

# Enfoques y métodos para resolver problemas sociales y productivos de manera sostenible

## Coordinadores

Jorge Adolfo Pinto Santos  
Jeovany Rafael Rodríguez Mejía  
Hansuk Sohn

En honor a el Dr. Jorge de la Riva Rodríguez,  
decano del TecNM-IT Cd Juárez, México.

Secundino Ramos Lozano  
Manuel Arnoldo Rodríguez Medina  
Ma. De los Ángeles de la Torre Mora  
Manuel Iván Rodríguez Borbón  
Hansuk Sohn  
Eduardo Rafael Poblano Ojinaga  
Rafael García Martínez  
Salvador A. Noriega Morales  
Tomas Francisco Limones Meraz  
Adán Valles Chávez  
Mariela Álvarez Argüelles  
Soledad Vianey Torres Argüelles  
Alejandra Flores Sánchez  
Ángel Noé Alvarado Pizarro  
Luis Raúl Aguilar Lujan  
Ericka Berenice Herrera Ríos  
Jaime Sánchez Leal  
Diego Adiel Sandoval Chávez  
Luz Elena Terrazas Mata  
Manuel Alonso Rodríguez Morachis  
Francisco Zorrilla Briones  
Jeovany Rafael Rodríguez Mejía  
Manuel de Jesús Nandayapa Alfaro  
Jorge Adolfo Pinto Santos



# Enfoques y métodos para resolver problemas sociales y productivos de manera sostenible

ISBN México (CENID): 978-607-8830-20-6

ISBN España (AEVA): 978-84-09-52247-7

Primera edición, 2023 Todos los derechos reservados.

© 2023, coordinadores. Jorge Adolfo Pinto Santos, Jeovany Rafael Rodríguez Mejía y Hansuk Sohn.

© 2023, autores. Secundino Ramos Lozano, Manuel Arnoldo Rodríguez Medina, Ma. De los Ángeles de la Torre Mora Manuel Iván Rodríguez Borbón, Hansuk Sohn, Eduardo Rafael Poblano Ojinaga, Rafael García Martínez, Salvador A. Noriega Morales, Tomas Francisco Limones Meraz, Adán Valles Chávez, Mariela Álvarez Argüelles, Soledad Vianey Torres Argüelles, Alejandra Flores Sánchez, Ángel Noé Alvarado Pizarro, Luis Raúl Aguilar Lujan, Ericka Berenice Herrera Ríos, Jaime Sánchez Leal, Diego Adiel Sandoval Chávez, Luz Elena Terrazas Mata, Manuel Alonso Rodríguez Morachis, Francisco Zorrilla Briones, Jeovany Rafael Rodríguez Mejía, Manuel de Jesús Nandayapa Alfaro y Jorge Adolfo Pinto Santos.

***Los conceptos expresados en este documento son responsabilidad exclusiva de los autores. Esta obra cumple con el requisito de evaluación por dos pares de expertos.***

**Edición y diagramación:** Salvador Tinoco.

Editorial Centro de Estudios e Investigaciones para el Desarrollo Docente. CENID AC es miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana Socio #3758.

Queda prohibida la reproducción o transmisión total o parcial del contenido de la presente obra mediante algún método sea electrónico o mecánico (INCLUYENDO EL FOTOCOPIADO, la grabación o cualquier sistema de recuperación o almacenamiento de información), sin el consentimiento por escrito del editor.

## Indexación de datos

Bases de datos en las que Editorial Centro de Estudios e Investigaciones para el Desarrollo Docente CENID A.C. está indexada: Dialnet (Universidad de la Rioja).

© 2023 Editorial Centro de Estudios e Investigaciones para el Desarrollo Docente. CENID AC Pompeya # 2705. Colonia Providencia C.P. 44670 Guadalajara, Jalisco. México Teléfono: 01 (33) 1061 8187 Registro Definitivo Reniecyt No.1700205 a cargo de Conacyt.

© 2023 Editorial de la Asociación Científica para la Evaluación y Medición de los Valores Humanos c/ de les cases sert nº 11, C.P. 08193, Bellaterra – Cerdanyola del Vallés (Barcelona).

