2 t^2 \{\delta\} = \\ [C_2] \left[- \int \dot{\phi} t + \int^2 (\ddot{\phi} t + 2 \dot{\phi}) \right] t \{\delta\} - [K_2] \int^2 \dot{\phi} t^2 \{\delta\} + \\ m_u d \int^2 \{\dot{\phi}^2 \text{sen}(\phi + \alpha) - \ddot{\phi} \text{cos}(\phi + \alpha)\} t^2 + \\ m_u d \int^2 \{\ddot{\phi} \text{sen}(\phi + \alpha) - \dot{\phi}^2 \text{cos}(\phi + \alpha)\} t^2 \end{aligned} \quad (9)$$

El desarrollo del identificador de los parámetros desconocidos del sistema bajo la condición de velocidad del rotor variable se lleva a cabo al integrar dos veces con respecto al tiempo a la Ecuación (9). Lo anterior con la finalidad de construir sistemas de ecuaciones lineales en la forma de la Ecuación (7) para las direcciones x y z del sistema.

La solución de las ecuaciones arrojará como datos de salida los parámetros desconocidos de masa, amortiguamiento y rigidez del sistema rotor-cojinete. Por tanto, las ecuaciones adicionales correspondientes se expresan como sigue:

$$\begin{aligned}
 [\mathbf{M}] \left[\int t^2 \{\delta\} - 4 \int t \{\delta\} + 2 \int \{\delta\} \right] + & \quad (10) \\
 [\mathbf{C}_1] \left[\int t^2 - 2 \int t \right] \{\delta\} + [\mathbf{K}_1] \int t^2 \{\delta\} = & \\
 [\mathbf{C}_2] \left[- \int \dot{\phi} t + \int (\ddot{\phi} t + 2\dot{\phi}) \right] t \{\delta\} - [\mathbf{K}_2] \int \dot{\phi} t^2 \{\delta\} + & \\
 m_u d \int \{\dot{\phi}^2 \sin(\phi + \alpha) - \ddot{\phi} \cos(\phi + \alpha)\} t^2 + & \\
 m_u d \int \{\ddot{\phi} \sin(\phi + \alpha) - \dot{\phi}^2 \cos(\phi + \alpha)\} t^2 &
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [\mathbf{M}] \left[\int t^2 \{\delta\} - 4 \int t \{\delta\} + 2 \int \{\delta\} \right] + & \quad (11) \\
 [\mathbf{C}_1] \left[\int t^2 - 2 \int t \right] \{\delta\} + [\mathbf{K}_1] \int t^2 \{\delta\} = & \\
 [\mathbf{C}_2] \left[- \int \dot{\phi} t + \int (\ddot{\phi} t + 2\dot{\phi}) \right] t \{\delta\} - [\mathbf{K}_2] \int \dot{\phi} t^2 \{\delta\} + & \\
 m_u d \int \{\dot{\phi}^2 \sin(\phi + \alpha) - \ddot{\phi} \cos(\phi + \alpha)\} t^2 + & \\
 m_u d \int \{\ddot{\phi} \sin(\phi + \alpha) + \dot{\phi}^2 \cos(\phi + \alpha)\} t^2 &
 \end{aligned}$$

A continuación, con las Ecuaciones de la (9) a la (11) es posible formar un sistema de ecuaciones linealmente independientes de la forma de la Ecuación (7). El sistema de ecuaciones resultante se puede resolver tal como se muestra en la Ecuación (8). Como resultado de la solución se obtienen los parámetros desconocidos del sistema: masa, amortiguamiento y rigidez. En la siguiente sección, se presentan los resultados de las simulaciones de los identificadores desarrollados en este apartado para las dos condiciones de velocidad de operación del rotor.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El esquema de la configuración del sistema rotor-cojinete utilizado en este trabajo para las simulaciones es el que se muestra en la [Figura 1](#). El rotor se compone de

un eje sólido circular uniforme de longitud L y un disco inercial que se ubica a una distancia l_1 , tal como se muestra en la figura, y además se considera como fuente de excitación un desbalance $m_u d$. Por otro lado, en la [Tabla 1](#) se presentan los valores de los parámetros físicos del sistema rotor-cojinete simplificado de dos grados de libertad que se muestra en la [Figura 1](#), y que son utilizados en la simulación de los identificadores algebraicos.

TABLA 1
PARÁMETROS FÍSICOS DEL SISTEMA ROTOR-COJINETE DE LA [FIGURA 1](#) ^[21]

$m = 14.29$ kg	$m_u = 1 \times 10^{-4}$ kg	$d = 0.15$ m
$\Omega = 1200$ rpm	$\ddot{\phi} = 10$ rad/s ²	$\alpha = 45^\circ$
$a = 2.871$ N·s ² /m	$c_x = c_z = 10$ N·s/m	$k_x = k_z = 1.195 \times 10^6$ N/m

Por simplificación para la simulación de los identificadores, se considera que los coeficientes rotodinámicos de los soportes son iguales para las direcciones x y z . Sin embargo, en aplicaciones reales estos valores serán diferentes, por lo cual, en el desarrollo de los identificadores propuestos en este trabajo los coeficientes de rigidez y amortiguamiento de los soportes en las direcciones x y z se consideraron diferentes.

SIMULACIÓN DEL IDENTIFICADOR A VELOCIDAD CONSTANTE

La simulación de la identificación de parámetros se llevó a cabo al considerar la respuesta vibratoria del rotor como dato de entrada, para una velocidad de rotación constante del rotor de 1200 rpm. La respuesta vibratoria del sistema se obtiene al resolver la Ecuación (2) utilizando el método de integración numérica de Newmark. Cabe mencionar que el periodo de tiempo de muestreo utilizado fue de 0.1 ms. La [Figura 2](#) muestra las señales de vibración del sistema para la velocidad de rotación del rotor de 1200 rpm. Estas señales se tomaron como los datos de entrada que alimentan al identificador paramétrico que está especificado por la Ecuación (8).

En las [Figuras 3, 4 y 5](#) se muestra el comportamiento del identificador algebraico en función del tiempo, de los parámetros de masa, amortiguamiento y rigidez del sistema rotor-cojinete, respectivamente. En las figuras, las líneas punteadas representan los valores reales asignados para los parámetros, mientras que la línea continua representa el valor identificado de los parámetros que se obtiene a partir de los modelos de identificación algebraica.

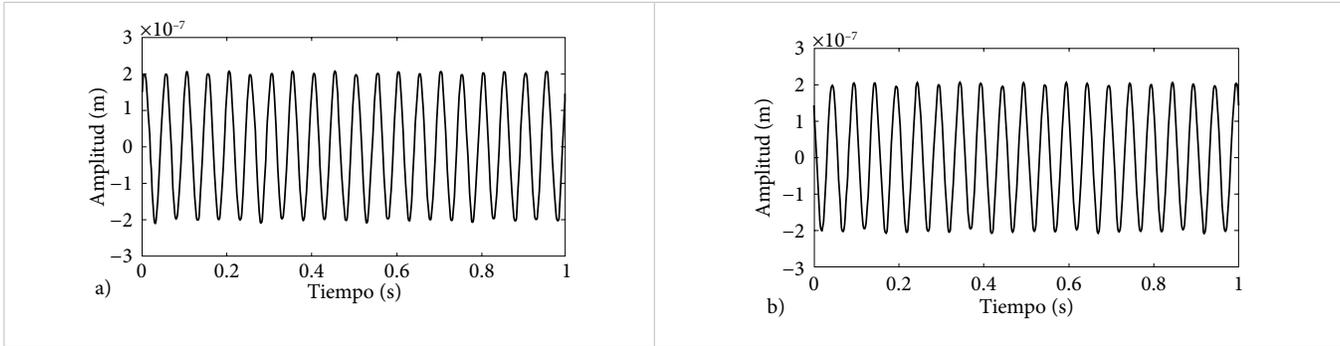


Figura 2. Respuesta vibratoria del sistema a velocidad constante $\Omega = 1200$ rpm: a) dirección x y b) dirección z .

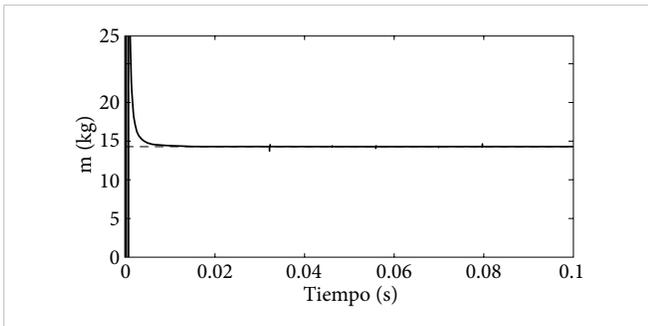


Figura 3. Identificación de la masa del sistema rotor-cojinete a velocidad constante $\Omega = 1200$ rpm.

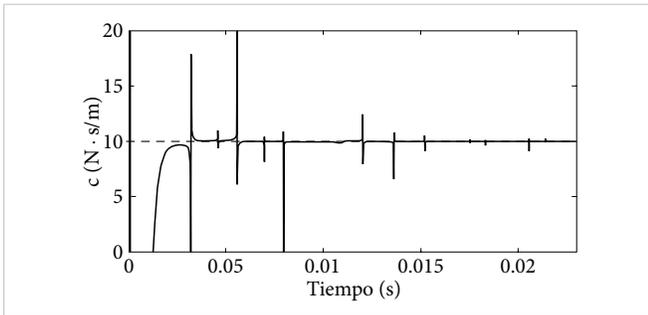


Figura 4. Identificación del amortiguamiento del sistema rotor-cojinete a velocidad constante $\Omega = 1200$ rpm.

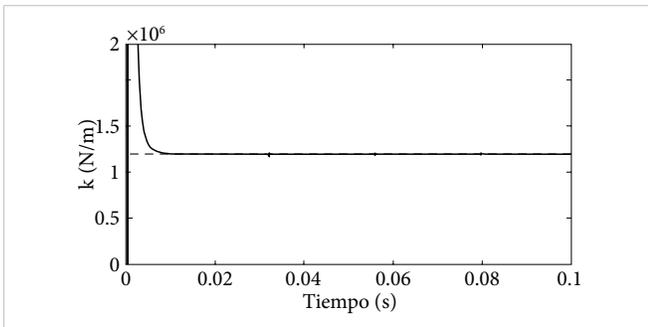


Figura 5. Identificación de la rigidez del sistema rotor-cojinete a velocidad constante $\Omega = 1200$ rpm.

Del análisis de las Figuras 3, 4 y 5 se observa que los modelos de identificación algebraica determinan satis-

factoriamente los parámetros de masa, amortiguamiento y rigidez del sistema rotor-cojinete en un tiempo menor a 0.2 segundos y una vez identificado el parámetro este se mantiene constante a lo largo del tiempo. Para un mejor análisis del comportamiento del identificador, en las figuras solo se muestran los resultados para un tiempo de 0.1 a 0.23 segundos, ya que es importante observar el tiempo que requiere el identificador para que converja al valor estimado.

SIMULACIÓN DEL IDENTIFICADOR A VELOCIDAD VARIABLE

Los parámetros físicos del sistema se determinaron mediante la simulación de los modelos de identificación paramétricos considerando como dato de entrada la respuesta vibratoria del rotor a velocidad variable, es decir, al considerar una rampa de excitación lineal con una aceleración angular de $\ddot{\phi} = 10$ rad/s². La señal de vibración del sistema se obtiene al resolver la Ecuación (1), utilizando el método de integración numérica de Newmark. Además, el periodo de tiempo de muestreo utilizado fue de 0.1 ms. En la Figura 6 se muestra la respuesta de vibración del sistema que alimentará al identificador, correspondiente a una aceleración angular de $\ddot{\phi} = 10$ rad/s².

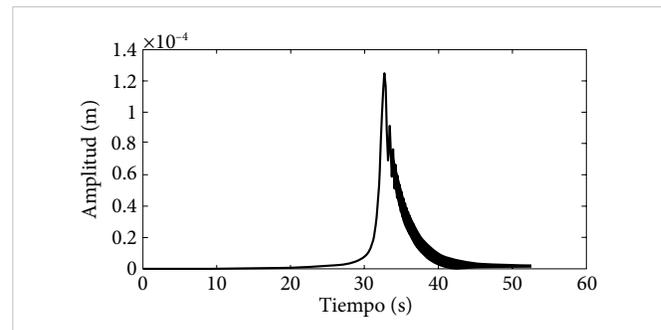


Figura 6. Respuesta de vibración del sistema rotor-cojinete en función del tiempo al considerar una rampa de excitación de tipo lineal con $\ddot{\phi} = 10$ rad/s².

Por otro lado, en las Figuras 7, 8 y 9 se muestran los resultados de la identificación algebraica de los parámetros de masa, amortiguamiento y rigidez del sistema rotor-cojinete, respectivamente. En las figuras, la línea punteada representa los valores reales asignados, mientras que la línea continua representa el resultado obtenido de la estimación algebraica.

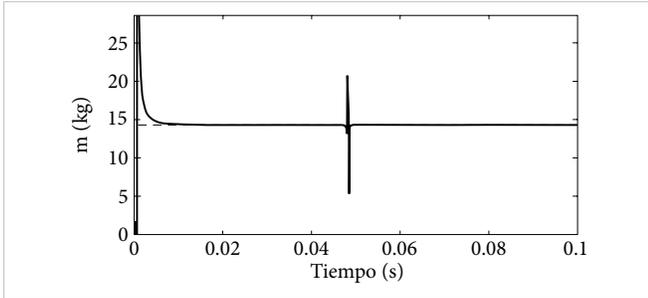


Figura 7. Identificación de la masa del sistema rotor-cojinete a velocidad variable, con rampa de excitación lineal $\dot{\phi} = 10 \text{ rad/s}^2$.

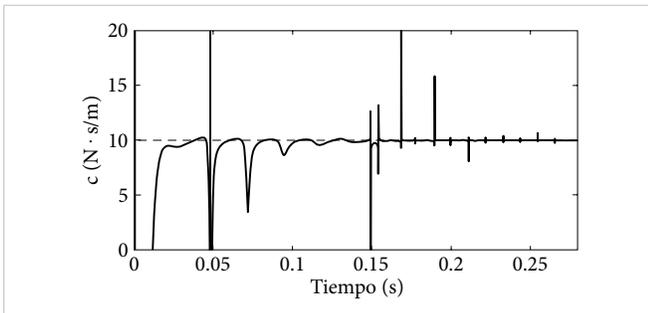


Figura 8. Identificación del amortiguamiento del sistema rotor-cojinete a velocidad variable, con rampa de excitación lineal $\dot{\phi} = 10 \text{ rad/s}^2$.

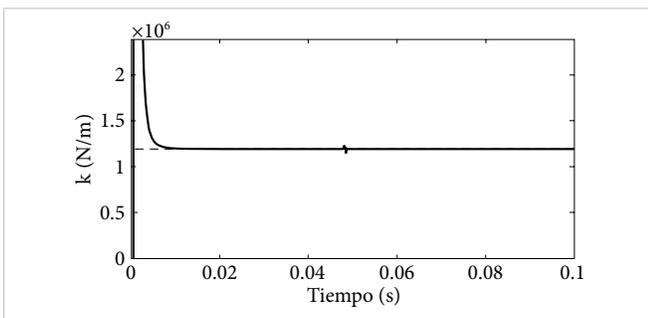


Figura 9. Identificación de la rigidez del sistema rotor-cojinete a velocidad variable, con rampa de excitación lineal $\dot{\phi} = 10 \text{ rad/s}^2$.

De los resultados que se muestran en las Figuras 7, 8 y 9 se observa que el comportamiento de los identificadores algebraicos de los parámetros del sistema a velocidad variable, es similar al comportamiento mostrado por los identificadores paramétricos a velocidad constante.

Además, la identificación de los parámetros de masa y rigidez se realizó en un tiempo menor a 0.1 segundos, valor que coincide con los tiempos de identificación reportados en la literatura. Sin embargo, el tiempo que tarda el identificador propuesto para la estimación del amortiguamiento es menor a 0.28 segundos. Asimismo, se identificaron algunos factores que influyen en la rapidez con la que los identificadores algebraicos determinan los parámetros desconocidos del sistema. Estos factores son la no linealidad del sistema, el método de integración utilizado tanto para el cálculo de la respuesta del sistema como para los identificadores algebraicos y el paso de integración. De hecho, estos mismos factores influyen en la presencia de perturbaciones y el comportamiento transitorio que se observa en las gráficas de las Figuras 4, 7 y 8.

Por otro lado, la estimación de los parámetros de masa, amortiguamiento y rigidez de los sistemas rotor-cojinete ayudan en la calibración de los modelos matemáticos que rigen su dinámica, lo cual mejora la predicción de su comportamiento dinámico, es decir, se podría obtener una mejor aproximación del cálculo de sus frecuencias naturales y formas modales, así como de su respuesta vibratoria ante diversas perturbaciones, como en el caso del desbalance.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se presenta el desarrollo de dos identificadores algebraicos, cuya función es determinar los parámetros desconocidos de masa, amortiguamiento y rigidez de un sistema rotor-cojinete tipo Jeffcott de dos grados de libertad, como el que se muestra en la Figura 1. Las simulaciones de los identificadores muestran que es posible determinar los parámetros de masa, amortiguamiento y rigidez del sistema rotor-cojinete únicamente utilizando la respuesta vibratoria del sistema. Además, las simulaciones se realizaron considerando dos condiciones de operación del rotor: velocidad constante y velocidad variable.

La identificación de los parámetros de masa y rigidez se realizó en un tiempo menor a 0.1 segundos, lo que es consistente con la rapidez de los identificadores reportados en la literatura. Por otro lado, la estimación del amortiguamiento para las dos condiciones de operación del sistema rotor-cojinete se llevó a cabo en un tiempo menor a 0.28 segundos. Adicionalmente, se observó que la rapidez con la que los identificadores deter-

minan la magnitud del parámetro a identificar depende en buena medida de la no linealidad del sistema y del método y el paso de integración utilizado en las simulaciones.

También, en los resultados de la identificación paramétrica es posible observar que el identificador muestra un comportamiento transitorio al inicio de la identificación, por ejemplo, este comportamiento transitorio es más notorio en las Figuras 4 y 8. Esto se debe en buena medida a los métodos de integración utilizados, tanto para la solución del modelo dinámico del sistema rotor-cojinete como para la solución de los identificadores algebraicos, así como el paso de integración utilizado en las soluciones.

REFERENCIAS

- [1] C. P. Moreno y P. Thomson, "Incertidumbre Paramétrica en Modelos Dinámicos de Estructuras Civiles", *Ingeniería y Competitividad*, vol. 12, n.º 1, pp. 111-125, 2010, doi: [10.25100/iyv.v12i1.2705](https://doi.org/10.25100/iyv.v12i1.2705).
- [2] H. Sira-Ramírez, C. García-Rodríguez, J. Cortés-Romero y A. Luviano-Juárez, *Algebraic Identification and Estimation Methods in Feedback Control Systems*. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2014.
- [3] L. Ljung, *Systems Identification: Theory for the User*. Englewood Cliffs, Nueva Jersey: Prentice-Hall, 1987.
- [4] T. Söderström y P. Stoica, *System Identification*. Nueva York: Prentice-Hall, 1989.
- [5] S. Sagara y Z.-Y. Zhao, "Recursive identification of transfer function matrix in continuous systems via linear integral filter", *Int. J. Control*, vol. 50, n.º 2, pp. 457-477, 1989, doi: [10.1080/00207178908953377](https://doi.org/10.1080/00207178908953377).
- [6] S. Sagara y Z.-Y. Zhao, "Numerical integration approach to on-line identification of continuous-time systems", *Automatica*, vol. 26, n.º 1, pp. 63-74, en. 1990, doi: [10.1016/0005-1098\(90\)90158-E](https://doi.org/10.1016/0005-1098(90)90158-E).
- [7] M. Fliess y H. Sira-Ramírez, "An algebraic framework for linear identification", *ESAIM: COCV*, vol. 9, pp. 151-168, feb. 2003, doi: [10.1051/cocv:2003008](https://doi.org/10.1051/cocv:2003008).
- [8] A. Blanco-Ortega, F. Beltrán-Carbajal, G. Silva-Navarro y H. Méndez-Azúa, "Control de Vibraciones en Maquinaria Rotatoria", *Rev. Iberoam. Autom. Inform. Ind.*, vol. 7, n.º 4, pp. 36-43, 2010, doi: [10.1016/S1697-7912\(10\)70058-3](https://doi.org/10.1016/S1697-7912(10)70058-3).
- [9] M. Arias-Montiel, F. Beltrán-Carbajal y G. Silva-Navarro, "On-line algebraic identification of eccentricity parameters in active rotor-bearing systems", *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 85, pp. 152-159, ag. 2014, doi: [10.1016/j.ijmecsci.2014.05.027](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2014.05.027).
- [10] J. Colín, J. G. Mendoza, A. Blanco, A. Abúndez y E. S. Gutiérrez, "Determinación del Desbalance en Sistemas Rotor-cojinete a velocidad constante: Método de Identificación Algebraica", *Ingenier. mecáni. tecnolog. desarroll.*, vol. 5, n.º 4, pp. 385-394, 2016.
- [11] J. G. Mendoza, J. Colín, A. Blanco, A. Abúndez y E. S. Gutiérrez, "Balanceo Automático de un Sistema Rotor-Cojinete: Identificador Algebraico en Línea del Desbalance Para un Sistema Rotodinámico", *Rev. Iberoam. Autom. Inform. Ind.*, vol. 13, n.º 3, pp. 281-292, 2016, doi: [10.1016/j.riai.2016.03.004](https://doi.org/10.1016/j.riai.2016.03.004).
- [12] L. A. Baltazar-Tadeo et al., "An Integrated Balancing Method for Asymmetric Rotor-Bearing Systems: Algebraic Identification, Modal Balancing, and Active Balancing Disks", *J. Vib. Eng. Technol.*, vol. 11, n.º 2, pp. 619-645, jul. 2022, doi: [10.1007/s42417-022-00598-6](https://doi.org/10.1007/s42417-022-00598-6).
- [13] J. G. Mendoza-Larios et al., "An Algebraic Approach for Identification of Rotordynamic Parameters in Bearings with Linearized Force Coefficients", *Mathematics*, vol. 9, n.º 21, pp. 27-47, oct. 2021, doi: [10.3390/math9212747](https://doi.org/10.3390/math9212747).
- [14] S. J. Landa-Damas et al., "A simplified Model for the On-Line Identification of Bearing Direct-Dynamic Parameters Based on Algebraic Identification (AI)", *Mathematics*, vol. 11, n.º 14, 3131, jul. 2023, doi: [10.3390/math11143131](https://doi.org/10.3390/math11143131).
- [15] J. R. Trapero, H. Sira-Ramírez y V. Feliu, "An algebraic frequency estimator for a biased and noisy sinusoidal signal", *Signal Processing*, vol. 87, n.º 6, pp. 1188-1201, jun. 2007, doi: [10.1016/j.sigpro.2006.10.006](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2006.10.006).
- [16] F. Beltrán-Carbajal, G. Silva-Navarro y M. Arias-Montiel, "Control Activo de Vibraciones en un Rotor Tipo Jeffcott con Velocidad Variable Usando una Suspensión Electromecánica", *Rev. Iberoam. Autom. Inform. Ind.*, vol. 11, n.º 3, pp. 295-303, jul. 2014, doi: [10.1016/j.riai.2014.05.002](https://doi.org/10.1016/j.riai.2014.05.002).

- [17] J. Kasac, T. Zilic, V. Milic y A. Jokic, “Frequency-shifting-based stable on-line algebraic parameter identification of linear systems”, *J. Frank. Inst.*, vol. 355, n.º 18, pp. 9224-9244 dic. 2018, doi: [10.1016/j.jfranklin.2017.03.008](https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2017.03.008).
- [18] L. G. Trujillo-Franco, G. Silva-Navarro y F. Beltrán-Carbajal, “Algebraic Parameter Identification of Nonlinear Vibrating Systems and Non-Linearity Quantification Using the Hilbert Transformation”, *Mathematics*, vol. 2021, n.º 4, 5595453, jun. 2021, doi: [10.1155/2021/5595453](https://doi.org/10.1155/2021/5595453).
- [19] F. Beltran-Carbajal, H. F. Abundis-Fong, L. G. Trujillo-Franco, H. Yañez-Badillo, A. Favela-Contreras y E. Campos-Mercado, “Online Frequency Estimation on a Building-like Structure Using a Nonlinear Flexible Dynamic Vibration Absorber”, *Mathematics*, vol. 10, n.º 5, feb. 2022, doi: [10.3390/math10050708](https://doi.org/10.3390/math10050708).
- [20] F. Beltran-Carbajal, R. Tapia-Olvera, A. Valderrabano-Gonzalez y H. Yañez-Badillo, “An asymptotic and algebraic estimation method of harmonics”, *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 206, 107771, may. 2022, doi: [10.1016/j.epsr.2022.107771](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.107771).
- [21] M. Lalanne, G. Ferraris. *Rotordynamics prediction in engineering*, 2.ª, ed. John Wiley & Sons, 1998.

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado parcialmente por la Universidad Tecnológica de la Mixteca.

Aplicabilidad de sensores electroquímicos de bajo costo como alternativa para medir material particulado en calidad del aire

Applicability of low-cost electrochemical sensors as an alternative to measure particulate matter in air quality

Yeimer Darian León Salas¹ , José Alejandro Murad Pedraza¹  

¹Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia

RESUMEN

El presente estudio evaluó la aplicabilidad de los sensores electroquímicos de bajo costo como alternativa para medir el material particulado $PM_{2.5}$ al determinar la calidad del aire. El estudio se desarrolló en dos fases: la primera con el objetivo de exponer la descripción y la operación del equipo certificado (Teledyne T640) y los sensores electroquímicos de bajo costo (Plantower PMS7003, Plantower PMSA003, Honeywell HPM115S0, Sensirion SPS30 y Panasonic SN-GCJA5), y la segunda se enfocó en especificar el sitio y las fechas de medición del equipo certificado y los sensores, así como también presentar los detalles de la organización de los datos obtenidos y validados para su posterior análisis con diferentes herramientas de estadística descriptiva. De los cinco sensores estudiados, el de mayor correlación con el equipo certificado fue el Sensirion SPS30, pues se obtuvieron valores para las series de tiempo diaria de 71.01 % y horaria 76.94 % en la medición de $PM_{2.5}$. Los demás sensores presentaron un coeficiente de correlación cercano, a excepción del HMPA115S0 en la temporalidad horaria, con un valor r de 0.7381, y el PMS7003, con r de 0.6950. De manera general, los valores de cada r tuvieron una correlación fuerte, sin embargo, los valores de r^2 no resultaron tan apropiados, lo que indica que el modelo de regresión lineal no se ajusta al conjunto de datos reportados por el equipo T640. Por tanto, se considera que los sensores de bajo costo, debido a su comportamiento de variabilidad con respecto al equipo certificado, pueden llegar a ser útiles para identificar tendencias generales de contaminación atmosférica y servir como medidores indicativos en redes ciudadanas de monitoreo.

PALABRAS CLAVE: contaminación atmosférica; salud pública; parámetro; estadística; meteorología.

ABSTRACT

The present study evaluated the applicability of low-cost electrochemical sensors as an alternative to measure $PM_{2.5}$ particulate matter when determining air quality. The study was developed in two phases: the first with the objective of exposing the description and operation of the certified equipment (Teledyne T640) and the low-cost electrochemical sensors (Plantower PMS7003, Plantower PMSA003, Honeywell HPM115S0, Sensirion SPS30 and Panasonic SN-GCJA5), and the second focused on specifying the site and measurement dates of the certified equipment and sensors, as well as presenting the details of the organization of the data obtained and validated for subsequent analysis with different descriptive statistics tools. Of the five sensors studied, the one with the highest correlation with the certified equipment was the Sensirion SPS30, since values were obtained for the daily time series of 71.01% and 76.94% hourly for the measurement of $PM_{2.5}$. The other sensors presented a close correlation coefficient, except for the HMPA115S0 in the time temporality, with an r value of 0.7381, and the PMS7003, with r of 0.6950. In general, the values of each r had a strong correlation, however, the values of r^2 were not as appropriate, indicating that the linear regression model does not fit the data set reported by the T640 device. Therefore, it is considered that low-cost sensors, due to their variability behavior with respect to certified equipment, can be useful to identify general trends in atmospheric pollution and serve as indicative meters in citizen monitoring networks.

KEYWORDS: atmospheric pollution; public health; parameters; statistics; meteorology.

Correspondencia:

DESTINATARIO: José Alejandro Murad Pedraza
INSTITUCIÓN: Universidad Distrital Francisco José de Caldas
DIRECCIÓN: Calle 13 #31 - 75, Bogotá D. C., Colombia
CORREO ELECTRÓNICO: jamuradp@udistrital.edu.co

Fecha de recepción: 4 de octubre de 2024. **Fecha de aceptación:** 25 de abril de 2024. **Fecha de publicación:** 30 de abril de 2024.



I. INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica es uno de los grandes problemas ambientales que afecta en gran medida la salud de las poblaciones de manera indirecta, a causa de los fenómenos meteorológicos, y directa, actuando por medio de fuentes de contaminantes, entre ellas los vehículos, los procesos industriales, el humo del tabaco, las estufas y cocinas de gas y la combustión en interiores, y estas, a su vez, liberan cantidades enormes y crecientes de partículas en suspensión y respirables (PM_{10} , $PM_{2.5}$, etc.), dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2), compuestos orgánicos volátiles (COV) y monóxido de carbono (CO) [1].

Según estudios epidemiológicos de Romero *et al.* [2] y Rosales *et al.* [3], la exposición a contaminantes atmosféricos se asocia con incrementos en la incidencia del asma, severidad en el deterioro de la función pulmonar e incluso con mayor gravedad de las enfermedades respiratorias en adolescentes e infantes. Esto se agrava cada vez más debido al aumento de la urbanización, el congestionamiento vehicular y los altos costos de las medidas de control.

Las partículas de fracción fina respirable $PM_{2.5}$, que se encuentran dentro de las de PM_{10} , agrupa a aquellas que son generalmente ácidas y que contienen hollín y otros derivados de las emisiones vehiculares e industriales. Tal fracción es la más pequeña y agresiva debido a que es respirable en un 100 % y tiene mayor efecto en la salud, ya que puede ingresar al sistema respiratorio, se deposita en los alvéolos pulmonares y de esta forma llega al torrente sanguíneo, produciendo efectos perjudiciales en este, tales como bronquitis, enfisema, cáncer pulmonar y disminución del funcionamiento pulmonar, entre otros [4].

Para identificar las problemáticas ambientales y de salud en la población, es necesario contar con redes de monitoreo que permitan conocer el estado de la calidad del aire en determinados sitios. Sin embargo, la tarea de la medición no es sencilla porque a pesar de que las redes de monitoreo de las grandes ciudades son efectivas, estas no cubren en su totalidad las áreas para caracterizar de manera adecuada la exposición de los ciudadanos a los contaminantes, esto a causa de su baja resolución espacio-temporal y al alto número de datos ausentes [5], [6], [7].

Para el mejoramiento de las redes de monitoreo de calidad del aire se han venido implementando sensores electroquímicos de bajo costo [6], [8], [9] que emplean diferentes tipos de principios de medición, los cuales están relacionados con su objetivo, el número de contaminantes a medir y el tipo de sistema tecnológico de vigilancia implementado, como automático, semiautomático, manual o híbrido [10].

Los monitores portátiles de bajo costo destacan como complemento de las redes existentes en regiones desarrolladas en lo referente a la industrialización, con el fin de aumentar la densidad de sitios y datos [6]. Adicionalmente, en el estudio de Castell *et al.* [5] la aparición de plataformas de contaminación del aire de bajo costo genera observaciones de alta resolución espacial, casi en tiempo real, y brinda nuevas oportunidades para mejorar simultáneamente los sistemas de monitoreo existentes, así como para involucrar a los ciudadanos en el monitoreo ambiental activo.

En un estudio de Wang *et al.* [11] se evaluaron tres sensores de partículas de bajo costo basados en la dispersión de la luz (Shinyei PPD42NS, Samyoung DSM501A y Sharp GP2Y1010AU0F) por medio de métodos de calibración adaptados a las recomendaciones del taller de sensores de aire de la Environmental Protection Agency (EPA) [12]. Tales dispositivos presentaron alta linealidad frente a las concentraciones medidas por el equipo de referencia SidePak, con valores de r^2 superiores a 0.89 en el rango de concentración de partículas de 0 a 1000 $\mu g/m^3$. Adicionalmente, se encontró que las salidas de los sensores dependían en gran medida de la composición y el tamaño de las partículas y que la humedad afectó la respuesta del sensor.

Por otro lado, Johnson *et al.* [13] evaluaron una serie de sensores de partículas (Shinyei: modelos PPD42NS, PPD20V, PPD60PV) en una variedad de condiciones ambientales y ubicaciones, incluidos el fondo urbano y los sitios al borde de la carretera en Atlanta, Estados Unidos, e Hyderabad, India. Las mediciones de los sensores se compararon con las mostradas por equipos de referencia, encontrando, entre otros resultados, que los dispositivos PPD20V tuvieron la correlación más alta con el monitor de atenuación beta equivalente, con valores de r^2 por encima de 0.80 en la ciudad india. Asimismo, Castell *et al.* [5] examinaron los resultados de una red de bajo costo que mide el ozono a nivel del suelo, determinando que las redes densas de sensores de

bajo costo pueden agregar valor a las redes existentes, con un impacto mínimo en la calidad general del conjunto de datos.

En el presente estudio se evaluó la aplicabilidad de los sensores electroquímicos de bajo costo como alternativa para medir el material particulado en la calidad del aire para el caso de $PM_{2.5}$, verificando su información precisa y confiable por medio de un análisis técnico y comparativo con un equipo certificado aprobado por la EPA: el Teledyne Advanced Pollution Instrumentation Model T640 PM Mass Monitor (EQPM-0516-236).

II. METODOLOGÍA

FASE 1. DESCRIPCIÓN Y OPERACIÓN DE LOS EQUIPOS DE MONITOREO

Esta fase abarca el estudio de las características técnicas y los principios de operación del equipo certificado empleado en la investigación y los cinco sensores electroquímicos de bajo costo utilizados para medir la concentración de $PM_{2.5}$, los cuales fueron facilitados por el Observatorio Ciudadano de Calidad del Aire (CanAir.io).

Cabe mencionar que, para la recolección de información, fue necesario el uso de los conceptos emitidos por organizaciones con autoridad en el campo de la medición de la contaminación atmosférica, p. ej., MADS, IDEAM y EPA [10], [20], [21], así como las fichas técnicas obtenidas por los desarrolladores del equipo de referencia y sensores empleados [14], [15], [16], [17], [18], [19].

FASE 2. MONITOREO $PM_{2.5}$: EQUIPO CERTIFICADO VS. SENSORES ELECTROQUÍMICOS

Se consideraron diferentes acciones con el fin de comparar los resultados del monitoreo de la concentración del $PM_{2.5}$, con base en el uso del equipo certificado y de los cinco sensores ya mencionados. En la sede Aduanilla de Paiba de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, se instalaron los sensores electroquímicos de bajo costo y el equipo certificado (Figura 1). La medición se llevó a cabo de noviembre de 2020 a marzo de 2021.

La información obtenida fue validada, organizada (en series de tiempo horarias y diarias) y agrupada para su posterior análisis, con base al Manual de Operación de Sistema de Vigilancia para la Calidad del Aire [10].



Figura 1. Disposición del equipo certificado y sensores de bajo costo.

Adicionalmente, la depuración de los datos se realizó en consideración a lo señalado en las fichas técnicas de los sensores de bajo costo, teniendo en cuenta el rango de humedad de su óptimo funcionamiento (0-90 %). Las diferentes características de medición se presentan en la Tabla 1.

Después de la depuración respectiva, se obtuvo un total de 2388 datos horarios y 95 diarios válidos, los cuales se distribuyeron durante cinco meses de la siguiente manera: noviembre 2020 (25.3 %), diciembre 2020 (32.6 %), enero 2021 (5.3 %), febrero 2021 (12.6 %) y marzo 2021 (24.2 %).

Para el correspondiente análisis de la información se consideraron los aspectos siguientes:

- Con ayuda de herramientas de estadística descriptiva se realizó la descripción de los datos útiles obtenidos por el equipo certificado y los sensores.
- Relación estadística entre las concentraciones (datos de los sensores y del equipo de equivalente). Esta se representó de manera gráfica (diagrama de dispersión) y numérica (coeficiente de determinación).
- El análisis del error. Este se expuso con base en la relación de a) la temperatura y la humedad relativa y b) el error (concentración reportada por el sensor menos la indicada por el equipo equivalente). Adicionalmente, se realizó un acercamiento a la incidencia de la temperatura y humedad sobre la relación estadística estudiada en el segundo aspecto. Para el análisis estadístico del caso se utilizó el software Microsoft Excel.

TABLA 1
CARACTERÍSTICAS DE LA MEDICIÓN

CARACTERÍSTICAS	TELEDYNE T640	PLANTOWER PMS7003	PLANTOWER PMSA003	HONEYWELL HMPA115S0	SENSIRION SPS30	PANASONIC SN-GCJA5
Descripción	Su funcionamiento se basa en la espectroscopia de banda ancha con dispersión de luz blanca. Opera a una tasa de flujo volumétrico de 5.0 litros/min	Recoge y calcula continuamente el número de partículas suspendidas en el aire en un volumen unitario	Recoge la luz de dispersión en un cierto grado y se obtiene la curva de dispersión de cambio de luz con el tiempo	Detecta y cuenta las partículas haciendo uso de la dispersión de la luz	El principio de medición se basa en la dispersión láser y hace uso de la innovadora tecnología de resistencia a la contaminación	Se encuentra integrado por un microprocesador, un microventilador, un diodo láser (LD) y un fotodiodo (PD)
Principios de medición	Espectroscopia de banda ancha combinada con dispersión de luz blanca	Dispersión láser	Dispersión láser	Dispersión láser	Dispersión láser	Dispersión láser
Tiempo	10 s - 48 h	< 1 s	< 1 s	< 6 s	1 s	1 s
Precisión	$\pm 0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 h)	$\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ $\pm 10 \%$	$\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ $\pm 10 \%$	$\pm 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ $\pm 15 \%$	$\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ $\pm 10 \%$	$\pm 10 \%$ (35-1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Rango	0.1-10 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0-500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0-500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0-1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0-1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0-1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Resolución	0.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presenta una descripción de los datos empleados tanto para series de tiempo diarias como para las horarias. En el primer tiempo de exposición se llegó a 2387 datos válidos, lo que representa el 90.42 % de un total de 2640, mientras que, horariamente, para noviembre 2020 fue de 88.75 %, diciembre 2020 de 98.52 %, enero 2021 de 88.88 %, febrero 2020 de 83.61 % y marzo 2021 de 87.20 %, todos superiores al 75 %, tal como lo determina la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. Adicionalmente, se exponen las similitudes del comportamiento de la información proporcionada por los sensores con respecto al equipo equivalente.

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL MONITOREO DE $\text{PM}_{2.5}$

Descripción estadística de los datos

1. Concentraciones diarias $\text{PM}_{2.5}$

La [Figura 2](#) presenta la tendencia de las concentraciones diarias obtenidas del cálculo del promedio de los valores reportados durante cada uno de los días monitoreados entre las 01:00 y las 24:00 horas, en el transcurso del periodo de medición del presente estudio.

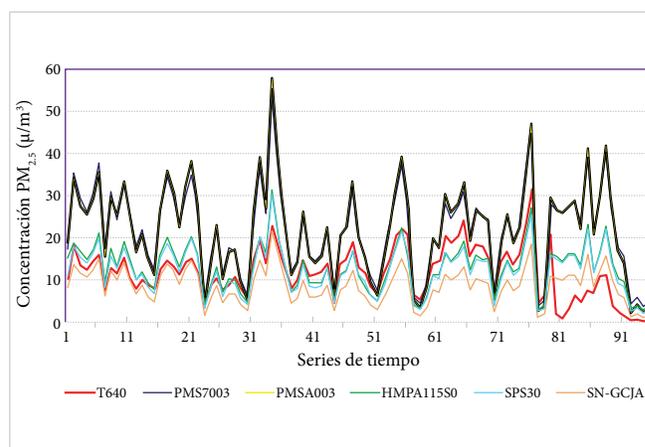


Figura 2. Tendencia de las concentraciones diarias $\text{PM}_{2.5}$.

Los promedios diarios obtenidos por el equipo certificado y los sensores electroquímicos presentaron comportamientos similares, en los que coincidieron los picos y las crestas en varios momentos.

Los sensores de marca Plantower (PMS7003 y PMSA003) tienden a sobrestimar los valores de referencia de manera relevante, exponiendo concentraciones por encima del 91 % al 95 % de los datos obtenidos, donde el mayor porcentaje se encuentra entre 5 a 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con el 31 y 26 %, hasta un máximo superior a los 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 3 de los 95 días evaluados.

Los sensores Honeywell HMPA115S0 presentaron un equilibrio en el número de datos para ambas situaciones, sin embargo, en la sobrestimación llega a 15.19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y en la subestimación hasta los 4.81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En ambos casos, la mayor distribución está entre los 0 y 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con el 31 % y 52 %, respectivamente. En cuanto al Sensirion SPS30 y al Panasonic SN-GCJA5, estos tienden a subestimar las concentraciones reportadas en un 45 % y 82 % con respecto a la medición realizada con el T640. Los rangos de mayor número de datos está entre 0 y 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con el 53 % y 57 % de datos válidos. La fecha en la que en los sensores de bajo costo PMSA003, SPS30

y SN-GCJA5 se presentaron concentraciones con el menor de los promedios diarios (Tabla 2), coincide con la misma en la cual el equipo certificado reportó los datos con la menor media. Lo anterior no sucedió con los valores máximos de concentración diaria, donde ninguno de los valores mayores derivados de la medición llevada a cabo por los sensores electroquímicos, concordó con el día en que el equipo certificado reportó las concentraciones con la media máxima, siendo los sensores de marca Plantower (PMS7003 y PMSA003) los que presentaron una desviación significativa en comparación de los demás dispositivos.