CENID y su símbolo identificador son una marca comercial registrada.

Impreso en México / Printed in México

**Si desea publicar un libro o un artículo de investigación contáctenos.**

[www.cenid.org](http://www.cenid.org)

[redesdeproduccioncenid@cenid.org](mailto:redesdeproduccioncenid@cenid.org)



## ÍNDICE

<b>Introducción</b>	<b>5 – 6</b>
<b>Semblanza del Dr. Jorge de la Riva Rodríguez</b>	<b>7 – 8</b>
<b>Mantenimiento Basado en Análisis de Redes Bayesianas</b> <i>Secundino Ramos Lozano, Manuel Arnoldo Rodríguez Medina, Ma. De los Ángeles de la Torre Mora</i>	<b>9 – 28</b>
<b>Desarrollo de un marco de evaluación de sostenibilidad basado en la confiabilidad para sistemas de energía renovable</b> <i>Manuel Iván Rodríguez Borbón, Hansuk Sohn, Eduardo Rafael Poblano Ojinaga</i>	<b>29 - 46</b>
<b>Validación de Contenido del Instrumento de Medición Empleado para la Construcción del Modelo para Cuantificar la Capacidad de Innovación Empresarial.</b> <i>Rafael García Martínez, Salvador A. Noriega Morales, Tomas Francisco Limones Meraz</i>	<b>47 – 68</b>
<b>Factores Críticos de Éxito en el Despliegue de Proyectos Seis Sigma: Una Revisión Sistemática y Metaanálisis</b> <i>Adán Valles Chávez, Mariela Álvarez Argüelles, Soledad Vianey Torres Argüelles</i>	<b>69 - 91</b>
<b>Enfermedades Crónico-Degenerativas en Personal de Comedores Industriales en Ciudad Juárez</b> <i>Alejandra Flores Sánchez, Ángel Noé Alvarado Pizarro, Luis Raúl Aguilar Lujan</i>	<b>92 - 107</b>

<b>Diseño Robusto de Procesos con Mezclas</b>	<b>108- 128</b>
<i>Ericka Berenice Herrera Ríos, Jaime Sánchez Leal, Diego Adiel Sandoval Chávez</i>	
<b>Establecimiento de factores de riesgo para mujeres con cáncer cérvico uterino mediante Mahalanobis-Taguchi</b>	<b>129 - 148</b>
<i>Luz Elena Terrazas Mata, Manuel Alonso Rodríguez Morachis, Francisco Zorrilla Briones</i>	
<b>Laboratorios remotos como ambientes para la enseñanza y experimentación de sistemas digitales y control en ingeniería</b>	<b>149 - 171</b>
<i>Jeovany Rafael Rodríguez Mejía, Manuel de Jesús Nandayapa Alfaro, Jorge Adolfo Pinto Santos</i>	
<b>Curriculums autores</b>	<b>172 - 178</b>



## **Introducción**

En el mundo actual, complejo y en constante cambio, resulta cada vez más necesario encontrar soluciones eficaces para los desafíos sociales y productivos que enfrentamos. Desde la pobreza y la desigualdad hasta la degradación ambiental y la inestabilidad económica, estos problemas requieren enfoques innovadores y reflexivos que tengan en cuenta las diversas necesidades y perspectivas de las comunidades y actores involucrados.

Para lograr una solución efectiva a los problemas sociales y productivos, es fundamental tener en cuenta los aspectos culturales, económicos, políticos y medioambientales que influyen en la situación. Por ello, es necesario emplear enfoques y métodos que permitan un análisis completo y detallado de las diferentes dimensiones de cada problema. Este libro presenta una selección de enfoques y métodos que han demostrado ser efectivos en la solución de problemas sociales y productivos en distintos contextos, brindando herramientas para abordar con éxito los desafíos del mundo actual.

En la búsqueda de soluciones efectivas y duraderas para los problemas sociales y productivos, la ingeniería juega un papel fundamental. A través de herramientas y métodos como el análisis de sistemas, la simulación y el modelado, la ingeniería permite un enfoque sistemático y riguroso para abordar estos desafíos. Además, la ingeniería fomenta una cultura de mejora continua y optimización de procesos, lo que es crucial para asegurar que las soluciones implementadas sean eficaces y sostenibles a largo plazo.

A través de este libro, se presentan diversas herramientas de ingeniería que pueden ser utilizadas para la solución de problemas sociales y productivos. Se describen técnicas como el diseño robusto de procesos, el análisis de redes bayesianas, la metodología Seis Sigma, análisis meta-heurístico entre otras. Estas herramientas permiten un análisis riguroso y sistemático de los procesos y sistemas involucrados en los problemas sociales y de las organizaciones empresariales, lo que facilita la identificación de posibles soluciones y la evaluación de su eficacia. Este libro presenta una combinación de herramientas de ingeniería y enfoques participativos que permiten abordar los desafíos actuales de la industria y la sociedad en general de manera sostenible y efectiva.

## Introduction

In today's complex and ever-changing world, it is increasingly necessary to find effective solutions to the social and productive challenges we face. From poverty and inequality to environmental degradation and economic instability, these issues require innovative and thoughtful approaches that take into account the diverse needs and perspectives of the communities and actors involved.

In order to achieve an effective solution to social and productive problems, it is essential to take into account the cultural, economic, political and environmental aspects that influence the situation. Therefore, it is necessary to use approaches and methods that allow a complete and detailed analysis of the different dimensions of each problem. This book presents a selection of approaches and methods that have proven effective in solving social and productive problems in different contexts, providing tools to successfully address the challenges of today's world.

In the search for effective and lasting solutions to social and productive problems, engineering plays a fundamental role. Through tools and methods such as systems analysis, simulation and modeling, engineering enables a systematic and rigorous approach to addressing these challenges. In addition, engineering fosters a culture of continuous improvement and process optimization, which is crucial to ensure that the solutions implemented are effective and sustainable in the long term.

Through this book, various engineering tools that can be used to solve social and productive problems are presented. Techniques such as robust process design, Bayesian network analysis, six sigma methodology, meta-heuristic analysis among others are described. These tools allow a rigorous and systematic analysis of the processes and systems involved in social problems and business organizations, which facilitates the identification of possible solutions and the evaluation of their effectiveness. This book presents a combination of engineering tools and participatory approaches that allow addressing the current challenges of industry and society at large in a sustainable and effective way.

---

## ***SEMBLAZA: Dr. Jorge de la Riva Rodríguez***

---

Nació el 22 de noviembre de 1952 en la Ciudad de Torreón, Coahuila; México.

### **Escolaridad.**

Curso su primaria y secundaria en Ciudad Juárez Chihuahua.

1968. Estudio la preparatoria en el Instituto Regional de Ciudad Juárez.

1975. Termino su carrera profesional en Ingeniería Industrial en Química en el Instituto Regional de la Laguna.

1982. Realizó estudios en la Universidad de Aston en Birmingham Inglaterra en Investigación de Operaciones y Análisis de Sistemas

1982. Obtiene el grado de Maestro en Administración General por la Universidad de Nuevo León.

2000. Obtuvo el grado de Doctor en Ciencias en Ingeniería Industrial por el Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez.

### **Reconocimientos.**

2014. Nombrado Profesor Decano del Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez.

2019. Recibe la distinción de miembro del SNI nivel I por CONACYT.

2022. Nombrado Decano de la División de Estudios e Investigación del Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez.

2022. Recibe nuevamente el nombramiento de miembro del SNI nivel 1 por CONACYT.

### **Prácticas Profesionales.**

1975. FERTIMEX planta ubicada en Salamanca Guanajuato.

### **Trabajos en la Industria.**

1976 al 1981. Se desempeñó profesionalmente como jefe de Estudios Económicos en la empresa Altos Hornos de México.

1982 al 1984. Asesorías en el área de producción a varias empresas, como parte de vinculación del Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez con sector empresarial.

1986 al 1990. Fue Gerente de Ingeniería Industrial en la empresa Maquilados Fronterizos-Arneses de Juárez.

1982 a la fecha se desempeña como Gerente General de la empresa Refacciones del Hogar de Chihuahua S.A. de C.V.