TABLA 2
VARIABILIDAD DE LAS CONCENTRACIONES DIARIAS

VARIABLES ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	TELEDYNE T640	PLANTOWER PMS7003	REF - PMS7003	PLANTOWER PMSA003	REF - PMSA003	HONEYWELL HMPA115S0	REF - HMPA115S0	SENSIRION SPS30	REF - SPS30	PANASONIC SN-GCJA5	REF - SN-GCJA5
Mínimo	0.31	3.63	-3.32*	2.14	-1.84	2.87	-2.56	2.25	-1.94	1.04	-0.73
Fecha	30/03/2021	7/03/2021	-	30/03/2021	-	7/03/2021	-	30/03/2021	-	30/03/2021	-
Máximo	31.74	54.79	-23.05	58.48	-26.74	31.98	-0.24	30.48	1.26	22.38	9.36
Fecha	6/03/2021	10/12/2020	-	10/12/2020	-	10/12/2020	-	10/12/2020	-	10/12/2020	-
Promedio	11.78	22.08	-10.30	22.05	-10.27	13.00	-1.21	12.29	-0.51	8.77	3.01

*Los valores negativos hacen referencia a la diferencia entre el equipo certificado y los sensores electroquímicos empleados en la investigación.

La Figura 3 expone los diagramas de caja (*boxplot*) para las concentraciones diarias del equipo certificado T640 y de cada uno de los sensores electroquímicos de bajo costo, así como los valores máximos y mínimos, el rango de las concentraciones diarias, los cuartiles inferior y superior, el rango intercuartil, la mediana de los datos, los valores atípicos detectados y la media.

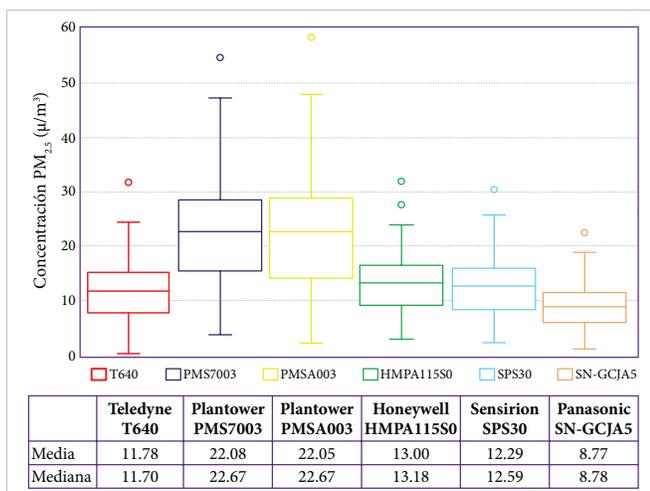


Figura 3. Diagramas de caja de concentraciones diarias.

Con base en el anterior diagrama, se puede observar que los sensores de marca Plantower presentaron

una variabilidad similar entre sí, pero muy distinta a la del equipo equivalente. De hecho, el Cuartil 1 (Q1) del PMS7003 y PMSA003 fue de 15.40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ frente al Cuartil 3 (Q3) del T640 de 15.14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, a diferencia de los sensores SPS30, HMPA115S0 y SN-GCJA5 que expresaron mejor similitud con respecto al equipo T640.

En cuanto a los valores de concentración del equipo certificado, se presentó Q1, la mediana y Q3 con datos de 7.8, 11.7 y 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, mientras que el equipo SPS30 mostró valores de 8.3, 12.5 y 15.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ que no resultaron significativamente alejados y, además, comparando la media del equipo certificado de 11.78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con los sensores, fueron más cercanos los valores de 12.29, 13.00 y 8.77 para SPS30, HMPA115S0 y SN-GCJA5. En este caso, tanto el equipo certificado como los sensores de bajo costo no revelaron valores atípicos por debajo del límite inferior de concentración, sino que solo lo hicieron por encima del valor máximo.

2. Concentraciones horarias $\text{PM}_{2.5}$

Con base en los numerosos reportes de concentración horaria procedentes de la medición del equipo certificado y de los sensores electroquímicos (2388 series de datos), se presentan a continuación gráficas donde se evi-

dencia el comportamiento de las concentraciones (eje x) el tiempo de medición y (eje y) reporta la concentración

de cada uno de los sensores frente al Teledyne T640.

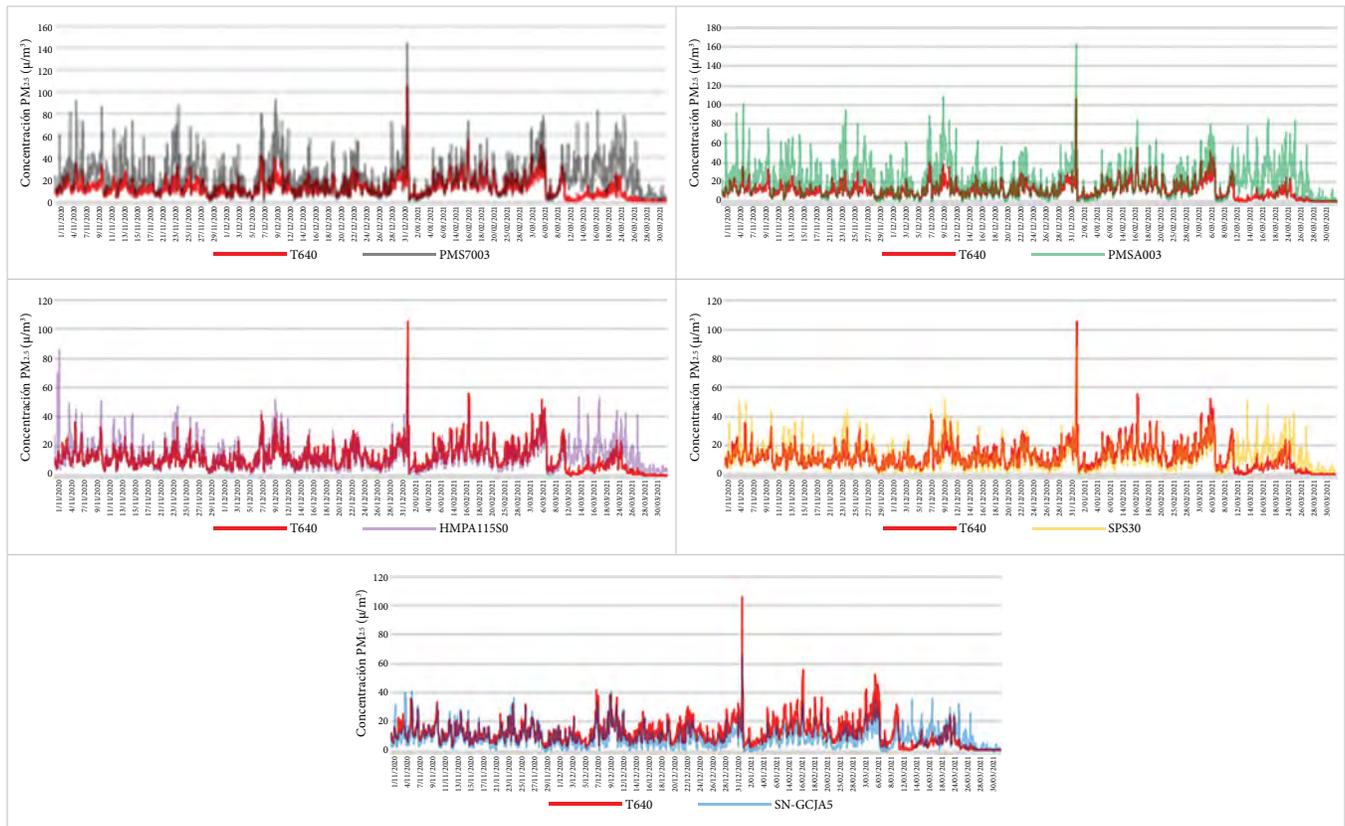


Figura 4. Tendencia de las concentraciones horarias $PM_{2.5}$

Según la [Figura 4](#), los sensores PMS7003 y PMSA003 sobrestimaron concentraciones horarias con respecto al equipo certificado superiores al 87.17 y 86.90 %. Cabe señalar que, como se observa en la [Figura 4](#), el PMSA003 es el que tiende a sobrestimar en mayor proporción.

Los sensores HMPA11550 y SPS30 subestimaron los datos horarios en comparación del T640, con desviaciones de 9.44 % y 4.15 %, respectivamente, mientras que el SN-GCJA5 lo hizo con 25.53 % ([Figura 4](#)). El sensor SPS30 presentó el menor porcentaje y, además, los reportes respectivos son los más cercanos al equipo certificado en su tendencia de concentraciones horarias.

En la [Tabla 3](#) se observa que, en este caso, las coincidencias de fecha se presentan en los valores máximos de concentración, donde los sensores PMS7003, PMSA003, SPS30 y SN-GCJA5 reportaron el mayor valor el mismo día que el equipo equivalente, coincidiendo este con el 1 de enero de 2021, que fue momento de altas emisiones a causa del uso de juegos pirotécnicos por la festividad de

fin de año y, también, al aplicar el percentil 95 la situación hizo que los dispositivos HMPA11550 y SPS30 fueran los que más se aproximaran, presentando la menor diferencia de $4.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $2.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En cuanto a los valores mínimos, no se encontró coincidencia alguna. No obstante, cabe señalar que las diferencias en la concentración son menores en comparación con las concentraciones diarias en la [Tabla 2](#) y al analizarlo con el percentil 5, el sensor SN-GCJA5 experimentó una menor diferencia con respecto al valor de $1.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$, obteniendo $0.84 \mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido del PMSA003 que reportó un valor de $1.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

La [Figura 5](#) muestra los diagramas de caja para las concentraciones horarias del equipo certificado y cada uno de los sensores electroquímicos, así como los valores máximos y mínimos de concentración, el rango, los cuartiles inferior y superior, el rango intercuartil, la mediana de los datos y los valores atípicos detectados.

TABLA 3
VARIABILIDAD DE LAS CONCENTRACIONES HORARIAS

VARIABLES ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	TELEDYNE T640	PLANTOWER PMS7003	REF - PMS7003	PLANTOWER PMSA003	REF - PMSA003	HONEYWELL HMPA115S0	REF - HMPA115S0	SENSIRION SPS30	REF - SPS30	PANASONIC SN-GCJA5	REF - PMSA003
Mínimo	0.09	0.21	-0.12*	0.00	0.09	0.77	-0.68	0.69	-0.6	0.00	0.009
Fecha	31/03/2021	1/01/2021	-	1/01/2021	-	7/03/2021	-	7/03/2021	-	7/03/2021	-
Hora	2:00:00	9:00:00	-	9:00:00	-	23:00:00	-	23:00:00	-	23:00:00	-
Máximo	105.49	145.00	-39.51	162.00	-56.51	85.40	20.09	88.40	17.09	64.40	41.09
Fecha	1/01/2021	1/01/2021	-	1/01/2021	-	2/11/2020	-	1/01/2021	-	1/01/2021	-
Hora	2:00	2:00	-	2:00	-	11:00	-	2:00	-	2:00	-
Rango	105.40	144.79	-39.39	162.00	-56.6	84.63	20.77	87.71	17.69	64.40	41

*Los valores negativos hacen referencia a la diferencia entre el equipo certificado y los sensores electroquímicos empleados en la investigación.

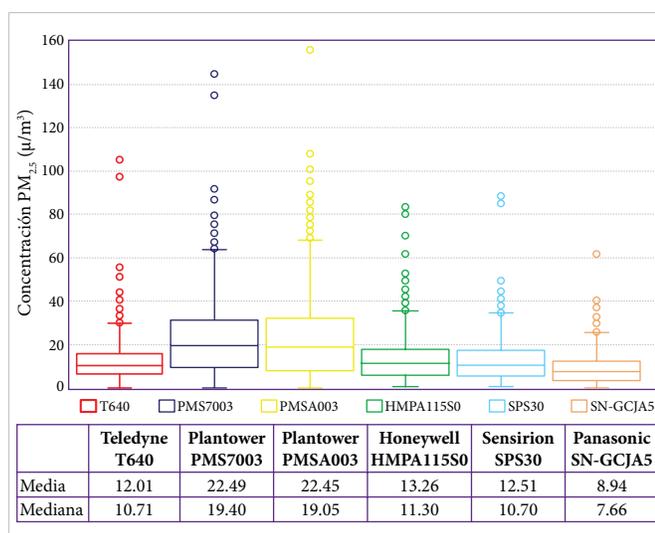


Figura 5. Diagramas de caja de las concentraciones horarias $\text{PM}_{2.5}$.

En los diagramas de caja para las concentraciones horarias (Figura 5), los sensores PMS7003 y PMSA003 presentaron una variabilidad similar entre sí, pero muy distinta a la del equipo certificado (situación parecida a la de concentraciones diarias). Nuevamente, el equipo con mayor similitud en cuanto a variabilidad respecto al certificado fue el SPS30, seguido del HMPA115S0 y el SN-GCJA5. Según la información del equipo equivalente, el 75 % de los datos se encontró por debajo de una concentración de $\text{PM}_{2.5}$ igual a $15.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el 25 % por debajo de $6.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y resultó una mediana de $10.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por su parte, el sensor SPS30 reveló que el 75 % de los datos fueron menores a una concentración de $17.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$, el 25 % fue menor de $5.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y se produjo una mediana de $10.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De igual manera, como en el caso anterior, la media de los datos del T640 fue de $12.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$, similar a los sensores SN-GCJA5, SPS30 y HMPA115S0, reportando medias de $8.94 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $12.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $13.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

De acuerdo con los rangos mostrados en los diagramas de cajas anteriores, se deduce de nuevo la similitud entre los valores de concentración del equipo certificado y los sensores SPS30, HMPA115S0 y SN-GCJA5.

Relación estadística de los datos

En el presente apartado se expone la relación estadística entre las concentraciones obtenidas tanto para las series de tiempo diarias (2388) como horarias (95). La relación de manera gráfica (diagrama de dispersión) y numérica (coeficiente de correlación y determinación) expone la bondad de ajuste de un modelo a la variable que se pretende explicar. Para este caso, se advierte la conveniencia de aproximarse a los valores de concentración de referencia, aportadas por el equipo certificado T640 a partir de las concentraciones obtenidas por los sensores electroquímicos.

El coeficiente de r de Pearson, que oscila entre -1 y $+1$, un valor menor a 0 indica que existe una correlación negativa, es decir, que las dos variables están asociadas en sentido inverso. Cuanto más se acerca a 1 , mayor es la fuerza de esa relación invertida; si es exactamente -1 eso significa que tienen una correlación negativa perfecta y un valor mayor que 0 indica que existe una correlación positiva. En este caso, las variables estarían asociadas en sentido directo. Cuanto más cerca está de $+1$, más alta es su asociación; un valor exacto de $+1$ indicaría una relación lineal positiva perfecta y, finalmente, una correlación de 0 o próxima a 0 indica que no hay relación lineal entre las dos variables [22]. En cuanto al coeficiente de determinación, que es un concepto de estadística también llamado r cuadrado o r^2 , representa la proporción de varianza total de la variable que explica la regresión. En otras palabras, dicho término trata de explicar la bondad

del ajuste de un modelo a la variable que pretende analizar. Este coeficiente puede ofrecer valores entre 0 y 1. Si el resultado es 1 o cercano a 1, indica que el modelo y la variable que se quiere explicar se ajustan mucho y, por el contrario, si se acerca más a 0 el modelo se ajustará menos (además de ser menos fiable) [23].

1. Concentraciones diarias PM_{2.5}

La Figura 6 presenta los diagramas de dispersión con sus coeficientes de correlación y determinación, así como las rectas de regresión lineal resultantes entre los datos diarios de concentración PM_{2.5} (µg/m³) obtenidos de las mediciones de cada uno de los sensores electroquímicos y las calculadas a partir de la información proporcionada por el equipo equivalente.

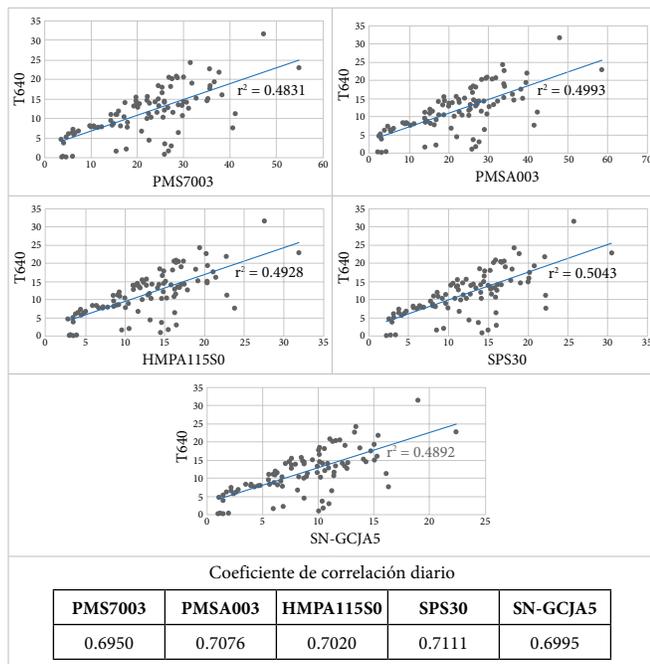


Figura 6. Diagramas de dispersión de las concentraciones diarias.

De acuerdo con la Figura 6, todas las series de datos de concentración diaria entre el equipo certificado y los sensores electroquímicos tienen una condición similar, presentando un coeficiente de correlación entre 0.695 (PMS7003) a 0.711 (SPS30), lo que indica un grado de asociación positiva entre moderada y significativa en las dos variables.

Al aproximar las concentraciones de los sensores electroquímicos a los valores de concentración del equipo certificado y empleando los modelos resultantes de la regresión lineal aplicada con el coeficiente de determinación,

se aprecia que los valores están entre 0.4892 (SN-GCJA5) y 0.5043 (SPS30), con la variación de la concentración en las técnicas de medición en alrededor del 50 %.

2. Concentraciones horarias PM_{2.5}

La Figura 7 presenta los diagramas de dispersión con sus respectivos coeficientes de correlación y rectas de regresión lineal, de acuerdo con los datos horarios de concentración de PM_{2.5} en µg/m³ para las mediciones de cada uno de los sensores electroquímicos y las establecidas a partir de la información del equipo equivalente.

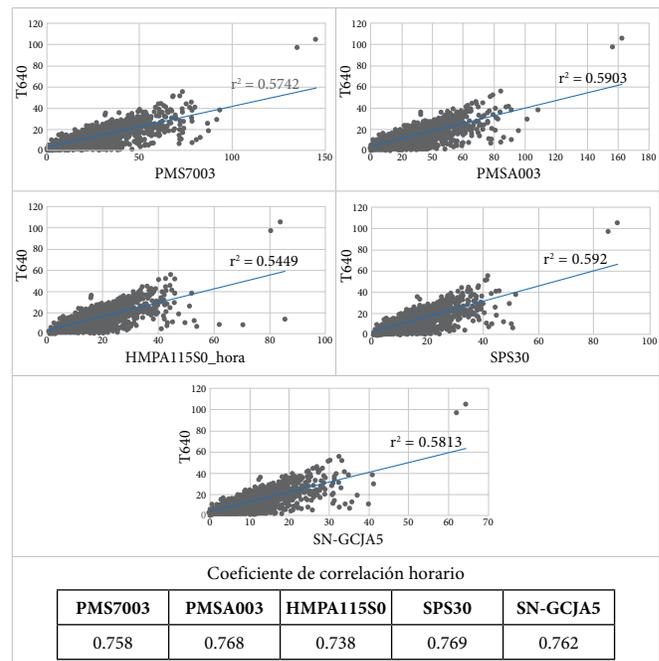


Figura 7. Diagramas de dispersión de las concentraciones horarias.

Las correlaciones aumentaron del 4 al 6 % para el tiempo de exposición diaria con respecto al horario, es decir, se llegó a valores entre 0.738 (HMPA11550) y 0.769 (SPS30), confirmando una asociación significativa entre las dos técnicas de medición. Asimismo, el coeficiente de determinación se incrementó del 6 al 10 % aproximadamente, llegando al 54.13 % y hasta el 59.2 % de aproximación de las concentraciones de los sensores mencionados anteriormente con respecto al equipo equivalente.

Con base en lo anterior, las relaciones estadísticas horarias guardan mayor bondad de ajuste, por lo que la deducción de las concentraciones de referencia a partir de las reportadas por los sensores electroquímicos, es más idónea con respecto al caso de las series de datos diarias.

Análisis del error

1. Concentraciones diarias

Con el objetivo de establecer el uso eficiente de sensores electroquímicos de bajo costo como alternativa en la medición y monitoreo de la calidad del aire, algunos trabajos de investigación exponen la influencia de ciertas variables meteorológicas en la precisión de los sensores [11], [24], [25]. Por tanto, en el presente apartado se expone la relación del error en porcentaje (concentración reportada por el sensor menos la indicada por el equipo equivalente), determinando rangos en tiempo de exposición diario y horario con el propósito de establecer el comportamiento de cada una de las concentraciones, qué tan cerca o lejos se está de la línea central y determinar la uniformidad de la información, independientemente de las condiciones que se presenten y la variabilidad de la temperatura y humedad en el sitio donde se está midiendo la calidad del aire.

Respecto al sensor PMS7003, no se presentaron concentraciones al mismo nivel del equipo certificado y el 90.5 % de los datos tuvo una sobrestimación de la concentración con respecto a la línea central, estando agrupados en su mayoría entre -10 % a -50 % de diferencia con el 30.5 % del total de información, lo cual es un incremento entre 1.34 µg/m³ y 15.5 µg/m³. Al igual que el anterior, el análisis del sensor PMSA003 no arrojó concentraciones iguales al equipo certificado y su mayor distribución está para una sobrestimación entre -10 y -100 % con 71 datos de 95, equivalente al 74.7 % de las concentraciones válidas.

El comportamiento de los datos del sensor HMPA115S0 se presenta en la [Figura 8](#), donde únicamente dos concentraciones fueron iguales al equipo de certificado y el 49.5 % de la información quedó por debajo de la línea central entre el rango de 10 % a 20 % y por encima entre -10 % y -50 %, obteniendo una mayor incidencia con 21 y 24 concentraciones de las 95 obtenidas, respectivamente.

La situación anterior se dio también en el sensor SPS30, donde el 54.7 % de la información estuvo por debajo del nivel de referencia mientras que el 45.3 % presentó concentraciones por encima del T640. Al tener una diferencia en concentración de ±3 µg/m³, esta situación se dio en 57 días, siendo el 60 % del tiempo de monitoreo y representando una adecuada armonización entre las técnicas de medición.

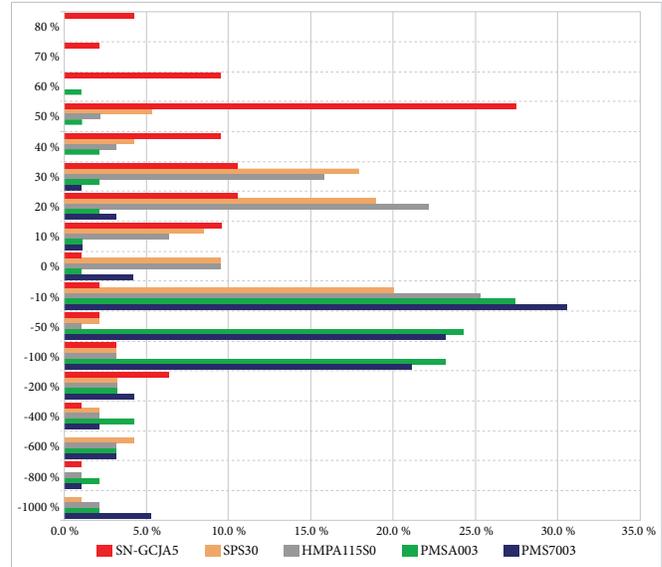


Figura 8. Variación de las concentraciones de los sensores con respecto a la línea central - diario.

El último sensor empleado, el SN-GCJA5, tuvo una representación de datos en 13 de los 14 rangos, una mayor presencia por debajo de la línea central en 83.2 % y 79 datos, y el rango de error más alto entre 10 y 30 % con el 21.2 % de la información procesada para esta exposición.

De los cinco sensores empleados en este estudio, HMPA115S0 y SPS30 son los de mejor comportamiento ([Tabla 4](#)), ya que fueron los que más días estuvieron en un rango de ±10 % de diferencia con la línea de tendencia central, con 15 y 17 días de los 95 evaluados.

TABLA 4
NÚMERO DE DÍAS DE MAYOR VARIACIÓN EN 24 HORAS

DESDE (%):	HASTA (%):	PMS7003	PMSA003	HMPA115S0	SPS30	SN-GCJA5
-3000	-1000	5	2	2	1	0
-1000	-800	1	2	1	0	1
-800	-600	3	3	3	4	0
-600	-400	2	4	2	2	1
-400	-200	4	3	3	3	6
-200	-100	20	22	3	3	3
-100	-50	22	23	1	2	2
-50	-10	29	26	24	19	2
-10	0	4	1	9	9	1
0	10	1	1	6	8	9
10	20	3	2	21	18	10
20	30	1	2	15	17	10
30	40	0	2	3	4	9
40	50	0	1	2	5	26
50	60	0	1	0	0	9
60	70	0	0	0	0	2
70	80	0	0	0	0	4
Total		95	95	95	95	95

2. Concentraciones horarias

El análisis de este error se da para un total de 2168 concentraciones que se grafican en la [Figura 9](#). Los sensores que principalmente estuvieron por debajo de la línea de correlación son HMPA115S0, SPS30 y SN-GCJA5, siendo los dos primeros muy similares y presentando la mayor influencia hasta el 80 %, sin embargo, el grupo que mostró mayor incidencia estuvo hasta en el 30 %, equivalente a 3.4 µg/m³ y 4.5 µg/m³, respectivamente, con el 56.8 % y 53.5 % de datos válidos.

Para el sensor SN-GCJA5 se detectó un error hasta del 290 % con 49 concentraciones y 1627 datos por debajo de la línea de tendencia, que equivalen al 75 % de la información y superando ampliamente a los que tuvieron una sobrevaloración de la línea central de tendencia.

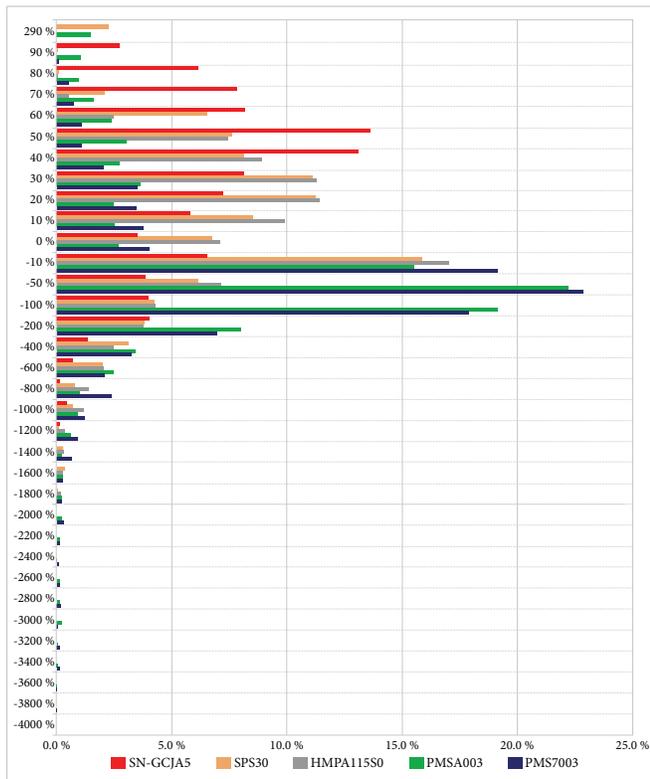


Figura 9. Variación de las concentraciones de los sensores con respecto a la línea central - horario

En cuanto al comportamiento de los sensores PMS7003 y PMSA003, se presentaron errores que llegaron a estar por encima de 3000 % de error con 14 y 12 horas del total medido, alcanzando a una diferencia entre concentraciones de 17.51 µg/m³ y 29.52 µg/m³ y una mayor proporción en el 200 % de error con el 63.9 % y 59.5 % de los datos analizados, llegando a 40.47 µg/m³ y 11.86

µg/m³. Para tener la información más clara sobre el número de horas de variación horaria, se pueden observar estos datos en la [Tabla 5](#).

Tabla 5. NÚMERO DE HORAS DE MAYOR VARIACIÓN HORARIO

DESDE (%):	HASTA (%):	PMS7003	PMSA003	HMPA115S0	SPS30	SN-GCJA5
-4200	-4000	0	0	0	0	0
-4000	-3800	1	0	0	0	0
-3800	-3600	1	1	0	0	0
-3600	-3400	3	2	0	0	0
-3400	-3200	3	1	0	0	0
-3200	-3000	2	5	0	0	0
-3000	-2800	4	3	0	0	0
-2800	-2600	3	3	0	0	0
-2600	-2400	2	1	0	0	0
-2400	-2200	3	3	0	0	0
-2200	-2000	7	5	0	0	0
-2000	-1800	5	5	4	1	0
-1800	-1600	6	6	7	8	0
-1600	-1400	15	5	8	7	0
-1400	-1200	20	14	9	3	4
-1200	-1000	27	20	26	16	10
-1000	-800	52	22	31	18	4
-800	-600	46	54	45	44	16
-600	-400	71	74	54	68	30
-400	-200	151	174	82	83	88
-200	-100	388	415	93	92	87
-100	-50	495	481	155	134	84
-50	-10	415	336	369	344	142
-10	0	88	58	154	146	76
0	10	82	55	215	185	126
10	20	75	54	248	244	157
20	30	76	80	245	241	176
30	40	45	60	193	176	284
40	50	25	67	162	166	295
50	60	25	52	54	142	177
60	70	17	35	12	46	170
70	80	12	21	2	3	134
80	90	3	23	0	1	59
90	290	0	33	0	0	49
Total		2168	2168	2168	2168	2168

De igual manera que en la condición diaria, en el tiempo de exposición horaria los dos sensores con un mejor comportamiento con respecto a las concentraciones reportadas por el equipo certificado T640 fueron el HMPA115S0 y el SPS30, los cuales, con 369 y 344 horas respectivamente, tuvieron un error de ±10 % y luego se desplazó a -200 % cuando la concentración estuvo por encima del valor de referencia y del 60 % tras quedar por debajo del eje central. En las dos situaciones se alcanzó el 65.9 % y 66.7 % del total de datos válidos.

Efecto de la humedad

1. Análisis diario

En el caso de la temporalidad diaria, se relacionó un total de 86 concentraciones debido a que en 9 de las 95 series diarias útiles propuestas en el estudio no se contó con la información suficiente sobre la presente variable meteorológica. La mayoría de los valores de humedad relativa promedio presentaron números superiores al 60 % y los

valores menores a ese porcentaje fueron de 7 días de medición. La [Tabla 6](#) muestra los valores de los coeficientes de dispersión para cada uno de los sensores electroquímicos empleados, en los casos en que se decidió depurar las concentraciones presentadas en días con humedades relativas promedios superiores a ciertos porcentajes propuestos para el análisis. Adicionalmente, se expone la cantidad de datos relacionados estadísticamente en cada una de las situaciones y el porcentaje que representan frente a los datos iniciales de 86.

TABLA 6
CORRELACIÓN DE CONCENTRACIONES DIARIAS A DIFERENTES HUMEDADES

HUMEDAD RELATIVA MÁXIMA (%)	PLANTOWER PMS7003	PLANTOWER PMSA003	HONEYWELL HMPA115S0	SENSIRION SPS30	PANASONIC SN-GCJA5	NÚM. DE DATOS	%
< 90	0.7067	0.7148	0.7056	0.7134	0.7073	86	100
< 80	0.7685	0.7743	0.7694	0.7766	0.7667	81	94.18
< 70	0.8771	0.8824	0.8722	0.8871	0.8741	49	56.98
< 60	0.9502	0.9305	0.9551	0.9358	0.9331	7	8.14

Los coeficientes r para cada relación estadística (sensor electroquímico, equipo equivalente) aumentaron gradualmente cada vez que se depuraban las concentraciones reportadas en días con humedades relativas inferiores a porcentajes del 90 %, obteniéndose coeficientes de dispersión de alrededor del 70 %. Cuando la humedad llegó al 80 %, los coeficientes se incrementaron en 6 %, si las humedades eran menores al 70 % la r fue del 87 %, que es un incremento de 11 %, y con humedades por debajo del 60 % se llegó a coeficientes del 94 %, es decir, se produjo un 24 % de incremento en r pasando de 90 % a 60 % de humedad. Esto significa que a medida que baja la humedad se incrementa la correlación, sin embargo, al presentarse esta condición, las cantidades de datos relacionadas estadísticamente se van haciendo menores y pierden representatividad de manera importante.

Esto se pudo observar en días con humedades relativas menores al 60 %, donde los datos útiles se redujeron a tan solo 7 (8.14 % de los iniciales). Pese a ello, el incremento en los valores de r anuncia la influencia de la humedad relativa en el ejercicio de ajuste estadístico de las concentraciones diarias obtenidas de la medición realizada por cada uno de los sensores electroquímicos y del equipo T640.

La diferencia en la correlación y linealidad de las concentraciones de las dos técnicas de medición indican que al reducirse la humedad se va aumentando el coeficiente r en proporciones significativas: al pasar del 90 al 80 % este crece en un 6 %, del 80 al 70 % de humedad se tiene

el mayor incremento (entre 10 y 11 %) y del 70 al 60 % de nuevo se tiene entre 5 y 7 % de aumento, llegando una diferencia total entre el 22 y el 25 %. Esto conlleva a determinar que esta variable meteorológica es de suma importancia en la influencia de las técnicas de medición para los sensores electroquímicos, lo que genera una alta variabilidad en las concentraciones y altas dispersiones cuando se presentan altas humedades relativas. Por ello en los *inlets* o cabezotes y en algunos equipos automáticos se agregan dispositivos para el manejo de la humedad, ya vez que a humedades altas la medición puede presentar interferencias e incertidumbres que dan como no válida una concentración.

2. Análisis horario

Del total de series de datos horarios propuestos en el estudio de los sensores electroquímicos, solo en 2175 se cuenta con reporte de humedad relativa, por lo cual, con tal información se realizó el análisis a la variable meteorológica de humedad.

En particular, la humedad relativa es considerada una variable con gran amplitud, a causa de la dependencia de factores naturales ^[25] y no tiene una incidencia sustancial en la concentración de los contaminantes en la calidad del aire, pero sí puede afectar las diferentes técnicas de medición que se emplean para determinar la concentración, principalmente si son de tipo automático.

La [Tabla 7](#) presenta los valores de los coeficientes de dispersión r para los sensores electroquímicos. Cuando se decidió depurar las concentraciones presentadas en tiempo de exposición horario y con humedades relativas inferiores a ciertos porcentajes, como son el 90, 80, 70 y 60 %, se advirtió que los valores de r mostraron un mayor ajuste a medida que se reducía la humedad en un 4 % en total, por ejemplo, el sensor SPS30 inició con

un 77.37 % de correlación con humedades por debajo del 90 % bajo 2114 datos, llevándose el 97.19 % del total de información. En cambio, con humedades por debajo del 60 % se obtuvo solo 570 datos, es decir, el 25.21 % de concentraciones y un coeficiente de correlación del 81.53 %, siendo este sensor el que tuvo mejores resultados en los análisis realizados para cada una de las humedades definidas.

TABLA 7
CORRELACIÓN DE CONCENTRACIONES HORARIAS A DIFERENTES HUMEDADES

HUMEDAD RELATIVA MÁXIMA (%)	PLANTOWER PMS7003	PLANTOWER PMSA003	HONEYWELL HMPA115S0	SENSIRION SPS30	PANASONIC SN-GCJA5	NÚM. DE DATOS	%
< 90	0.7667	0.7755	0.7391	0.7737	0.7692	2114	97.19
< 80	0.7952	0.8032	0.7570	0.8008	0.7948	1554	71.44
< 70	0.8068	0.8148	0.7821	0.8148	0.8067	994	45.70
< 60	0.8027	0.8168	0.75651	0.8153	0.8099	570	26.21

Para los tiempos de exposición diaria y horaria es importante verificar que las lecturas en los sensores electroquímicos, como en las técnicas de medición equivalentes aprobadas por la EPA, no tengan influencia o error en la medición debido a la incidencia del vapor de agua en la atmósfera. Por esta razón, muchos equipos activos y automáticos tienen sistemas para separar las micropartículas de agua, como el calentador en el tubo de succión, lo que reduce la incertidumbre y el error en la medición de acuerdo a la técnica aplicada en los equipos equivalentes.

diarias útiles propuestas en el estudio, no se contó con la información suficiente sobre la presente variable meteorológica.

De igual manera que con el concepto de humedad relativa, a la temperatura también se le considera una variable de gran amplitud a causa de la dependencia de factores naturales ^[26].

En la [Tabla 8](#), los valores del r aumentan cada vez que se omiten las concentraciones reportadas en días con temperaturas superiores a 17, 16.5, 16, 15.5 y 15 °C, respectivamente. En el caso de las concentraciones con temperaturas mayores a 17 °C, la tendencia descrita se siguió presentando en todos los sensores, con excepción del HMPA115S0 que obtuvo el 86 % de correlación.

Efecto de la temperatura

1. Análisis diario

En este caso, se relacionaron de igual manera un total de 86 concentraciones debido a que en 9 de las 95 series

TABLA 8
CORRELACIÓN DE CONCENTRACIONES DIARIAS A DIFERENTES TEMPERATURAS

TEMPERATURA MÍNIMA (°C)	PLANTOWER PMS7003	PLANTOWER PMSA003	HONEYWELL HMPA115S0	SENSIRION SPS30	PANASONIC SN-GCJA5	NÚM. DE DATOS	% DE DATOS
> 15	0.8366	0.8425	0.8304	0.8475	0.8310	75	87.21
> 15.5	0.8891	0.8957	0.8835	0.8982	0.8865	58	67.44
> 16	0.911	0.9210	0.8984	0.9186	0.9113	40	47.67
> 16.5	0.9079	0.9137	0.8883	0.9145	0.9126	25	29.07
> 17	0.9424	0.9452	0.8608	0.9486	0.9331	8	9.30

Este comportamiento es tal que si solo se presentan temperaturas por encima de 15 °C, los coeficientes de correlación r serían del orden del 83 y 84 % para un total de 75 días evaluados con el 87.21 % de datos y al

ir incrementando la temperatura en 0.5 °C, estos coeficientes aumentan hasta llegar al 93 y 94 % de correlación, pero con solo 8 días de información y el 9.3 % de representatividad.

Lo anterior indica que los sensores generan una mejor condición de correlación con respecto al equipo certificado cuando se tiene una mayor temperatura, aumentando entre 6 % y 8 %. El SPS30 es el de mejor coeficiente, siendo este de 84.75 % para temperaturas mayores a 15 °C y hasta de 94.86 % para una temperatura superior a 17 °C.

2. Análisis horario

Para analizar el efecto de la temperatura sobre la diferencia entre las concentraciones horarias reportadas por cada uno de los sensores electroquímicos y el equipo equivalente, se relacionaron estadísticamente un total de 2181 datos válidos.

La mayoría de las concentraciones horarias se condensaron en valores por debajo de los 20 °C y mayores a los 12 °C. En la [Tabla 9](#) se presentan los coeficientes de correlación r para los sensores electroquímicos. Cuando se decidió depurar las concentraciones reportadas con temperaturas cada 2 °C en promedio, estas aumentaron gradualmente llegando a un rango entre 3 % y 5 %, a excepción del sensor HMPA115S0, en el que se redujo en el rango de temperaturas hasta un 12 %. Adicionalmente, en la tabla se presenta la cantidad de datos relacionados de manera estadística en cada uno de los casos y el porcentaje que representan frente a los datos iniciales de 2168, iniciando con el 95.96 % con 2093 datos al tener temperaturas mayores de 12 °C y mayor de 20 °C al presentarse únicamente 182 horas con el 8.34 %.

TABLA 9
CORRELACIÓN DE CONCENTRACIONES HORARIAS A DIFERENTES TEMPERATURAS

TEMPERATURA MÍNIMA (°C)	PLANTOWER PMS7003	PLANTOWER PMSA003	HONEYWELL HMPA115S0	SENSIRION SPS30	PANASONIC SN-GCJA5	NÚM. DE DATOS	% DE DATOS
> 12	0.7626	0.7706	0.7342	0.7693	0.7641	2093	95.96
> 14	0.7837	0.7883	0.7503	0.7883	0.7798	1575	72.21
> 16	0.8046	0.8047	0.7811	0.8080	0.7947	921	42.22
> 18	0.8117	0.8191	0.7715	0.8217	0.8090	507	23.24
> 20	0.8046	0.8135	0.64678	0.8162	0.7974	182	8.34

Los valores de r aumentaron cada vez que se depuraban las concentraciones reportadas con la temperatura. De manera general, tanto para las series de tiempo diarias como horarias en la mayoría de los casos se presentó un efecto relevante de la temperatura y la humedad relativa sobre el error y el coeficiente de dispersión r .