### **Trabajos en el Ámbito Educativo.**

- Maestro a nivel licenciatura en la Universidad Autónoma del Noroeste unidad Monclova, en el Tecnológico de Monterrey Campus Ciudad Juárez y en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
- Fungió como Jefe de la División de Estudios de Posgrado e Investigación y Jefe del Departamento de Ingeniería Industrial.
- Desde el año 1982, ha impartido cursos a nivel licenciatura, maestría y doctorado en el Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez.

### **Otras Gestiones.**

- Colaboró en el diseño de los programas de estudios de posgrado en el Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez.
- Profesor Investigador del ITCJ, siendo su área de interés de investigación el Estudio del Trabajo, Ergonomía y Neuro-ergonomía.

# **Mantenimiento Basado en Análisis de Redes Bayesianas**

*Maintenance Based on Bayesian Network Analysis*

**Secundino Ramos Lozano**

Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez

ramossecundino@hotmail.com

<https://orcid.org/000-0003-0484-0297X>

**Manuel Arnoldo Rodríguez Medina**

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Cd. Juárez

manuel\_rodriguez\_itcj@yahoo.com

<https://orcid.org/0000-0002-8922-4718>

**Ma. De los Ángeles de la Torre Mora**

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Cd. Juárez

angeles6696@hotmail.com

<https://orcid.org/0009-0008-9734-5879>

## **Resumen**

La necesidad de mejorar el desempeño de mantenimiento en la industria ha acelerado el desarrollo de diferentes técnicas de mantenimiento con la finalidad de reducir costos y el tiempo muerto causado por fallas en el equipo. Se han desarrollado diferentes sistemas de mantenimiento, desde el mantenimiento preventivo, mantenimiento basado en la condición del equipo, por horas de uso, etc. El mantenimiento mediante el uso de redes Bayesianas se propone como una herramienta eficiente de análisis de fallas para lograr el objetivo de reducir costos y el tiempo de paro no programado en los equipos, mediante un análisis que permite un diagnóstico más certero, eliminando la causa raíz de las fallas de manera más efectiva y obteniendo mejores resultados en los métricos de mantenimiento y un mejor desempeño de los equipos analizados. El uso de las redes Bayesianas para análisis de fallas permite retroalimentar el sistema y obtener probabilidades que son de utilidad para programar las tareas de mantenimiento, basado principalmente en el historial de mantenimiento del equipo, el cual se va actualizando tomando en cuenta el mantenimiento realizado al equipo y la probabilidad de falla de sus componentes. Se da un ejemplo de esta técnica de análisis de falla de mantenimiento utilizando equipos de impresión 3D que cuentan con historial de fallas suficiente para determinar las probabilidades condicionales con la finalidad de realizar el análisis usando la metodología de Redes Bayesianas.