Respecto a la temperatura, mientras esta variable meteorológica descendía, el error se hizo más visible y r alcanzó valores con un menor ajuste estadístico entre las concentraciones de los sensores y de referencia. Lo anteriormente mencionado obedece únicamente a una tendencia de los datos y no a modelos de predicción estadística.

La tendencia del error y del coeficiente de dispersión con respecto a la temperatura y humedad relativa puede tener distintas explicaciones. Por ejemplo, en el caso del efecto de la humedad relativa sobre la respuesta de los sensores, en un estudio de 2019 ^[27] se indica que los sensores electroquímicos de bajo costo no cuentan con un sistema de secado de partículas antes del ingreso a la cámara de detección óptica, lo que implica que se estén

contabilizando tanto las partículas de aerosol como las gotas de niebla, lo cual genera un error en la medición del material particulado.

En una investigación de 2015 ^[11] se aborda una situación similar, explicando que el agua absorbe la radiación infrarroja y puede causar una sobrestimación de las concentraciones de masa de partículas debido a la intensidad de luz reducida que recibe el fototransistor. Adicionalmente, se menciona que el vapor de agua altamente concentrado puede provocar una falla en los circuitos de los sensores de partículas y así generar resultados de medición sesgados.

En otro estudio, en 2020 ^[26], se señala que, de acuerdo con el principio de funcionamiento de los sensores, se puede inferir que el vapor de agua podría absorber parte de la luz en condiciones de alta humedad relativa, lo cual genera que la intensidad de la luz recibida por los transistores fotoeléctricos se reduzca y se manifieste una sobrestimación de las concentraciones de masa de partículas.

En el caso de la temperatura y el sesgo en la medición de los sensores, este puede tener origen en la proporcionalidad que guarda la temperatura con respecto a la humedad relativa, debido a que, en condiciones de presión atmosférica poco variable, a medida que aumenta la temperatura el aire se vuelve más seco y la humedad relativa disminuye, a diferencia de cuando la temperatura se reduce, el aire se vuelve más húmedo y la humedad relativa aumenta.

Percentiles

Los percentiles es una medida de posición relativa del p-ésimo (punto) para un conjunto de datos, con la intención de conocer la posición de los datos para identificar datos extremos [28]. La [Tabla 10](#) muestra los percentiles para el equipo certificado y los sensores. En ella se aprecia que el p_{99} para el equipo certificado corresponde a una concentración de $37.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y solo 20 datos de 2168 se encuentran por encima de esta concentración. De los cinco sensores instalados, solo el SPS30 tuvo un comportamiento similar con un valor de $39.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido del HMPA115S0 con $42.71 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

TABLA 10
PERCENTILES DE CONCENTRACIONES DEL T640 Y SENSORES ELECTROQUÍMICOS

PERCENTILES	T640	PMS-7003	PMSA-003	HMPA-115S0	SPS30	SN-GCJA5
99	37.53	72.07	77.16	42.71	39.41	30.91
95	26.72	53.46	55.66	30.90	29.00	21.56
90	22.26	44.40	46.31	25.41	24.30	17.90
5	1.05	3.11	1.54	2.70	2.13	0.84

La situación antes presentada también se dio para los p_{95} y p_{90} . En todos los casos, los sensores PMS7003, PMSA003, SPS30 y HMPA115S0 tuvieron una mayor concentración en el análisis del percentil, a excepción del SN-GCJA5 que estuvo por debajo. No obstante, para el SPS30 las diferencias son muy bajas, por el ejemplo, en el p_{95} fue de $3.276 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y en el p_{90} de $2.037 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a diferencia de los otros sensores que tienen para este último percentil $22.137 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el PMS7003 y de $24.047 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Lo anterior muestra una perspectiva sobre la distribución de los datos y sus tendencias o patrones, en especial para el PMSA003.

Para el p_{25} y p_5 la mayor diferencia se dio con el sensor PMS7003, que obtuvo un valor de $12.944 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y 2.069

$\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, y la mínima con el sensor SN-GCJA5 con $1.194 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0.207 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para el aparato de mejor tendencia a percentiles 30 en adelante, que corresponde al SPS30, su diferencia fue de $-4.244 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $1.084 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

IV. CONCLUSIONES

Los sensores electroquímicos de bajo costo estudiados (Plantower PMS7003 y PMA7003, Honeywell HPA115S0, Sensirion SPS30 y Panasonic SN-GCJA5) resultaron ser eficaces para identificar las tendencias generales de contaminación atmosférica y complementar las redes de monitoreo en la medición de $\text{PM}_{2.5}$, aunque tienen limitaciones en la precisión y rango de medición e incertidumbre sobre la sensibilidad en la medición (tamaño de partícula mínimo detectable), pues las especificaciones de estos equipos no incluyen dicha información.

El comportamiento de las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ reportadas, según los sensores electroquímicos de bajo costo evaluados con respecto al equipo certificado Teledyne T640 para las series de tiempo horarias, indica que los sensores PMS7003 y PMA7003 sobrestimaron la concentración en más de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con el 42 % y 43 % de los datos medidos, mientras que los sensores HMPA115S0 y SPS30 lo hicieron en un porcentaje del 54 % y 52 %, respectivamente, por debajo de los $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En el caso del sensor SN-GCJA5, la mayor agrupación de datos fue del 60 % bajo un rango de concentración entre 3 a $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Según el análisis comparativo de los datos de concentración obtenidos por los sensores y el equipo equivalente, el sensor SPS30 presenta la mejor relación estadística para las series de tiempo tanto diarias como horarias, con r de 0.7101 y 0.7694, respectivamente. Los demás dispositivos presentaron un coeficiente de correlación cercano, a excepción del sensor HMPA115S0 en la temporalidad horaria que presentó un valor r de 0.7381 y el sensor PMS7003 con r de 0.6950. De manera general, los valores de cada r tienen una correlación fuerte, sin embargo, los valores de r^2 no son tan apropiados, lo que indica que el modelo de regresión lineal no se ajusta al conjunto de datos reportados por el equipo T640.

Los datos de cada uno de los equipos es una distribución simétrica, porque en los percentiles 5 y 95, el porcentaje de datos sesgados es similar. Por otra parte,

en los cuartiles 1 y 3 y la mediana las concentraciones están muy separadas, por lo que indica una dispersión alta. Además, se presentó una relación del Q1 del equipo certificado con los sensores PMS7003 y PMA7003 en el Q3, donde reportan concentraciones diarias similares. Es importante señalar que las posiciones de los cinco sensores, en contraste con los valores del Teledyne T640, el dispositivo SPS30 tiene mejor relación. De manera puntual, aquí se hace referencia a los cuartiles, mediana y media de las concentraciones horarias y diarias.

Se demostró que los sensores electroquímicos de bajo costo, pueden convertirse en una herramienta importante en la tarea de complementar las actuales redes de monitoreo de calidad del aire y de caracterizar adecuadamente los niveles de contaminación a los que están expuestos los ciudadanos, a partir de una alta resolución espacio temporal y bajo número de datos faltantes. Sin embargo, se debe garantizar una adecuada toma de la muestra, junto con un oportuno procesamiento y reporte de los datos, además de lograr el aseguramiento y control de calidad de la información.

Adicionalmente, es necesario señalar que, en las circunstancias actuales, los sensores electroquímicos de bajo costo pueden utilizarse para evaluaciones indicativas de la calidad del aire, pero habría que tener en cuenta la incertidumbre en los datos generados, es decir, que este tipo de tecnología debe ser metodológicamente implementada en un tiempo prudente (mínimo un año), con el fin de establecer de manera indicativa el comportamiento de la calidad del aire para examinar enseguida la situación en los sitios o áreas donde se reporten concentraciones de interés o estados de excepcionalidad a través del uso de equipos automáticos aprobados por la EPA.

Debido a su alta correlación y variabilidad con respecto al equipo certificado, los sensores de bajo costo pueden llegar a ser útiles para identificar tendencias generales de contaminación atmosférica y servir como medidores indicativos en redes ciudadanas de monitoreo.

Además, es muy importante acompañar la medición de la calidad del aire con la toma de lecturas al mismo tiempo de exposición de variables meteorológicas, como temperatura y humedad relativa, para poder validar la información y así garantizar que las concentraciones no presenten alteraciones.

REFERENCIAS

- [1] F. Ballester, "Contaminación atmosférica, cambio climático y salud", *Rev Esp Salud Pública*, vol. 79, n.º 2, pp. 159-175, mar.-abr. 2005.
- [2] M. Romero, F. Diego y M. Álvarez, "La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud", *Rev Cubana Hig Epidemiol*, vol. 44, n.º 2, pp. 1-14, 2006.
- [3] J. A. Rosales-Castillo, V. M. Torres-Meza, G. Olaiz-Fernández y V. H. Borja-Aburto, "Los efectos agudos de la contaminación del aire en la salud de la población: evidencias de estudios epidemiológicos", *Salud Pública Méx.*, vol. 43, n.º 6, pp. 544-555, 2001, disponible en: <https://www.scielosp.org/pdf/spm/2001.v43n6/544-555/es>.
- [4] A. Quijano, M. J. Quijano y J. A. Henao, "Caracterización fisicoquímica del material particulado-fracción respirable PM2.5 en Pamplona-Norte de Santander-Colombia", *Bistua*, vol. 8, n.º 1, pp. 1-20, en.-jun. 2010.
- [5] N. Castell *et al.*, "Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates?", *Environ Int*, vol. 99, pp. 293-302, feb. 2017, doi: [10.1016/j.envint.2016.12.007](https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.007).
- [6] M. Gao, J. Cao y E. Seto, "A distributed network of low-cost continuous reading sensors to measure spatiotemporal variations of PM2.5 in Xi'an, China", *Environ Pollut*, vol. 199, pp. 56-65, abr. 2015, doi: [10.1016/j.envpol.2015.01.013](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.01.013).
- [7] G. Miskell, J. Salmond y D. E. Williams, "Low-cost sensors and crowd-sourced data: Observations of siting impacts on a network of air-quality instruments", *Sci Total Environ*, vol. 575, pp. 1119-1129, en. 2017, doi: [10.1016/j.scitotenv.2016.09.177](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.177).
- [8] L. X. Roncancio, "Evaluación del desempeño de sensores de bajo costo como complemento para el monitoreo de la calidad del aire de Bogotá y como herramienta para la determinación del grado de exposición de una población caso de estudio", tesis de magister en ingeniería ambiental, Universidad Nacional de Colombia., Bogotá D.C., 2019. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/77273>
- [9] O. O. Flores, R. A. Cortez y V. I. Rosa, "Sistema telemático de monitoreo de calidad del aire en zonas remo-

- tas, utilizando técnicas IoT y big data: fase I. Estación IoT automatizada para el monitoreo de calidad del aire por contaminantes PM2.5 y PM10”, Universidad Tecnológica San Salvador, San Salvador, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11298/1144>
- [10] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, “Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. Manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire”, oct. 2010. [En línea]. Disponible en: https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Protocolo_Calidad_del_Aire_-_Manual_Disenio.pdf (accedido: mar. 10, 2024).
- [11] Y. Wang, J. Li, H. Jing, Q. Zhang, J. Jiang y P. Biswas, “Laboratory evaluation and calibration of three low-cost particle sensors for particulate matter measurement”, *Aerosol Sci Technol*, vol. 49, n.º 11, pp. 1063-1077, oct., 2015, doi: [10.1080/02786826.2015.1100710](https://doi.org/10.1080/02786826.2015.1100710).
- [12] A. Clements y R. Vanderpool. (2019). Seminario web de herramientas y recursos de la EPA – FRM/FEM y sensores: Estrategias complementarias para determinar la calidad del aire ambiental. [Presentación]. Disponible en: https://espanol.epa.gov/system/files/documents/2021-10/102821-05p_10-15-2021-spanish-y1010-082521-frm-and-air-sensors_dec-2019-tools-webinar_508-tagged-1.pdf
- [13] K. K. Johnson, M. H. Bergin, A. G. Russell y G. S. W. Hagler, “Field Test of Several Low-Cost Particulate Matter Sensors in High and Low Concentration Urban Environments”, *Aerosol Air Qual. Res.*, vol. 18, n.º 3, pp. 565-578, doi: [10.4209/aaqr.2017.10.0418](https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.10.0418).
- [14] Teledyne API, “Model T640 with NumaView™ Software”, T640 PM Mass Monitor, 2023. <https://www.teledyne-api.com/products/particulate-instruments/t640> (accedido: mar. 27, 2024).
- [15] Aqicn, “Digital universal particle concentration sensor”, PMS7003 series data manual, 2016. <https://aqicn.org/air/sensor/spec/pms7003-english-v2.5.pdf> (accedido: mar. 27, 2024).
- [16] GoTronic, “Digital universal particle concentration sensor”, PMSA003 series data manual, 2016. <https://www.gotronic.fr/pj2-pmsa003-series-data-manual-english-v2-5-2083.pdf> (accedido: mar. 27, 2024).
- [17] Honeywell, “Particulate Matter Sensors”, HPM Series, 2019. <https://sps.honeywell.com/us/en/products/advanced-sensing-technologies/healthcare-sensing/particulate-matter-sensors/hpm-series> (accedido: mar. 27, 2024).
- [18] Sensirion, “Particulate Matter Sensor for Air Quality Monitoring and Control”, Datasheet SPS30, 2020. https://cdn.sparkfun.com/assets/2/d/2/a/6/Sensirion_SPS30_Partuculate_Matter_Sensor_v0.9_D1_1_.pdf (accedido: mar. 10, 2024)
- [19] Panasonic Industry, “SN-GCJA5 Particulate Matter Laser Sensor”. Panasonic.com. <https://na.industrial.panasonic.com/products/sensors/air-quality-gas-flow-sensors/lineup/laser-type-pm-sensor/series/123557/model/123559> (accedido: mar. 27, 2024).
- [20] Environmental Protection Agency (EPA). “Ambient Monitoring Technology Information Center (AMTIC)”. EPA.com. Accedido: mar. 27, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.epa.gov/amtic>
- [21] Environmental Protection Agency (EPA), “List of Designated Reference and Equivalent Methods”, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, Carolina del Norte, fecha de emisión: jun. 15, 2020.
- [22] L. F. Orellana, “Relación entre liderazgo y la motivación al logro de los estudiantes que participan en alguna agrupación estudiantil de las facultades de Ingeniería, Humanidades, Ciencias Jurídicas y Sociales y Ciencias Empresariales”, tesis de magister, Universidad Rafael Landívar, Guatemala de la Asunción, 2015. [En línea]. Disponible en: <http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesiseortiz/2015/05/83/Orellana-Luis.pdf>
- [23] A. C. Bustos, “Efecto de la migración venezolana sobre el desempleo en Colombia: 2012-2019”, proyecto de grado para obtener el título de economista, Fundación Universitaria Los Libertadores, Bogotá, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://repository.libertadores.edu.co/server/api/core/bitstreams/da1a9d16-269e-42b1-98ca-9d446b4070a4/content>
- [24] F. M. J. Bulot *et al.*, “Long-term field comparison of multiple low-cost particulate matter sensors in an outdoor urban environment”, *Sci Rep*, vol. 9, n.º 1, pp. 74-97, may. 2019, doi: [10.1038/s41598-019-43716-3](https://doi.org/10.1038/s41598-019-43716-3).

- [25] G. M. Polanco, “Prueba de Concepto de una Nueva Energía Renovable: La Inercia Térmica Noche-Día”, trabajo fin de máster, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, 2023. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10317/12782>
- [26] H. Li *et al.*, “Evaluation of the Performance of Low-Cost Air Quality Sensors at a High Mountain Station with Complex Meteorological Conditions”, *Atmosphere*, vol. 11, n.º 212, pp. 17 feb, 2020, [doi: 10.3390/atmos11020212](https://doi.org/10.3390/atmos11020212).
- [27] H.-Y. Liu, P. Schneider, R. Haugen y M. Vogt, “Performance Assessment of a Low-Cost PM_{2,5} Sensor for a near Four-Month Period in Oslo, Norway”, *Atmosphere*, vol.10, n.º 41, pp. 19, 2019, [doi: 10.3390/atmos10020041](https://doi.org/10.3390/atmos10020041).
- [28] H. Llinás y C. Rojas, *Estadística descriptiva y distribuciones de probabilidad*. Barranquilla, Colombia: Editorial Universidad del Norte, 2015.

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran que no hay conflicto de interés en la publicación del presente trabajo.

Edición especial

Investigaciones y Soluciones en Ergonomía Ocupacional

Karl Marx dijo: “El trabajo dignifica al hombre”, y el trabajo es una necesidad para todas las personas; pero ese trabajo, además de ser digno, debe ser libre de todo tipo de riesgos. Por eso, autoridades laborales en México (Secretaría del Trabajo y Previsión Social, STPS) han atendido esa parte, dando un paso muy importante al publicar en el año 2018 en el Diario Oficial de la Federación la Norma Oficial Mexicana NOM 036-1 STPS 2018, Factores de riesgo ergonómico en el Trabajo-Identificación, análisis, prevención y control. Parte 1: Manejo manual de cargas. Esta Secretaría está trabajando ya con la segunda parte de esta norma referente a los factores de riesgo por el trabajo repetitivo.

Ante este escenario, es importante realizar investigación de todos los aspectos ergonómicos que rodean el trabajo humano, principalmente los aspectos físicos, cognitivos y psicosociales, ya sea que el trabajo se realice de manera formal o informal, en un taller, una ofi-

cina, una línea de producción en la construcción, en el campo agrícola, una mina o en nuestros hogares.

Este número especial trata de llevar a los interesados en ergonomía los avances en investigación y casos de estudio que se tienen en los centros de investigación y de enseñanza superior, dando conocimiento nuevo o soluciones a problemas que puedan ser causa de lesiones incapacitantes y días perdidos en el ámbito laboral con consecuencias negativas para nuestros compañeros trabajadores.

Dra. Aidé Aracely Maldonado Macías
Dra. Mónica Gabriela Gutiérrez Hernández
Dra. Karla Patricia Lucero Duarte
Dr. Enrique Javier de la Vega Bustillos
Dr. Juan Luis Hernández Arellano
Editores invitados

Organización del tiempo durante el teletrabajo como riesgo psicosocial en docentes

Teleworking: College teachers' organization of time as a psychosocial risk

Mónica Gabriela Gutiérrez-Hernández^{1,2}  [0000-0003-4866-4933](#), Aidé Aracely Maldonado-Macías¹ 

 [0000-0002-4959-161X](#), Beatriz Sibaja Terán³  [0000-0002-0514-6119](#)

¹Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura, México

²Tecnológico Nacional de México campus Ciudad Juárez, Departamento de Ingeniería Industrial y Logística, México

³Instituto Politécnico Nacional, ENMH, Departamento de Formación Profesional Genérica, Ciudad de México, México

RESUMEN

La docencia es una profesión demandante debido a la incorporación de nuevas tecnologías de información y comunicación en un competitivo mercado global. Además, a partir de la pandemia de COVID-19 dicha profesión se transformó en teletrabajo docente. Consecuentemente, los docentes han invertido y organizado su tiempo para desarrollar las habilidades requeridas, representando un factor de riesgo psicosocial del trabajo. Los objetivos de la investigación son determinar el nivel de riesgo psicosocial por la organización del tiempo de trabajo en docentes del TecNM / campus Ciudad Juárez y comparar su prevalencia por sexo, grado académico y nombramiento. Se aplicó la guía de referencia III de la NOM-035, en una muestra no probabilística de 202 docentes, se depuró la base de datos y se comparó su prevalencia por sexo, grado académico y tipo de nombramiento realizando pruebas de diferencia de proporciones. Como resultados, un 62 % de los docentes presentan niveles elevados del riesgo. No se encontraron diferencias significativas por sexo, pero existen diferencias significativas por tipos de nombramiento y grado académico. En conclusión, la docencia se ha visto afectada significativamente por la organización del tiempo de trabajo y se requieren estrategias para mitigar este riesgo psicosocial que puede afectar la salud de los docentes y el proceso enseñanza-aprendizaje.

PALABRAS CLAVE: teletrabajo; riesgo; docentes; COVID-19.

ABSTRACT

Teaching is a demanding profession due to the incorporation of new information and communication technologies in a competitive global market. In addition, during the COVID-19 pandemic, it was transformed into teaching telework. Consequently, teachers have invested and organized their time to develop the required skills, representing a psychosocial risk factor of work. The objectives of the research are to determine the level of psychosocial risk due to the organization of working time in teachers of TecNM / campus Ciudad Juárez and to compare its prevalence by sex, academic degree, and contractual relationship. Reference guide III of NOM-035 was applied in a non-probabilistic sample of 202 teachers, the database was filtered and its prevalence was compared by performing proportional difference tests. As a result, 62% of teachers have high levels of risk. No significant differences were found by sex, but there are significant differences by type of contractual relationship and academic degree. In conclusion, teaching has been significantly affected by the organization of working time and strategies are required to mitigate this psychosocial risk that can affect teachers' health and the teaching-learning process.

KEYWORDS: teleworking; risk; teachers; COVID-19.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Aidé Aracely Maldonado-Macías.
INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez,
Instituto de Ingeniería y Tecnología.
DIRECCIÓN: Av. del Charro núm. 450 norte, col. Partido Romero,
C. P. 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.
CORREO ELECTRÓNICO: amaldona@uacj.mx

Fecha de recepción: 10 de octubre de 2023. **Fecha de aceptación:** 23 de noviembre de 2023. **Fecha de publicación:** 1 de enero de 2024.



I. INTRODUCCIÓN

Si bien es cierto que antes de 2019 los países de la Unión Europea y Estados Unidos ya desarrollaban una variedad de trabajos virtualmente o combinados, la pandemia de COVID-19 representó un cambio drástico en el estilo de vida. Esta situación implicó la migración repentina y forzada de trabajadores y estudiantes de todos los niveles educativos al teletrabajo. Por ello, varias organizaciones a nivel mundial estudian esta modalidad para conocer sus ventajas, desventajas y el impacto en sus indicadores de desempeño laboral, académico u organizacional. Así, Eurofound, junto con la Organización Internacional del Trabajo (OIT), afirman que el teletrabajo surge cuando las tecnologías de la información y la comunicación se utilizan para trabajar fuera de las instalaciones del empleador ^[1]. Esta investigación está interesada en el estudio de la organización del tiempo durante el teletrabajo como un factor psicosocial que puede afectar el equilibrio trabajo-familia en docentes de educación superior durante la contingencia de salud en una muestra de docentes del estado de Chihuahua, México.

En este estado, durante 2021 hubo una matrícula de 132 718 estudiantes en el nivel superior atendidos por 11 518 docentes ^[2]. De estos, 350 estaban adscritos al Tecnológico Nacional de México (TecNM), campus Ciudad Juárez, reveló Daniel Rentería, Jefe del Departamento de Planeación de este instituto, en una entrevista personal en 2021. Durante la pandemia, maestros, estudiantes y administradores enfrentaron varios obstáculos para teletrabajar, destacando entre los principales que para ese año solo el 63.7 % de los hogares tenía acceso a internet —cuya calidad no era la más adecuada— y el 45.3 % contaba con una computadora en casa ^[3]. Asimismo, profesores y estudiantes no tuvieron la oportunidad de formarse previamente ^[4]. Como resultado, se observó un aumento en el tiempo y los esfuerzos requeridos para el desarrollo de la enseñanza en línea, lo que generó nuevos riesgos laborales, tanto físicos como mentales ^[5], redujo el tiempo dedicado al cuidado e interacción entre los miembros de la familia y dio lugar a un desequilibrio en la organización del tiempo trabajo-familia como factores de riesgo psicosocial en el teletrabajo ^[6].

Además, la OIT puntualizó que las mujeres son más propensas a presentar riesgos psicosociales y estrés ^[1], ^[7]. También se ha considerado que el grado académico de los docentes, el tipo de contrato laboral y la antigüedad como docente contribuyen a dicho estrés ^[8]. Por lo

tanto, diversos aspectos individuales y laborales pueden afectar e influir en los niveles de riesgo psicosocial en el teletrabajo y esta investigación presenta un análisis descriptivo del mismo derivado de la organización del trabajo durante la pandemia de COVID-19 en docentes de educación superior, distinguiendo sexo, grado académico y tipo de nombramiento.

II. METODOLOGÍA

La metodología se desarrolló en tres etapas en las que se aplicó la guía de referencia III en una muestra no probabilística de 202 docentes, se depuró la base de datos y se comparó su prevalencia por sexo, grado académico y tipo de nombramiento, realizando pruebas de diferencia de proporciones.

ETAPA 1. TRABAJO DE CAMPO

Participantes

El cuestionario se aplicó a toda la planta laboral docente del Tecnológico Nacional de México campus Ciudad Juárez. Se obtuvo una muestra no probabilística de 202 participantes de un total de 350 docentes que conformaban toda la planta docente. Se les compartió de manera electrónica el consentimiento informado y se contestó de manera voluntaria y de manera anónima. La muestra está compuesta por docentes de todas las carreras que se ofrecen en la institución a nivel licenciatura y posgrado.

Instrumentos

Para la recolección de datos se utilizó el instrumento de la Guía de Referencia III propuesto en la Norma Oficial Mexicana NOM-035-STPS-2018, el cual tiene 72 ítems agrupados en diez dominios y que a su vez conforman cinco categorías principales: ambiente de trabajo, factores propios de la actividad, organización del tiempo de trabajo, liderazgo y relaciones en el trabajo y entorno organizacional ^[7]. Para este estudio únicamente se utilizaron los seis ítems que conforman la categoría organización del tiempo de trabajo.

Los ítems son tipo Likert con una escala de cinco puntos, donde: Nunca = 0, Casi nunca = 1, Algunas veces = 2, Casi siempre = 3 y Siempre = 4. Una vez que se asigna a cada respuesta su valor correspondiente, se obtiene la sumatoria de las respuestas de los seis ítems para obtener el nivel de riesgo psicosocial de la categoría.

Los puntos de corte para evaluar el nivel de riesgo correspondiente a la organización del tiempo de trabajo son los siguientes:

- $C_{cat} < 5$ = nulo o despreciable
- $5 \leq C_{cat} < 7$ = bajo
- $7 \leq C_{cat} < 10$ = medio
- $10 \leq C_{cat} < 13$ = alto
- $C_{cat} \geq 13$ = muy alto [7].

Recopilación de datos

El instrumento se elaboró en Google Forms® y se envió por correo electrónico a toda la planta docente del TecNM campus Ciudad Juárez durante el periodo abril-agosto 2021 que incluye a 350 empleados. Es importante mencionar que en este periodo aún se desarrollaban las labores a través del teletrabajo derivado de la pandemia de COVID-19.

ETAPA 2. BASE DE DATOS

Para el análisis de la base de datos se utilizó el software IBM SPSS Statistics® v26. Se calificaron las respuestas obtenidas de acuerdo con los valores de la escala tipo Likert propuesta en la NOM-035-STPS-2018. Mediante un diagrama de caja y bigotes se corroboró que estuviera libre tanto de valores atípicos. Asimismo, aquellos valores perdidos encontrados se remplazarían por el valor por la mediana ya que se trata de datos ordinales [9]. Adicionalmente se calculó la mediana y rangos intercuartílicos para apreciar el comportamiento de los datos.

ETAPA 3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Primeramente, se calculó el nivel de riesgo psicosocial derivado de la organización del tiempo de trabajo de manera general. Posteriormente se graficaron los resultados obtenidos para el nivel de riesgo. Además, se realizó una comparación de la prevalencia del riesgo psicosocial por sexo, grado académico y el tipo de nombramiento de los docentes participantes mediante pruebas de proporciones para muestras independientes con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

RESULTADOS ETAPA 1. TRABAJO DE CAMPO

El cuestionario tuvo una tasa de respuesta media, con un 57.7 % de la planta docente. En la [Tabla 1](#) se observa

que la mayoría de los docentes tienen una edad entre los 30 y 59 años (79 %), están casados (66 %). Por otro lado, en lo referente al trabajo se observa que el 57 % de ellas tienen base, aunque el tipo de nombramiento es de asignatura (64 %).

TABLA 1
CARACTERÍSTICAS SOCIODEMOGRÁFICAS DE LA MUESTRA

MUESTRA $n = 202$ DOCENTES			
EDAD		ESTADO CIVIL	
20 - 29	20	Soltero	51
30 - 39	52	Casado	133
40 - 49	49	Divorciado	14
50 - 59	58	Viudo	4
≥ 60	23		
NOMBRAMIENTO			
Base	91	Tiempo completo	50
Honorarios	87	Medio tiempo	22
Mixto	24	Asignatura	130

RESULTADOS ETAPA 2. BASE DE DATOS

En la depuración de la base de datos no se encontraron valores perdidos o atípicos. La [Tabla 2](#) muestra la mediana y rango intercuartílico (RI) de cada pregunta en donde se puede apreciar que las preguntas 17 y 20 presentan las medianas más altas, es decir que la mayoría de los docentes casi siempre trabajan horas extras por semana y/o deben atender asuntos de trabajo fuera de su horario laboral. Así mismo, el rango intercuartílico como indicador de la dispersión de los datos y tomando en cuenta los valores menores, las preguntas 20 a la 22 son las que presentan mayor consenso en las respuestas de los participantes.

TABLA 2
COMPORTAMIENTO DE LOS DATOS

PREGUNTA	MEDIANA	RI
17. Trabajo horas extra más de tres veces a la semana.	2.6471	2.3339
18. Mi trabajo me exige laborar en días de descanso, festivos o fines de semana.	2.2326	2.4580
19. Considero que el tiempo en el trabajo es mucho y perjudica mis actividades familiares o personales.	1.6667	2.26173
20. Debo atender asuntos de trabajo cuando estoy en casa.	2.5410	1.8247
21. Pienso en las actividades familiares o personales cuando estoy en mi trabajo.	1.7823	1.8221
22. Pienso que mis responsabilidades familiares afectan mi trabajo.	0.9632	1.7990

RESULTADOS ETAPA 3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

De acuerdo con el procedimiento de la norma 035 y los valores de corte establecidos, se calculó el nivel de riesgo psicosocial al que están expuestos los docentes respecto a la organización del tiempo de trabajo [10]. La Figura 1 muestra que un 62 % de ellos presentan un nivel de riesgo elevado. Dichos resultados coinciden con autores que refieren alta exposición a niveles de riesgo psicosocial específicamente en la docencia [6], [11], [12].

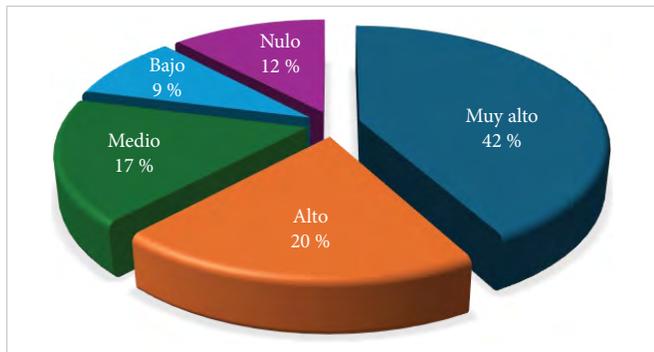


Figura 1. Nivel de riesgo psicosocial derivado de la organización del trabajo.

Asimismo, algunos autores refieren que las mujeres son más propensas a sufrir niveles elevados de riesgo [6], [7], [12]. Para probar el comportamiento del nivel de riesgo de acuerdo con el sexo, primeramente se realizó una gráfica de barras (Figura 2). Adicionalmente, para determinar la prevalencia del riesgo entre los docentes se hizo la prueba de proporciones para dos muestras independientes con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$. En la Tabla 3 se observa que no existe evidencia estadística que determine diferencias significativas de prevalencia del riesgo entre ambos sexos por nivel de riesgo, al obtener valor P superiores a 0.05. Para este análisis se utilizó Minitab® v.17.

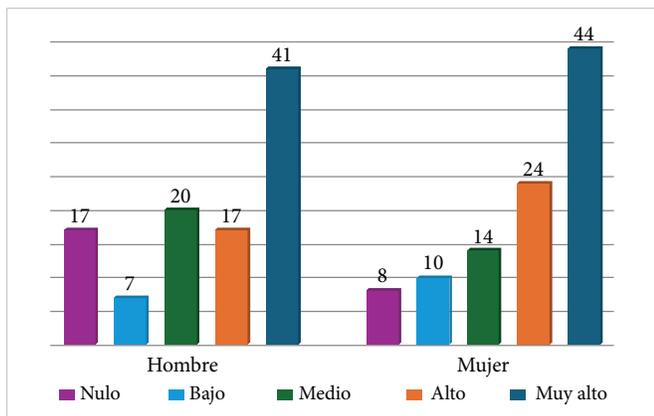


Figura 2. Riesgo psicosocial por sexo.

TABLA 3
COMPARACIÓN DE PROPORCIONES POR SEXO

NIVEL DE RIESGO	SEXO*	EVENTOS	MUESTRA	VALOR P
Muy alto	H	41	102	0.584
	M	44	100	
Alto	H	17	102	0.195
	M	24	100	
Medio	H	20	102	0.287
	M	14	100	
Bajo	H	7	102	0.422
	M	10	100	
Nulo o discriminante	H	17	102	0.061
	M	8	100	

*H: hombre, M: mujer.

Asimismo, se realizó la prueba de estadística no paramétrica para comparar medianas de Mann-Whitney debido a que los datos incumplen el supuesto de normalidad, con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$. En dicha prueba se obtuvo una mediana global de 11, indicando un nivel de riesgo alto de acuerdo con los puntos de corte propuestos por la norma (Figura 3), mientras que la Tabla 4 muestra el resumen del contraste de hipótesis por sexo.

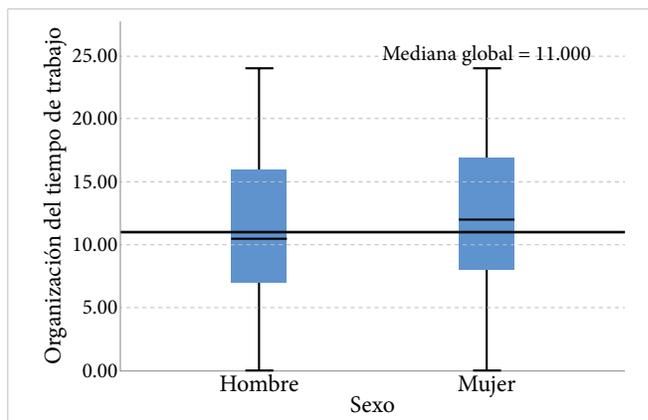


Figura 3. Prueba de medianas para muestras independientes.

De acuerdo con los resultados, se puede afirmar que en la muestra de docentes analizada no existen diferencias significativas entre las medianas en ningunos de los niveles de riesgo psicosocial por la organización del tiempo de trabajo al que están expuestos los hombres y mujeres docentes (Tabla 4).

TABLA 4
RESUMEN DE LOS CONTRASTES DE HIPÓTESIS

	HIPÓTESIS NULA	PRUEBA	SIG.	DECISIÓN
1	Las medianas de las calificaciones obtenidas por la categoría son las mismas en hombres y mujeres.	Prueba de la mediana para muestras independientes	0.576*	Conserve la hipótesis nula.
2	La distribución de las calificaciones obtenidas por la categoría es la misma en hombres y mujeres.	Prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes	0.311	Conserve la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significancia $\alpha = 0.05$. *Significación asintótica corregida de continuidad de Yates.

Por otro lado, en un estudio se afirma que los docentes con doctorado experimentan menor nivel de riesgo psicosocial, situación se atribuye a varios aspectos entre los que destaca el dominio de la materia, así como mayor control del grupo [8]. Con base en ello, resulta importante corroborar la existencia de diferencias significativas por nivel de riesgo de acuerdo con el grado académico del docente. En este sentido, y al tener una muestra suficientemente grande ($n \geq 80$), fue posible realizar las pruebas de proporciones por nivel de riesgo y grado académico del docente.

De los 202 docentes que participaron en el estudio: 85 tienen licenciatura (L), 103 maestría (M) y 14 doctorado (D). En dichas pruebas, el nivel de riesgo psicosocial bajo es el único en donde se encontraron diferencias significativas entre las proporciones dadas por grado académico (Tabla 5), es decir, la prevalencia del riesgo en el resto de los niveles estudiados (muy alto, alto, medio y nulo) es igual en los docentes de cualquier grado académico considerado en el estudio.

Así, se realizaron pruebas de proporciones unilaterales en el nivel bajo con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$. Los resultados muestran suficiente evidencia estadística para afirmar que la prevalencia de docentes con nivel de riesgo psicosocial bajo en cuanto a la organización del trabajo es superior en los docentes de licenciatura que en los de maestría (valor $P = 0.016$) y doctorado (valor $P = 0.000$). De igual forma, la prevalencia de este nivel

de riesgo en docentes con maestría es superior a la prevalencia en docentes con doctorado.

TABLA 5
PRUEBAS DE PROPORCIONES POR GRADO ACADÉMICO Y NIVEL DE RIESGO PSICOSOCIAL

NIVEL DE RIESGO	GA*	EVENTOS	P ≠ P	VALOR P
Muy alto	L	34	L - M	0.555
	M	46	M - D	0.514
	D	5	L - D	0.757
Alto	L	14	L - M	0.238
	M	24	M - D	0.873
	D	3	L - D	0.671
Medio	L	14	L - M	0.862
	M	16	M - D	0.300
	D	4	L - D	0.342
Bajo	L	12	L - M	0.032**
	M	5	M - D	0.022**
	D	0	L - D	0.000**
Nulo o discriminante	L	11	L - M	0.789
	M	12	M - D	0.790
	D	2	L - D	0.893

*Grado académico del docente. **Estos valores fueron significantes en las pruebas.

Finalmente, se llevaron a cabo las pruebas de proporciones por nivel de riesgo de acuerdo con el tipo de nombramiento (contrato) de los docentes: base (B), honorarios (H) o mixto (M). De los 202 docentes, 91 tenían base (contrato permanente), 87 eran de honorarios (contrato temporal de seis meses) y 24 de ellos tenían contratos mixtos (algunas horas de base y otras por honorarios).

La Tabla 6 muestra los resultados obtenidos de dichas pruebas destacando que solo en el nivel de riesgo muy alto las proporciones de los docentes de honorarios y los docentes de contrato mixto presentan una diferencia significativa con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Por esta razón, se realizó una segunda prueba de proporciones bajo el supuesto $P_M \geq P_H$ con el mismo nivel de significancia estadística. Los resultados muestran evidencia suficiente para afirmar que la prevalencia de riesgo psicosocial muy alto en docentes por contrato mixto es superior a aquella presentada en docentes por honorarios.

TABLA 6
PRUEBAS DE PROPORCIONES POR TIPO DE NOMBRAMIENTO Y NIVEL DE RIESGO PSICOSOCIAL

NIVEL DE RIESGO	*C	EVENTOS	P ≠ P	VALOR P
Muy alto	B	39	B - H	0.407
	H	32	B - M	0.172
	M	14	H - M	0.003**
Alto	B	17	B - H	0.600
	H	19	B - M	0.816
	M	5	H - M	0.915
Medio	B	14	B - H	0.593
	H	16	B - M	0.880
	M	4	H - M	0.842
Bajo	B	7	B - H	0.537
	H	9	B - M	0.476
	M	1	H - M	0.237
Nulo o discriminante	B	14	B - H	0.598
	H	11	B - M	0.000**
	M	0	H - M	0.000**

*C: tipo de nombramiento o contrato, B: base, H: honorarios, M: mixto.
**Estos valores fueron significantes en las pruebas.

IV. CONCLUSIONES

El objetivo de este estudio, que fue identificar el nivel de riesgo psicosocial al que están expuestos los docentes de nivel superior, se cumplió al determinar el nivel de riesgo total en la muestra estudiada. Los resultados muestran que la mayoría de los docentes presentan un nivel elevado de riesgo psicosocial (62 %), principalmente por la necesidad de trabajar horas extra más de tres veces a la semana y tener que atender asuntos del trabajo fuera del horario laboral (mientras está en su casa).

En este sentido, y considerando los datos sociodemográficos de la muestra, se observa que 87 de los docentes tiene contrato por honorarios y 130 de asignatura. Es decir, que las horas que se estipulan en el contrato corresponden a las horas frente a grupo, teniendo que disponer de su tiempo libre para preparar la clase, revisar trabajos u otras actividades propias de la labor docente.

Por otro lado, en la muestra estudiada se presentan comportamientos relevantes. Entre los que se destaca que no existen diferencias significativas en el nivel de riesgo de trabajo entre hombres y mujeres. Por otro lado, la prevalencia del riesgo por grado académico del docente pre-

senta diferencias significativas solo en el nivel de riesgo bajo. Es decir, la prevalencia de este nivel de riesgo entre los docentes con licenciatura, maestría y doctorado son diferentes entre sí; por lo que sería de utilidad analizar una muestra más grande y estudiar otros aspectos del trabajo que pueden determinar estas diferencias.

Mientras que, al hacer la comparación por tipo de nombramiento o contrato, todas las pruebas realizadas presentaron diferencias no significativas entre las proporciones (prevalencias) por nivel de riesgo; excepto en el nivel de riesgo psicosocial muy alto donde se encontraron diferencias en la prevalencia entre los docentes cuyos nombramientos son de honorarios y mixtos con un nivel de significancia del 95 %. Al realizar la prueba de proporciones unilateral, se pudo comprobar que la proporción de docentes con contrato mixto que presenta un nivel de riesgo muy alto es superior a aquella de docentes por honorarios. Entre las posibles explicaciones que se pueden dar a dicho resultado se encuentra que el grado de exigencia que implica cumplir con las condiciones laborales de ambos contratos está afectando el equilibrio del tiempo de trabajo-familia.