**Palabras Clave:** Red Bayesiana, Análisis de falla, mantenimiento

## **Abstract**

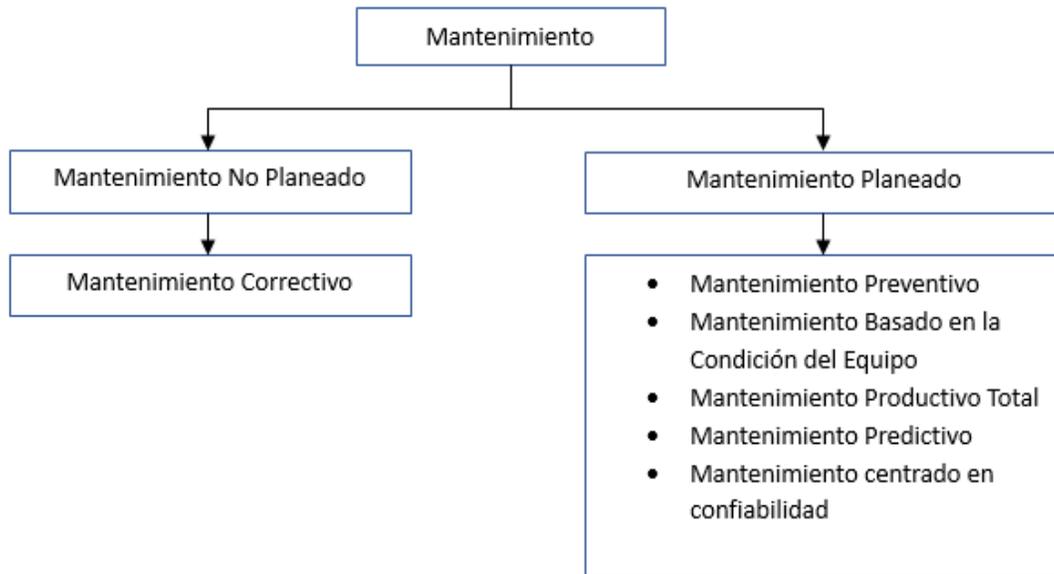
The need to improve maintenance performance in the industry has accelerated the development of different maintenance techniques in order to reduce costs and downtime caused by equipment failures. Different maintenance systems have been developed, from preventive maintenance, maintenance based on the condition of the equipment, by hours of use, etc.; Maintenance through the use of Bayesian networks is proposed as an efficient failure analysis tool, to achieve the objective of reducing costs and unscheduled downtime in the equipment, through an analysis that allows more accurate diagnosis, eliminating failure root cause more effectively, obtaining better results in maintenance metrics and improve performance of the analyzed equipment. The use of Bayesian networks for failure analysis allows us to give feedback to the system, obtaining probabilities that are useful to schedule maintenance task, based mainly on the maintenance history of the equipment, which is updated taking into account the performance of the equipment, maintenance performed and the probability of failure of its components. An example of this maintenance failure analysis technique is given for a 3D printing equipment that has a sufficient history of failures to determine the initial probabilities in order to carry out the analysis using the Bayesian Networks methodology.

## **1 INTRODUCCION**

La exigencia de los clientes hacia sus proveedores en cuanto a mejoramiento de calidad y reducción de costos, así como la competencia en el mercado global, ha forzado a las compañías a establecer estrategias de mejoramiento continuo en todas las áreas de sus organizaciones con la finalidad de cumplir con las expectativas de sus clientes y mantenerse vigentes en un entorno cada vez más competitivo. Una de las áreas con mayores oportunidades de mejoramiento es el área del departamento de mantenimiento, ya que además de los gastos de operación del departamento, también se puede mejorar el servicio, estableciendo acciones enfocadas a reducir o eliminar los paros no programados mediante el mejoramiento e implementación de estrategias adecuadas de mantenimiento y de metodologías de análisis de fallas eficientes.

El mantenimiento se divide básicamente en dos tipos, mantenimiento no planificado y mantenimiento planificado, como se muestra en la Figura 1. Estas técnicas de mantenimiento han sido implementadas en la industria y se han obtenido resultados muy favorables. Sin embargo, se prueban diferentes técnicas en las empresas buscando un mejoramiento en los métricos del departamento de mantenimiento, siempre buscando mantener el equipo en óptimas condiciones y ofrecer un servicio más eficiente. Para el logro de este objetivo, se debe contar con una estrategia adecuada para el análisis de las fallas e implementar acciones correctivas adecuadas, con la finalidad de mejorar los métricos de mantenimiento.

**Figura 1.** Tipos de mantenimiento



Fuente: Elaboración propia

La finalidad de realizar el mantenimiento basado en un análisis de redes Bayesianas (RB) es incrementar la disponibilidad del equipo productivo y reducir o eliminar el tiempo utilizado para realizar reparaciones no programadas mediante un análisis más eficiente, enfocando las tareas de mantenimiento en las secciones identificadas con mayor probabilidad de falla e implementando las acciones necesarias para reducir la probabilidad de ocurrencia de falla. Además, se evalúa la efectividad de las acciones tomadas y se realizan las correcciones pertinentes en caso de encontrar deficiencias que no permitan el mejoramiento deseado. Los métricos de mantenimiento tales como el tiempo promedio entre fallas (MTBF por sus siglas en inglés), el tiempo promedio para reparar (MTTR por sus siglas en inglés) y el tiempo promedio para falla (MTTF por sus siglas en inglés) se utilizan para el cálculo de probabilidades de falla. Además, se utiliza la información proporcionada por el fabricante del equipo o la refacción que se requiera analizar.

Al utilizar las RB para hacer el análisis de fallas en los equipos, se obtienen diagnósticos más certeros comparado con otras metodologías. Además, se pueden realizar pronósticos de comportamiento del equipo y sus componentes para poder establecer acciones correctivas efectivas.

## 2.- MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Metodología utilizada

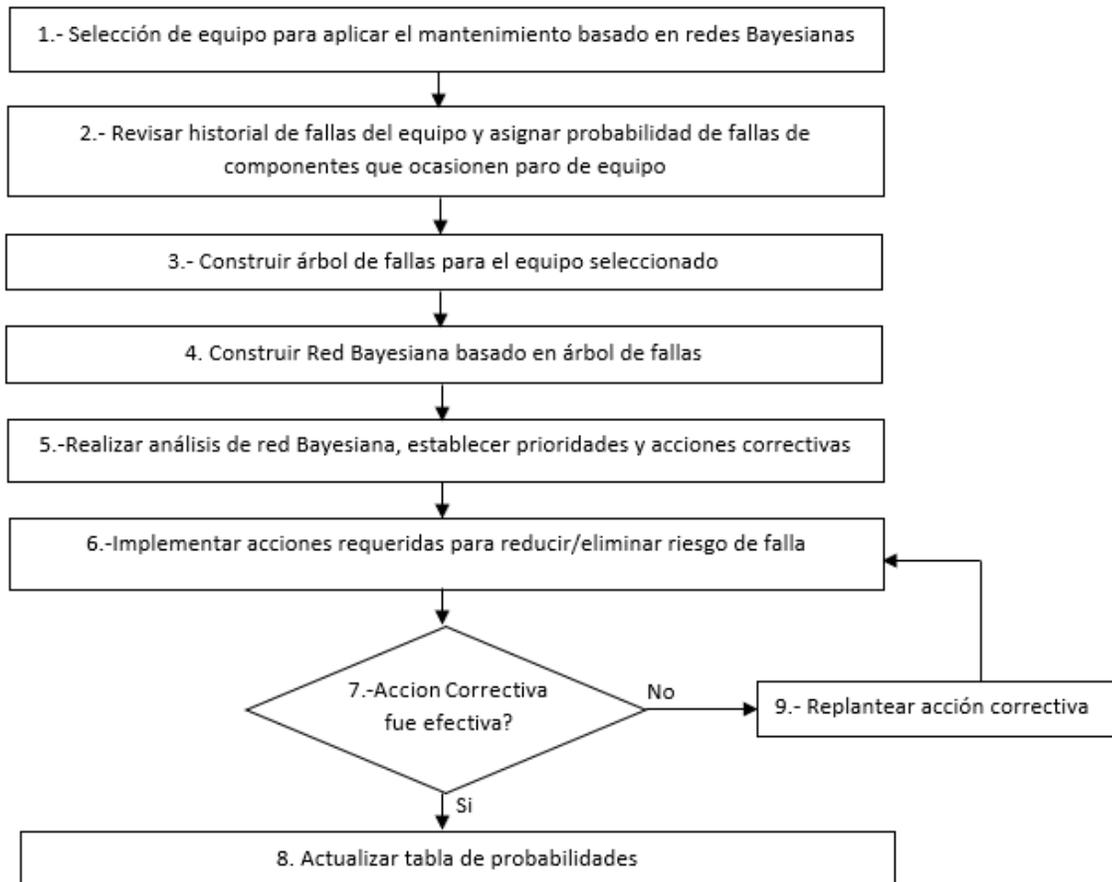
En la Figura 2 se muestra el método propuesto para la programación del mantenimiento basado en redes Bayesianas. El primer paso es hacer un análisis a fondo del equipo al que se le aplicará este sistema de mantenimiento, comenzando con el equipo o maquinaria en el cual un paro no programado tenga una mayor repercusión en el proceso de producción. Una vez realizada la selección, el paso número 2 es recolectar la información requerida para poder determinar la probabilidad de falla de los componentes del equipo que pudieran ocasionar un paro no programado, basados en el historial de mantenimiento, información proporcionada por el fabricante, experiencia del técnico de mantenimiento, etc.