Con base en los resultados obtenidos se puede concluir que la docencia se ha visto afectada significativamente por la organización del tiempo de trabajo y se requieren estrategias para mitigar este riesgo psicosocial que puede afectar la salud del docente y el proceso enseñanza-aprendizaje. Entre dichas estrategias se debe incluir la modificación de las políticas y reglamentos que rigen la docencia, especialmente en los contratos temporales o permanentes de asignatura. Además, es necesario concientizar a los docentes sobre los riesgos psicosociales a los que se encuentran expuestos, así como las actividades recomendadas para su prevención o reducción.

REFERENCIAS

- [1] Eurofound/OIT, “Trabajar en cualquier momento y en cualquier lugar: consecuencias en el ámbito laboral”, Ginebra, Informe conjunto OIT-Eurofound, 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_protect/---protrav/---travail/documents/publication/wcms_712531.pdf
- [2] ANUIES, “Anuarios Estadísticos de Educación Superior”. <http://www.anui.es/informacion-y-servicios/informacion-estadistica-de-educacion-superior/anuario-estadistico-de-educacion-superior> (accedido: may. 23, 2023).

- [3] Gobierno de México, “Protocolo para prevenir, atender y erradicar el hostigamiento laboral, acoso laboral y maltrato laboral”, 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.sep.gob.mx/comunicacioninterna/protocolo_prevenir_acoso_laboral.pdf
- [4] T. J. Brito-Cruz, C. C. Lara-Gamboa, D. A. Morales-Diego, M. C. Sánchez-May, A. K. Perez-Jaimes y Á. E. Torres-Zapata, “Aproximación del teletrabajo en el ámbito universitario”, *INVURNUS*, vol. 16, n.º 1, dic. 2021, doi: 10.46588/invurnus.v16i1.43.
- [5] A. Selvaraj, V. Radhin, N. Ka, N. Benson y A. J. Mathew, “Effect of pandemic based online education on teaching and learning system,” *Int. J. Educ. Dev.*, vol. 85, p. 102444, sept. 2021, doi: 10.1016/j.ijedudev.2021.102444.
- [6] C. G. Alvites-Huamani, “Estrés docente y factores psicosociales en docentes de Latinoamérica, Norteamérica y Europa”, *Propós. Represent.*, vol. 7, n.º 3, pp. 141-159, oct. 2019, doi: 10.20511/pyr2019.v7n3.393.
- [7] OIT, *SOLVE: Integrando la promoción de la salud a las políticas de SST en el lugar de trabajo*. Ginebra: Oficina Internacional del Trabajo, 2012. [En línea]. Disponible en: <https://docer.com.ar/doc/n08es5e>
- [8] J. A. Domínguez, “Riesgo psicosocial en la Universidad: estresores propios del docente universitario”, *Rev. Digit. Salud Secur. en el Trab.*, n.º 2, pp. 1-38, 2009.
- [9] IBM, “IBM SPSS - Valores perdidos 26”, IBM Corporation, Estados Unidos, 2019. Accedido: feb. 7, 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.ibm.com/docs/en/SSLVMB_26.0.0/pdf/es/IBM_SPSS_Missing-Values.pdf
- [10] Secretaría del Trabajo y Previsión Social. (2018, nov. 23). *Norma Oficial Mexicana NOM-035-STPS-2018, Factores de riesgo psicosocial en el trabajo-Identificación, análisis y prevención*. [En línea]. Disponible en: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5541828&fecha=23/10/2018#gsc.tab=0
- [11] R. A. Chavarría, F. J. Colunga, J. Loría y K. Peláez, “Síndrome de *burnout* en médicos docentes de un hospital de 2.º nivel en México”, *Educ. Médica*, vol. 18, n.º 4, pp. 254-261, 2017, doi: 10.1016/j.edumed.2016.09.001.
- [12] L. M. Estupiñán, H. V. Guerrero y E. A. Jiménez, “Condiciones de Seguridad y Salud en el Trabajo de los Teletrabajadores: Revisión Sistemática”, *Pensam. Am.*, vol. 12, n.º 23, pp. 94-104, en. 2019, doi: 10.21803/pensam.v12i22.249.

RECONOCIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) a través de la beca posdoctoral con CVU: 482517.

Integración y validación de una encuesta para evaluar cultura corporativa y productividad en trabajadores administrativos

Integration and validation of a survey to assess the corporative culture and productivity among administrative workers

Adriana Camargo Gómez¹✉ , Juan Luis Hernández Arellano² , Ángel Fabián Campoya Morales² 

¹ Doctorado en Administración y Gestión Empresarial, Universidad del Centro del Bajío, México

² Doctorado en Ciencias de la Ingeniería Avanzada, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México

RESUMEN

Hoy en día, el factor humano ha tomado relevancia dentro de la organización. Los seres humanos son individuos con características diferentes y únicas que constituyen al elemento diferenciador y esta es la más importante innovación en el ramo público organizacional del siglo XXI para generar ventaja competitiva. Dentro de los estudios organizacionales la *cultura* es uno de los paradigmas al que pocas empresas suelen dedicarle tiempo, es un campo poco explorado y de grandes beneficios si es correctamente aplicado y orientado. El objetivo de la investigación es integrar y validar una encuesta que analice y relacione los constructos *cultura corporativa* y *productividad*, tomando como caso de estudio los servidores de las dependencias públicas recaudadoras del estado de Guanajuato, México. El diseño de la investigación fue cuantitativa, no experimental, transversal y de alcance correlacional, utilizando como técnica de recolección de datos un instrumento tipo cuestionario con escala Likert autoadministrado. El análisis de confiabilidad y correlaciones mostraron niveles de alfa de Cronbach y correlaciones considerados como altos. Por lo tanto, el instrumento se considera confiable y ha sido validado para su aplicación.

PALABRAS CLAVE: cultura corporativa; desarrollo organizacional; productividad; servidor público y recaudador.

ABSTRACT

Nowadays, the human factor has become relevant within the organization. Human beings are individuals with different and unique characteristics that constitute the differentiating element, and this is the most important innovation in the organizational public field of the 21st century to generate competitive advantage. Within organizational studies, "culture" is one of the paradigms to which few companies usually dedicate time, it is a little explored field and benefits if it is correctly applied and oriented. The objective of the research is to integrate and validate a survey that analyzes and relates the constructs of *corporate culture* and *productivity*, taking as a case study the servers of public collection agencies in the state of Guanajuato, Mexico. The research design was quantitative, non-experimental, cross-sectional and correlational in scope, using as a data collection technique a questionnaire-type instrument with a self-administered Likert scale. The reliability and correlation analysis showed Cronbach's alpha levels and correlations considered to be high. Therefore, the instrument is considered reliable and has been validated for its application.

KEYWORDS: corporate culture; productivity; public servant and collector; organizational development.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Adriana Camargo Gómez.

INSTITUCIÓN: Universidad del Centro del Bajío.

DIRECCIÓN: Antonio García Cubas núm. 704, col. Fovissste, C. P. 38020, Celaya, Guanajuato.

CORREO ELECTRÓNICO: 23442@uniceba.edu.mx

Fecha de recepción: 18 de agosto de 2023. **Fecha de aceptación:** 30 de noviembre de 2023. **Fecha de publicación:** 30 de enero de 2024.



I. INTRODUCCIÓN

Las organizaciones y los individuos son similares en que ambos tienen características individuales, principios y valores, así como un comportamiento colectivo que se ve influenciado por la interacción entre sus miembros. Esta conducta colectiva da forma al carácter de la organización o del individuo ^[1]. La cultura organizacional es un factor clave para el éxito de las organizaciones. Estas, cuando poseen una cultura fuerte y bien definida, suelen tener una mayor productividad, un menor índice de rotación de personal y una mayor satisfacción de los empleados. Por ello, es importante que se comprenda la importancia de este aspecto y trabajen para crear una cultura positiva ^[2]. Por esto, actualmente el factor humano en el sector organizacional ha cobrado una importancia significativa en la que los colaboradores aportan un valor de manera intangible, mediante el cual se genera una esencia única e irrepetible como ventaja competitiva.

La cultura corporativa es un tema sustancial de estudio en las organizaciones. Los enfoques para estudiar la cultura corporativa varían desde las manifestaciones culturales, como los valores, creencias, ritos e historias, hasta el rol del gerente como transmisor de la cultura organizacional. Comprender estos procedimientos es fundamental para la sostenibilidad organizacional ^[3].

Aunado a ello y con la llegada del siglo XXI, los efectos de la globalización, el auge de las tecnologías de información y comunicación (TIC), las tendencias e irregularidades económicas a escala internacional, la presencia de mercados cada vez más exigentes, el incremento de la competencia y las mediaciones desde el punto de vista político causan cada vez más un impacto significativo en la cultura de las organizaciones ^[4]. Desde el enfoque de la organización, el concepto de cultura se desarrolla con el aporte de la escuela de administración de las relaciones humanas y de experimentos desarrollados por Elton Mayo ^[5]. Entre los años setenta y ochenta, la cultura corporativa adquirió mayor relevancia y complejidad debido al alcance que esta tiene en las dimensiones económica y social ^[6].

La cultura corporativa tiene sus antecedentes en la primera mitad del siglo XX; cobró auge alrededor de la década del setenta y continúa en ascenso. Surgió por la necesidad de romper con los paradigmas tradicionales que explican la realidad organizacional, agotados y con

insuficiencias para demostrar el lugar de las dinámicas internas de grupos e individuos en el éxito laboral ^[7], a través de la implementación de estrategias organizacionales, tomando un enfoque de administración centrado en las personas.

Se ha considerado que México es el país que dedica más horas laborales que cualquier otro de la región al trabajo, pero también el que registra un índice de productividad mucho menor al promedio y no hay relación con las horas que los mexicanos dedican a las labores que les generan ingresos ^[8]. Aunado a ello, y conforme a los datos de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), los mexicanos trabajan 43 horas por semana, es decir, 2225 horas por año, 480 horas más que el promedio estándar; unas 440 horas más que en Estados Unidos y 862 más que en Alemania. En contraste, México es uno de los países miembros de la OCDE que tiene uno de los salarios mínimos más bajos, siendo el ingreso casi 7000 pesos menos que en Uruguay, el país de mejor ingreso en Latinoamérica ^[8].

Recientemente se reveló que un profesionista en México gana entre 8000 a 10 000 pesos mensuales, mientras que un comerciante informal obtiene hasta 15 000. Debido a esto, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) reporta una tasa de informalidad superior al 57 %.

Además, se estima que una de las principales motivaciones para una productividad laboral efectiva es la cultura fuertemente establecida dentro de la organización ^[9]. En los últimos veinte años, la cultura corporativa ha logrado una importancia gradual en la gestión humana. Esto, gracias a la teoría sistémica, las organizaciones se consideran como sistemas vivos constituidos por personas ^[10].

Además, se recomienda considerar que la nueva cultura corporativa es un cambio que se está gestando en muchas organizaciones y como tal requiere de tiempo para su consolidación, por lo que no es factible dar un salto brusco en su implementación, sino un conjunto de acciones constantes en una misma dirección ^[11]. Las culturas pueden mantenerse estables durante un cierto periodo de tiempo, pero nunca estáticas. La empresa actual no debe esperar a que las crisis y desafíos la obliguen a cambiar, sino que es ella misma debe tomar conciencia de la necesidad del cambio y emprender las acciones necesarias para efectuarlo.

Con base en lo anteriormente descrito, el objetivo de este estudio es integrar y validar una encuesta que analice y relacione los constructos *cultura corporativa* y *productividad*, tomando como caso de estudio los servidores de las dependencias públicas recaudadoras en el estado de Guanajuato, México. Como objetivos específicos se tienen los siguientes: identificar instrumentos que analicen la cultura corporativa y la productividad, aplicar el instrumento a servidores públicos del gobierno del estado de Guanajuato, México, y analizar los indicadores de consistencia interna del instrumento integrado.

II. METODOLOGÍA

DISEÑO DEL ESTUDIO

El diseño de la presente investigación es no experimental, transversal y correlacional, ya que no se manipularán las variables (*cultura corporativa* y *productividad*), sino que se observarán y se recogerán datos del fenómeno en el contexto laboral actual de los servidores públicos adscritos a los entes públicos recaudadores a nivel estado de Guanajuato. El periodo de recolección de datos fue de los meses de junio y julio de 2022.

PARTICIPANTES

La población de estudio de la presente investigación fue los trabajadores servidores de base de los entes públicos recaudadores a nivel estado de Guanajuato. El número de personas, conforme a listas de asistencia de colaboradores con puesto de base, fue de 402 (cuatrocientos dos) adscritas a estos centros de trabajo, de acuerdo a datos proporcionados por el ente de estudio

INTEGRACIÓN DE LA ENCUESTA

El diseño del instrumento se dividió en dos partes: la primera con *cultura corporativa* como variable independiente y la segunda con *productividad* como variable dependiente.

Para analizar la variable cultura corporativa se eligió un cuestionario basado en las aportaciones de los estudios académicos [12], [13], [14], integrada por 4 dimensiones (sentido de identidad organizacional, filosofía empresarial, compromiso organizacional y bienestar laboral) y un total de 36 ítems.

Por otro lado, el instrumento elegido para analizar la variable productividad es un cuestionario autoadministrado, cuyo diseño se basó también en [12], [13], [14], integrado por 3 dimensiones (administración del tiempo, organización, orden y resolución de tareas en el trabajo, así como conocimiento y formación del colaborador) y un total de 36 ítems.

El instrumento tiene un total de 72 ítems e incluye una escala Likert con 5 niveles de respuesta (Tabla 1).

TABLA 1
ESCALA DE LIKERT DEL INSTRUMENTO DE INVESTIGACIÓN

SIEMPRE	CASI SIEMPRE	ALGUNAS VECES	CASI NUNCA	NUNCA
5	4	3	2	1

ADMINISTRACIÓN DE LA ENCUESTA

El procedimiento para recolectar los datos se describe a continuación. El primer paso fue solicitar la autorización para aplicar el instrumento al personal adscrito al ente público, de manera electrónica con un formulario de Google Forms, el cual fue distribuido utilizando el correo electrónico oficial de cada participante.

ANÁLISIS DE DATOS

Los datos fueron analizados con el Software SPSS V18 (Statistical Package for the Social Sciences). Se determinó el alfa de Cronbach para analizar la confiabilidad de la encuesta, se calculó la chi cuadrada para analizar la dependencia de las variables, se determinó phi de Pearson para analizar la intensidad de la asociación de las variables, la V. de Cramer para analizar el nivel de asociación de las variables, el Coeficiente de Contingencia de Pearson para analizar el nivel de asociación absoluta de las variables, el coeficiente de tau B. Kendall para analizar la correlación significativa de las variables. También, se utilizó un valor de p de 0.05 para todas las pruebas realizadas.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos de la muestra fueron recolectados durante el periodo del 14 de julio al 25 de agosto de 2022, recopilando un total de 320 encuestas contestadas, siendo 100 hombres y 220 mujeres, todos ellos trabajadores con puesto de base.

ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD

De acuerdo con la prueba alfa de Cronbach, el instrumento aplicado, un cuestionario compuesto por 72 ítems, 7 dimensiones y 2 variables, obtuvo un valor de 0.960 en el análisis de todos los ítems. Asimismo, las dimensiones de la cultura corporativa y la productividad tuvieron como resultados 0.957 y 0.882, respectivamente, lo que se interpreta como un instrumento altamente confiable. Los resultados coinciden con los obtenidos por los autores de los estudios [12], [13], [14], cuyos rangos de confiabilidad del alfa de Cronbach oscilaron de 0.754, 0.857 y 0.936, respectivamente. La [Tabla 2](#) muestra el análisis completo realizado a las 7 dimensiones que integra el instrumento.

TABLA 2
ANÁLISIS DE FIABILIDAD DEL INSTRUMENTO APLICADO

ESTADÍSTICA DE FIABILIDAD		
Variable/dimensión	Ítems	Alfa de Cronbach
Encuesta completa	72	0.96
Cultura corporativa		0.957
Sentido de identidad organizacional	10	0.848
Filosofía empresarial	6	0.829
Compromiso organizacional	10	0.875
Bienestar laboral	10	0.892
Productividad		0.882
Administración del tiempo	7	0.305
Organización, orden y resolución de tareas en el trabajo	16	0.846
Conocimiento y formación del colaborador	13	0.829

CHI CUADRADA

En la [Tabla 3](#) se define la correlación de dependencia entre las variables de la presente investigación de cultura corporativa y productividad. Se ha considerado que uno de los beneficios de crear cultura corporativa es la óptima colaboración que lleva a eficiencia en los procesos (productividad) [15]. Por lo tanto, derivado de los resultados en esta investigación de la prueba de chi cuadrada, se concluye que el valor es significativo, determinando que las variables de cultura corporativa y productividad son dependientes.

TABLA 3

PRUEBA DE CORRELACIÓN DE DEPENDENCIA DE CHI CUADRADA

	VALOR	GRADOS DE LIBERTAD	SIGNIFICACIÓN ASINTÓTICA (BILATERAL)
chi cuadrada	6229.14	3712	0.001

PHI DE PEARSON

Por consiguiente, a efecto de comprobar la intensidad de la correlación encontrada en la prueba anterior se realizaron las pruebas de asociación mostradas en la [Tabla 4](#). De los resultados de la phi de Pearson, V. de Cramer y el Coeficiente de Contingencia de Pearson, la fuerza de la correlación entre las variables de la investigación se caracteriza siendo por una fuerte y significativa asociación positiva, por lo que se determina que cultura corporativa tiene una influencia fuertemente significativa sobre la variable productividad.

En el presente estudio se coincide con [16] en que una alta productividad se integra por una estructura organizacional clara, distribución correcta de roles y tareas, ritmos de trabajo, comunicación, temporización de objetivos, espacios y logística, desarrollo tecnológico, adaptación de horarios, espíritu de cooperación, motivación e identidad y compromiso. Y también se asume que una cultura corporativa se construye por cultivo y diseño, es decir, sobre los resultados que se desean mediante el desarrollo de factores del comportamiento, tal como se cita en [17].

TABLA 4
RESULTADOS DE PRUEBAS DE MEDIDAS ASIMÉTRICAS

PRUEBA	VALOR
Phi	4.412
V de Cramer	0.579
Coeficiente de Contingencia	0.975

Además, se realizó la correlación no paramétrica tau B. de Kendall, obteniendo valores significativos en todas las correlaciones analizadas de las dimensiones que integran las variables cultura corporativa y productividad. Se destacan las correlaciones entre sentido de identidad organizacional y compromiso organizacional (0.668), compromiso organizacional y bienestar laboral (0.710), compromiso organizacional y cultura corporativa (0.828) y organización, orden y resolución de tareas en el trabajo y productividad (0.812) con valores mayores de 0.70, lo cual es interpretado como correlaciones muy altas.

La [Tabla 5](#) muestra la correlación de dependencia entre las variables de la presente investigación de cultura corporativa y productividad fue de 0.654, por lo que existe una correlación significativa.

Estos resultados mostrados en la [Tabla 5](#) (análisis de las correlaciones de las variables y sus dimensiones con las pruebas no paramétricas tau B, Kendall y rho de Spearman) coinciden con los obtenidos por ^[17]. Por tanto, se determina que se identifican las dimensiones

de mayor impacto entre las variables de productividad y cultura corporativa dentro un ente público, siendo las dimensiones más destacadas con correlación positiva fuerte, las dimensiones de compromiso organizacional y organización, orden y resolución de tareas en el trabajo. Asimismo, la correlación de significancia positiva muy débil está entre las dimensiones de la administración del tiempo y las de sentido de identidad, filosofía organizacional, compromiso organizacional y bienestar laboral.

TABLA 5
 CORRELACIONES NO PARAMÉTRICAS

ESTADÍSTICA DE FIABILIDAD	VARIABLE 2	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN
Sentido de identidad organizacional	Filosofía empresarial	0.546
	Compromiso organizacional	0.668
	Bienestar laboral	0.624
	Administración del tiempo	0.096
	Organización, orden y resolución de tareas en el trabajo	0.569
	Conocimiento y formación del colaborador	0.541
	Cultura corporativa	0.775
Compromiso organizacional	Bienestar laboral	0.710
	Administración del tiempo	0.089
	Organización, orden y resolución de tareas en el trabajo	0.643
	Conocimiento y formación del colaborador	0.544
	Cultura corporativa	0.828
	Productividad	0.623
Bienestar laboral	Administración del tiempo	0.086
	Organización, orden y resolución de tareas en el trabajo	0.626
	Conocimiento y formación del colaborador	0.534
	Cultura corporativa	0.809
	Productividad	0.605
Administración del tiempo	Organización, orden y resolución de tareas en el trabajo	0.157
	Conocimiento y formación del colaborador	0.116
	Cultura corporativa	0.090
	Productividad	0.269
Organización, orden y resolución de tareas en el trabajo	Conocimiento y formación del colaborador	0.574
	Cultura corporativa	0.662
	Productividad	0.812
Cultura corporativa	Productividad	0.654

IV. CONCLUSIONES

Una vez realizados los análisis alfa de Cronbach, chi cuadrada, phi, V de Cramer y Coeficiente de Contingencia se puede comprobar que el instrumento integrado para evaluar la cultura corporativa y la productividad tiene niveles altos de confiabilidad. Otros autores han obtenido niveles similares, por lo que se asume con un instrumento válido.

El análisis de correlaciones no paramétricas encontró correlaciones significativas para todas las relaciones analizadas, tanto con las variables generales (cultura corporativa y productividad) como para las siete dimensiones analizadas. Esto da la oportunidad de planear estudios causales donde se utilicen ecuaciones estructurales y se ofrezca una mejor comprensión al fenómeno estudiado.

Por tanto, es válido considerar que en este momento los entes públicos deben evolucionar e incrementar su productividad mediante la aplicación de instrumentos de investigación, basados en tendencias humanistas.

REFERENCIAS

- [1] J. A. Velásquez, K. S. Peralta, M. J. Landa, M. Á. Chiscul y J. A. Gamonal, “Cultura Organizacional en las Entidades,” *Revista Conrado*, vol. 18, n.º S1, pp. 159-170, abr. 2022.
- [2] C. Molina, “Análisis de la cultura organizacional empresarial y su mediación en las acciones formativas,” tesis doctoral, Depto. de Educación y Psicología Social, Universidad Pablo de Olavide, Sevilla, 2014.
- [3] A. C. Cújar *et al.*, “Cultura organizacional: evolución en la medición,” *Estudios Gerenciales*, vol. 29, n.º 128, pp. 350-355, 2013, disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=21229786009>.
- [4] D. Mena, “La cultura organizacional, elementos generales, mediaciones e impacto en el desarrollo integral de las instituciones,” *Pensamiento y Gestión*, n.º 46, pp. 11-47, mar. 2020, doi: 10.14482/pege.46.1203.
- [5] A. Pérez, “La cultura organizacional: algunas reflexiones a la luz de los nuevos retos,” *Revista Venezolana de Gerencia*, vol. 14, n.º 46, 2009, disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/290/29011523003.pdf>.
- [6] A. P. Carrillo, “Medición de la cultura organizacional,” *Ciencias Administrativas*, n.º 8, 2016, disponible en: <https://revistas.unlp.edu.ar/CADM/articulo/view/2637>.
- [7] L. Céspedes, “La cultura organizacional y su gestión desde un enfoque estratégico una revisión bibliográfica, análisis y valoraciones,” *PSOCIAL*, vol. 6, n.º 2, pp. 88-97, 2020, disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=672371459008>.
- [8] Y. Sierra, “Horas-nalga,” *Excelsior: Nudo Gordiano*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.excelsior.com.mx/opinion/yuriria-sierra/horas-nalga/1310625> (accedido: ag. 16, 2023).
- [9] F. Quintanilla, *Relaciones Laborales y Productividad. En las Relaciones Humanas 2+2 También son 4, pero no Sabes Cuando*. Bookbaby, 2018.
- [10] M. Llanos, comp., *La cultura organizacional: Eje de acción en la gestión humana*. Ecuador: Universidad ECOTEC, 2016, pp. 126. [En línea]. Disponible en: <https://libros.ecotec.edu.ec/index.php/editorial/catalog/view/53/48/713-1>
- [11] B. Brancato y F. Juri, “¿Puede influir el clima laboral en la productividad?”, 2011. Accedido: ag. 16, 2023. [En línea]. Disponible en: https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/4936/brancato-puedeinfluirclimallabralenlaproductividad.pdf
- [12] I. C. De los Santos, “La cultura organizacional como estrategia de mejora en el desempeño de los colaboradores de las empresas del sector inmobiliario en Lima Metropolitana, en el 2020,” tesis de licenciatura, Fac. de Negocios, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú, 2020. [En línea]. Disponible en: [https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/654548/De losS M.pdf?sequence=3](https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/654548/De%20los%20Santos.pdf?sequence=3)
- [13] F. M. Calero, “La cultura organizacional y el desempeño del personal en las empresas procesadoras de atún, de la provincia de Manabí – Ecuador,” tesis doctoral, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/8968>
- [14] V. E. Páez, “Cultura organizacional y síndrome de burnout en personal de enfermería en área de emergencia del Hospital Abel Gilbert Pontón,” tesis de

- maestría, Universidad César Vallejo, Piura, Perú, 2022. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/83699/Páez_CVE-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [15] K. Smits. *10 Beneficios de una Cultura Organizacional desarrollada - Practical Thinking*. (2019). Accedido: ag. 16, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.practical-thinking.com/wp-content/uploads/2019/01/PTG-benefits-culture.pdf>
- [16] J. Rivero, “Productividad Laboral: ¿Qué es? ¿Y cómo mejorarla al máximo?”. Neetwork Business School. <https://neetwork.com/productividad-laboral-conceptos-mejorar/> (accedido: ag. 16, 2023).
- [17] TEDx Talks. *Mettaliderazgo, creando líderes de alto desempeño* | Roberto Mourey | TEDxBarriodelEncino. (Abr. 25, 2016). Accedido: ag. 16, 2023. [Video en línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=PZuSrV0hsnA>

Las mejores prácticas de colaboración en la cadena de suministro para la gestión de ergonomía

The best collaborative practices in the supply chain for ergonomics management

Iván Francisco Rodríguez-Gámez^{1a, 2} , Aidé Aracely Maldonado-Macías^{1b} ✉ , Arnulfo Aurelio Naranjo Flores² 

¹{^aDoctorado en Ciencias de la Ingeniería Avanzada, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación, ^bDepartamento de Ingeniería Industrial y Manufactura}, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México
²Ingeniería Industrial y de Sistemas, Departamento de Ingeniería Industrial, Instituto Tecnológico de Sonora, México

RESUMEN

La Gestión de Ergonomía (GE) es un concepto en desarrollo y a la vez un proceso que se lleva a cabo en las empresas que integran las Cadenas de Suministro (CS), las cuales buscan evaluarla integral y holísticamente. Así, las prácticas de colaboración (PrC) son clave en la mejora de la eficiencia y productividad, así como en la prevención y evaluación de riesgos ergonómicos. Esta investigación tiene como objetivo determinar las mejores PrC en la CS para la GE. Para ello, se desarrolló una revisión de literatura, posteriormente se diseñó un cuestionario digital con preguntas tipo Likert sobre las PrC que fue respondido por un grupo de expertos de Latinoamérica. Finalmente, se realizó el análisis descriptivo. Como resultados, el cuestionario fue integrado por dos constructos (*proveedores* y *clientes*) y 12 ítems. El análisis de las respuestas de 34 expertos estableció que entre las mejores PrC están el compromiso gerencial, planificar y compartir experiencias de los factores de riesgo, de las acciones preventivas y de control entre las compañías. Así, estas prácticas permitirán la evaluación de la GE mediante el intercambio de información y la generación de conocimiento de ergonomía entre los miembros de la CS pueden contribuir a mejorar el desempeño y bienestar de los empleados.

PALABRAS CLAVE: gestión; ergonomía; cadena de suministro; colaboración.

ABSTRACT

Ergonomics Management (EG) is a concept in development and at the same time a process that is carried out in companies that make up Supply Chains (SC), which seek to evaluate it comprehensively and holistically. Thus, collaborative practices (CPr) are key to improving efficiency and productivity and preventing and evaluating ergonomic risks. This research aims to determine the best CPr in the SC for EM. For this purpose, a literature review was developed. A digital questionnaire with Likert-type questions on CPr was designed and answered by a group of experts from Latin America. Finally, a descriptive analysis was performed. As a result, the questionnaire comprised two constructs (*suppliers* and *customers*) and 12 items. The analysis of the responses of 34 experts established that the best CPr, according to the highest degree of agreement among them, are the management commitment, planning, and sharing experiences of risk factors, preventive actions, and control between companies. In conclusion, these practices will allow the evaluation of the GE through the exchange of information and the generation of ergonomics knowledge among the members of the SC can contribute to improving the performance and well-being of employees.

KEYWORDS: management; ergonomics; supply chain; collaboration.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Aidé Aracely Maldonado-Macías.
INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ingeniería y Tecnología.
DIRECCIÓN: Av. del Charro núm. 450 norte, col. Partido Romero, C. P. 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.
CORREO ELECTRÓNICO: amaldona@uacj.mx

Fecha de recepción: 9 de octubre de 2023. **Fecha de aceptación:** 4 de enero de 2024. **Fecha de publicación:** 26 de febrero de 2024.



I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día se ha incrementado el número de organizaciones que están implementando sistemas de gestión en diferentes campos, como la calidad (SGC) [1]-[3], el medio ambiente (EMS) [4], [5], la salud y seguridad (HSMS) [6]-[8], incluso han surgido sistemas integrados de gestión (SIG). Sin embargo, solo en estos últimos se han considerado aspectos ergonómicos, por lo que hace falta un sistema de gestión adecuado para esta disciplina [9]-[11]. También, ante una creciente atención en la gestión sostenible de la cadena de suministro (CS) [12] se han adoptado a gran escala prácticas sostenibles [13], [14], con el fin coadyuvar en su rentabilidad y eliminar o reducir los impactos negativos en el ambiente y la sociedad. Es en este último aspecto donde la Gestión de Ergonomía (GE) encuentra su mayor aportación, debido a la necesidad de realizar estudios integrales de ergonomía en toda la CS y de proponer una evaluación de todos los eslabones con una visión holística y sostenible [15], [16].

Estas consideraciones han llevado a las empresas a colaborar con sus proveedores y clientes [17], fomentando iniciativas colectivas para desarrollar estrategias que mejoren la eficiencia de toda la CS. También, con el fin de obtener beneficios mutuos y contribuir socialmente, es de esperar que las prácticas de colaboración (PrC) estén presentes en las relaciones entre los eslabones para que la GE se lleve a cabo a lo largo de la CS. Así, el objetivo de esta investigación es identificar aquellas mejores prácticas de colaboración que contribuyen a este propósito.

DESARROLLO CONCEPTUAL

Uno de los conceptos clave de esta investigación es el de Gestión de Ergonomía, el cual, según Rodríguez-Gómez *et al.* [18], sigue siendo un concepto en desarrollo. Aunque los enfoques modernos para la gestión de la calidad, así como los de la salud y la seguridad, han ido aclarando algunos de sus dominios y características a través de diversos modelos y normas, en la literatura se carece de una definición ampliamente aceptada, por lo que se describirá en función de sus términos. La gestión se refiere al conjunto de acciones o diligencias para la realización de cualquier actividad, resolución de un problema o materialización de un proyecto [19]. También, es asociada a un conjunto de procedimientos y acciones que se llevan a cabo para lograr un determinado objetivo [20].

Frecuentemente, el concepto de gestión implica un sistema de gestión, el cual es definido por la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés) como un conjunto de elementos de una organización que interactúan para establecer políticas, objetivos y procesos con el fin de alcanzar las metas establecidas. Entre los elementos más reconocidos están la estructura de la organización, la asignación de roles y responsabilidades, la planeación, la operación, la evaluación del desempeño y la mejora continua.

Por otro lado, la ergonomía o factores humanos es definida por la Asociación Internacional de Ergonomía (IEA, por sus siglas en inglés), como el conjunto de conocimientos científicos aplicados para que trabajos, sistemas, productos y ambientes se adapten a las capacidades y limitaciones físicas y mentales de las personas. Además, es la disciplina científica que se ocupa de la comprensión de las interacciones entre humanos y otros elementos de un sistema y, también, es la profesión que aplica teoría, principios, datos y métodos para diseñar, con el fin de optimizar el bienestar humano y el rendimiento general del mismo [21].

Por tanto, para fines de esta investigación, la Gestión de Ergonomía se define como el conjunto de procedimientos y acciones destinadas a identificar los factores de riesgo ergonómico, planear y ejecutar un programa de ergonomía, establecer el control de riesgos y peligros mediante buenas prácticas, además de fijar objetivos para reducirlos o eliminarlos en los sistemas hombre-máquina y entornos laborales. La filosofía de mejora continua es la base para el desarrollo del modelo de evaluación de la GE. Este modelo incluye los constructos *planear, hacer, verificar y actuar*. Además, se integran *liderazgo y participación de los trabajadores* que se puede consultar, para mayor comprensión, en el trabajo de Rodríguez-Gómez *et al.* [18].

Otro concepto clave es el que se refiere a la Cadena de Suministro, la cual es definida como una serie de empresas integradas que comparten información y coordinan la ejecución física de las operaciones para conseguir un flujo integrado y continuo de bienes, servicios, información y efectivo [22]. Otro enfoque la considera como la integración de las principales funciones del negocio hasta el usuario final, a través de proveedores que ofrecen productos, servicios e información que agregan valor para el cliente y otros grupos de interés. Además, engloba los procesos de la empresa, las personas, la or-

ganización, la tecnología y la infraestructura física para la transformación de la materia prima en productos terminados que son distribuidos para cumplir con las especificaciones del cliente [23].

En la búsqueda por ampliar el alcance de la evaluación de la GE en la CS, es necesario analizar las relaciones que existen entre los eslabones que la conforman y es por ello que surge el concepto de las relaciones interorganizacionales, definido en Oliver [24] como aquellos vínculos que se dan entre una o varias organizaciones de un entorno particular, con el fin de realizar transacciones relativamente duraderas y constantes.

Estos vínculos o asociaciones se clasifican según su naturaleza en tres categorías denominadas *cooperación*, *coordinación* y *colaboración* [25]. Estas categorías o términos son utilizados para evaluar las relaciones interorganizacionales [26] entre los miembros de la CS. Es en la colaboración donde se centra esta investigación y es definida en Camarinha-Matos y Afsarmanesh [27] como un proceso en el que las entidades comparten información, recursos y responsabilidades (lo que incluye riesgos y recompensas) para planificar, ejecutar y evaluar conjuntamente un programa de actividades con el fin de alcanzar un objetivo común. La colaboración implica el compromiso mutuo y la confianza de los participantes para resolver problemas [28]. Además, Moharana *et al.* [29] la conciben como un proceso interactivo que da lugar a decisiones y actividades para una ejecución conjunta derivada del trabajo en equipo.

LA COLABORACIÓN EN LA CADENA DE SUMINISTRO Y SUS BENEFICIOS

La necesidad de las organizaciones por participar en la cadena de suministro sostenible ha llevado a muchas empresas a colaborar con sus proveedores y clientes [17]. Por tanto, han evolucionado hacia estructuras más complejas de colaboración integradas, dando lugar al concepto de colaboración en la cadena de suministro (CCS). Esta se describe como un proceso de asociación a largo plazo en el que los socios o miembros de la CS tienen objetivos comunes y colaboran estrechamente para lograr ventajas mutuas superiores a las que obtendrían individualmente [30], [31].

Esta colaboración demanda la participación de dos o más empresas autónomas que trabajan conjuntamente para planificar y ejecutar las operaciones de la CS. La CCS se basa, según Cao y Zhang [32], en un paradigma de

ventaja colaborativa, donde una CS se compone de una secuencia o red de relaciones interdependientes fomentadas mediante alianzas estratégicas y de colaboración.

La CS, vista desde la concepción de sus eslabones primarios, está compuesta por tres fases: *de aprovisionamiento*, que comprende los lugares donde se obtienen las materias primas, las cuales se gestionan entre los puntos de adquisición (proveedores iniciales) y las plantas de procesamiento; *de producción*, mediante la cual los materiales son transformados para convertirlos en producto terminado, y *de distribución*, donde se traslada el producto final hasta los lugares de venta para ser almacenado y posteriormente adquirido por el consumidor [33]. Además, la colaboración entre los socios de la CS no se limita a meras transacciones, sino que aprovecha el intercambio de información y la creación de conocimiento del mercado para lograr una ventaja competitiva sostenible [34].

Entre los beneficios de la CCS se incluyen la mejora de los ingresos, la reducción de costos y la flexibilidad operativa para hacer frente a las incertidumbres de una demanda elevada [35], [32]. Estas ventajas se ven reflejadas cuando los miembros de la CS aprovechan los recursos y conocimientos de sus proveedores y/o clientes [36], [37]. Además, otro de los beneficios de la CCS es en materia de la sostenibilidad, la cual se puede lograr siempre y cuando se inviertan sistemáticamente recursos en las empresas destinados a la colaboración, a través de la implementación de prácticas de sostenibilidad social [14].

En este sentido, Yilmaz [38] define la sostenibilidad social como la especificación y gestión de los impactos positivos y negativos de los sistemas, procesos, organizaciones y actividades en las personas y la vida social. Los temas incluidos en este concepto se dividen en cuestiones sociales internas y externas [39]. Las externas se refieren a los impactos de las operaciones en tres niveles de la sociedad: la comunidad local, regional y nacional. Las internas se enfocan en la responsabilidad social de las empresas con respecto a su propia fuerza de trabajo, donde la ergonomía tiene su mayor aportación mejorando las condiciones de trabajo y previniendo enfermedades por factores disergonómicos, por lo que es considerada como un factor fundamental en la gestión de la cadena de suministro [40].

Aunque también se reconoce que la responsabilidad social puede ser un concepto más amplio, ya que se refiere al compromiso consciente y congruente de cumplir integralmente con la finalidad de la empresa, tanto en lo in-

terno como en lo externo, que considera las expectativas económicas, sociales y ambientales de todos sus participantes, que demuestra respeto por la gente, los valores éticos, la comunidad y el medio ambiente y contribuye así a la construcción del bien común [41]. Por lo tanto, la sustentabilidad y la responsabilidad social convergen en la búsqueda del bienestar humano con la ergonomía, ya que se interesan en aspectos como el empleo, la estabilidad y prácticas laborales, la salud y la seguridad y el desarrollo de las capacidades, pero no se limitan a estos.

Debido a su relevancia, es importante realizar evaluaciones ergonómicas en toda la CS y en todos los eslabones que la conforman, con el fin de lograr un alto nivel de rendimiento [40]. Adicionalmente, la adopción de prácticas interorganizativas en la CS ayuda a mejorar los resultados en la formación de aspectos de sostenibilidad social y a resolver deficiencias en las condiciones de salud y seguridad de las empresas. Como parte de las relaciones interorganizativas, las PrC requieren de la ergonomía para lograr una colaboración eficaz entre proveedores y clientes [42], ya que a través de esta se puede diseñar una CS con mayor control, comunicación, compatibilidad y cultura en aspectos de salud y seguridad, un enfoque macroergonómico que consiste en la relación humano-tecnología-ambiente y puede ser el más indicado para el desarrollo de estas prácticas.

Además, la implementación de PrC permite desarrollar conocimientos y habilidades útiles para mejorar la actuación social en la CS [43]. Es por ello que a la par del enfoque colaborativo se debe implementar programas de desarrollo, inversiones específicas para la sostenibilidad y reuniones conjuntas para desarrollar las capacidades de los miembros de la CS y mejorar el desempeño en cuanto a la sostenibilidad social [44]-[46].

II. METODOLOGÍA

PARTICIPANTES

Los participantes en esta investigación son expertos que debían cumplir con ciertos criterios, como contar con al menos cinco años de experiencia en una de las siguientes áreas de conocimiento: ergonomía, salud y seguridad, sistemas de gestión y cadena de suministro (logística). También debían estar involucrados en el sector público o privado de Latinoamérica: profesores universitarios, consultores, supervisores, gerentes o directores en organizaciones.

La recolección de datos comenzó en mayo de 2022 y finalizó en noviembre de 2022 a través de un cuestionario digital elaborado en la plataforma <https://www.jotform.com/>. Los expertos aceptaron participar voluntariamente y firmaron de consentimiento bajo la evaluación y resolución CEI-2022-1-591, otorgada por el Comité de Ética en Investigación de la UACJ. Se utilizó un muestreo aleatorio por conveniencia [47] y se logró la participación de $n = 34$ expertos. La [Tabla 1](#) muestra las características de los participantes.

TABLA 1
 CARACTERÍSTICAS DE LOS PARTICIPANTES

CARACTERÍSTICA		FRECUENCIA	%
Nacionalidad	México	22	64.71
	Chile	3	8.82
	Ecuador	3	8.82
	Venezuela	3	8.82
	Colombia	1	2.94
	Cuba	1	2.94
	Perú	1	2.94
Sexo	Hombres	26	76.47
	Mujeres	8	23.53
Nivel académico	Doctorado	12	35.29
	Maestría	15	44.12
	Licenciatura	5	14.71
	Especialidad en ergonomía	2	5.88
Formación académica	Ciencias de la salud	11	32.35
	Ingeniería, manufactura y construcción	20	58.82
	Administración y negocios	2	5.88
	Ciencias sociales y derecho	1	2.94
Sector	Público (académico)	12	35.29
	Privado (minería, manufactura o consultoría)	13	38.24
	Ambos sectores	9	26.47
Años de experiencia en ergonomía	> 20	9	26.47
	11-20	10	29.41
	2-10	14	41.18
	1	1	2.94
Años de experiencia en seguridad y salud ocupacional	> 20	13	38.23
	11-20	7	20.58
	2-10	13	38.23
	1	1	2.94
Años de experiencia en sistemas de gestión	> 20	8	23.53
	11-20	9	26.47
	2-10	16	47.06
	0	1	2.94
Años de experiencia en logística	> 20	3	8.82
	11-20	3	8.82
	2-10	15	44.12
	1	10	29.41
	0	3	8.82

MATERIALES

Se desarrolló un cuestionario digital sobre las PrC en la CS para la GE. Es un instrumento integrado por dos constructos (*proveedores* y *clientes*) derivados de la revisión bibliográfica del concepto de colaboración y PrC en las cadenas de suministro. Posteriormente, se definieron 12 ítems con escala de valoración tipo Likert de 5 puntos, donde las respuestas oscilaban entre 1 = Totalmente en desacuerdo y 5 = Totalmente de acuerdo, en relación con el cumplimiento de las PrC. Los ítems formulados fueron revisados por seis expertos, quienes sugirieron su eliminación o redefinición. El diseño final del cuestionario consta de dos secciones: 1) datos sociodemográficos de los participantes y 2) prácticas de colaboración. Por último, el cuestionario incluye una sección introductoria e instrucciones sobre su llenado.

MÉTODO

Se llevó a cabo un estudio transversal, no experimental, con una muestra de expertos por conveniencia y una metodología de cuatro etapas, tal como se muestra en la [Figura 1](#).

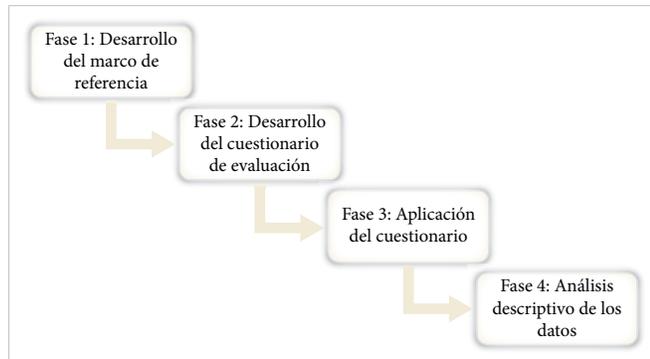


Figura 1. Fases del método de investigación.

A continuación, se describe con mayor detalle cada fase del método.

Fase 1: Desarrollo del marco de referencia

En esta fase inicial, se realizó una revisión sistemática de literatura (RSL) para proponer los constructos y las prácticas de colaboración (ítems) que integran el cuestionario para ser valorados por los expertos, para lo cual se utilizó la Declaración PRISMA ^[48], tal como se puede consultar en su página web: <http://www.prisma-statement.org/>. La [Figura 2](#) muestra las cinco etapas que rigieron este proceso.



Figura 2. Visión general del enfoque utilizado en la revisión de literatura.

Fase 2: Desarrollo del Cuestionario de Evaluación

En esta fase se diseñó el cuestionario digital dirigido a los expertos y para ello se establecieron las siguientes etapas: 1) diseñar el cuestionario de evaluación y 2) diseñar el cuestionario digital para la recopilación de la información. Dichas etapas serán abordadas y descritas con mayor detalle a continuación.

Para el diseño del cuestionario se consideró los aspectos propuestos por Hague ^[49] y Martín ^[50], donde primeramente se determinaron los constructos a medir, relacionados directamente con los objetivos de la investigación y con la información obtenida de la revisión de literatura. A continuación se definió el contenido, alcance y población a la cual va dirigido el cuestionario (con estos aspectos se determinó el contenido, estructura y logística para la recopilación de los datos). Posteriormente, se realizó una lista de ítems a evaluar para cada constructo considerando el tipo de pregunta, ya sea abierta o cerrada según corresponda, considerando la escala de medición para cada una de ellas, así como la codificación de las respuestas (dicotómicas, policotómicas y/o analógicas). Una vez definidas o formuladas las preguntas se procedió a la ordenación de estas en el cuestionario y completar el diseño integral del instrumento. Finalmente, se realizó una revisión de contenido del cuestionario a cargo de seis expertos, así como una prueba piloto, y se redefinieron o eliminaron las preguntas planteadas en función de los comentarios de estos expertos, obteniendo una versión final del cuestionario.

Una vez terminado el diseño del cuestionario, se procedió a desarrollar el formulario en la aplicación en línea Jotform®, para lo cual se representaron todas las secciones incluidas en el cuestionario:

1. Portada
2. Introducción
3. Consentimiento informado
4. Instrucciones
5. Contenido – Secciones
 - a. Datos sociodemográficos del experto
 - b. Prácticas de colaboración

Esto se efectuó mediante esta aplicación para el diseño del formulario y, adicionalmente, se capturaron las preguntas de opción múltiple a través de las tablas de entrada, las cuales permiten modificar las opciones de los campos necesarios para las respuestas de los expertos. Los campos disponibles son: 1) opción múltiple con botón de selección, 2) casilla, 3) desplegable y 4) campo de texto. Con estas opciones se representaron las variables a medir en el instrumento (ítems), para las cuales se identificó como tipo de respuesta el grado de acuerdo con la afirmación. Para finalizar con el diseño, se eligió el tema (aspecto de imagen del formulario, como tipo de letra, tamaño, colores, fondos, etc.), así como los botones de las funciones de guardado del avance de las respuestas y envío del formulario una vez finalizado. Por último, el diseño final del cuestionario digital se sometió a una prueba piloto con ayuda de seis expertos, quienes registraron sus comentarios y observaciones para identificar errores y realizar ajustes en los ítems, así como en el diseño. En la [Figura 3](#) se muestra un extracto del cuestionario digital.

1. Se comparte información y/o experiencias de las prácticas de GE con sus proveedores. *

Totalmente de acuerdo	De acuerdo	Ni de acuerdo ni en des-acuerdo	En des-acuerdo	Totalmente en des-acuerdo	% mínimo de cumplimiento deseable (o a 100)
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	▼

2. Se participa en la planeación en conjunto con sus proveedores sobre aspectos ergonómicos. *

Totalmente de acuerdo	De acuerdo	Ni de acuerdo ni en des-acuerdo	En des-acuerdo	Totalmente en des-acuerdo	% mínimo de cumplimiento deseable (o a 100)
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	▼

3. Se establecen acciones de colaboración sobre aspectos ergonómicos con sus proveedores. *

Totalmente de acuerdo	De acuerdo	Ni de acuerdo ni en des-acuerdo	En des-acuerdo	Totalmente en des-acuerdo	% mínimo de cumplimiento deseable (o a 100)
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	▼

4. Se considera que la alta dirección está comprometida a colaborar con sus proveedores en la GE. *

Totalmente de acuerdo	De acuerdo	Ni de acuerdo ni en des-acuerdo	En des-acuerdo	Totalmente en des-acuerdo	% mínimo de cumplimiento deseable (o a 100)
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	▼

5. Se da a conocer los resultados y las medidas de control de la identificación de los factores de riesgo ergonómico a sus proveedores. *

Totalmente de acuerdo	De acuerdo	Ni de acuerdo ni en des-acuerdo	En des-acuerdo	Totalmente en des-acuerdo	% mínimo de cumplimiento deseable (o a 100)
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	▼

Figura 3. Extracto del cuestionario digital.

Fase 3: Aplicación del Cuestionario de Evaluación

Esta fase inició con la invitación a los expertos a contestar el cuestionario digital con el fin de establecer la pertinencia de las prácticas de colaboración en la CS para la GE. Se utilizaron tres estrategias de invitación: 1) envío de correos electrónicos a contactos de redes de investigación, 2) promoción en foros y congresos internacionales y 3) a través de la plataforma LinkedIn. A quienes decidieron participar se les aplicó el cuestionario de evaluación a través del acceso al mismo por medio de un enlace (*link*) proporcionado por la plataforma Jotform®, el cual fue enviado por correo, Whatsapp y/o chats en redes sociales.

Fase 4: Análisis descriptivo de los datos

Una vez recopilada la información de los expertos, se conformó una base de datos de las respuestas para ser ingresada en el software SPSS 23®, en donde se realizó una exploración de los datos como parte del proceso de depuración o limpieza, el cual consiste en la identificación de posibles errores de captura, valores extremos, comportamientos inadecuados, datos perdidos y variabilidad no esperada. Para el análisis descriptivo se utilizó la mediana, cuartiles y rango intercuartílico.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en las cuatro fases de la metodología.

FASE 1: DESARROLLO DEL MARCO DE REFERENCIA

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en cada etapa de la RSL.

Selección de la base de datos

La búsqueda se realizó en las bases de datos ScienceDirect, ProQuest y SpringerLink por ser las más utilizadas en los ámbitos de la ingeniería, la cadena de suministro, la seguridad y la ergonomía [18], [51].

Identificación de los parámetros de búsqueda

Dentro de los parámetros de búsqueda en todas las bases de datos está el periodo de publicación de los artículos, el cual comprendió de 2010 a 2021 y además se concentró en artículos de revistas que contaran en su título

y contenido las palabras clave. También se consideró los operadores lógicos. Ambos parámetros se muestran en la [Figura 4](#).

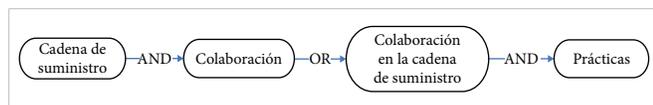


Figura 4. Relación de las palabras clave y operadores lógicos usada en la revisión.

Proceso de selección de documentos

En este proceso, inicialmente se encontraron 1147 artículos. En la [Figura 5](#) se muestra el proceso de selección, así como los resultados de la depuración por medio de los criterios de selección y exclusión establecidos. Asimismo, se muestran los resultados de cada etapa del proceso de selección.

Criterios de inclusión:

1. El artículo se publica en una revista científica.
2. El artículo está disponible en inglés.
3. El artículo define el concepto de colaboración.
4. El artículo trata sobre PrC en la CS.

Criterios de exclusión:

1. Artículos duplicados.
2. Trabajos en forma de póster de conferencias, resúmenes, artículos cortos y trabajos inéditos.
3. Artículos que no aborden la cadena de suministros ni PrC entre los eslabones.

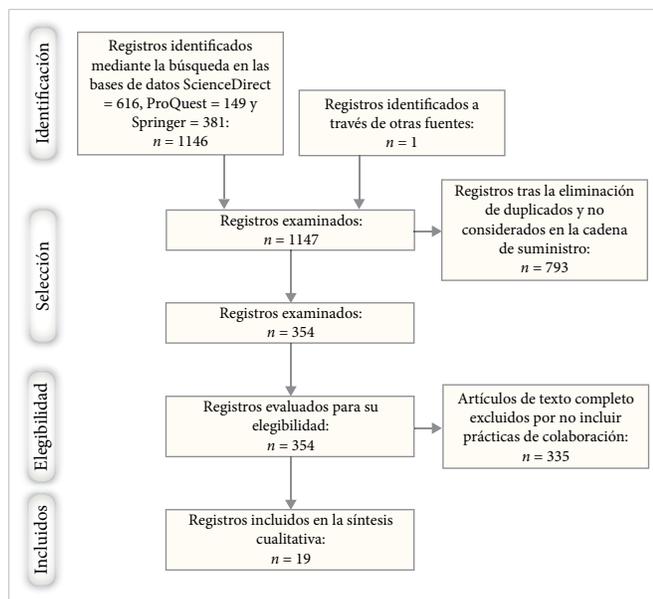


Figura 5. Proceso de selección de artículos.

Resultados de la selección final

En la selección final se identificaron 19 artículos, tal como se muestra en la [Tabla 2](#), donde también se observa año de publicación, autor (referencia) y PrC implementadas en la investigación.

Análisis de resultados

Los 19 artículos que cumplieron con los criterios establecidos son evidencia del interés creciente por el tema, pero también la oportunidad de atender y estudiar este aspecto con mayor detalle en la CS. Se identificaron 18 PrC distintas, las cuales se muestran en la [Tabla 2](#), mientras que en la [Tabla 3](#) se enlistan las prácticas más comunes en la CS en función de la literatura seleccionada, estando, entre las más representativas, el compartir información o recursos entre los eslabones de la cadena, congruencia de objetivos comunes, planeación en conjunto, sincronización de las decisiones, entre otras.

Solo uno de los artículos seleccionados aborda las PrC centradas en la ergonomía, donde Mejías y Huaccho ^[42] argumentan que para que el proceso de colaboración proveedor-cliente sea eficaz deben tenerse en cuenta cuatro aspectos macroergonómicos:

1. Un enfoque sistémico e integral que parte de la identificación y análisis de las variables que afectan a los roles laborales, sistemas de trabajo y organizaciones dentro de la colaboración proveedor-cliente, con el fin de poner en marcha proyectos ergonómicos que permitan resolver y obtener mejoras en su eficacia.
2. La participación de todas las personas implicadas en la colaboración proveedor-cliente, independientemente del nivel jerárquico, es decir, la Ergonomía Participativa apoyada en el estudio de casos y la investigación-acción como metodologías para implementar las intervenciones en las organizaciones que aprenden. Esto implica la participación de los empleados de todos los niveles, así como de la dirección, en la identificación, el análisis y las propuestas de mejora.
3. La creación de equipos de ergonomía como parte esencial del establecimiento para la identificación y análisis de las propuestas de mejora. Estos equipos se deben distinguir por su enfoque sistémico e integral desde las variables involucradas hasta las soluciones integrales.

TABLA 2
 CARACTERÍSTICAS DE LOS ARTÍCULOS SELECCIONADOS

AÑO	REFERENCIA	PRÁCTICAS COLABORATIVAS																	
		COMPARTIR INFORMACIÓN	CONGRUENCIA DE OBJETIVOS (COMUNES)	SINCRONIZACIÓN DE DECISIONES	ALINEACIÓN DE INCENTIVOS	COMPARTIR RECURSOS	COMUNICACIÓN COLABORATIVA	CREACIÓN CONJUNTA DE CONOCIMIENTOS	PLANEACIÓN EN CONJUNTO	COMERCIO COLABORATIVO	RELACIÓN DE COOPERACIÓN	DAR A CONOCER LOS RESULTADOS	PARTICIPAR EN LAS EVALUACIONES	COMPARTEN PROCESOS	CONTRATOS CON LOS MIEMBROS DE LA CS	PROVEER ENTRENAMIENTO / EDUCACIÓN	COMPARTEN EL RIESGO Y COSTOS	COMPROMISO DE LA ALTA DIRECCIÓN	COLABORACIÓN EFECTIVA
2020	[44]	X	X				X				X	X	X	X		X		X	X
	[52]	X				X			X		X		X						
	[53]	X	X	X	X	X	X	X										X	
2019	[54]	X	X																
	[55]	X	X	X	X	X	X	X											
	[56]	X			X												X		
	[57]	X	X			X	X		X				X					X	X
2018	[58]	X	X	X	X		X	X	X		X					X	X	X	X
2016	[31]	X	X	X				X					X						
2015	[59]	X				X		X			X	X	X			X			X
2013	[60]	X	X	X		X			X								X	X	
	[61]	X			X	X													
	[12]		X						X	X									
2012	[42]	X						X				X		X	X		X	X	
	[62]							X	X				X	X	X				
2011	[32]		X	X	X	X	X	X	X										
	[63]	X	X	X		X			X								X		
2010	[29]	X	X	X									X						X
	[64]	X							X										X

TABLA 3
 FRECUENCIA DE LAS PrC EN LA LITERATURA SELECCIONADA

PRÁCTICAS DE COLABORACIÓN	FRECUENCIA DE LA PrC	%
Compartir información	16	84.2
Congruencia de objetivos (comunes)	12	63.1
Planeación en conjunto	10	52.6
Compartir recursos	9	47.3
Sincronización de decisiones	8	42.1
Generación conjunta de conocimientos	7	36.8
Colaboración efectiva	7	36.8
Alineación de incentivos	6	31.5
Comunicación colaborativa	6	31.5
Compromiso de la alta dirección	6	31.5
Comparten procesos	6	31.5
Relación de cooperación	4	21.0
Comparten el riesgo y costos	4	21.0
Proveer entrenamiento /educación	4	21.0
Participar en las evaluaciones	3	15.7
Dar a conocer los resultados obtenidos	2	10.5
Contratos con los miembros de la CS	2	10.5
Comercio colaborativo	1	5.2

- La evaluación de la eficacia de los proyectos ergonómicos que podría contribuir a dar continuidad de las prácticas ergonómicas, como la evaluación del impacto de las mejoras de los resultados obtenidos. Esto constituye una oportunidad para continuar las acciones de los proyectos ergonómicos.

Tanto las PrC identificadas en la literatura como las prácticas colaborativas centradas en la ergonomía fueron utilizadas como insumos para el desarrollo del cuestionario de evaluación. Además, queda de manifiesto la importancia y participación de los eslabones de proveedor y cliente, por tal motivo se consideran los constructos a evaluar.

FASE 2: DESARROLLO DEL CUESTIONARIO DE EVALUACIÓN

En esta fase se diseñó el cuestionario dirigido a los expertos. Una vez finalizada la validación del contenido de las variables de medición (ítems) de las PrC, se establecieron 12 ítems, de los cuales los primeros 6 pertenecen al constructo *proveedores* y el resto a *clientes*.

Estos ítems finales se muestran en la [Tabla 4](#), los cuales se utilizaron para el desarrollo del formulario digital en la plataforma Jotform® (<https://www.jotform.com/>).

TABLA 4
ÍTEMES DEL CUESTIONARIO

CONSTRUCTO	CÓDIGO	ÍTEMES
Proveedores		En la organización, respecto a la COLABORACIÓN en la GE con PROVEEDORES de la CS:
	CLL1	Se comparte información y/o experiencias de las prácticas de GE con sus proveedores.
	CLL2	Se participa en la planeación en conjunto con sus proveedores sobre aspectos ergonómicos.
	CLL3	Se establecen acciones de colaboración sobre aspectos ergonómicos con sus proveedores.
	CLL4	Se considera que la alta dirección está comprometida en colaborar con sus proveedores en la GE.
	CLL5	Se da a conocer los resultados y las medidas de control de la identificación de los factores de riesgo ergonómico a sus proveedores.
	CLL6	Se considera que su organización colabora de manera efectiva y en conjunto con sus proveedores para la implementación de prácticas de ergonomía.
Clientes		En la organización, respecto a la COLABORACIÓN en la GE con CLIENTES de la CS:
	CLL7	Se comparte información y/o experiencias de las prácticas de GE con sus clientes.
	CLL8	Se participa en el proceso de planeación en conjunto con sus clientes sobre aspectos ergonómicos.
	CLL9	Se establecen acciones de colaboración sobre aspectos ergonómicos con sus clientes.
	CLL10	Se considera que la alta dirección está comprometida en colaborar con sus clientes en la GE.
	CLL11	Se da a conocer los resultados y medidas de control de la identificación de los factores de riesgo ergonómico a sus clientes.
	CLL12	Se considera que su organización tiene fortalecido el compromiso de colaboración con sus clientes.

FASE 3: APLICACIÓN DEL CUESTIONARIO DE EVALUACIÓN

En esta fase se invitó a los expertos a contestar el cuestionario digital con el fin de establecer la pertinencia de las PrC en la CS para la GE. Se utilizaron tres estrategias para invitar a los expertos a participar: 1) envío de correos electrónicos a contactos de redes de investigación, 2) promoción en foros y congresos internacionales y 3) a través de la plataforma linkedin.com. Al implementar la primera de ellas, contactando a investigadores en la materia que desearan colaborar, se logró la participación de 10 expertos.

Adicionalmente, a partir de la promoción en congresos y foros nacionales e internacionales de ergonomía, se

obtuvo la participación de 6 expertos latinoamericanos. Por último, en la plataforma linkedin.com® fue necesario definir los términos clave (seguridad, ergonomía, sistemas de gestión de personas y logística) para localizar a los expertos según sus perfiles laborales y, una vez verificados, se envió una invitación a 286 expertos de diferentes países con el enlace al cuestionario, de los cuales participaron el 6.2 % (18).

FASE IV: ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LOS DATOS

Los valores de las medidas descriptivas obtenidas a partir de las respuestas de los expertos se muestran en la [Tabla 5](#).

TABLA 5
 MEDIANAS, CUARTILES Y RANGO INTERCUARTÍlicos DE LOS
 CONSTRUCTOS DE LA COLABORACIÓN

CONSTRUCTO	ÍTEMS	MEDIANA	CUARTIL			RI
			25	50	75	
Proveedores	CLL1	3.83	3.14	3.83	4.47	1.33
	CLL2	3.94**	3.26	3.94	4.57	1.31
	CLL3	3.94**	3.05	3.94	4.65	1.59
	CLL4	3.98**	3.75	3.98	4.60	0.85
	CLL5	3.75*	3.10	3.75	4.38	1.28
	CLL6	3.82*	3.12	3.82	4.42	1.29
Clientes	CLL7	3.66*	2.60	3.66	4.50	1.90
	CLL8	3.87**	2.80	3.87	4.70	1.90
	CLL9	3.76*	2.72	3.76	4.63	1.90
	CLL10	3.87**	2.81	3.87	4.73	1.91
	CLL11	3.42*	2.73	3.42	4.33	1.60
	CLL12	3.83	3.00	3.83	4.47	1.47

Nota: * Prácticas de menor consenso en la colaboración de la GE con sus proveedores y clientes. ** Prácticas de mayor consenso en la colaboración de la GE con sus proveedores y clientes. RI: Rango intercuartílico.

A partir de las medianas más altas y rangos intercuartílicos más pequeños, se determinó que los expertos manifestaron un total acuerdo en que las principales PrC entre eslabones para la gestión de ergonomía son:

- Contar con el compromiso de la alta dirección para colaborar con sus proveedores y clientes en la GE de la CS.
- Participar en el proceso de planeación en conjunto con sus proveedores y clientes sobre aspectos ergonómicos.
- Establecer acciones de colaboración sobre aspectos ergonómicos con sus proveedores y clientes.
- Compartir información y/o experiencias de las prácticas de GE con sus proveedores y clientes.
- Compartir los resultados y medidas de control de la identificación de los factores de riesgo ergonómico con sus proveedores y clientes.

Estas PrC, así como su implementación, pueden ser utilizadas para evaluar el nivel de colaboración que existe entre los eslabones que conforman la CS para beneficiarse de la colaboración con sus proveedores y clientes al equilibrarse su rendimiento y funcionamiento con el de sus socios ^[12].

IV. CONCLUSIONES

Es importante definir las mejores PrC en la CS relacionadas con la GE, ya que su cumplimiento no solo puede prevenir enfermedades por factores disergonómicos, sino también mejorar la eficiencia y productividad general de la CS al implementar proyectos o programas de ergonomía en conjunto con beneficios para los miembros de la CS. Además, es viable evaluar el nivel de GE de la CS a través del cumplimiento de las prácticas de colaboración. El objetivo se cumplió, ya que se determinó las mejores PrC por los expertos. Entre ellas se destaca el compromiso gerencial para colaborar en el proceso de GE.

Además, la colaboración puede fomentar la generación de medios propicios para la planeación en conjunto sobre aspectos ergonómicos entre los miembros de la cadena, así como la comunicación, el aprendizaje de las experiencias, las acciones de prevención y las medidas de control de los factores de riesgo ergonómicos que pueden afectar su desempeño y sostenibilidad social. Además, estas prácticas pueden favorecer la diseminación y desarrollo de la GE mediante el intercambio de información y la creación del conocimiento de ergonomía entre los miembros de la CS.

Futuras líneas de investigación deben proponerse para comprender el impacto que estas PrC tienen con el resto de las relaciones interorganizacionales (cooperación y coordinación), así como en los componentes de la gestión de ergonomía (planear, hacer, verificar, actuar y liderazgo y participación de los trabajadores). Asimismo, deben considerarse como parte de un modelo de evaluación que proporcione un índice global de GE en toda la CS.

REFERENCIAS

- [1] L. S. Sfreddo, G. B. Borges, G. Vidor y C. H. Schuch, "ISO 9001 based quality management systems and organisational performance: a systematic literature review", *Total Qual. Manag. Bus. Excell.*, vol. 32, n.º 3-4, pp. 389-409, 2021, doi: [10.1080/14783363.2018.1549939](https://doi.org/10.1080/14783363.2018.1549939).
- [2] J. M. Rodríguez-Mantilla, A. Martínez-Zarzuelo y F. J. Fernández-Cruz, "Do ISO:9001 standards and EFQM model differ in their impact on the external relations and communication system at schools?", *Eval. Program Plann.*, vol. 80, jun. 2020, doi: [10.1016/j.evalprogplan.2020.101816](https://doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2020.101816).

- [3] H. T. Ingason, “Best Project Management Practices in the Implementation of an ISO 9001 Quality Management System”, *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 194, n.º oct. 2014, pp. 192-200, 2015, doi: [10.1016/j.sbspro.2015.06.133](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.133).
- [4] M. Gunawan, R. Asyahir y F. M. Sidjabat, “Environmental Management System Implementation in MSMEs: A Literature Review”, *J. Serambi Eng.*, vol. 5, n.º 2, pp. 1070-1078, 2020, doi: [10.32672/jse.v5i2.1958](https://doi.org/10.32672/jse.v5i2.1958).
- [5] A. Pacana y R. Ulewicz, “Research of Determinants Motiving to Implement the Environmental Management System”, *Polish J. Manag. Stud.*, vol. 16, n.º 1, pp. 165-174, 2017, doi: [10.17512/pjms.2017.16.1.14](https://doi.org/10.17512/pjms.2017.16.1.14).
- [6] L. Morgado, F. J. G. Silva y L. M. Fonseca, “Mapping occupational health and safety management systems in Portugal: Outlook for ISO 45001:2018 adoption”, *Procedia Manuf.*, vol. 38, pp. 755-764, 2019, doi: [10.1016/J.PROMFG.2020.01.103](https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2020.01.103).
- [7] S. Çalış y B. Y. Büyükkakinci, “Occupational Health and Safety Management Systems Applications and A System Planning Model”, *Procedia Comput. Sci.*, vol. 158, pp. 1058-1066, 2019, doi: [10.1016/J.PROCS.2019.09.147](https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2019.09.147).
- [8] I. Mohammadfam, M. Kamalinia, M. Momeni, R. Golmohammadi, Y. Hamidi y A. Soltanian, “Evaluation of the Quality of Occupational Health and Safety Management Systems Based on Key Performance Indicators in Certified Organizations”, *Saf. Health Work*, vol. 8, n.º 2, pp. 156-161, jun. 2017, doi: [10.1016/J.SHAW.2016.09.001](https://doi.org/10.1016/J.SHAW.2016.09.001).
- [9] T. Vieira, M. Bernardo y O. J. Oliveira, “Guiding principles of integrated management systems: Towards unifying a starting point for researchers and practitioners”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 210, pp. 977-993, feb. 10, 2019, doi: [10.1016/j.jclepro.2018.11.066](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.066).
- [10] E. De Lima, M. Borges y J. P. E. De Souza, “The Integrated Management System (IMS) and Ergonomics: An Exploratory Research of Qualitative Perception in the Application of NR-17”, *J. Ergonomics*, vol. 8, n.º 3, pp. 8-10, 2018, doi: [10.4172/2165-7556.1000231](https://doi.org/10.4172/2165-7556.1000231).
- [11] P. Domingues, P. Sampaio y P. M. Arezes, “Integrated management systems assessment: A maturity model proposal”, *J. Clean. Prod.*, vol. 124, pp. 164-174, 2016, doi: [10.1016/j.jclepro.2016.02.103](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.103).
- [12] C. Blome, A. Paulraj y K. Schuetz, “Supply chain collaboration and sustainability: A profile deviation analysis”, *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, vol. 34, n.º 5, pp. 639-663, 2013, doi: [10.1108/IJOPM-11-2012-0515](https://doi.org/10.1108/IJOPM-11-2012-0515).
- [13] J. A. Rodríguez, C. Giménez, D. Arenas y M. Pagell, “NGOs’ Initiatives to Enhance Social Sustainability in the Supply Chain: Poverty Alleviation through Supplier Development Programs”, *J. Supply Chain Manag.*, vol. 52, n.º 3, pp. 83-108, 2016, doi: [10.1111/jscm.12104](https://doi.org/10.1111/jscm.12104).
- [14] R. Roch, P. Guarnieri, O. Moreira, S. Araújo, J. Márcio y C. Rosano, “The Social Dimension and Indicators of Sustainability in Agrifood Supply Chains”, *IJM&P*, vol. 10, n.º 5, sept.-oct. 2019, doi: [10.14807/ijmp.v10i5.894](https://doi.org/10.14807/ijmp.v10i5.894).
- [15] P. Perttula, “Improving Occupational Safety in Logistics - Accident Risks of Heavy Vehicle Drivers and Material Transfers at Construction Sites”, Finnish Institute of Occupational Health, Helsinki, Finlandia, rep. 95, 2011.
- [16] D. E. Cantor, “Workplace safety in the supply chain: A review of the literature and call for research”, *Int. J. Logist. Manag.*, vol. 19, n.º 1, pp. 65-83, 2008, doi: [10.1108/09574090810872604](https://doi.org/10.1108/09574090810872604).
- [17] R. D. Klassen y S. Vachon, “Collaboration and evaluation in the supply chain: The impact on plant-level environmental investment”, *Prod. Oper. Manag.*, vol. 12, n.º 3, pp. 336-352, 2003, doi: [10.1111/j.1937-5956.2003.tb00207.x](https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2003.tb00207.x).
- [18] I. F. Rodríguez-Gámez, A. A. Maldonado-Macías, B. Mrugalska, E. Lagarda-Leyva, J. L. Hernández-Arellano y Y. Rodríguez, “A new ergonomics management model for supply chains”, en *Human Factors in Engineering*, 1.ª ed., B. Mrugalska, T. Ahram y W. Karwowski, eds. Taylor & Francis, 2023, pp. 1-28, doi: [10.1201/9781003383444](https://doi.org/10.1201/9781003383444).
- [19] F. Fantova. “Gestión”. Wikipedia. La enciclopedia libre. <https://es.wikipedia.org/wiki/Gestión> (accedida: nov. 14, 2021).
- [20] G. Westreicher. “Gestión”. Economipedia.com. <https://economipedia.com/definiciones/gestion.html> (accedida: nov. 14, 2021).
- [21] IEA. “What Is Ergonomics (HFE)?”. International Ergonomics Association. <https://iea.cc/about/what-is-ergonomics/> (accedida: feb. 25, 2021).

- [22] C. J. Langley, R. A. Novack, B. Gibson y J. J. Coyle, *Supply Chain Management: A Logistics Perspective*, 11.ª ed. Cengage Learning, 2020.
- [23] R. H. Ballou, *Logística: Administración de la cadena de suministro*, 5.ª ed. Pearson Educación de México, 2004.
- [24] C. Oliver, "Determinants of Interorganizational Relationships: Integration and Future Directions", *Acad. Manag. Rev.*, vol. 15, n.º 2, pp. 241-265, 1990, doi: [10.5465/amr.1990.4308156](https://doi.org/10.5465/amr.1990.4308156).
- [25] H. Zarei, M. Rasti-Barzoki, J. Altmann y B. Egger, "Cooperation, coordination, or collaboration? A structured review of buyers' partnerships to support sustainable sourcing in supply chains", *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, n.º 31, pp. 76491-76514, jul. 1, 2023, doi: [10.1007/s11356-023-27541-w](https://doi.org/10.1007/s11356-023-27541-w).
- [26] N. Nikolchenko, "Differences Between Collaboration, Cooperation and Coordination in Supply Chains", Working Papers 16080, 2019. Disponible en: <https://ideas.repec.org/p/sps/wpaper/16080.html>.
- [27] L. M. Camarinha-Matos y H. Afsarmanesh, "Collaborative networks: Value creation in a knowledge society", *IFIP Int. Fed. Inf. Process.*, vol. 207, n.º jun., 2014, pp. 26-40, 2006, doi: [10.1007/0-387-34403-9_4](https://doi.org/10.1007/0-387-34403-9_4).
- [28] R. E. Spekman, J. W. Kamauff Jr. y N. Myhr, "An empirical investigation into supply chain management : a perspective on partnerships", *Supply Chain Manag.*, vol. 3, n.º 2, pp. 53-67, 1998, doi: [10.1108/13598549810215379](https://doi.org/10.1108/13598549810215379).
- [29] H. Moharana, J. S. Murty, S. K. Senapati y K. Khuntia, "Coordination, Collaboration and Integration for Supply Chain Management", *Intersci. Manag. Rev.*, vol. 3, n.º 1, pp. 16-20, 2010, doi: [10.47893/imr.2010.1044](https://doi.org/10.47893/imr.2010.1044).
- [30] M. Cao, M. A. Vonderembse, Q. Zhang y T. S. Ragu-Nathan, "Supply chain collaboration: conceptualisation and instrument development", *Int. J. Prod. Res.*, vol. 48, n.º 22, pp. 37-41, 2010, doi: [10.1080/00207540903349039](https://doi.org/10.1080/00207540903349039).
- [31] P. Graça y L. M. Camarinha-Matos, "Performance indicators for collaborative business ecosystems — Literature review and trends", *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 116, pp. 237-255, 2016, doi: [10.1016/j.techfore.2016.10.012](https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.10.012).
- [32] M. Cao y Q. Zhang, "Supply chain collaboration: Impact on collaborative advantage and firm performance", *J. Oper. Manag.*, vol. 29, n.º 3, pp. 163-180, 2011, doi: [10.1016/j.jom.2010.12.008](https://doi.org/10.1016/j.jom.2010.12.008).
- [33] M. A. L. Manrique, J. Teves, A. M. Taco y J. A. Flores, "Gestión de cadena de suministro: una mirada desde la perspectiva teórica", *Rev. Venez. Gerenc.*, vol. 24, n.º 88, pp. 1136-1146, 2019.
- [34] A. Malhotra, S. Gosain y O. A. El Sawy, "Absorptive Capacity Configurations in Supply Chains : Gearing for Partner Enabled Market Knowledge Creation", *MIS Q.*, vol. 29, n.º 1, pp. 145-187, 2005, doi: [10.2307/25148671](https://doi.org/10.2307/25148671).
- [35] T. M. Simatupang y R. Sridharan, "The collaboration index: A measure for supply chain collaboration", *Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag.*, vol. 35, n.º 1, pp. 44-62, 2004, doi: [10.1108/09600030510577421](https://doi.org/10.1108/09600030510577421).
- [36] S. E. Fawcett y G. M. Magnan, "Ten guiding principles for high-impact SCM", *Bus. Horiz.*, vol. 47, n.º 5, pp. 67-74, 2004, doi: [10.1016/j.bushor.2004.07.011](https://doi.org/10.1016/j.bushor.2004.07.011).
- [37] M. A. Lejeune y N. Yakova, "On characterizing the 4 C's in supply chain management", *J. Oper. Manag.*, vol. 23, n.º 1, pp. 81-100, en. 2005, doi: [10.1016/J.JOM.2004.09.004](https://doi.org/10.1016/J.JOM.2004.09.004).
- [38] Ş. Yilmaz, "Sustainability Issues in Biomass-Based Production Chains", en *Decision-Making for Biomass-Based Production Chains: The Basic Concepts and Methodologies*. Elsevier, 2019, cap. 4, pp. 77-112.
- [39] F. Meyer, G. Eweje y D. Tappin, "Ergonomics as a tool to improve the sustainability of the workforce", *Work*, vol. 57, n.º 3, pp. 339-350, 2017, doi: [10.3233/WOR-172563](https://doi.org/10.3233/WOR-172563).
- [40] N. Sampouw y M. Hartono, "The Role of Ergonomics in Supporting Supply Chain Performance in Manufacturing Companies: A Literature review", en *IOP Conf. Series: Mater. Sci. and Eng.*, 2019, vol. 703, n.º 1, doi: [10.1088/1757-899X/703/1/012034](https://doi.org/10.1088/1757-899X/703/1/012034).
- [41] J. F. Cajiga, *El Concepto de Responsabilidad Social Empresarial*, 1.ª ed. Ciudad de México: Cemefi, 2014.
- [42] S. Mejías y L. Huaccho, "Macroergonomics' contribution to the effectiveness of collaborative supply chains", *Work*, vol. 41, suppl. 1, pp. 2695-2700, 2012, doi: [10.3233/WOR-2012-0513-2695](https://doi.org/10.3233/WOR-2012-0513-2695).

- [43] J. Gualandris, R. Golini y M. Kalchschmidt, “Do supply management and global sourcing matter for firm sustainability performance?: An international study”, *Supply Chain Manag.*, vol. 19, n.º 3, pp. 258-274, 2014, doi: [10.1108/SCM-11-2013-0430](https://doi.org/10.1108/SCM-11-2013-0430).
- [44] M. Alghababsheh y D. Gallea, “Socially Sustainable Supply Chain Management and Suppliers’ Social Performance: The Role of Social Capital”, *J. Bus. Ethics*, vol. 173, pp. 855-875, 2021, doi: [10.1007/s10551-020-04525-1](https://doi.org/10.1007/s10551-020-04525-1).
- [45] M. Alghababsheh, D. Gallea y M. Rahman, “Balancing the scales of justice: Do perceptions of buyers’ justice drive suppliers social performance?”, *J. Bus. Ethics*, vol. 163, pp. 125-150, 2020, doi: [10.1007/s10551-018-3993-0](https://doi.org/10.1007/s10551-018-3993-0).
- [46] F. A. Huq, I. N. Chowdhury y R. D. Klassen, “Social management capabilities of multinational buying firms and their emerging market suppliers: An exploratory study of the clothing industry”, *J. Oper. Manag.*, vol. 46, pp. 19-37, sept. 2016, doi: [10.1016/J.JOM.2016.07.005](https://doi.org/10.1016/J.JOM.2016.07.005).
- [47] D. S. Mann, “Research Methods for Business: A Skill-Building Approach”, *Leadersh. Organ. Dev. J.*, vol. 34, n.º 7, pp. 700-701, 2013, doi: [10.1108/lodj-06-2013-0079](https://doi.org/10.1108/lodj-06-2013-0079).
- [48] A. Liberati *et al.*, “The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate healthcare interventions: explanation and elaboration.”, *BMJ*, vol. 339, n.º 1, pp. 57-58, 2009, doi: [10.1136/bmj.b2700](https://doi.org/10.1136/bmj.b2700).
- [49] P. Hague, *Questionnaire Design*. B2B International, 2006.
- [50] M. C. Martín, “Diseño y validación de cuestionarios”, *Matronas Profesión*, vol. 5, n.º 17, pp. 23-29, 2004.
- [51] I. F. Rodríguez-Gámez, A. A. Maldonado-Macías, J. L. Hernández-Arellano, E. A. Lagarda-Leyva y A. A. N. Flores, “Safety and Ergonomics Indexes Applied to Sustainable Supply Chain Evaluation: A Systematic Literature Review”, en *Digital Transformation for Sustainability*, 1.ª ed, J. Marx Gómez y M. R. Lorini, eds. Springer, Cham, 2022, pp. 495-519, doi: [10.1007/978-3-031-15420-1_24](https://doi.org/10.1007/978-3-031-15420-1_24).
- [52] X. Castañer y N. Oliveira, “Collaboration, Coordination, and Cooperation Among Organizations: Establishing the Distinctive Meanings of These Terms Through a Systematic Literature Review”, *J Manage.*, vol. 46, n.º 6, pp. 965-1001, feb. 2020, doi: [10.1177/0149206320901565](https://doi.org/10.1177/0149206320901565).
- [53] T. Ho, A. Kumar y N. Shiwakoti, “Supply chain collaboration and performance: an empirical study of maturity model”, *SN Appl. Sci.*, vol. 2, n.º 726, pp. 1-16, abr. 2020, doi: [10.1007/s42452-020-2468-y](https://doi.org/10.1007/s42452-020-2468-y).
- [54] M. Mishra y M. Banerjee, “Non-coercive influence: Scale development and validation based on resource and relational paradigms”, *J. Purch. Supply Manag.*, vol. 25, n.º 3, p. 100498, 2019, doi: [10.1016/j.pursup.2018.04.001](https://doi.org/10.1016/j.pursup.2018.04.001).
- [55] D. Ho, A. Kumar y N. Shiwakoti, “A Literature Review of Supply Chain Collaboration Mechanisms and Their Impact on Performance”, *Eng. Manag. J.*, vol. 31, n.º 1, pp. 47-68, 2019, doi: [10.1080/10429247.2019.1565625](https://doi.org/10.1080/10429247.2019.1565625).
- [56] C. Wankmüller y G. Reiner, “Coordination, cooperation and collaboration in relief supply chain management”, *J. Bus. Econ.*, vol. 90, pp. 239-276, 2020, doi: [10.1007/s11573-019-00945-2](https://doi.org/10.1007/s11573-019-00945-2).
- [57] V. Balza-Franco, C. Paternina-Arboleda y D. Cardona-Arbeláez, “Prácticas Colaborativas en la Cadena de Suministro: Una Revisión Conceptual.”, *Saber, Cienc. y Lib.*, vol. 14, n.º 2, 2019, doi: [10.18041/2382-3240/saber.2019v14n2.5882](https://doi.org/10.18041/2382-3240/saber.2019v14n2.5882).
- [58] W. A. Prima, K. Xing y Y. Amer, “Collaboration behavioural factors for sustainable agri-food supply chains: A systematic review”, *J. Clean. Prod.*, vol. 186, pp. 851-864, 2018, doi: [10.1016/j.jclepro.2018.03.148](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.148).
- [59] C. Sancha, C. Gimenez y V. Sierra, “Achieving a socially responsible supply chain through assessment and collaboration”, *J. Clean. Prod.*, vol. 112, pp. 1934-1947, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.137>.
- [60] A. C. Marqui, K. Sacilotto y R. L. Chicarelli, “Collaborative supply chain: a conceptual model for operationalisation”, *Int. J. Manag. Decis. Mak.*, vol. 12, n.º 3, pp. 195-214, 2013, doi: [10.1504/IJMDM.2013.056458](https://doi.org/10.1504/IJMDM.2013.056458).
- [61] N. Lehoux, S. D’Amours y A. Langevin, “Inter-firm collaborations and supply chain coordination: review of key elements and case study”, *Prod. Plan. Control Manag. Oper.*, vol. 25, n.º 10, 2014, pp. 858-872, 2013, doi: [10.1080/09537287.2013.771413](https://doi.org/10.1080/09537287.2013.771413).