En el paso número 3, se construye el árbol de fallas para cada equipo. Una vez terminado, se procede a determinar los cut set mínimos utilizando álgebra booleana. Se determinan sus expresiones booleanas mediante el proceso de abajo hacia arriba. En este proceso de construcción, se arranca del nivel más bajo, siguiendo con el nivel inmediato superior hasta llegar al evento superior. Se reemplazan los puertos con expresiones booleanas, las cuales se combinan para reducirlas a una sola ecuación que es simplificada utilizando las reglas de álgebra booleana para determinar los cut set mínimos. En las ecuaciones, el símbolo  $\cdot$  representa una intersección y el símbolo  $+$  representa una unión. Este árbol de fallas servirá para construir la red Bayesiana (paso 4) y, en el paso 5, para hacer un análisis a fondo de los resultados obtenidos. En el paso número 6 se implementan las acciones a tomar en base al análisis realizado en el paso número 5. Es importante que las acciones que se determinen sean viables y que mejoren el proceso de mantenimiento, es decir, reduzcan en forma sustancial la probabilidad de ocurrencia de falla en un tiempo razonable. En este paso, puede ser necesario contar con la participación de la administración para solventar los costos que pudiera traer la implementación de la acción correctiva.

En el paso número 7 se hace una evaluación que nos puede determinar si la acción correctiva implementada es o no efectiva. En caso de ser efectiva, en el paso 8 se actualizan las tablas de probabilidad en la red Bayesiana. En caso contrario, se procede al paso 9 donde se replantea la acción correctiva dada y se vuelve a evaluar. Este paso se puede repetir hasta que se encuentre una solución que reduzca de forma efectiva la probabilidad de ocurrencia de falla.

El proceso de análisis debe ser realizado por un equipo multidisciplinario para lograr una acción correctiva más eficaz y para que el problema sea analizado desde diferentes perspectivas.

**Figura 2.** Modelo propuesto para Mantenimiento basado en redes Bayesianas



Fuente: Elaboración propia

### 2.1.1 Software utilizado

El software utilizado para el proceso de análisis estadísticos y probabilísticos se utilizó el lenguaje R y el Samlam. El lenguaje R contiene un paquete de librerías con diferentes funciones, que es una alternativa gratuita a los paquetes de software comerciales que permiten realizar este tipo de análisis estableciendo las relaciones entre las variables hasta llegar al evento cumbre. Para la elaboración de la red Bayesiana, el software Samlam, desarrollado en Java por Automated Reasoning Group a cargo del Profesor Adnan Darwiche de la Universidad de California en Los Ángeles (UCLA), permite asignar a las variables sus probabilidades simples o condicionales y obtener las probabilidades conjuntas de cada una en el diseño de la red Bayesiana.

## 2.1 MÉTRICOS DE MANTENIMIENTO

Existen diversos parámetros para medir el desempeño del departamento de mantenimiento en una unidad productiva. El uso de distribuciones normal, triangular y exponencial es común para describir tanto los tiempos de reparación como de fallas.

En la práctica, para la confiabilidad, el métrico de MTTF (por sus siglas en inglés) es muy utilizado y se define como el valor esperado de una variable aleatoria distribuida exponencialmente con una tasa de falla. Para los equipos reparables, se utilizan los métricos de tiempo promedio entre fallas (MTBF por sus siglas en inglés) y tiempo promedio para reparar (MTTR por sus siglas en inglés) (Ruane, Walsh, & Cosgrove, 2022). La ecuación (1) muestra el cálculo de MTBF. Según Ribeiro et al. (2019), el MTBF y MTTR también se pueden determinar de acuerdo a las ecuaciones 2 y 3, respectivamente.

$$MTBF = MTTF + MTTR(1)$$

$$MTBF = \frac{\text{tiempodeoperación}}{\text{númerodefallas}} \quad (2)$$

$$MTTR = \frac{\text{Tieputilizado parareparar las fallas}}{\text{Número de fallas}} \quad (3)$$

## 2.2 TIPOS DE MANTENIMIENTO

### 2.2.1 Mantenimiento Correctivo

Existen diferentes estrategias de mantenimiento, tales como el mantenimiento correctivo, en el cual se toma acción solo cuando se presenta una falla crítica y el equipo o maquinaria no puede seguir trabajando debido a su condición actual. El mantenimiento correctivo es una actividad de reparación para hacer que un equipo que está fallando recupere el estado técnico requerido para su funcionamiento, e incluye una o más de las siguientes actividades: localización de la falla, aislamiento de la falla, desarme, reemplazo, reinstalación, verificación y reparación de partes dañadas (Fang & Zhaodong, 2015).