- [62] B. Weaver, “Coordination, Cooperation, and Collaboration: Defining the C3 Framework”, disertación, Bryant University, may. 2011. [En línea]. Disponible en: https://digitalcommons.bryant.edu/honors_management/13/
- [63] S. E. Fawcett, C. Wallin, C. Allred, A. M. Fawcett y G. M. Magnan, “Information Technology as an enabler of supply chain collaboration: A dynamic-capabilities perspective”, *J. Supply Chain Manag.*, vol. 47, n.º 1, pp. 38-59, 2011, doi: [10.1016/0009-2614\(89\)87129-5](https://doi.org/10.1016/0009-2614(89)87129-5).
- [64] A. S. Kohli y J. B. Jensen, “Assessing Effectiveness of Supply Chain Collaboration: An Empirical Study”, *Supply Chain Forum: An Int. J.*, vol. 11, n.º 2, pp. 2-16, 2010, doi: [10.1080/16258312.2010.11517228](https://doi.org/10.1080/16258312.2010.11517228).

RECONOCIMIENTOS

Agradecemos al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por el apoyo financiero para la realización de esta investigación. También agradecemos a la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ) por el seguimiento de esta investigación y al Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON) por proporcionar las instalaciones para el procesamiento y análisis de datos. Finalmente, un agradecimiento especial a la Unión Latinoamericana de Ergonomía (ULAERGO) y a la Sociedad de Ergonomistas de México, A. C. (SEMEX), ya que a través de ellos se realizó la vinculación con los expertos.

Mejora ergonómica y productiva en prensa CNC en empresa manufacturera

Ergonomic and productive improvement in CNC bending machine in manufacturing company

Rigoberto Zamora Alarcón^{1a, 2}, Christian Axel Contreras Peñuelas^{1a}, Jesús Rene Valencia Lara^{1a}, Acela Castellón Barraza^{1a, 2} , Arturo Sinue Ontiveros Zepeda^{1b}

¹Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, {^aMexicali, ^bTecate}, Baja California, México

²Departamento de Ingeniería Industrial, TecNM/Instituto Tecnológico de Mexicali, Mexicali, Baja California, México

RESUMEN

En el área industrial metalmecánica, el presente proyecto tuvo como objetivo mejorar las estaciones de trabajo integradas a un proceso de conformado, analizando las estaciones de trabajo donde operan máquinas de corte con láser, mesa de planos, doblado CNC e inspección en una empresa mexicana ubicada en la ciudad de Mexicali, Baja California. Se identificaron áreas donde se requería mejorar las condiciones de trabajo y operación, tomando mediciones de las condiciones laborales y realizando una evaluación con las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) relacionadas con ruido, iluminación, condiciones térmicas elevadas o abatidas, condiciones de seguridad e higiene, así como factores de riesgo ergonómico en el trabajo. Además, con la evaluación de algunos métodos ergonómicos, se logró identificar la probabilidad de actividades que pudieran generar riesgos de lesiones musculoesqueléticas, aplicando herramientas de mejora industrial, como la reingeniería de proceso, 5S, SMED y ergonómica. Se hizo una propuesta de mejora del proceso de prensa CNC, logrando una mejora en las medidas de rendimiento y disminuir las condiciones de riesgo ergonómico de nivel medio a bajo, así como incrementar la productividad del proceso.

PALABRAS CLAVE: Sue Rodgers; RULA; REBA; 5S; SMED.

ABSTRACT

In the metalworking industrial area, this project aimed to improve the workstations integrated into a forming process, analyzing the workstations where laser cutting, drawing table, CNC bending and inspection machines operate in a Mexican company. Areas where it was necessary to improve working and operating conditions were identified, taking measurements of working conditions and carrying out an evaluation with the Mexican Official Standards (NOM) related to noise, lighting, elevated or low thermal conditions, safety and hygiene conditions, as well as ergonomic risk factors at work. Furthermore, with the evaluation of some ergonomic methods, it was possible to identify the probability of activities that could generate risks of musculoskeletal injuries, applying industrial improvement tools, such as process reengineering, 5S, SMED and ergonomics. A proposal was made to improve the CNC press process, achieving an improvement in performance measures and reducing ergonomic risk conditions from a medium to low level, as well as increasing the productivity of the process.

KEYWORDS: Sue Rodgers; RULA; REBA; 5S; SMED.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Acela Castellón Barraza.

INSTITUCIÓN: Instituto Tecnológico de Mexicali / Universidad Autónoma de Baja California.

DIRECCIÓN: Av. Tecnológico s/n, col. Plutarco Elías Calles, C. P. 21376, Mexicali, B. C., México.

CORREO ELECTRÓNICO: acelacastillon@itmexicali.edu.mx

Fecha de recepción: 10 de septiembre de 2023. **Fecha de aceptación:** 27 de febrero de 2024. **Fecha de publicación:** 5 de abril de 2024.



I. INTRODUCCIÓN

Para toda empresa, la mejora continua de sus procesos debe ser vital para aumentar la eficiencia de estos y la calidad de sus productos [1]. Además, se debe verificar que sus procesos cumplan con los requisitos mínimos de seguridad y salud en el trabajo para prevenir accidentes y enfermedades laborales. Para ello, las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) son regulaciones esenciales emitidas por la Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS) [2] que toda empresa debe cumplir.

La aplicación de estas normas puede ayudar a reducir y prevenir accidentes, brindando una mayor protección a los empleados al desempeñar su trabajo.

El presente artículo describe cómo una empresa mexicana que cuenta con experiencia en el diseño industrial y fabricación de carpintería, aprovisionamiento de materiales, modificaciones de distribución de planta, preocupada por la mejora en sus áreas de trabajo y por verificar la seguridad de sus empleados, la calidad y mejora de sus procesos, desarrolló un proyecto donde se aplicó la reingeniería, la ergonomía y la evaluación de las NOM en el área de cortado con láser con Control Numérico Computarizado (CNC).

En el área de estudio, que cuenta con una máquina cortadora con láser CNC y una máquina dobladora en prensa CNC, se observaron y evaluaron altos valores de riesgos ergonómicos a los que están expuestos los trabajadores en sus actividades laborales y que pueden llegar a causar lesiones musculoesqueléticas que generarán incapacidades, según el Reporte de Salud Ocupacional expedido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) [3].

Algunos factores de riesgos son la generación de fuerzas internas en segmentos auriculares de gran intensidad o con una significativa frecuencia, así como la alta periodicidad de movimientos repetitivos y la duración de larga exposición [4].

En este estudio, se tomaron los datos necesarios para posteriormente valorar los resultados que permitieron mejorar el transporte, el manejo del material y los procesos de conformado e inspección de las piezas producidas.

Tomando en cuenta lo anterior, se realizó la validación de las condiciones de seguridad según las NOM corres-

pondientes, buscando corregir posturas que pudieran mejorar la salud de los trabajadores.

El principal problema detectado fue en el traslado del producto, con un 28 % de prioridad; siguiendo la inspección, con un 26.7 %; manejo de material, con 23 %, y, por último, el proceso de doblado, con un 22.3 %. Por consiguiente, se evaluó el proceso según la Norma Oficial Mexicana NOM-036-1-STPS-2018 [5], la cual ayudó a determinar los factores de riesgo ergonómico en los centros de trabajo en el manejo manual de cargas y, a continuación, se hicieron propuestas de mejora que puedan prevenir alteraciones a la salud de los trabajadores.

Con el fin de analizar los procesos en las actividades críticas dentro del área de estudio, se utilizaron las metodologías establecidas en las normas mexicanas NOM-011-STPS-2001 [6], NOM-025-STPS-2008 [7], NOM-015-STPS-2001 [8] y NOM-036-1-STPS-2018 [5]; los métodos ergonómicos Sue Rodgers, REBA, RULA, ARTOOL, QEC, OWAS y WERA, entre otros, y recomendaciones de la Oficina Internacional del Trabajo (OIT) [9].

II. METODOLOGÍA

Para el análisis del proceso se tomaron vídeos, fotografías y mediciones con sonómetros, luxómetros y termómetros del área de trabajo integrada al proceso de doblado de láminas en prensa CNC y se hicieron diagramas de recorrido y de flujo de proceso para facilitar la toma de decisiones de la herramienta a emplear, todo ello para estructurar una propuesta de mejora en los procesos.

Posteriormente, con las Normas Oficiales Mexicanas de la Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS) se evaluó los factores de riesgo. Con el análisis de las actividades realizadas por los operadores se realizó un análisis del área, aplicando esta normatividad en temas como la iluminación y el ruido y evaluando el área de trabajo, además de validar los factores de riesgos ergonómicos que determinan las condiciones para la prevención de riesgos de trabajo, dado lo que establece la NOM-036-1-STPS-2018 de la STPS.

De igual manera, se consideraron los métodos ergonómicos que evalúan las tareas en las que se realizan levantamientos de carga. Se aplicó la ecuación del peso máxi-

mo recomendado según las condiciones del puesto, con la intención de evitar el riesgo de problemas de espalda o lumbalgias ^[10].

El método Sue Rodgers ^[11] ayudó a analizar la fatiga muscular en los operadores, considerando el esfuerzo, la duración y la frecuencia para realizar una determinada tarea.

Con la intención de continuar evaluando los factores de riesgos físicos asociados con trastornos musculoesqueléticos en el trabajo, se aplicaron los métodos REBA (Rapid Entire Body Assessment), RULA (Rapid Upper Limb Assessment), ARTOOL (Assessment of Repetitive Tasks of the Upper Limbs), QEC (Quick Exposure Check), OWAS (Ovako Working Analysis System) y WERA (Workplace Ergonomic Risks Assessment) que consta de seis factores: postura, repetición, esfuerzo de fuerza y la fuerza, vibración, estrés de contacto y duración de cada tarea que involucre las cinco partes principales del cuerpo, que son hombros, muñecas, espalda, cuello y piernas ^[12].

Mediante la antropometría y la medición de estaciones de trabajo se realizó una propuesta de prototipo para disminuir los riesgos y mejorar el flujo de materiales. A su vez, se realizó el mejoramiento del área con la aplicación de 5S, que es el acrónimo de cinco palabras japonesas: seiri, seiton, seiso, seiketsu y shitsuke, que significan clasificación, orden, limpieza, estandarización y disciplina ^[13] y SMED (Single Minute Exchange of Die, o cambio de matriz en menos de 10 minutos) que permitan establecer un método óptimo de alternativas de trabajo ordenadas y simplificadas ^[14].

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al aplicarse las NOM para condiciones de seguridad e higiene en espacios de trabajo, se inició estableciendo una malla de 4 x 4 para determinar los puntos a evaluar dentro del área de trabajo.

Con referencia a la NOM-011-STPS-2001, el ruido dentro de la oficina está debajo de 85 dB(A), cifra dentro de lo permitido por la norma, por lo que no es necesario el uso de equipo de protección auditiva. En la [Figura 1](#) se enlistan los decibeles percibidos en la empresa que se encuentran dentro del rango, pero, aun así, los trabajadores utilizan equipo de protección.

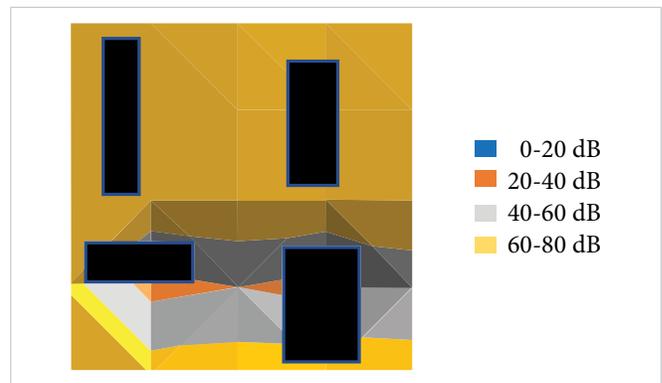


Figura 1. Decibeles percibidos en área de trabajo en evaluación del ruido.

Al evaluar la iluminación dentro área de trabajo, con base en la NOM-025-STPS-2008, se obtuvieron los datos mostrados en la [Figura 2](#), por lo cual se recomienda la iluminación adecuada, cuidando no asignar equipo o máquinas en zona roja, ya que el valor recomendado es de 500 lux y en esa área no se cumple con lo requerido.

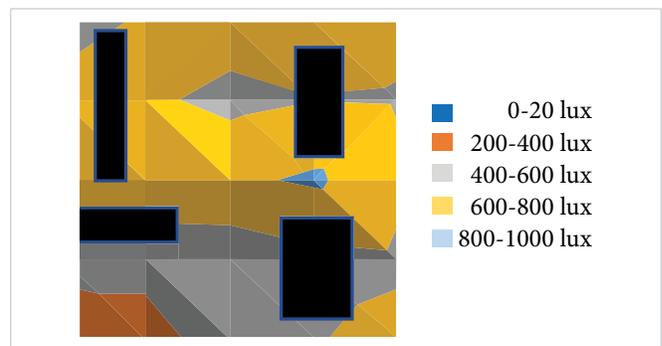


Figura 2. Evaluación de iluminación en el área de interacción de trabajo.

Con base en la NOM-015-STPS-2001, relativa a la exposición laboral de las condiciones térmicas elevadas o abatidas en los centros de trabajo ^[8], en la empresa se detectaron temperaturas acordes a la norma, puesto que la más alta se encuentra en 24 °C, lo cual quiere decir que el taller está a temperatura ambiente, de 20 a 24 °C en promedio, pero cuando se utiliza la máquina de corte láser se debe descansar por diez minutos.

En cuanto a la NOM-036-1-STPS-2018, sobre el manejo manual de cargas, al evaluar esta actividad se encontró que en el levantamiento de la carga el riesgo presentado es medio, por lo tanto, se recomienda realizar una evaluación más específica y medidas de control para así poder implementar un programa de ergonomía para el manejo de cargas manuales. Además, se evaluó el trans-

porte de carga clasificando la actividad con riesgo medio. Véanse los resultados en la [Tabla 1](#).

TABLA 1 RESULTADOS AL APLICAR LA NOM-036-1-STPS-2018

FACTOR DE RIESGO	LEVANTA	TRASLADA
Peso y carga	4*	4
Distancia horizontal	3	0
Región vertical	0	
Torsión y flexión del torso	2	1
Restricciones de postura	0	0
Acoplamiento mano-carga	1	1
Superficie de trabajo	0	0
Otros factores ambientales	0	0
Distancia de transporte		1
Obstáculo de ruta		0
Puntuación:	10	7
Nivel de Riesgo:	Medio	Medio

*Las unidades correspondientes son asignadas por la NOM-036-1-STPS-2018, según el movimiento que realiza el trabajador y el factor de riesgo de ese movimiento.

Cada lámina metálica tiene un peso mayor a los 3 kg. Para poder comprobar dicha medición, se adjuntan datos resultado del peso usando un dinamómetro. En el proceso evaluado, se cargaron más de 5 láminas al momento de transportarlas a la mesa de inspección, lo que significa un levantamiento de carga mayor a 15 kg, por lo que se propuso la mesa móvil (*dolly*).

Se realizó un diagrama de recorrido antes de la propuesta, como se muestra en la [Figura 3](#).

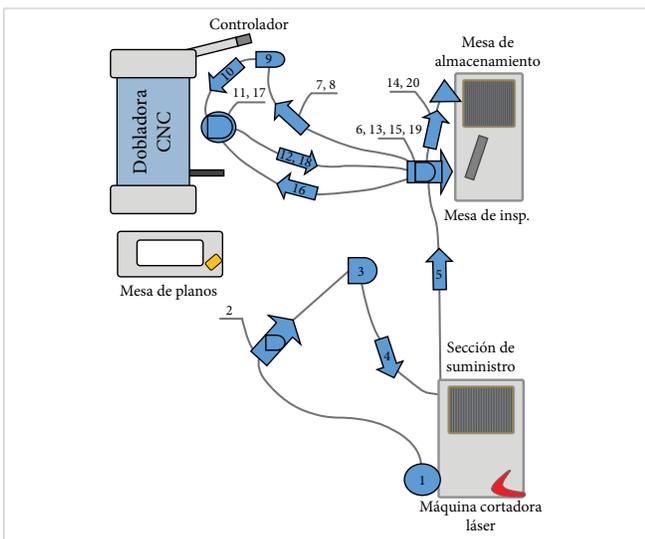


Figura 3. Diagrama de recorrido antes de la mejora.

En la [Figura 4](#) se muestra el diagrama después de la mejora propuesta, con la aplicación de las necesidades ergonómicas analizadas y de los métodos de mejoramiento industrial asignadas o su inspección, según el caso.

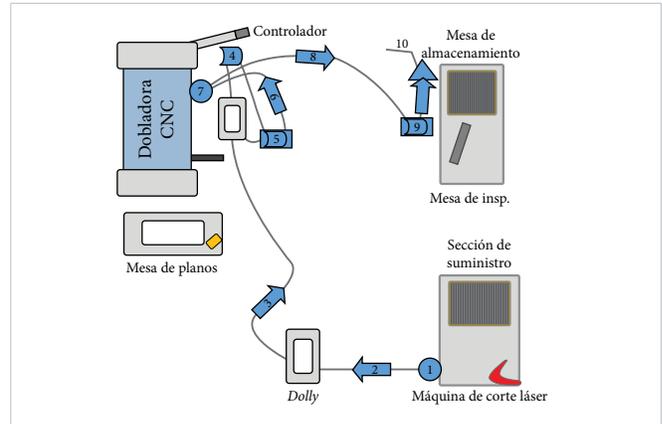


Figura 4. Diagrama de recorrido después de la mejora.

En la propuesta de mejora se propuso usar una mesa móvil (*dolly*) para hacer algunas actividades en el área de trabajo, la cual se desarrolló conforme la antropometría de los dos operadores ([Tabla 2](#)). Esta mesa permitió llevar las cargas de las placas cortadas a las máquinas, disminuyendo el esfuerzo del operador.

TABLA 2 ANTROPOMETRÍA DE UNO DE LOS OPERADORES PARA EL DISEÑO DE LA MESA MÓVIL

DESCRIPCIÓN DE LA MEDICIÓN	cm
Estatura	176.00
Altura de la vista al suelo	163.80
Altura hombro al suelo	145.00
Altura codo flexionado	107.50
Altura rodilla al suelo	51.60
Extensión brazo doblado	38.80
Extensión hacia el frente	91.80
Extensión brazo lateral	94.90
Ancho de codo a codo	53.20
Profundidad máxima cuerpo	22.50

En la [Figura 5](#) se muestra el proceso realizado por un operador: a) levantamiento y transporte manual de láminas cortadas de la cortadora láser al área de trabajo asignada, b) manejo de material entre operaciones de inspección a prensa y de prensa a inspección, c) procesamiento de láminas en piezas dobladas en la prensa CNC y d) inspección de piezas dobladas y almacenamiento.

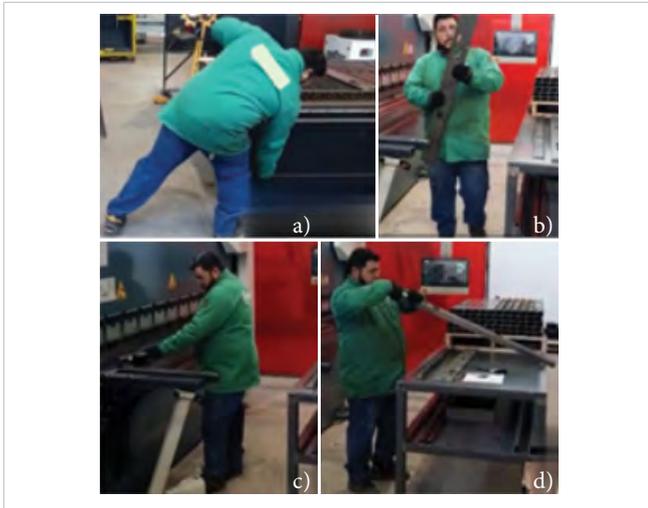


Figura 5. a) Transporte de material, b) manejo de material, c) proceso de doblado y d) inspección.

La aplicación de los métodos ergonómicos permitió valorar los factores de riesgo ergonómico, como se muestra de la [Tabla 3](#) a la [Tabla 7](#). Esto permitió observar que, en algunos casos, los niveles eran de medios a muy altos antes de aplicar mejoras y, por tanto, había gran riesgo.

La [Tabla 3](#) muestra la valoración ergonómica de los factores de riesgo antes y después de aplicar las mejoras ergonómicas y productivas en la operación de transporte de material de forma manual y utilizando como mejora la mesa móvil por el operador de corte de lámina, ya no por el operador de doblado.

TABLA 3
RESULTADOS DE LOS MÉTODOS ERGONÓMICOS EN EL TRANSPORTE DE LÁMINAS CORTADAS A PRENSA

FACTOR DE RIESGO		Cuello	Espalda	Brazo	Antebrazo	Muñeca	Pierna	Fuerza
Sue Rodgers	A	3	3	3	3	4	3	-
	D	1	1	1	1	1	1	-
REBA	A	3	5	4	2	3	2	2
	D	1	2	3	1	2	2	0
RULA	A	3	5	4	3	4	1	3
	D	2	2	2	1	1	1	1
ARTOOL	A	1	2	2	-	1	-	6
	D	0	0	0	-	0	-	0
OWAS	A	-	4	1	-	-	7	3
	D	-	1	1	-	-	2	1
WERA	A	4	4	4	-	3	5	6
	D	2	3	3	-	3	4	3
QEC	A	H	H	V	-	H	-	-
	D	H	M	B	-	H	-	-

A = antes; D = después; V = muy alto; H = alto; M = medio, B = bajo.

Estas mejoras ergonómicas y productivas permitieron, en promedio en todos los casos, mejorar las posturas de cuello (46.8 %), espalda (56.6 %), brazos (40.4 %), antebrazos (61.1 %) y muñeca/mano (43.4 %), que fueron de un 62.6 % a 30.6 % y en algunos métodos no se identificó cambios. También, se registró una mejora en el factor fuerza de 62.6 % en promedio.

Todas las mejoras, en promedio, fueron de 48.8 % y obtenidas según los métodos ergonómicos en un 87.8 % de ellos para la valoración del riesgo ergonómico.

La [Tabla 4](#) muestra que por usar la mesa móvil, que permitió eliminar el transporte manual de las láminas, se mejoró, en promedio, algunas de las posturas de espalda (16.7 %), brazos (27.8 %), antebrazos (16.7 %) y muñeca/mano (21.2 %), que fueron de un 27.8 % a 16.7 % y en algunos métodos no se identificó cambios, como en cuello, piernas y factor fuerza. Todas las mejoras, en promedio, fueron de 11.8 % y obtenidas según los métodos ergonómicos en un 22.1 % de ellos para la valoración del riesgo ergonómico.

TABLA 4
RESULTADOS DE LOS MÉTODOS ERGONÓMICOS EN EL MANEJO DE LÁMINAS A PRENSA Y DE PRENSA A LA MESA DE INSPECCIÓN

FACTOR DE RIESGO		Cuello	Espalda	Brazo	Antebrazo	Muñeca	Pierna	Fuerza
Sue Rodgers	A	1	1	4	4	7	1	-
	D	1	1	1	4	4	1	-
REBA	A	3	3	4	2	3	2	0
	D	3	2	3	1	2	2	0
RULA	A	3	3	3	3	4	1	2
	D	1	2	3	3	2	1	2
ARTOOL	A	1	1	2	-	1	-	4
	D	1	1	0	-	1	-	4
OWAS	A	-	2	2	-	-	7	1
	D	-	1	1	-	-	7	1
WERA	A	3	4	4	-	3	4	3
	D	3	4	4	-	3	4	3
QEC	A	H	M	M	-	H	-	-
	D	H	M	M	-	H	-	-

A = antes; D = después.

En la operación de doblado no hubo cambios significativos, sino que solo se mejoraron posturas observadas en vídeos con los que posteriormente se entrenó a los operadores. En este caso, la [Tabla 5](#) muestra que, en promedio en todos los casos, en las posturas de cuello hubo mejoras del 8.3 %, antebrazos (11.1 %) y muñeca/mano (5.6 %), que fueron de un 11.1 % a 11.6 % y

en algunos métodos no se identificó cambios, como en espalda, brazos, piernas y factor fuerza. Todas las mejoras en promedio fueron de 3.6 % y obtenidas según los métodos ergonómicos en un 11.9 % de ellos para la valoración del riesgo ergonómico.

TABLA 5
RESULTADOS DE LOS MÉTODOS ERGONÓMICOS EN LA OPERACIÓN DE DOBLADO EN LA PRENSA CNC

FACTOR DE RIESGO		Cuello	Espalda	Brazo	Ante-brazo	Muñeca	Pierna	Fuerza
Sue Rodgers	A	2	2	6	6	9	2	-
	D	2	2	6	6	6	2	-
REBA	A	3	2	4	2	2	2	0
	D	3	2	4	2	2	2	0
RULA	A	4	2	4	3	4	1	2
	D	3	2	4	2	4	1	2
ARTOOL	A	1	0	2	-	1	-	2
	D	1	0	2	-	1	-	2
OWAS	A	-	1	1	-	-	3	1
	D	-	1	1	-	-	3	1
WERA	A	4	2	4	-	3	4	2
	D	3	2	4	-	3	4	2
QEC	A	H	M	M	-	H	-	-
	D	H	M	M	-	H	-	-

A = antes; D = después.

En la inspección de piezas dobladas hubo mejoras al ubicar a otro operador para compartir dicha tarea y utilizar una mesa móvil ajustable, quedando los resultados iguales a la inspección anterior (Tabla 6).

TABLA 6
RESULTADOS DE LOS MÉTODOS ERGONÓMICOS EN LA INSPECCIÓN DE PIEZAS DOBLADAS

FACTOR DE RIESGO		Cuello	Espalda	Brazo	Antebrazo	Muñeca	Pierna	Fuerza
Sue Rodgers	7	5	7	7	10	5	-	-
	6	2	6	6	6	2	-	-
REBA	3	3	4	2	3	1	0	0
	2	2	4	1	2	1	0	0
RULA	4	3	4	3	4	1	2	2
	3	2	4	2	2	1	2	2
ARTOOL	1	1	2	-	1	-	2	2
	1	1	0	-	0	-	2	2
OWAS	-	2	2	-	-	1	1	1
	-	2	1	-	-	1	1	1
WERA	4	3	5	-	3	4	3	2
	4	3	4	-	3	4	3	2
QEC	H	M	M	-	H	-	-	-
	H	M	M	-	M	-	-	-

A = antes; D = después.

Las operaciones de inspección disminuyeron y mejoraron, en promedio, las posturas de cuello (12.2 %), espalda (18.1 %), brazos (21.1 %), antebrazos (32.6 %), muñeca/mano (31.1 %) y piernas (12 %), que fueron de un 32.6 % a 12 %, y en algunos métodos no identificó cambios, como en factor fuerza. Todas las mejoras en promedio fueron de 18.1 % y obtenidas según los métodos ergonómicos en un 50.5 % de ellos para la valoración del riesgo ergonómico.

Por otra parte, se registró una disminución de los niveles de riesgo finales, como se puede apreciar en la Tabla 7, de un 50.0 % de los casos, siendo esto una mejora apreciable.

TABLA 7
CONCENTRADO DE RESULTADOS DE LOS MÉTODOS QUE MUESTRAN SUS NIVELES DE RIESGO

FACTOR DE RIESGO ERGONÓMICO		Traslado	Manejo	Proceso	Inspección
REBA	Antes	MA	A	A	A
	Mejora	B	M	A	M
RULA	Antes	MA	MA	MA	MA
	Mejora	M	A	MA	A
ARTOOL	Antes	A	A	M	M
	Mejora	B	M	M	M
OWAS	Antes	A	M	A	A
	Mejora	B	B	A	A
WERA	Antes	M	M	M	M
	Mejora	M	M	M	M
QEC	Antes	MA	A	A	A
	Mejora	A	A	A	A
Sue Rodgers	Antes	B	M	A	MA
	Mejora	B	B	M	M

Hubo una reducción en el traslado de láminas cortadas (71.4 % de los casos en los métodos ergonómicos presentados para la valoración), en el manejo de piezas en estaciones (71.4 %), en el proceso de doblado de láminas en la dobladora CNC (14.3 %) y en la inspección y almacenaje de piezas (42.9 %).

Después de aplicar reingeniería, 5S y SMED, los números indican que se quedan con piezas las 3 estaciones incluyendo la mesa móvil (*dolly*). En este caso se concluye que el proceso quedó como el método de manufactura esbelta lo indica (una pieza a la vez). Los operadores han están trabajando relajados puesto que tienen más tiempo libre entre piezas, como se muestra en la Tabla 8.

TABLA 8
CONCENTRADO DE MEDIDAS DE RENDIMIENTO DESPUÉS DE APLICAR MEJORAMIENTO INDUSTRIAL

MEDIDA DE RENDIMIENTO	ANTES	DESPUÉS	MEJORA
Razón de producción (piezas/hora)	34.6	60	73.4 %
Capacidad producida (piezas/día)	1156	2039	76.3 %
Utilización (%)	86.5	49.04	43.3 %
Disponibilidad (%)	95	95	0.0 %
Inventario en proceso (piezas)	5.6	3	4.6 %

Después del análisis, se realizó una propuesta de distribución que se muestra en la [Figura 6 a\)](#) el mapa 5S y b) la ruta con la mesa móvil (*dolly*) y que fue implementada en el área de trabajo, como se muestra en la [Figura 7](#).

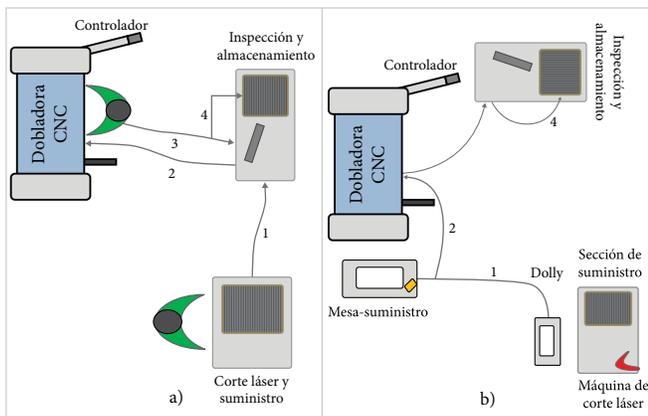


Figura 6. Mapa 5S: a) antes y b) después de aplicarlo.



Figura 7. Verificación de la mesa móvil (*dolly*) con los cambios propuestos y valorados.

Los resultados obtenidos de la aplicación SMED se muestran en la [Figura 8](#), que describe un sistema de mejora industrial, detectándose un 13.1 % del tiempo en preparaciones internas. Esto indicó que las máquinas permanecían sin operar mientras se preparaban las piezas o se inspeccionaba.

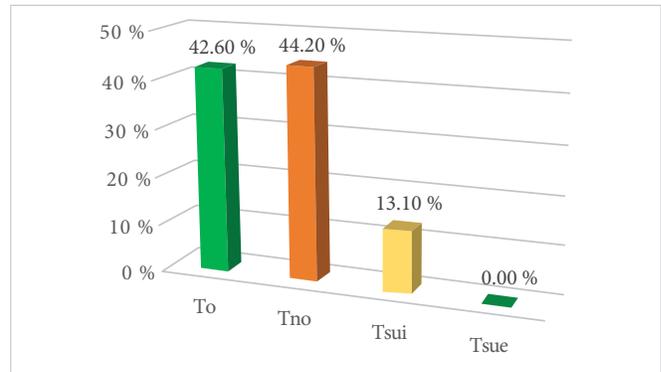


Figura 8. Diagramas muestran mejora en tiempos de preparación (antes).

Después, como muestra la [Figura 9](#), dicha preparación se convirtió en preparación externa porque se tiene el material y herramientas en el sitio donde se van a utilizar.

En este caso, la implementación del uso de la mesa móvil con las herramientas y materiales requeridos en el orden y cantidad necesaria fue de gran importancia para la disminución de los tiempos de preparación.

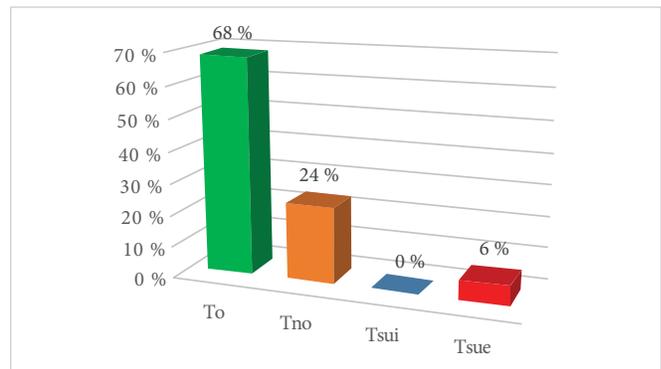


Figura 9. Diagramas muestran mejora en tiempos de preparación (después).

La valoración metodológica de las normas mexicanas permitió identificar y disminuir las condiciones expuestas del transporte y a su vez disminuyeron las posturas incómodas al utilizar el móvil y adaptarlo a la altura de operadores. Después de aplicar el método SMED se mejoró la preparación en un 48.09 % y la operativa en 60.56 %.

IV. CONCLUSIONES

En el área de la máquina de corte por láser CNC y la dobladora mejoraron sus operaciones integradas de forma significativa, disminuyendo los riesgos ergonómicos,

con la aplicación de las diversas herramientas de ingeniería y la evaluación con base en las normas oficiales aplicadas.

Hubo mejoría en la producción del área con el análisis de reingeniería de procesos, pues se hicieron propuestas de mejora para las actividades identificadas como riesgos ergonómicos.

La optimización de las operaciones y el rediseño de los equipos de manejo de cargas fueron indispensables para disminuir radicalmente las cargas manuales que podrían provocar daños musculoesqueléticos, sobre todo cuando se considera la selección por medidas antropométricas y la validación de resultados de los métodos ergonómicos.

Las normas mexicanas fueron la guía para hacer mediciones que, a su vez, permitieron identificar la óptima operación de las estaciones de trabajo. Con los métodos ergonómicos se valoró si las mejoras productivas también disminuían los riesgos ergonómicos considerados.

En esta experiencia propositiva, la mejora ergonómica permite disminuir actividades que no agregan valor, reducir los riesgos y aumentar la productividad.

También, los diagramas de recorrido permiten diagnosticar procesos antes y después de mejoras, así como lo que agregan y no agregan valor a los procesos analizados para disminuir riesgos ergonómicos de manejo de materiales.

La metodología de las herramientas de manufactura esbelta, como 5S y SMED, posibilitan formular opciones de mejora de procesos de forma más rápida y, paralelamente, disminuir los riesgos ergonómicos inherentes.

Las recomendaciones internacionales de la OIT ayudaron a identificar el elemento de manejo de carga que permite ser utilizado como una subestación de apoyo para ordenar y disminuir los traslados de material, con lo cual se redujeron los traslados y aumentó la productividad.

Las valoraciones derivadas de este trabajo pueden ayudar a mejorar las condiciones de trabajo en el área de transporte, manejo e inspección de materiales, disminuyendo el riesgo de lesiones musculoesqueléticas, así como proporcionar las bases para hacer la propuesta

general de adaptación de actividades y del área de trabajo actual de los operadores.

REFERENCIAS

- [1] Keisen Consultores. “Manual de Control y Mejora Continua de los Procesos”, Kaisen, 2015. Accedido: jul. 8, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://keisen.com/es/wp-content/uploads/2015/05/Manual-de-Control-y-mejora-continua-de-los-procesos.pdf>
- [2] STPS, “Evaluación de la Normatividad en Seguridad y Salud en el Trabajo para el Proceso de Transmisión”, Secretaría del Trabajo y Previsión Social. Accedido: jul. 8, 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.stps.gob.mx/BP/SECCIONES/dgsst/publicaciones/prac_seg/sec_elec/evaluacionNor.pdf
- [3] M. I. Clemente, A. F. Cruz, R. E. Arcos y J. Rocha, “Evaluación de un Ciclo de Trabajo, Bajo la Norma Oficial Mexicana NOM-036-1 de Riesgos Ergonómicos”, *JC*, vol. 10, 2021, <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3296>.
- [4] A. Fragoso, R. Pérez, A. K. Merino y J. T. Oliva, “Un análisis ergonómico del manejo manual de cargas: NOM-036-1-STPS-2018 en proceso de fabricación de calzado para pie diabético: NMX-A-238-SCFI-2019”, *INCEPTUM*, vol. 17, n.º 33, pp. 79-107, 2023, doi: <http://dx.doi.org/10.33110/inceptum.v17i33.428>.
- [5] *Factores de Riesgo Ergonómico en el Trabajo-Identificación, Análisis, Prevención y Control. Parte 1: Manejo Manual de cargas*, NOM-036-1-STPS-2018, Secretaría del Trabajo y Previsión Social, nov. 23, 2018. [En línea]. Disponible en: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5544579&fecha=23/11/2018#gsc.tab=0
- [6] *Condiciones de Seguridad e Higiene en los Centros de Trabajo Donde se Genere Ruido*, NOM-011-STPS-2001, Secretaría del Trabajo y Previsión Social, abr. 17, 2002. [En línea]. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=734536&fecha=17/04/2002#gsc.tab=0
- [7] *Condiciones de Iluminación en los Centros de Trabajo*, NOM-025-STPS-2008, Secretaría del Trabajo y Previsión Social, dic. 29, 2008. [En línea]. Disponible en: <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/3581/stps/stps.htm>

- [8] *Condiciones Térmicas Elevadas o Abatidas-Condiciones de Seguridad e Higiene*, NOM-015-STPS-2001, Secretaría del Trabajo y Previsión Social, jun. 14, 2002. [En línea]. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=728016&fecha=14/06/2002#gsc.tab=0
- [9] OIT, “Lista de Comprobación Ergonómica / Ergonomics Checkpoints”, Oficina Internacional del Trabajo en colaboración con la Asociación Internacional de Ergonomía. Accedido: jul. 8, 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/@ed_protect/@protrav/@safework/documents/instructionalmaterial/wcms_345646.pdf
- [10] J. A. Diego-Mas, “Ecuación de NIOSH. Evaluación del Levantamiento de Carga”, *Ergonautas*, 2015, <https://www.ergonautas.upv.es/metodos/niosh/niosh-ayuda.php>
- [11] A. García (2020). Método Suzanne Rodgers [Presentación para descarga]. Disponible en: <https://www.scribd.com/document/488691475/METODO-SUZANNE-RODGERS-ppt>
- [12] ChanelAlberto (2019). Método WERA. [Presentación para descarga]. Disponible en: <https://www.scribd.com/document/412838172/Metodo-WERA>
- [13] Rivera, “Método de las 5S: Orden, Limpieza y Disciplina”, *limpiezarivera.com*. <https://www.limpiezasrivera.com/2019/7/3/metodo-5s> (accedido en mar. 18, 2023).
- [14] J. Müller, “SMED aplicado a matrices de conformado en frío en una autopartista”, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, dic. 2014. Accedido: mar. 18, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/1830>

Rediseño de estación de trabajo mediante simulación Humano Digital y Diseño de Experimentos

Workstation redesign through digital human simulation and design of experiments

Jesús José Aguirre-Solís¹ , Rosalba Angélica Chávez Portillo¹, Mónica Gabriela Gutiérrez Hernández¹  ✉ ,
Paulina Rocío Gutiérrez Hernández² , Gabriel Ibarra-Mejía³ , Luis Gonzalo Guillén Anaya¹ 

¹Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, Chihuahua, México

²Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios 138 "José Mariano Jiménez", Jiménez, Chihuahua, México

³Department of Public Health Sciences, University of Texas at El Paso, El Paso, TX

RESUMEN

En este estudio se adaptó la metodología experimental de Ben-Gal y Bukchin para rediseñar una estación de prueba eléctrica cuyo objetivo fue reducir el riesgo ergonómico al que estaba expuesto el trabajador de una empresa mexicana ubicada en Ciudad Juárez, Chihuahua, México, así como incrementar la productividad de la estación. La metodología inicia con la creación de un gemelo digital, el cual, a través de una prueba de hipótesis, se corroboró la similitud entre las condiciones reales de la estación y lo obtenido de la simulación. Posteriormente, se realizó una secuencia de corridas de simulación y diseños experimentales hasta encontrar el diseño óptimo de esta estación. Finalmente, en la búsqueda del diseño óptimo se usó la metodología de superficie de respuesta y la función de deseabilidad para ambos objetivos. Los resultados muestran que los gemelos digitales son una opción viable cuando se busca mejorar un sistema o proceso sin tener que hacer los cambios físicamente durante los experimentos. Asimismo, se observa una disminución significativa en el riesgo postural del operador de cuatro puntos en el método RULA y una reducción en el tiempo de ciclo del 26 %. En conclusión, los gemelos digitales y la metodología propuesta por Ben-Gal y Bukchin son una opción viable cuando se quiere diseñar o rediseñar una estación de trabajo en la que se pretenda optimizar más de un objetivo.

PALABRAS CLAVE: diseño; ergonomía; función de deseabilidad.

ABSTRACT

In this study, the experimental methodology of Ben-Gal and Bukchin was adapted to redesign an electrical test station whose objective was to reduce the ergonomic risk to which the worker of a Mexican company located in Ciudad Juárez, Chihuahua, Mexico was exposed, as well as increase the productivity of the station. The methodology begins with the creation of a digital twin, which, through a hypothesis test, corroborated the similarity between the real conditions of the station and what was obtained from the simulation. Subsequently, a sequence of simulation runs and experimental designs were carried out until the optimal design of this station was found. Finally, in the search for the optimal design, the response surface methodology and the desirability function were used for both objectives. The results show that digital twins are a viable option when looking to improve a system or process without having to physically make changes during experiments. Likewise, a significant decrease in the postural risk of the four-point operator is observed in the RULA method and a reduction in cycle time of 26%. In conclusion, digital twins and the methodology proposed by Ben-Gal and Bukchin are a viable option when you want to design or redesign a workstation in which you intend to optimize more than one objective.

KEYWORDS: design; ergonomics; desirability function.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Mónica Gabriela Gutiérrez Hernández.

INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez / Instituto de Ingeniería y Tecnología.

DIRECCIÓN: Av. del Charro núm. 450 norte, col. Partido Romero, C. P. 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

CORREO ELECTRÓNICO: monica.gutierrez@uacj.mx

Fecha de recepción: 21 de agosto de 2023. **Fecha de aceptación:** 29 de febrero de 2024. **Fecha de publicación:** 17 de abril de 2024.



I. INTRODUCCIÓN

A partir de la literatura, se sabe que la ergonomía, la ingeniería de métodos y la manufactura virtual se han utilizado en el diseño de estaciones de trabajo industriales. Asimismo, cuando una estación está bien diseñada da como resultado beneficios económicos y ergonómicos. Por un lado, la evaluación de los beneficios económicos se hace a través de las medidas de productividad sustitutiva, entre las que se encuentran la tasa de unidades producidas por hora o su inversa, el tiempo de ciclo por unidad producida. Pero evaluar los beneficios ergonómicos resulta más complejo, pues esto generalmente implica medidas indirectas de los factores de riesgo asociados con el desarrollo de trastornos musculoesqueléticos relacionados con el trabajo. Es decir, se debe realizar un análisis de postura, repetición y fuerza o gasto energético [1]-[4].

Este artículo presenta un estudio de caso en una estación de trabajo de una empresa manufacturera mexicana donde se realiza la prueba eléctrica para los micrófonos manos libres. La actividad en dicha estación es de cuatro pasos: 1) elegir un micrófono, 2) probarlo en una máquina, 3) identificar el resultado de la prueba en un monitor superior y 4) decidir dónde colocar el micrófono dado el resultado de la prueba. Cabe mencionar que el operador de dicho espacio presentaba algunas molestias en el cuello al momento del estudio.

En este sentido, el objetivo de este estudio fue mejorar las condiciones de trabajo del operario mediante el rediseño del puesto de trabajo. El rediseño se realizó siguiendo la metodología propuesta por Ben-Gal y Bukchin [1]. Además, se debió mantener la secuencia de tareas sin cambios, porque está determinada tecnológicamente.

METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE ESTACIONES DE TRABAJO

Con la llegada de la cuarta revolución industrial (I 4.0), se ha incrementado considerablemente la presencia de tecnologías inteligentes en una gran diversidad de procesos y sistemas industriales [5], [6]. Entre dichas tecnologías están internet de las cosas (IoT) y gemelos digitales, consistente esta última en la representación de un sistema de producción, persona, máquina, instalación o un proceso productivo nuevo a través de las tecnologías computacionales. Asimismo, dentro de sus aplicaciones principales se encuentra la validación del diseño me-

dante un modelo de simulación que replica las características y el comportamiento del sistema bajo estudio. Es decir, no debe haber discrepancias entre el gemelo digital y el estado actual del sistema [7].

También, diversos autores [8] afirman que el modelado y simulación de gemelos digitales, junto con la ergonomía y el estudio de tiempos, son técnicas efectivas para mejorar las condiciones y el medio ambiente de trabajo mediante el diseño de estaciones de trabajo en la fabricación [9].

Por ejemplo, Arenas *et al.* [10] aplicaron una herramienta de realidad virtual (RV) en el diseño 3D de los puestos de trabajo para una línea de fabricación y montaje de clústeres automotrices. Dicho diseño se realizó en el software de simulación Catia V5[®], incluyendo factores humanos y ergonomía. Para el análisis postural se utilizó SAFEWORK[™], mientras el prototipo final se evaluó a través de los métodos RULA y NIOSH LE integrados en el software de simulación. Este enfoque permite visualizar los cambios necesarios cuando se lanza un nuevo producto.

Además, se ha desarrollado una metodología que incluye la ergonomía y simulación discreta de eventos con el software Arena[®] para rediseñar estaciones de trabajo manuales en una fábrica de bandejas de comida para la industria aérea [3], en la que se aplicó ERIN para evaluar los riesgos posturales de los empleados. Los resultados de dicha evaluación permitieron identificar las operaciones críticas de este proceso y, además, proponer algunas opciones de rediseño para reducir los riesgos posturales y mejorar la productividad. Se simularon y analizaron dichas opciones, seleccionando un diseño que satisficiera el volumen de producción requerido con el mínimo riesgo ergonómico para los empleados [3].

En los estudios mencionados, se utilizaron herramientas de ergonomía, ingeniería de métodos, simulación y fabricación virtual para generar y evaluar las opciones de diseño de las estaciones de trabajo. Ciertamente, se puede seleccionar una de ellas, aunque no sea necesariamente la óptima, lo cual sería una limitación metodológica cuando el interés sea encontrar el diseño óptimo.

Por otro lado, Somasundaram y Srinivasan [11] proponen una metodología que utiliza el Diseño de Experimentos (DOE, por sus siglas en inglés) para encontrar un conjunto de parámetros óptimo de diseño para una estación

de trabajo dedicada a hacer dosa, una comida popular de la India. Para identificar los posibles factores de riesgo que propician la presencia de los trastornos musculoesqueléticos relacionados con el trabajo dentro de las condiciones laborales actuales, se efectuó una serie de entrevistas a 350 personas que trabajaban en esta cocina. Posteriormente, hicieron un experimento con 6 trabajadores, cada uno de los cuales hizo la misma operación con las mismas condiciones de trabajo, pero en tres modelos de estaciones de trabajo distintas. Con la ayuda del análisis de experimentos, identificaron factores significativos relacionados con la eficiencia y los riesgos posturales. Se utilizó el método de Taguchi para encontrar el modelo óptimo de estación de trabajo. Entre los resultados destaca un aumento de la productividad de los trabajadores superior al 10 % por hora y, además, una reducción en el dolor de espalda, hombros y cuello.

Cuando el interés es encontrar la configuración óptima de diseño de la estación de trabajo, el DOE es relevante, pero requiere realizar el experimento construyendo o modificando físicamente las estaciones de trabajo actuales y esto puede representar una limitación en términos de costo y tiempo [10]. Para superar esta limitación, Ben-Gal y Bukchin [1] han propuesto una metodología para encontrar un diseño óptimo de la estación de trabajo sin modificar la estación de trabajo actual. En su lugar, plantean construir un modelo virtual para la estación de trabajo actual, utilizando experimentos factoriales, ejecutando simulaciones con herramientas de diseño de simulación humana virtual y metodologías de superficie de respuesta (RSM) hasta encontrar la mejor configuración o el diseño óptimo.

Esta última metodología se aplicó en una planta de envasado de frutas, donde muchas tareas, como el enrutamiento y la clasificación, estaban totalmente automatizadas, pero tenían un cuello de botella en la línea de envasado manual. Además, la línea consistía en varias estaciones de trabajo similares de envasado manual. En este sentido, se decidió rediseñar la estación de trabajo para aumentar su productividad, pero en lugar de experimentar con la estación de trabajo existente, construyeron un modelo de esta con RobcadMan/eMPOWER, una herramienta de fabricación virtual con un humano digital.

Este modelo se construyó siguiendo la configuración de la estación de trabajo existente. Posteriormente se ejecutó un experimento factorial simulado con cuatro factores de diseño y dos objetivos para la generación de

un conjunto de soluciones factibles. Sus objetivos eran maximizar el rendimiento y crear un entorno ergonómico aceptable para los trabajadores.

Asimismo, se utilizó las metodologías de superficie de respuesta y el procedimiento de optimización de Derringer y Suich, cuya finalidad era encontrar la solución óptima. Una vez que se obtuvo dicha solución, fue evaluada a través del sistema de evaluación de la postura de trabajo (OWAS, por sus siglas en inglés) de Ovako, de la ecuación de levantamiento del Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional y del sistema de medición de tiempo de métodos (MTM). Entre los resultados se reportó una reducción en el tiempo de ciclo de 11.08 a 10.56 segundos y un aumento en la función de discapacidad de 0.236 a 0.736 (en un rango de 0 a 1) para una mejora significativa en la comodidad del trabajador [12].

Aunado a ello, diversos autores afirman que para evaluar los centros de trabajo tomando de referencia el humano, resulta de gran utilidad la modelación y simulación Humano Digital y el uso de interfaces. Por ejemplo, los sensores, cámaras de audio y vídeo facilitan el estudio del movimiento humano en tiempo real. Entre las ventajas de los simuladores como Jack® está que los resultados reportados, aunque mejorables, son alentadores. También incluye diversos métodos usados en ergonomía, como RULA, OWAS, LB y CA [13]-[16].

En este sentido, este trabajo representa una contribución a la metodología propuesta por Ben-Gal y Bukchin [1] al ser aplicada al rediseño ergonómico de una estación de trabajo de pruebas eléctricas en la línea de montaje de los micrófonos de manos libres en una planta de fabricación. En dicha estación, el operador siguió la secuencia de tareas para probar un micrófono de manos libres, uno a la vez, con una máquina de prueba. Además, es importante mencionar que se trata de una estación en la que se trabaja a un ritmo acelerado. De lo contrario, se convierte en un cuello de botella al generar una acumulación considerable de piezas provenientes de estaciones de trabajo anteriores. Además, en el análisis ergonómico se observó que el trabajador adoptaba posturas no neutras que le provocaba molestias en el cuello.

En esta perspectiva, el objetivo de este trabajo es rediseñar la estación de pruebas eléctricas, utilizando la metodología propuesta por Ben-Gal y Bukchin, para

incrementar la productividad de la estación, además de reducir o eliminar los factores de riesgo que propician el desarrollo de los trastornos musculoesqueléticos derivados de las condiciones laborales, como lo es la carga postural.

II. METODOLOGÍA

El estudio se aplicó en la estación de pruebas eléctricas de un micrófono de manos libres. Primeramente, se realizó la configuración actual de la estación de trabajo como solución inicial. Esta solución fue modelada, validada y simulada utilizando Jack®, un software de simulación desarrollado por Technomatix. Los análisis estadísticos se efectuaron con el software Minitab® versión 16. La metodología constó de dos etapas descritas a continuación.

ETAPA 1. USO DE UN GEMELO DIGITAL PARA MEJORAR LA ESTACIÓN DE TRABAJO

Esta etapa, que consta de cinco pasos, consistió en mejorar la solución inicial mediante un experimento factorial cuya finalidad es buscar las opciones ideales de una combinación de los niveles de los factores utilizando el modelado y simulación Humano Digital (DHMS, por sus siglas en inglés):

1. Realizar un análisis de tareas para la estación de trabajo actual. Se analizaron las posturas actuales del operador con la ayuda de vídeos y el sistema de análisis de postura de trabajo Ovako OWAS ^{[13], [14]}.
2. Recopilar datos relevantes, como las medidas antropométricas del operador, las características de la estación de trabajo mediante el uso de fotos, dimensiones y vídeos de diferentes vistas, así como el tiempo de ciclo con un estudio de tiempos y movimientos, entre otros ^[15].
3. Diseñar el experimento estadístico para mejorar la solución inicial, estableciendo los objetivos, las respuestas y los factores de control.
4. Modelar y simular el sistema actual con el software de simulación Jack®. Este modelo de simulación (MS) es el modelo de estación de trabajo en 3D y Humano Digital (HD) diseñado con las medidas antropométricas del operador. Posteriormente, se valida dicho modelo con los resultados posturales

del Sistema de Análisis de la Postura de Trabajo (OWAS) de Ovako, comparando los tiempos de ciclo simulados y observados.

Se considera como *tiempo de ciclo* el tiempo total que tarda el operador en probar cada micrófono. Este es igual a la suma de los tiempos de cada movimiento durante todo el ciclo. Dicho ciclo comienza con el tiempo que tarda el operador en agarrar un micrófono de una bandeja y termina con el tiempo que tarda en colocarlo en otra bandeja después de ser probado. El tiempo de ciclo se calculó con Jack®, el software de simulación, después de cada ejecución. La Ecuación 1 muestra la fórmula para calcular el tiempo de ciclo.

$$\text{tiempo de ciclo} = \sum_{i=1}^n t_i \text{ (segundos/parte)} \quad (1)$$

donde t_i es el tiempo en segundos para el movimiento i para $i = 1, \dots, n$ y n es el número de movimientos.

Por otro lado, la *carga postural* es un promedio ponderado en el tiempo de los valores de riesgo postural calculados por el método OWAS para las posturas del operador a lo largo del ciclo. Este promedio se calcula con Jack®. La Ecuación 2 corresponde a la fórmula para calcular la carga postural.

$$\text{carga postural} = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i * t_i)}{\text{tiempo de ciclo}} \quad (2)$$

donde p_i es el nivel de riesgo de postura del método OWAS (con valores enteros de 1 a 4) y t_i es el tiempo que el operador pasa en cada postura para $i = 1, \dots, n$, donde n es el número de posturas.

5. Ejecutar el experimento con el modelo de simulación validado para encontrar cualquier configuración mejorada de la estación de trabajo.

ETAPA 2. OPTIMIZACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN MEDIANTE LA SUPERFICIE DE RESPUESTA Y EL ENFOQUE DE DESEABILIDAD DE DERRINGER Y SUICH

En esta segunda etapa, que también abarca cinco pasos, la solución mejorada (obtenida de la primera etapa) se refina y optimiza aún más utilizando técnicas de superficie de respuesta y el enfoque de deseabilidad de Derringer y Suich.

1. Utilizar las Metodologías de Superficie de Respuesta (RSM, por sus siglas en inglés) para analizar la configuración del modelo de regresión del diseño mejorado, así como para probarlo en busca de falta de ajuste.
2. Perfeccionar el modelo de regresión mejorado y, si es necesario, ajustar a un modelo de regresión de orden superior.
3. Evaluar y optimizar aún más la solución refinada con el procedimiento de optimización de Derringer y Suich.

Para trabajar en la optimización de la estación de trabajo es necesario tener claro los dos objetivos que se pretenden lograr con este rediseño: el ergonómico y el productivo, ambos medidos por la variable de respuesta correspondiente que en el primer objetivo es *carga postural* y en el segundo es *tiempo de ciclo*.

Estos objetivos, cada uno con igual peso, deben ser modelados mediante modelos de regresión. Para optimizar ambos se debe utilizar el enfoque de la función de deseabilidad de Harrington [17], con la metodología descrita por Derringer y Suich [12]. Este enfoque tiene cinco fases:

- a) Determinación de los parámetros óptimos de deseabilidad y valores objetivo para ambas variables de respuesta: *carga postural* y *tiempo de ciclo*.
 - b) Encontrar la solución de diseño óptima.
 - c) Optimización de la variable de respuesta *rango postural*.
 - d) Calcular el tiempo de ciclo y los valores de ergonomía para la solución de diseño óptima.
 - e) Calcular el valor general de la función de deseabilidad para la solución de diseño óptima.
4. Analizar los resultados.
 5. Comparar la solución óptima de diseño con la solución de diseño inicial y evaluar los resultados.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

RESULTADOS ETAPA 1. USO DE UN DHMS PARA MEJORAR LA ESTACIÓN DE TRABAJO

1. Análisis de la tarea

Cuando se desea analizar una tarea, se sugiere el uso de la técnica de videofilmación y la toma de fotografías que permitan realizar la evaluación tanto de tiempos y movimientos como ergonómica sin necesidad de interrumpir o incomodar al trabajador [18]. Asimismo, se recomienda filmar entre 20 y 40 minutos la tarea con la finalidad de obtener una muestra representativa de las distintas posturas que se adopta al realizarla, así como conocer la frecuencia de cada una de ellas [18], [14]. Para este estudio se filmó la actividad durante 20 ciclos ininterrumpidos a través de videofilmación, con la finalidad de obtener la información precisa sin incomodar al operador.

Para realizar el estudio de tiempos y movimientos se utilizó el MTM-1 y el cronometraje, mientras que el análisis postural se llevó a cabo a través de la observación y la evaluación con el método OWAS de Ovako en el modelo de simulación inicial. La [Tabla 1](#) muestra la distribución de tiempo-frecuencia de las actividades que conforman la tarea.

TABLA 1
FRECUENCIA DE TIEMPO DE LAS TAREAS DE PRUEBA ELÉCTRICA

ORDEN	TAREA	% TIEMPO
1	Toma un micrófono	20
2	Realiza una prueba de sonido	9
3	Verifica la salida de la prueba	12
4	Acciona la palanca de tracción de la máquina	8
5	Elimina el micrófono anterior, de tipo MMIC	9
6	Inserta el siguiente micrófono en el nido	9
7	Acciona la palanca de empuje de la máquina	5
8	Inspecciona visualmente el micrófono probado	9
9	Coloca el micrófono probado en una bandeja	19

La frecuencia de las tareas 1, 3 y 9 es superior al 10 por ciento. En la tarea 1, el operador flexiona el brazo para agarrar un micrófono colocado en una bandeja inferior

derecha. En la tarea 3, el operador gira el cuello e inclina la cabeza hacia atrás para ver el monitor superior. Y en la tarea 9, después de hacer la prueba, el operador que sostiene el micrófono con la mano izquierda flexiona el brazo para colocarlo en una bandeja inferior.

Por otro lado, al aplicar el método de evaluación postural OWAS de Ovako se detectó que el operario adoptaba malas posturas al desarrollar la actividad. Es decir, al realizar la actividad, el operador adoptaba posturas no neutras (la extensión del cuello, por ejemplo). En este sentido, también se consideró reducir o eliminar las dichas posturas al realizar la tarea.

Recolección de datos

Con referencia a las medidas antropométricas del operador, se observaron valores que corresponden al 50 percentil de las mujeres mexicanas [19]. Por ello, dicho percentil se tomó de referencia para el rediseño de la estación [12].

Además, en el diseño inicial de la estación de trabajo se configuró la altura de la mesa para que se ajustara a la altura del operador.

Por otra parte, al calcular los tiempos de ciclo con el diseño original se obtuvo un promedio de 17.56 segundos. Estos tiempos de ciclo se utilizaron para validar el modelo de simulación de estación de trabajo (MS) actual.

Diseños de experimentos

Se diseñó una secuencia de dos experimentos para mejorar la configuración inicial de la estación de trabajo modelada por el modelo de simulación. El primero de ellos fue un diseño factorial con dos variables de respuesta y tres factores de control y el segundo, destinado a refinar aún más la solución óptima del anterior, es un experimento con una variable de respuesta y un factor de control.

El primer diseño del experimento tuvo dos objetivos: uno ergonómico y otro productivo. La variable de respuesta para el objetivo ergonómico es la *carga postural* y para el objetivo productivo es el *tiempo de ciclo*. Por otra parte, los factores de control para el primer experimento se determinaron de acuerdo con las recomendaciones proporcionados por la metodología de Ben-Gal y Bukchin [1]:

- a) Factor X1 (altura de la mesa). Es la distancia vertical en centímetros desde el suelo hasta la superficie de la mesa de la estación de trabajo. En el modelo de simulación inicial (MS) es de 87.5 centímetros.
- b) Factor X2 (distancia a la bandeja). Es la distancia horizontal en centímetros desde el borde izquierdo de la máquina de prueba eléctrica hasta el borde derecho de la bandeja izquierda. Esta distancia es de 25 centímetros en el modelo de simulación inicial (MS) (Figura 1).

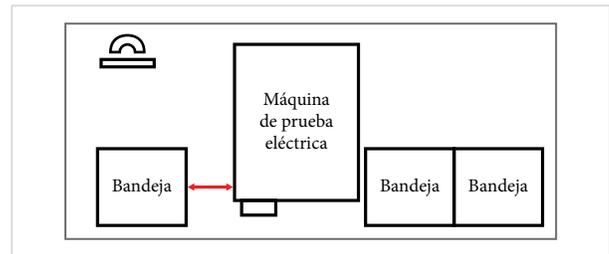


Figura 1. Factor X2: distancia a la bandeja.

- c) Factor X3 (profundidad a la bandeja). Es la distancia entre el borde de la mesa de la estación de trabajo y el borde de la bandeja izquierda en centímetros (Figura 2). Inicialmente, esta distancia se establece en cero.

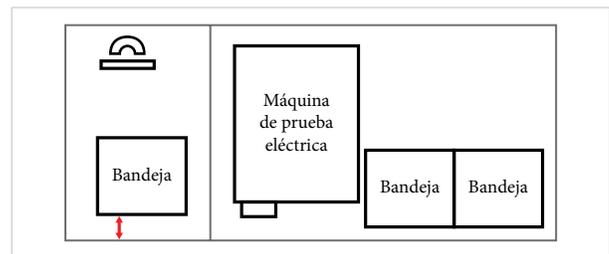


Figura 2. Factor X3: profundidad de la bandeja.

Los niveles de los factores de diseño y sus valores delta, en centímetros, se muestran en la Tabla 2. Los valores de estos factores en el modelo de simulación de solución inicial (MS) se encuentran en la columna Nivel 0.

TABLA 2
NIVELES DE FACTORES DE DISEÑO

FACTORES	NIVEL			
	0	1	-1	DELTA
X1	87.5	97	78	9.5
X2	25	45	5	20
X3	0	30	-30	30
Monitor	49	70	0	

Asimismo, en la [Tabla 2](#) se muestra el factor de control para el segundo experimento (monitor). Este factor está diseñado para tener en cuenta el riesgo postural en la operación 3. La variable de respuesta, que es discreta, representa el rango postural con valores para el cuello, calculados con el software Jack®, utilizando el método RULA. La función de la elevación del monitor tiene dicha altura como único factor de control. Los valores factibles para este son de 0 a 70 centímetros y la altura real, medida desde el borde inferior del monitor hasta la superficie de la mesa de la estación de trabajo, es de 49 centímetros, la misma que en la solución inicial.

Construcción y validación del modelo de simulación de la estación de trabajo

Se construyó un modelo de simulación (MS) para la estación de trabajo de prueba eléctrica con un modelo de humano digital con las medidas antropométricas del operador, utilizando el software de simulación Jack® ([Figura 3](#)). Durante el proceso de validación de este MS, se realizó una prueba de hipótesis comparando el tiempo de ciclo promedio simulado de 17.69 segundos con el promedio de los tiempos de ciclo observados de 17.56 segundos. Dicha hipótesis probó si existe diferencia entre el tiempo de ciclo simulado y el tiempo de ciclo observado. Finalmente, el resultado no mostró suficiente evidencia estadística para afirmar que hay diferencia entre ambos ciclos, con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$.



Figura 3. El modelo de simulación de la estación de trabajo.

Simulación del experimento

Las corridas simuladas para el diseño de experimentos factorial 2^3 con cinco puntos centrales, se muestran en la [Tabla 3](#), en la cual se observa cada ejecución de simulación, analizando el informe de evaluación postural del método OWAS y registrando la carga postural (Y1) calculada por este método.

Con el análisis de estos informes se pretende identificar alguna mejora para las posturas del operador en las tareas 1 y 9. El análisis de los informes para las corridas experimentales 6 y 13 muestra valores de uno, en un rango de uno a cuatro, identificando posturas mejoradas para estas dos tareas.

TABLA 3
SALIDA DE LA SIMULACIÓN PARA LAS EJECUCIONES EXPERIMENTALES (VARIABLES CODIFICADAS)

CORRIDA	FACTOR			RESPUESTA	
	X1	X2	X3	CARGA	TIEMPO
1	0	0	0	1.39	17.43
2	-1	-1	-1	1.44	17.99
3	0	0	0	1.44	17.67
4	1	1	1	1.34	18.07
5	-1	-1	1	1.24	13.52
6	1	-1	1	1.06	13.01
7	0	0	0	1.40	18.24
8	-1	1	-1	1.47	21.87
9	0	0	0	1.42	17.65
10	-1	1	1	1.44	18.32
11	1	-1	-1	1.35	17.54
12	0	0	0	1.39	17.45
13	1	1	-1	1.43	21.98

RESULTADOS ETAPA 2. OPTIMIZACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN MEDIANTE LA SUPERFICIE DE RESPUESTA Y EL ENFOQUE DE DESEABILIDAD DE DERRINGER Y SUICH

Uso de metodologías de superficie de respuesta (RSM)

En esta sección se describe el ajuste de dos modelos de regresión de superficie de respuesta: el de la respuesta Y1 (carga postural) y el de la respuesta Y2 (tiempo de ciclo), con la metodología de DHMS y el RSM ^[20].

Modelo de carga postural

Para ajustar un modelo de regresión a la respuesta carga postural, se comenzó con un modelo de regresión de primer orden considerando los tres factores X1, X2 y X3. En este modelo, como se muestra en la [Tabla 4](#), todos los factores y la interacción entre X2 y X3 son significativos a un nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

Adicionalmente, se observa que R-sq = 87.30 % y R-sq (pred) = 56.38 %, lo cual indica que el modelo explica un 87.3 % la variabilidad observada en la variable carga postural. Además, la r^2 pronosticada refiere que este modelo puede predecir la respuesta para nuevas observaciones en un 56.38 % ^[21]. Dicho resultado se confirmó con un diagrama normal y uno de Pareto de efectos estandarizados.

TABLA 4
ANÁLISIS DE UN MODELO AJUSTADO PARA CARGA POSTURAL (VARIABLES CODIFICADAS)

FACTOR	EFEECTO	COEFICIENTE	COEFICIENTE ES	T	P
Constante		1.37	0.01339	102.31	0.000
X1	-0.1025	-0.05125	0.01707	-3.00	0.017 ^a
X2	0.1475	0.07375	0.01707	4.32	0.003 ^a
X3	-0.1525	-0.07625	0.01707	-4.47	0.002 ^a
X2*X3	0.0925	0.04625	0.01707	2.71	0.027 ^a
S = 0.0482830		PRENSA = 0.0640336			
R-sq = 87.30 %		R-sq (pred) = 56.38 %		R-sq (ajust) = 80.94 %	

^aEstos valores fueron significantes en las pruebas con un $\alpha = 0.05$.

Posteriormente, se realizó una prueba de falta de ajuste para este modelo y los resultados muestran que este no se ajusta a las corridas experimentales al obtener un valor P menor que el nivel de significancia $\alpha = 0.05$ ($P = 0.02819$) ([Tabla 5](#)).

En este sentido, Myers, Montgomery y Anderson-Cook ^[20] refieren que se debe considerar la posibilidad de que los términos de interacción puedan estar causando alguna curvatura en la superficie de respuesta, requiriendo en este caso un modelo de regresión de segundo orden.

TABLA 5
ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL MODELO DE CARGA POSTURAL DE PRIMER ORDEN (UNIDADES CODIFICADAS)

FUENTE DE VARIACIÓN	GL	SUMA DE CUADRADOS	SUMA DE CUADRADOS (AJUSTADA)	MEDIA CUADRÁTICA	F	P
Efectos principales	3	0.111037	0.111037	0.0370125	15.88	0.001
Interacciones	1	0.017113	0.017113	0.0171125	7.34	0.027
Error residual	8	0.011865	0.011865	0.0023312		
Falta de ajuste	4	0.016770	0.016770	0.0041925	8.92	0.028
Puro error	4	0.001880	0.001880	0.0004700		
Total	12 ^a	0.146800 ^a				

^aEstos totales son la suma de efectos principales, interacciones y error residual.

Antes de ajustar un modelo de regresión de segundo orden, se construyó una gráfica de contorno y una de superficie ([Figura 4](#)) que muestran los efectos cuadráticos.

factores significativos: la distancia a la bandeja (X2) y la profundidad de la bandeja (X3) con valores $P < 0.05$ ^[22].

Modelo de regresión para el tiempo de ciclo

La [Tabla 6](#) muestra los resultados del ajuste correspondiente al modelo para el tiempo de ciclo. Se obtuvo dos

En consecuencia, la Ecuación 4 muestra el modelo de regresión de primer orden para la variable de respuesta tiempo de ciclo:

$$\hat{y}_2 = 17.749 + 2.273x_2 - 2.058x_3 \quad (4)$$

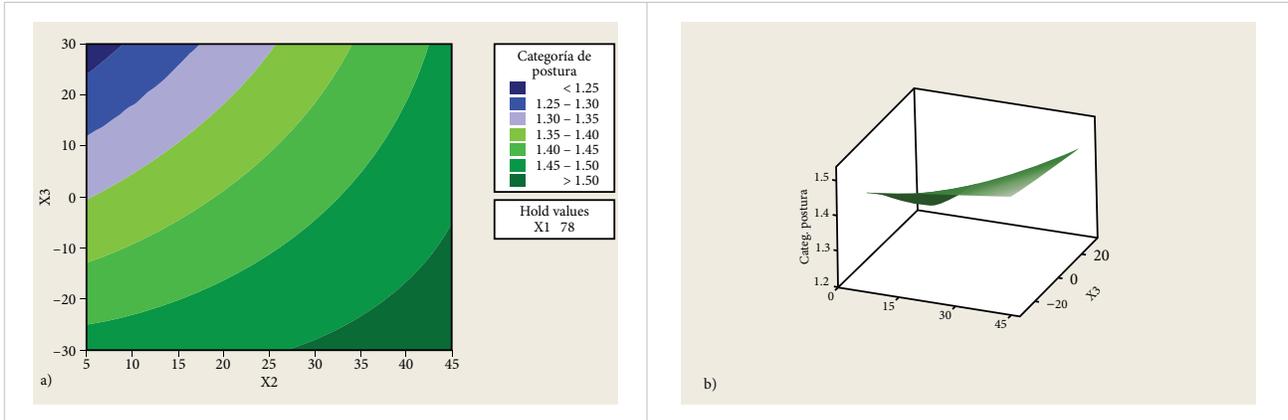


Figura 4. Gráficos del modelo de segundo orden para la carga postural versus X2 y X3: a) de contorno y b) de superficie de respuesta.

TABLA 6
ANÁLISIS DE UN MODELO AJUSTADO PARA TIEMPO DE CICLO (UNIDADES CODIFICADAS)

FACTOR	EFFECTO	COEFICIENTE	COEFICIENTE ES	T	P
Constante		17.749	0.07452	238.19	0.000
X1	-0.275	-0.138	0.09499	-1.45	0.186
X2	4.545	2.273	0.09499	23.92	0.000 ^a
X3	-4.115	-2.058	0.09499	-21.66	0.000 ^a
X2*X3	0.385	0.192	0.09499	2.03	0.077
S = 0.268676		PRENSA = 1.24734			
R-sq = 99.24 %		R-sq (pred) = 98.36 %		R-sq (ajust) = 98.86 %	

^aEstos valores fueron significantes en las pruebas con un $\alpha = 0.05$.

El análisis de varianza de la prueba de falta de ajuste para este modelo de regresión de primer orden se muestra en la [Tabla 7](#). Se obtuvo un valor *P* superior al nivel

de significancia ($P = 0.837$), lo cual indica que no hay suficiente evidencia estadística para asegurar que este modelo no se ajusta a los datos ^[23].

TABLA 7
ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL MODELO DE PRIMER ORDEN CON LA VARIABLE DE RESPUESTA TIEMPO DE CICLO (UNIDADES CODIFICADAS)

FUENTE DE VARIACIÓN	GL	SUMA DE CUADRADOS	SUMA DE CUADRADOS (AJUSTADA)	CUADRADO MEDIO	F	P
Efectos principales	3	75.3318	75.3318	25.1106	347.86	0.000
Interacciones	1	0.2964	0.2964	0.2964	4.11	0.077
Error residual	8	0.5775	0.5775	0.0722		
Falta de ajuste	4	0.1478	0.1478	0.0370	0.34	0.837
Error puro	4	0.4297	0.4297	0.1074		
Total	12	76.2057				

Tanto el gráfico de superficie de respuesta como el gráfico de contorno de la [Figura 5](#) muestran una curvatura despreciable. El gráfico de contorno también exhibe la región óptima para minimizar el tiempo de ciclo de respuesta.

Sin embargo, una búsqueda adicional en esta región probablemente requiera cambiar los niveles de factores experimentales y el procedimiento de prueba actual, y esto no es una opción.

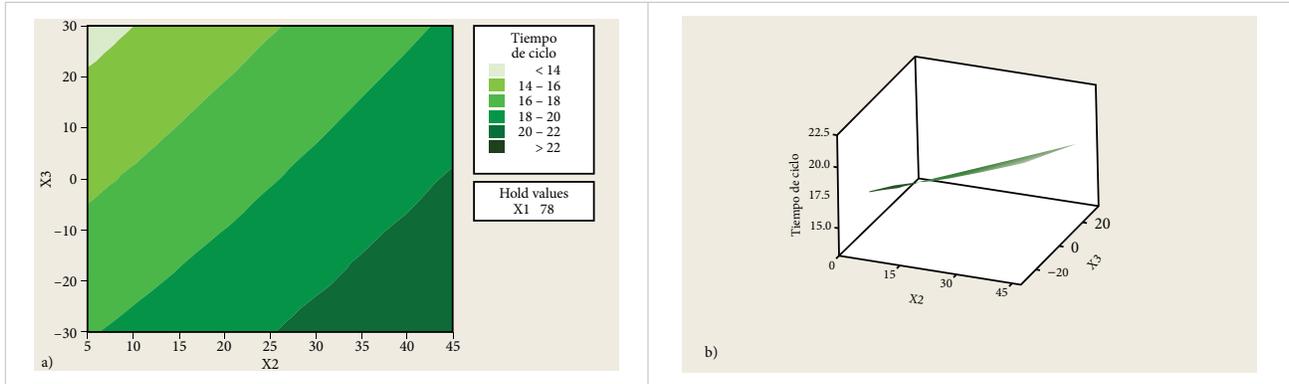


Figura 5. Gráficos del modelo de segundo orden para tiempo de ciclo versus X2 y X3: a) de contorno y b) de superficie de respuesta.

Modelo de regresión de segundo orden

Con base en los resultados anteriores, fue necesario ajustar un modelo de regresión de segundo orden para la variable de respuesta carga postural, y para ello se utilizó un diseño central compuesto (CCD, por sus siglas en inglés) con 5 puntos centrales. Se realizaron 19 corridas experimentales que se muestran en la [Tabla 8](#). Se observan 5 puntos centrales y 6 puntos axiales con una distancia axial $\alpha = 1.6818$, así como 8 puntos factoriales. Todas las ejecuciones se simularon con éxito, excepto las ejecuciones inviables (2 y 9).

TABLA 8
LA SIMULACIÓN EJECUTA LA SALIDA DE LA CARGA POSTURAL (CCD)

NÚM.	VARIABLES CODIFICADAS			RESPUESTA
	X1	X2	X3	CARGA POSTURAL
1	-1	1	-1	1.47
2	0	-1.68179	0	
3	1	1	1	1.34
4	0	0	0	1.39
5	0	0	1.68179	1.27
6	0	0	0	1.40
7	0	1.68179	0	1.51
8	1	-1	1	1.06
9	0	0	-1.68179	
10	0	0	0	1.44
11	-1	1	1	1.44
12	-1	-1	-1	1.44
13	1.68179	0	0	1.27
14	0	0	0	1.42
15	0	0	0	1.39
16	1	-1	-1	1.35
17	1	1	-1	1.43
18	-1.68179	0	0	1.44
19	-1	-1	1	1.24

Por otro lado, la [Tabla 9](#) muestra los coeficientes de regresión para todos los factores y sus interacciones. En el análisis residual no se observó desviaciones significativas de los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia.

El análisis de regresión muestra que todos los factores, X1, X2 y X3, la interacción entre los factores X2 y X3 y el término cuadrático del factor X1 son significativos. Posteriormente, se eliminaron las interacciones no significativas y se realizó el análisis residual.

La Ecuación 5 muestra el modelo de regresión de segundo orden para la variable de respuesta carga postural.

$$\hat{y}_1 = 1.409 - 0.086x_1 + 0.132x_2 - 0.121x_3 - 0.064x_1^2 + 0.131x_2x_3 \quad (5)$$

En dicho modelo, el valor de R-sq (pred) fue de 82.08 %, que es superior al obtenido para el modelo de regresión de primer orden (56.38 %). En este sentido, el modelo de segundo orden tiene 25.7 % más precisión al momento de predecir nuevas observaciones ^[21].

Además, al realizar la prueba de falta de ajuste para este modelo no se logró rechazar la hipótesis nula al obtener un valor $P = 0.356$, es decir, que el modelo especifica correctamente la relación entre la respuesta y los predictores con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ (véase la [Tabla 10](#)).

También, obsérvese el gráfico de contorno y el gráfico de superficie de respuesta de la [Figura 6](#), donde se advierte la presencia de la curvatura.

TABLA 9
COEFICIENTES DE REGRESIÓN PARA LA VARIABLE DE RESPUESTA CARGA POSTURAL

FUENTE DE VARIACIÓN	GL	SUMA DE CUADRADOS	SUMA DE CUADRADOS (AJUSTADA)	CUADRADO MEDIO	F	P
Regresión	9	0.187383	0.187383	0.020820	37.27	0.000
Lineal	3	0.154303	0.154303	0.041887	74.97	0.000
Cuadrático	3	0.011043	0.011043	0.003681	6.59	0.019
Interacción	3	0.022037	0.022037	0.007346	13.15	0.003
Error residual	7	0.003911	0.003911	0.000559		
Falta de ajuste	3	0.002031	0.002031	0.000677	1.44	0.356
Error puro	4	0.001880	0.001880	0.000470		
Total	16 ^a	0.191294 ^a				

^aEstos totales son la suma de regresión y error residual.

TABLA 10
COEFICIENTES DE REGRESIÓN PARA LA VARIABLE DE RESPUESTA CARGA POSTURAL

FACTOR	COEFICIENTE	COEFICIENTE SE	T	P
Constante	1.40873	0.01056	133.362	0.000
X1	-0.08570	0.01076	-7.967	0.000 ^a
X2	0.13157	0.01345	9.781	0.000 ^a
X3	-0.12070	0.01345	-8.972	0.000 ^a
X1*X1	-0.06440	0.01879	-3.426	0.011 ^a
X2*X2	-0.05163	0.02475	-2.086	0.075
X3*X3	-0.03937	0.02475	-1.591	0.156
X1*X2	0.04596	0.02364	1.945	0.093
X1*X3	-0.05303	0.02364	-2.244	0.060
X2*X3	0.13081	0.02364	5.534	0.001 ^a
S = 0.0236365	PRENSA = 0.0342785			
R-sq = 97.96 %	R-sq (pred) = 82.08 %		R-sq (ajust) = 95.33 %	

^aEstos valores fueron significantes en las pruebas con un $\alpha = 0.05$.

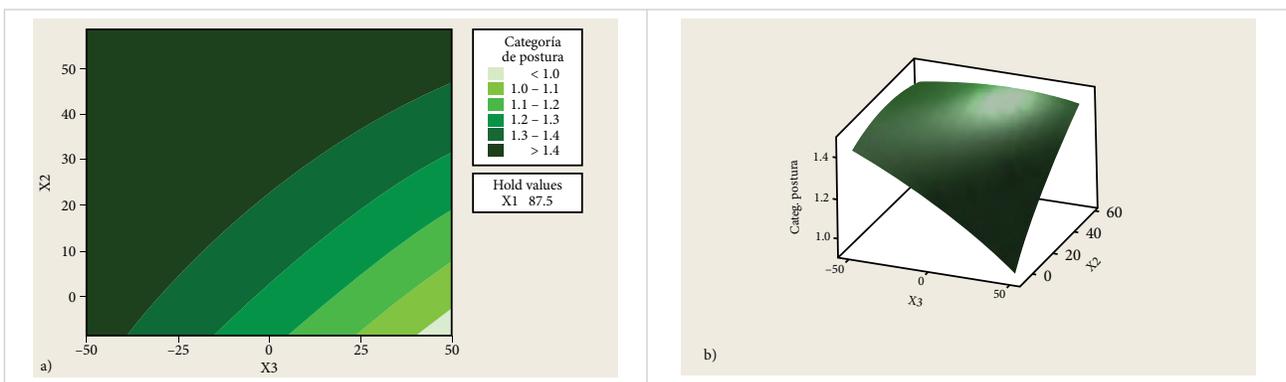


Figura 6. Gráficos del modelo de segundo orden para carga postural versus X2 y X3: a) de contorno y b) de superficie de respuesta.

Encontrar la solución óptima de respuesta múltiple

Para encontrar una solución óptima de respuesta múltiple, es necesario recordar que con este rediseño se buscaba mejorar en dos aspectos (objetivos): ergonómico y productivo.

Ambos, cada uno con igual peso, han sido modelados mediante modelos de regresión de respuesta, con el modelo (Ecuación 5) para el objetivo ergonómico y con el modelo (Ecuación 4) para el objetivo productivo. Sin embargo, para optimizar más de

un objetivo se debe utilizar la función de deseabilidad de Harrington. En este caso se siguió la metodología de cinco puntos descrita por Derringer y Suich.

1. Determinación de los parámetros de deseabilidad de las variables de respuesta. Los valores objetivo para las variables de respuesta *tiempo de ciclo* y *carga postural* se muestran en la [Tabla 11](#), las cuales se determinaron con el *takt time* y el mejor valor de OWAS, respectivamente. Un valor de 1 en el método OWAS permite encontrar un diseño ergonómico para el trabajador.

TABLA 11
PARÁMETROS DEL MÉTODO DE DESEABILIDAD

RESPUESTA	OBJETIVO	OBJETIVO (TI)	LÍMITE SUPERIOR (UI)	IMPORTANCIA Y PESO(S)
Carga postural (\hat{y}_1)	Minimizar	1	2	1
Tiempo de ciclo (\hat{y}_2)	Minimizar	12.5	20	1

2. Obtención de la solución óptima de diseño. Al ejecutar la simulación en búsqueda de los valores óptimos para los factores de diseño, se encontró el valor mínimo óptimo para la función de regresión de la variable de respuesta carga postural. Dichos valores son: X1(altura de la mesa) = 98 centímetros, X2(distancia a la bandeja) = 0 centímetros, y X3(profundidad de la bandeja) = 32 centímetros ([Figura 7](#)).

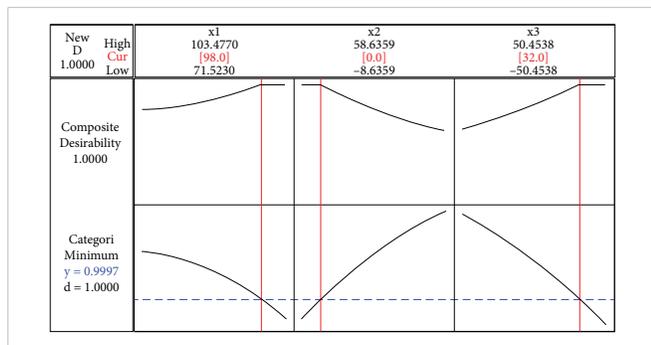


Figura 7. Gráfico de deseabilidad para la respuesta de carga postural con parámetros de solución óptimos.

3. Optimización de la variable de respuesta rango postural. Una vez que se tiene la solución óptima para el diseño, fue necesario refinarla para mejorar las posturas del operador en la tarea 3. Para ello, se hizo un experimento con un factor de control: la elevación del monitor. Esta simulación se ejecutó con el mismo MS ([Figura 8](#)),

pero en esta ocasión se hizo algunos cambios para permitir el ajuste a los valores óptimos que se encontraron en el punto anterior.

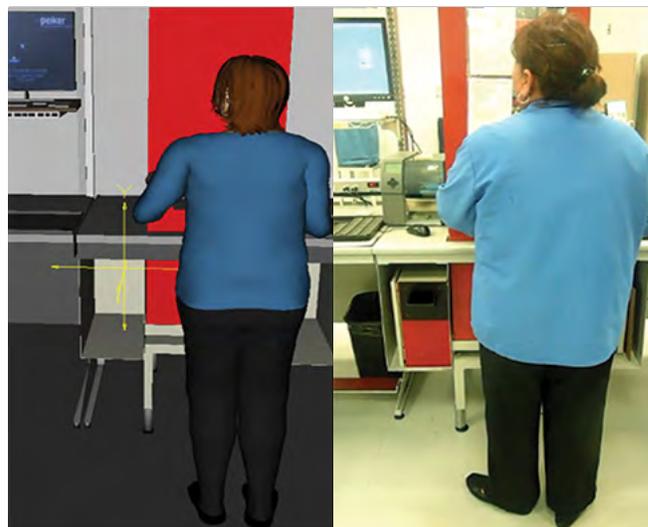


Figura 8. Modelo de postura del cuello tarea 3.

El experimento consistió en 15 corridas, ajustando en cada una la elevación del monitor en incrementos de 5 centímetros con respecto a la altura de la mesa. Después de cada corrida, se obtuvo un resumen de la calificación de las posturas del cuerpo por el método RULA, que incluía una calificación para el cuello y una gran puntuación con una acción recomendada.

En este sentido, la [Figura 9](#) muestra un gráfico con los valores de valoración para el cuello (carga postural) en relación con la elevación del monitor, y el rango más favorable para colocar el monitor es cuando su altura está entre 10 y 45 centímetros con respecto a la superficie de la mesa. Dentro de este rango, el ángulo de inclinación del cuello está entre 5 y 10 grados y es una postura aceptable para este tipo de tareas [24], [25], [26].

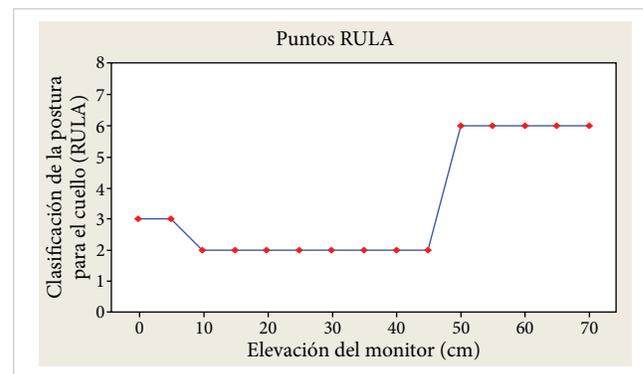


Figura 9. Clasificación de la postura corporal de RULA en relación con la elevación del monitor.

4. Calcular el tiempo de ciclo y otras medidas ergonómicas con la solución de diseño óptima. Con esta solución óptima refinada, el tiempo de ciclo fue de 13.10 segundos, mostrando una reducción importante del valor de diseño inicial de 17.69 segundos. Asimismo, se obtuvieron en los informes OWAS valores de 1 para las tareas 1 y 9, mientras que el informe RULA arrojó valores de 2 para la tarea 3.

5. Calcular los valores generales de la función de deseabilidad para la solución de diseño óptima. Una vez que se tienen los valores necesarios para cumplir con ambos objetivos del rediseño, se debe utilizar el enfoque de deseabilidad propuesto por Derringer y Suich para encontrar la solución óptima que satisfaga ambos objetivos. Dicho enfoque requiere calcular un valor de función de deseabilidad $d_i(\hat{Y}_i)$ para cada función de respuesta \hat{Y}_i . Esto va a depender si se desea maximizar, minimizar o lograr un valor objetivo. Para este caso, se desea minimizar ambas respuestas \hat{Y}_i . La Ecuación 6 muestra la función de deseabilidad cuando el objetivo T_i para la respuesta i es minimizar.

$$d_i(\hat{Y}_i) = \begin{cases} 1.0 & \text{if } \hat{Y}_i(x) < T_i \\ \left(\frac{\hat{Y}_i(x) - U_i}{T_i - U_i}\right)^s & \text{if } T_i \leq \hat{Y}_i(x) \leq U_i \\ 0 & \text{if } \hat{Y}_i(x) > U_i \end{cases} \quad (6)$$

donde $d_i(\hat{Y}_i)$ es la función de deseabilidad para la respuesta Y_i , con valores $0 \leq d_i(\hat{Y}_i) \leq 1$, siendo $d_i(\hat{Y}_i) = 0$ un valor completamente indeseable y $d_i(\hat{Y}_i) = 1$ completamente deseable. Aquí, T_i y U_i representan los valores objetivo y el valor superior, respectivamente. Estos son los valores deseados para la respuesta Y_i , con $T_i \leq U_i$ y el exponente s determinando qué tan importante es alcanzar el valor objetivo. Cuando $s = 1$, como en este caso, la función de deseabilidad aumenta linealmente hacia T_i [12].

La Ecuación 7 muestra la función de deseabilidad general D , que es la media geométrica de todas las funciones de deseabilidad:

$$D = (d_1(\hat{Y}_1)d_2(\hat{Y}_2)\dots d_k(\hat{Y}_k))^{1/k} \quad (7)$$

con k es el número de respuestas y el objetivo es maximizar D .

La función de deseabilidad global D , en este caso, requiere calcular dos valores de la función de deseabi-

lidad $d_i(\hat{Y}_i)$, uno para cada respuesta Y_i . El valor de D mide qué tan bien una solución cumple con el objetivo, y se usa para comparar la solución óptima con la solución inicial. Se calcularon dos valores generales de la función de deseabilidad, $D1$ para los valores óptimos del factor de solución (x^*) y $D2$, para los valores iniciales del factor de solución (x).

La Figura 7 muestra el valor de la función de deseabilidad $d_1(\hat{Y}_1) = 1.000$ calculado con los valores óptimos del factor de solución (x^*) = (98,0,32). Asimismo, la Figura 10 muestra el valor de la función de deseabilidad $d_1(\hat{Y}_1) = 0.59127$, calculado con los valores de la solución inicial del factor (x) = (87.5,25.0,0.0).

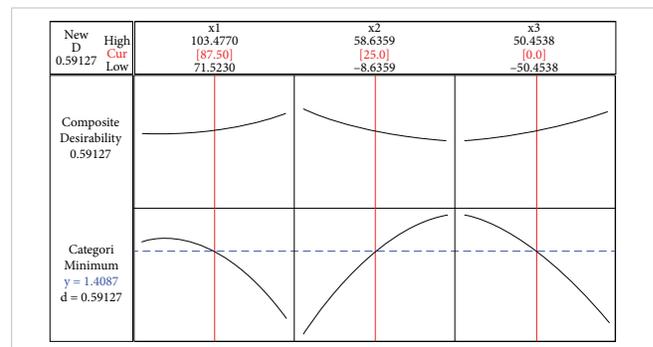


Figura 10. Gráfico de deseabilidad para la respuesta de carga postural con los parámetros iniciales de la solución.

El tiempo de ciclo para la solución óptima fue $\hat{y}_2(x^*) = 13.10$ segundos y el valor de la función de deseabilidad $d_2(\hat{y}_2) = 0.92$. El tiempo de ciclo para la solución inicial es de $\hat{y}_2(x) = 17.692$ segundos y el valor de la función de deseabilidad $d_2(\hat{y}_2) = 0.3077$. Con estos valores de la función de deseabilidad, la ecuación 8 muestra la función global calculada D_1 para la solución óptima (x^*).

$$D_1 = (d_1(\hat{y}_1)d_2(\hat{y}_2))^{1/2} = ((1)(0.92))^{1/2} = 0.959 \quad (8)$$

Y la Ecuación 9 muestra la función de deseabilidad global D_2 para los valores de la solución inicial del factor.

$$D_2 = (d_1(\hat{y}_1)d_2(\hat{y}_2))^{1/2} = ((0.59127)(0.307733))^{1/2} = 0.426 \quad (9)$$

Con la solución de diseño óptima, el valor de la función de deseabilidad $d_1(\hat{y}_1)$ está en el objetivo, mientras que el valor de la función de deseabilidad para $d_2(\hat{y}_2)$ está cerca del objetivo.

IV. CONCLUSIONES

Se demostró que metodología experimental propuesta por Ben-Gal y Bukchin es efectiva para el diseño de estaciones de trabajo. En este trabajo, esta metodología se adaptó en el rediseño de una estación de trabajo de prueba eléctrica, mejorando tanto la postura y comodidad del operador como la productividad de la estación de trabajo. Se utilizó Jack®, un software de modelado y simulación digital de personas (DHMS, por sus siglas en inglés) y Minitab®, un software de análisis estadístico. Asimismo, el enfoque de deseabilidad propuesto por Derringer y Suich es eficaz para resolver el problema de optimización de respuesta múltiple.

La comparación de los valores generales de la función de deseabilidad para las soluciones de diseño inicial y óptima D_2 y D_1 respectivamente, mostraron una mejora significativa del 125 %. En el objetivo ergonómico, el valor de deseabilidad para la respuesta carga postural mejoró de un valor de 0.59 para la solución inicial, a un valor de 1.0 para la solución óptima, siendo una mejoría significativa en la comodidad del operador. Asimismo, en el objetivo productivo, el valor de la función de deseabilidad para el tiempo de ciclo pasó de un valor de 0.31 (17.69 segundos) para la solución inicial a un valor de 0.92 (13.10 segundos) para la solución óptima, lo que representa una reducción significativa del tiempo de ciclo en un 26 %.

Además, el rango postural de respuesta pasó de una tasa de postura inicial de 6, a una tasa de postura de dos, una mejora de 4 puntos basada en el método RULA. Una reducción significativa del riesgo postural para el cuello.

REFERENCIAS

- [1] I. Ben-Gal y J. Bukchin, “The ergonomic design of workstations using virtual manufacturing and response surface methodology”, *IIE Trans.*, vol. 34, n.º 4, pp. 375-391, abr. 2002, doi: [10.1080/07408170208928877](https://doi.org/10.1080/07408170208928877).
- [2] A. Azizi, P. Ghafoorpoor Yazdi y M. Hashemipour, “Interactive design of storage unit utilizing virtual reality and ergonomic framework for production optimization in manufacturing industry”, *Int J Interact Des Manuf*, vol. 13, n.º 1, pp. 373-381, mar. 2019, doi: [10.1007/s12008-018-0501-9](https://doi.org/10.1007/s12008-018-0501-9).
- [3] Y. Rodríguez-Ruiz y E. Pérez-Mergarejo, “Ergonomía y Simulación Aplicadas a la Industria”, *Ingeniería Industrial*, vol. XXXII, n.º 1, 2011.
- [4] H. O. Demirel y V. G. Duffy, “Applications of Digital Human Modeling in Industry”, en *Digital Human Modeling*, V. G. Duffy, ed., serie Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007, pp. 824-832. doi: [10.1007/978-3-540-73321-8_93](https://doi.org/10.1007/978-3-540-73321-8_93).
- [5] I. Errandonea, S. Beltrán y S. Arrizabalaga, “Digital Twin for maintenance: A literature review”, *Comput. Ind.*, vol. 123, p. 103316, dic. 2020, doi: [10.1016/j.comp-ind.2020.103316](https://doi.org/10.1016/j.comp-ind.2020.103316).
- [6] A. Munir et al., “Cellular Metaverse: Enhancing Real-Time Communications in Virtual World”, *2023 International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers, and Communications (ITC-CSCC)*, Jeju, República de Corea, 2023, pp. 1-4, doi: [10.1109/ITC-CSCC58803.2023.10212885](https://doi.org/10.1109/ITC-CSCC58803.2023.10212885).
- [7] J. A. Aquino-Robles, A. Robles, C. Fernandez y L. G. Corona, “Los gemelos digitales, la última frontera de la Ingeniería Mecatrónica”, en *X Simposium Int. de Inv. Multidisciplinaria*, Villahermosa, Tabasco, 2020.
- [8] H. Alimam, G. Mazzuto, N. Tozzi, F. E. Ciarapica y M. Bevilacqua, “The resurrection of digital triplet: A cognitive pillar of human-machine integration at the dawn of industry 5.0”, *JKSUCI*, vol. 35, n.º 10, p. 101846, 2023, doi: [10.1016/j.jksuci.2023.101846](https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2023.101846).
- [9] F. Longo y N. R. Monteil, “Industrial Workstation Design Based on Digital Human Modelling and Simulation: A Review”, *Soc Model Simul Int*, vol. 3, pp. 133-141, 2011, disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/INDUSTRIAL-WORKSTATION-DESIGN-BASED-ON-DIGITAL-AND-Longo-Monteil/066b05dd0193af42a2115a1f038f18449444d174>.
- [10] J. Arenas, M. García, M. Sebastián y A. Sánchez, “Diseño de sistemas productivos y mejora de su eficiencia mediante técnicas de realidad virtual”, *DyO*, vol. 0, n.º 40, pp. 60-66, 2010, doi: [10.37610/dyo.v0i40.77](https://doi.org/10.37610/dyo.v0i40.77).
- [11] A. Somasundaram y P. Srinivasan, “Design optimization of dosa making workstation for smooth ergonomic interface”, *J. Sci. Amp Ind. Res.*, vol. 69, n.º 3, pp. 221-224, 2010.

- [12] G. Derringer y R. Suich, “Simultaneous Optimization of Several Response Variables”, *J. Qual. Technol.*, vol. 12, n.º 4, pp. 214-219, oct. 1980, doi: [10.1080/00224065.1980.11980968](https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968).
- [13] O. Karhu, P. Kansu y I. Kuorinka, “Correcting working postures in industry: A practical method for analysis”, *Appl. Ergon.*, vol. 8, n.º 4, pp. 199-201, dic. 1977, doi: [10.1016/0003-6870\(77\)90164-8](https://doi.org/10.1016/0003-6870(77)90164-8).
- [14] J. A. Diego-Mas. “Evaluación postural mediante el método OWAS”. [En línea]. Disponible en: <https://www.ergonautas.upv.es/metodos/owas/owas-ayuda.php>.
- [15] F. J. Llana, *Ergonomía y Psicología Aplicada. Manual para la Formación del Especialista*, 12.ª ed. España: Lex Nova, 2009.
- [16] B. A. Silverstein y L. J. Fine, “Cumulative Trauma Disorders of the Upper Extremity: A Preventive Strategy Is Needed”, *J. Occup. Med.*, vol. 33, n.º 5, pp. 642-644, 1991.
- [17] D. R. Ankrum y K. J. Nemeth, “Head and Neck Posture at Computer Workstations - What’s Neutral?”, *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc. Annu. Meet.*, vol. 44, n.º 30, pp. 5-565, jul. 2000, doi: [10.1177/154193120004403046](https://doi.org/10.1177/154193120004403046).
- [18] H. González, A. García y M. M. Villasana, “Rediseño de una Estación de Trabajo Considerando la Ergonomía para Incrementar la Productividad”, *Jóvenes en la Ciencia*, vol. 3, n.º 1, pp. 413-417, 2017.
- [19] R. Ávila, L. R. Prado y E. L. González, *Dimensiones antropométricas de población latinoamericana*, 2.ª ed. Guadalajara: Universidad de Guadalajara, 2007.
- [20] R. H. Myers, D. C. Montgomery y C. M. Anderson-Cook, *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, 4.ª ed. Wiley, 2016.
- [21] “Interpretar los resultados clave para ajustar modelo de regresión”. Minitab.com. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/regression/how-to/fit-regression-model/interpret-the-results/key-results/> (accedido, en. 9, 2024).
- [22] D. C. Montgomery, *Diseño y Análisis de Experimentos*, 2.ª ed. México: LIMUSA WILEY, 2004.
- [23] “Falta de ajuste y pruebas de falta de ajuste”. Minitab.com. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/regression/supporting-topics/regression-models/lack-of-fit-and-lack-of-fit-tests/> (accedido, en. 9, 2024).
- [24] D. Fuller y W. Scherer, “The desirability function: underlying assumptions and application implications”, en *SMC’98 Conference Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Cat. No.98CH36218)*, oct. 1998, pp. 4016-4021 vol. 4. doi: [10.1109/ICSMC.1998.726717](https://doi.org/10.1109/ICSMC.1998.726717).
- [25] T. Quirante, P. Sebastian y Y. Ledoux, “A trade-off function to tackle robust design problems in engineering”, *J. Eng. Des.*, vol. 24, pp. 1-18, en. 2012, doi: [10.1080/09544828.2012.691160](https://doi.org/10.1080/09544828.2012.691160).
- [26] E. C. Harrington et al., “The desirability function”, *Industrial Quality Control*, vol. 21, pp. 494-498, 1965.

Mejoras ergonómicas para puestos de trabajo de oficina aplicando el Cuestionario Nórdico y el Método ROSA

Ergonomic improvements for office workplaces applying the Nordic Questionnaire and the ROSA Method

Christian Cisneros-Cervantes¹ , Ismael Mendoza-Muñoz¹  , Mildrend Montoya-Reyes¹ , Gabriela Jacobo-Galicia¹ , Olivia Yessenia Vargas-Bernal¹ 

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, Baja California, México

RESUMEN

Esta investigación se centró en mejorar las condiciones de salud y bienestar de trabajadores de oficina mediante el análisis de operaciones comunes en auditoría interna de una empresa agrícola del Valle de Mexicali, México. Se utilizaron estratégicamente un cuestionario diagnóstico, el Cuestionario Nórdico y el Método ROSA (Evaluación Rápida de Esfuerzo para Oficinas), para evaluar y proponer estrategias de mejora, buscando un ambiente laboral confortable y la reducción de TME (trastornos musculoesqueléticos). La gestión de programas ergonómicos se planteó como parte de las actividades diarias para optimizar la producción y calidad. Tras una exhaustiva evaluación ergonómica, se identificaron factores de riesgo asociados al diseño del puesto, manipulación de cargas, patrones de movimiento y elementos ambientales, contribuyendo a las molestias en la espalda y los hombros debido a posturas inadecuadas y posiciones estáticas prolongadas. Se llevaron a cabo mejoras ergonómicas y después se realizó una segunda evaluación con resultados más favorables. La aplicación de estrategias ergonómicas demostró ser efectiva para mejorar las condiciones laborales y reducir los TME en trabajadores de oficina.

PALABRAS CLAVE: ergonomía; trastornos musculoesqueléticos; Método ROSA; Cuestionario Nórdico; salud ocupacional.

ABSTRACT

This research focused on improving the health and well-being conditions of office workers through the analysis of common operations in the internal audit of an agricultural company in the Mexicali Valley, Mexico. A diagnostic questionnaire, the Nordic Questionnaire, and the ROSA Method (Rapid Office Strain Assessment) were strategically used to evaluate and propose improvement strategies, seeking a comfortable work environment and the reduction of MSDs (Musculoskeletal Disorders). The management of ergonomic programs was proposed as part of daily activities to optimize production and quality. After an exhaustive ergonomic evaluation, risk factors associated with job design, load handling, movement patterns and environmental elements were identified, contributing to back and shoulder discomfort due to inadequate postures and prolonged static positions. Ergonomic improvements were made, followed by a second evaluation with more favorable results. The application of ergonomic strategies proved to be effective in improving working conditions and reducing MSDs in office workers.

KEYWORDS: ergonomics; musculoskeletal disorders; ROSA Method; Nordic Questionnaire; occupational health.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Ismael Mendoza-Muñoz.

INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Baja California /
Facultad de Ingeniería.

DIRECCIÓN: Blvr. Benito Juárez s/n, Parcela 44, C. P. 21280,
Mexicali, Baja California, México.

CORREO ELECTRÓNICO: ismael.mendoza@uabc.edu.mx

Fecha de recepción: 22 de enero de 2024. **Fecha de aceptación:**
9 de marzo de 2024. **Fecha de publicación:** 20 de abril de 2024.



I. INTRODUCCIÓN

En el entorno laboral actual, el uso generalizado de pantallas y el sedentarismo prolongado son más frecuentes y cada vez es mayor la preocupación por los Trastornos Músculo-Esqueléticos (TME) que pueden tener un profundo impacto en la salud y el bienestar general de los empleados, influyendo al mismo tiempo en la productividad y la eficiencia de las organizaciones ^{[1]-[2]}.

Además, Shikdar y Al-Kindi ^[3] identificaron deficiencias ergonómicas en el diseño de puestos de trabajo informáticos en oficinas típicas. En su estudio de 40 puestos de trabajo, se detectaron importantes problemas ergonómicos en el diseño físico, la disposición, las posturas de los empleados, las prácticas de trabajo y la formación. Estas deficiencias tenían consecuencias significativas para la salud y el bienestar general de los usuarios ^{[4]-[5]}.

Considerando el tipo de trabajo, es evidente que las funciones de auditoría interna no están exentas de este problema. Estas funciones implican largos periodos de tiempo frente a pantallas de visualización de datos, junto con la ejecución de tareas que requieren movimientos repetitivos ^[3]. Lamentablemente, estas circunstancias generan posturas corporales inadecuadas, tensión muscular y una serie de problemas de salud asociados ^[6].

Dada esta urgente preocupación, resulta evidente un paso crucial: la necesidad de realizar una evaluación ergonómica exhaustiva del puesto de trabajo de auditoría interna. A partir del trabajo de Jensen *et al.* ^[7], que hace hincapié en la identificación de problemas ergonómicos en los puestos de trabajo a través del método finlandés, se hace evidente que una parte significativa de los puestos carecía de principios ergonómicos adecuados, lo que se traducía en una postura incorrecta de los trabajadores. Además, el estudio de Akhil ^[8] subraya la importancia de rectificar estas deficiencias ergonómicas mediante evaluaciones y métodos destinados a mejorar las condiciones de trabajo.

En este sentido, el Método de Evaluación Rápida de Esfuerzo para Oficinas (Rapid Office Strain Assessment o ROSA por sus siglas en inglés) es una técnica de evaluación ergonómica utilizada para identificar y evaluar

rápidamente los posibles riesgos ergonómicos en los puestos de trabajo de oficina. Se centra en la evaluación de factores clave como iluminación, colocación del monitor, configuración de la silla y el escritorio, disposición del teclado y el ratón, y otros elementos que podrían contribuir a causar molestias o problemas musculoesqueléticos. El método pretende proporcionar una evaluación rápida pero exhaustiva, que permita realizar ajustes y mejoras a tiempo para prevenir problemas de salud relacionados con el lugar de trabajo ^[9].

En este contexto, el empleo estratégico de herramientas como el cuestionario diagnóstico, el Cuestionario Nórdico ^[10] y el Método ROSA se manifiesta como un enfoque sólido, pues estos sirven como conductos eficaces para la recopilación de datos pertinentes, el examen exhaustivo de los riesgos ergonómicos y el diseño específico de mejoras. Las consecuencias de los resultados son múltiples: mediante la introducción de mejoras ergonómicas en el lugar de trabajo, el espectro de los TME puede reducirse considerablemente. Esto, a su vez, se traduce en una mejora de la dinámica postural, un aumento del confort general y el cultivo del bienestar holístico de los trabajadores. Además, es fundamental reconocer que un mejor diseño del espacio de trabajo no solo mitiga los riesgos para la salud, sino que también actúa como catalizador de una mayor productividad y satisfacción laboral ^[11].

En resumen, el escrutinio evaluativo y la subsiguiente mejora del puesto de trabajo no solo son encomiables, sino imperativos. Estas medidas proactivas son fundamentales para mitigar los riesgos que plantean los TME y fomentar un entorno de trabajo propicio. La utilización estratégica del cuestionario diagnóstico, el Cuestionario Nórdico y el Método ROSA establece una base resistente, identificando hábilmente los factores de riesgo ergonómico y proponiendo soluciones a medida en consonancia con las necesidades específicas de cada empleado ^{[12], [11]}.

Por lo tanto, se realizó una evaluación ergonómica exhaustiva del puesto de trabajo de auditoría interna con el objetivo de identificar los posibles factores de riesgo, para formular recomendaciones específicas para las actividades diarias que permitan un espacio de trabajo confortable y reducir los trastornos musculoesqueléticos.

II. METODOLOGÍA

Considerando que incluso cambios ergonómicos pequeños en el diseño de equipos, puestos de trabajo o tareas pueden mejorar significativamente la salud del trabajador. La [Figura 1](#) ofrece una visión concisa de las etapas de la metodología.

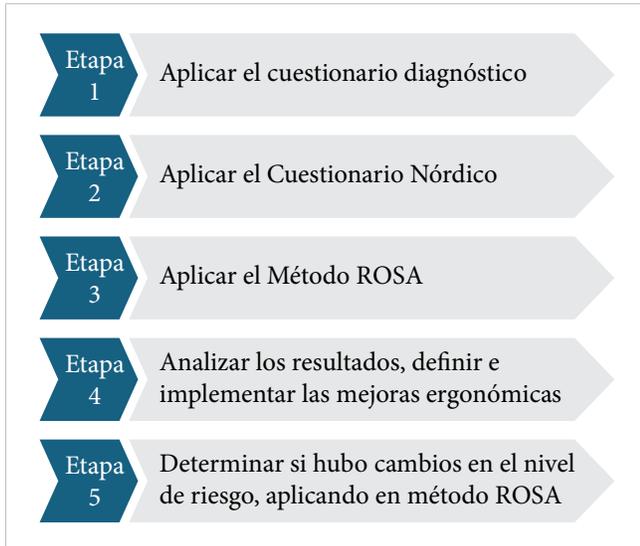


Figura 1. Etapas para mejorar puestos de trabajo de oficina.

La primera etapa consiste en la aplicación de un cuestionario diagnóstico, estructurado meticulosamente para obtener información pertinente sobre los antecedentes profesionales, hábitos laborales, incomodidades predominantes y percepción general del puesto de trabajo designado.

En la segunda etapa se aplica el Cuestionario Nórdico para obtener una comprensión más detallada de las molestias y posibles patologías que podrían manifestarse durante las actividades operativas. Este instrumento facilita la adquisición de información sobre los aspectos matizados de la experiencia ergonómica.

Para la tercera etapa se toma en cuenta los síntomas y molestias señaladas en los cuestionarios previos y se procede con la aplicación estratégica del Método ROSA. Este marco de evaluación facilita el análisis en profundidad del puesto de trabajo, considerando meticulosamente las variables de riesgo identificadas.

En la cuarta etapa se analizan los resultados obtenidos, dando prioridad a las áreas de oportunidad detectadas y generando propuestas de mejoras para implementar.

En la quinta etapa, se lleva a cabo de nuevo la aplicación del método ROSA para discernir el impacto tangible de las intervenciones ergonómicas. Esto no solo abarca la cuantificación de los niveles de riesgo inherentes al espacio de trabajo, sino también una evaluación de las mejoras resultantes en la satisfacción de los trabajadores.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las etapas para mejorar puestos de trabajo de oficina se implementaron en el puesto de trabajo de auditoría interna de una empresa agrícola.

El cuestionario diagnóstico arrojó los siguientes datos sobre el participante: mujer de 49 años, 149 centímetros de estatura, complexión robusta y 62 kilogramos de peso. No suele desayunar a la misma hora y regularmente duerme entre 7 y 8 horas. Sin embargo, no practica ejercicio físico ni deporte. El mantener una hidratación adecuada es inconsistente. A lo largo de su carrera profesional, que abarca dos décadas, ha realizado actividades de oficina y su historial médico incluye una lesión cervical tratada que solo recibe atención en respuesta a importantes episodios de dolor.

Con el cuestionario nórdico se identificaron varios factores clave de riesgo ergonómico asociados al diseño del puesto de trabajo, como la manipulación de cargas, los patrones de movimiento y los elementos ambientales. Estos factores contribuyeron colectivamente a las molestias experimentadas por la trabajadora, en particular en las zonas de la espalda y los hombros, debido a posturas inadecuadas sostenidas y posiciones estáticas prolongadas.

Mediante la aplicación del método ROSA, se realizó una evaluación que arrojó luz roja sobre problemas específicos del entorno laboral. En particular, una preocupación significativa surgió del ajuste inadecuado de la silla alineada con la altura del trabajador ([Figura 2](#)). Esta desalineación, además de comprometer la postura de la gerente de auditoría interna, aumentaba la incomodidad durante las largas jornadas de trabajo. La incongruencia en el ajuste de la altura de la silla exige atención inmediata debido a su impacto potencial en la salud musculoesquelética y el bienestar general.

Otra revelación significativa fue la falta de apoyo lumbar ([Figura 3](#)) en la disposición de los asientos. Esta au-

sencia intensificaba notablemente la incomodidad de la gerente de auditoría interna, aumentando la posibilidad de desarrollar problemas musculoesqueléticos con el tiempo. Igualmente, notable era el considerable espacio existente entre la zona del asiento y la ubicación del monitor, el teclado y el ratón. Esta disposición comprometía la postura y obligaba a estirarse incómodamente, lo que acentuaba la preocupación por una incompatibilidad ergonómica.



Figura 2. Ajuste inadecuado de la silla en relación con la altura del trabajador.

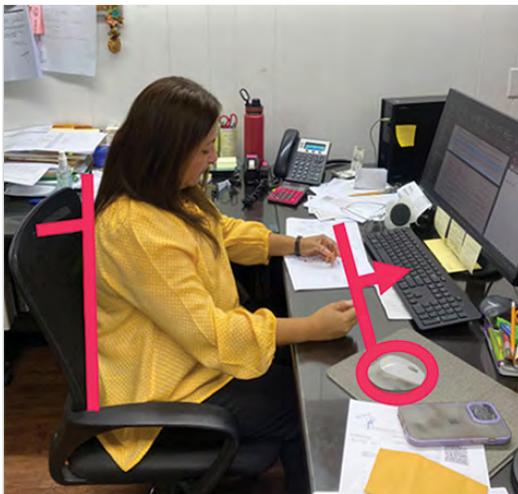


Figura 3. Ausencia de apoyo lumbar y disposición subóptima del puesto de trabajo.

Abordar estas deficiencias ergonómicas se volvió esencial para reducir el daño causado por los asientos sin apoyo en la salud de la columna vertebral y aliviar las

molestias asociadas. Además, destaca que la persona en estudio tenía problemas de visión y no utilizaba lentes correctivos, acentuando la importancia de estas consideraciones en la búsqueda de soluciones integrales.

La [Tabla 1](#) presenta un resumen de los resultados derivados de la aplicación del Método ROSA. De acuerdo con la escala de niveles de riesgo establecida, el puesto de trabajo se clasifica como “Prioridad de Intervención Ergonómica” debido a la puntuación final de 5. Esto sugiere que deben tomarse medidas para mejorar la configuración ergonómica y garantizar un entorno de trabajo más cómodo para el usuario. A partir de los resultados de la evaluación, surgió una serie de mejoras ergonómicas.

TABLA 1
RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL MÉTODO ROSA

ASPECTO	PUNTAJE	NIVEL DE RIESGO
Silla	5	Prioritario
Monitor y teléfono + teclado y ratón	3	Bajo
Puntaje final	5	Prioritario

En particular, la introducción de una almohada de apoyo lumbar surgió como una solución viable para aumentar el apoyo de la espalda durante las horas de trabajo. Además, en pro del bienestar ergonómico, se recomendó utilizar un ratón inalámbrico ergonómico recargable para aumentar la comodidad y la libertad de movimiento. Asimismo, reconociendo la importancia de la postura, se propuso la incorporación de un reposapiés ergonómico bajo el escritorio para mejorar la postura y aliviar la tensión de las extremidades inferiores.

Por último, respecto al impacto de la visión, se recomendó utilizar lentes de visión con una adaptación adecuada para rectificar los problemas visuales y evitar la fatiga ocular. Este conjunto de propuestas ergonómicas está en consonancia con el objetivo general de optimizar el espacio de trabajo de la gerente de auditoría interna y fomentar un entorno de trabajo armonioso.

Tras la aplicación de estas intervenciones ergonómicas, se observó una mejora perceptible de la postura y la comodidad de la gerente de auditoría interna ([Figuras 4 y 5](#)). Estas mejoras específicas se tradujeron directamente en un mayor nivel de satisfacción en la ejecución de las

tareas diarias, ya que los niveles de incomodidad disminuyeron notablemente. Este cambio positivo fomentó significativamente una sensación general de bienestar en el entorno del puesto de trabajo.



Figura 4. Ajuste óptimo de la silla en función de la altura del trabajador.

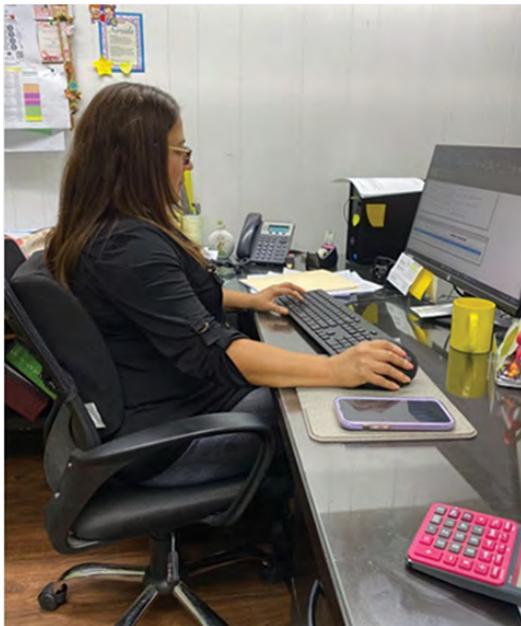


Figura 5. Mejora de la postura y confort.

Después de aplicar las diferentes mejoras, se evaluó nuevamente el área de trabajo utilizando el método ROSA, obteniendo un buen impacto en el área del respaldo, esto debido al soporte lumbar agregado y al reposapiés. Se una menor puntuación y nivel de riesgo, lo que da un mejor resultado, como se muestra en la [Tabla 2](#), gracias a las implementaciones, y se proporcionó un mejor

confort y alcance, generando un ambiente cómodo para desarrollar las tareas diarias con total normalidad y sin ningún riesgo y así prevenir dolencias y males asociados a un diseño de puesto inadecuado.

TABLA 2
CONCLUSIONES TRAS LA APLICACIÓN DEL MÉTODO ROSA

ASPECTO	PUNTAJE	NIVEL DE RIESGO
Silla	3	Bajo
Monitor y teléfono + teclado y ratón	2	Bajo
Puntaje final	3	Bajo

IV. CONCLUSIONES

En el ámbito de la dinámica de puestos de trabajo, es importante considerar de forma holística todos los elementos que facilitan la integración y la adaptación del entorno a las necesidades de los trabajadores.

Mediante una meticulosa evaluación ergonómica del puesto de trabajo de auditoría interna, junto con la aplicación de un cuestionario diagnóstico, el Cuestionario Nórdico y el Método ROSA se ha navegado y abordado hábilmente los riesgos ergonómicos asociados. Las propuestas de mejoras ergonómicas precisas, que abarcan actualizaciones de equipos y la reconfiguración estratégica del espacio de trabajo, ha contribuido de forma tangible a disminuir los niveles de riesgo y aumentar la comodidad de los trabajadores.

Estas intervenciones transformadoras subrayan de forma convincente la importancia primordial de integrar la ergonomía en los puestos de trabajo de oficina, actuando como un sólido baluarte contra los trastornos musculoesqueléticos y cultivando de forma significativa un entorno de trabajo propicio y preocupado por la salud.

REFERENCIAS

- [1] J. M. Y. Chim, “The FITS model office ergonomics program: a model for best practice”, *Work*, vol. 48, n.º 4, pp. 495-501 2014, doi: [10.3233/WOR-131806](https://doi.org/10.3233/WOR-131806).
- [2] L. Bernfort, J. Persson, C. Linderöthy K. Ekberg, “Supervisor ratings of productivity loss associated with presenteeism and sick leave due to musculoskeletal disorders and common mental disorders in Sweden”, *Work*,

- vol. 68, n.º 4, pp. 1091-1100, 2021, doi: [10.3233/WOR-213439](https://doi.org/10.3233/WOR-213439).
- [3] A. A. Shikdar y M. A. Al-Kindi, "Office Ergonomics: Deficiencies in Computer Workstation Design", *Int. J. Occupational Saf. Ergonom.*, vol. 13, n.º 2, pp. 215-223, 2007, doi: [10.1080/10803548.2007.11076722](https://doi.org/10.1080/10803548.2007.11076722).
- [4] H. O. Kalte et al., "Use of the Finnish method to quantify the ergonomic properties in an office environment among the workplaces in an Electricity Distribution Company in West Tehran Province", *Electron. Physician*, vol. 6, n.º 1, pp. 779-785, 2014, doi: [10.14661/2014.779-785](https://doi.org/10.14661/2014.779-785).
- [5] C. T. J. Hulshof et al., "The effect of occupational exposure to ergonomic risk factors on osteoarthritis of hip or knee and selected other musculoskeletal diseases: A systematic review and meta-analysis from the WHO/ILO Joint Estimates of the Work-related Burden of Disease and Injury", *Environ. Int.*, vol. 150, p. 106349, 2021, doi: [10.1016/j.envint.2020.106349](https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106349).
- [6] S. Carter et al., "Using an e-Health Intervention to Reduce Prolonged Sitting in UK Office Workers: A Randomised Acceptability and Feasibility Study", *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 17, n.º 23, 2020 doi: [10.3390/ijerph17238942](https://doi.org/10.3390/ijerph17238942).
- [7] C. Jensen, C. U. Ryholt, H. Burr, E. Villadsen y H. Christensen. "Work-related psychosocial, physical and individual factors associated with musculoskeletal symptoms in computer users", *Work & Stress*, vol. 16, n.º 2, pp. 107-120, 2002, doi: [10.1080/02678370210140658](https://doi.org/10.1080/02678370210140658).
- [8] P. Akhil, "Ergonomic Assessment in the Workplace." *Journal of ergonomics*, *J Ergonomics*, vol. 11, n.º S2, 2021.
- [9] P. R. Mondelo, E. Gregori, Ó. P. González y M. Á. Gómez, *El trabajo en oficinas*, Ergonomía 4, 2.ª ed. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya / Mutua Universal, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.3/36777/9788476539828.pdf>
- [10] A. Chairani, "Validity and reliability test of the Nordic musculoskeletal questionnaire with formal and informal sector workers", en *The 7th International Conference on Public Health*, Solo, Indonesia, nov. 18-19, 2020, doi: [10.26911/the7thicph-FP.05.06](https://doi.org/10.26911/the7thicph-FP.05.06).
- [11] A. S. Sahlabadi, A. Karim, A. Khatabakhsh y H. Soori, "Ergonomic Evaluation of Office Staff by Rapid Office Strain Assessment Method and Its Relationship with the Prevalence of Musculoskeletal Disorders", *Journal of Health*, vol. 11, n.º 2, pp. 223-234, 2020, doi: [10.29252/j.health.11.2.223](https://doi.org/10.29252/j.health.11.2.223).
- [12] O. Adiyanto, E. Mohamad, R. Jaafar, F. Ma'ruf, M. Faishal y A. Anggraeni. "Application of Nordic Body Map and Rapid Upper Limb Assessment for Assessing Work-related Musculoskeletal Disorders: A case study in Small and Medium Enterprises", *Int. J. Integr. Eng.*, vol. 14, n.º 4, 2022, doi: [10.30880/ijie.2022.14.04.002](https://doi.org/10.30880/ijie.2022.14.04.002).

RECONOCIMIENTOS

Agradecemos al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo financiero brindado a través del CVU 1202917 para continuar adquiriendo conocimientos y alcanzando metas académicas. Asimismo, agradecemos a todas las personas que han brindado orientación y apoyo en este proyecto, lo cual ha sido fundamental para el desarrollo académico y profesional.