### 2.2.2 Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo es uno de los tipos de mantenimiento más utilizados en la industria y se desarrolla en base a un calendario donde se plasman las tareas de mantenimiento en intervalos de tiempo predeterminados. El objetivo del mantenimiento preventivo es alargar o posponer la probabilidad de degradación y la falla o paro no planeado del equipo. Una cantidad mínima de mantenimiento preventivo puede ocasionar fallas prematuras; por otro lado, un exceso de mantenimiento puede incrementar los costos, por lo que debe existir un balance adecuado (Nasrfard, Mohammadi, & Karimi, 2023).

### **2.2.3 Mantenimiento basado en la condición del equipo**

El mantenimiento basado en la condición del equipo es una ramificación del mantenimiento preventivo en la que el monitoreo de la condición del equipo es una de sus características principales. En el mantenimiento basado en la condición del equipo, las tareas de mantenimiento se programan según la actual condición del equipo, el cual es inspeccionado después de cada operación y se toma la decisión de realizar o no actividades de mantenimiento antes de comenzar la operación del equipo. Además, esta condición se debe predecir basándose en el concepto de degradación (Ali, Saif, & Ghasemi, 2022).

### **2.2.4 Mantenimiento productivo total (TPM)**

El objetivo de implementar el TPM es mejorar la productividad y la calidad, así como incrementar la moral de los empleados y, consecuentemente, su satisfacción laboral. En el pasado, el mantenimiento preventivo se consideraba una actividad que no agregaba valor; sin embargo, ahora es un requisito esencial para un ciclo de vida útil más largo de las máquinas en la industria. El TPM es un enfoque innovador para el mantenimiento que optimiza la efectividad del equipo, elimina averías y promueve el mantenimiento autónomo del operador a través del día a día, con actividades que involucran a la totalidad de la fuerza de trabajo (Singh, Gohil, Shah, & Desai, 2013).

El mantenimiento productivo total es una filosofía que tiene el objetivo de optimizar el desempeño general de los equipos de manufactura y asegurar su uso más eficiente. Este método se enfoca en la participación de los empleados en actividades de mantenimiento para hacer más eficiente el uso del equipo. La filosofía del TPM consiste en no dejar nunca de buscar la máxima productividad del sistema industrial con el objetivo de lograr el máximo potencial productivo mediante el logro de cero, o casi cero, interrupciones del proceso (Ribeiro, Godina, Pimentel, Silva, & Matias, 2019). El principio básico del TPM es empoderar a los empleados para que se involucren en el mejoramiento del proceso de prevenir tiempo muerto no planeado.

### **2.2.5 Mantenimiento Predictivo**

El mantenimiento predictivo es una técnica de mantenimiento que se ha implementado en numerosas empresas debido a los buenos resultados que se han obtenido mediante la implementación de este método de mantenimiento a los equipos existentes en la industria. Sin embargo, se requiere una inversión considerable y un cierto nivel de conocimiento técnico para su implementación. La idea del mantenimiento predictivo es planear las tareas de mantenimiento proactivamente, basándose en la condición actual para predecir la condición en el futuro. Desde el punto de vista técnico, el mantenimiento predictivo requiere implementar el uso de sensores y analizar el flujo de datos en tiempo real por medio de plataformas informáticas, de modo que se pueda estimar o incluso predecir el estado del equipo (Wolfartsberger, Zenisek, & Wild, 2020).

## 2.2.6 Mantenimiento centrado en Confiabilidad

El mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) es una combinación óptima de las prácticas de mantenimiento correctivo, mantenimiento basado en tiempo o intervalos, mantenimiento proactivo y mantenimiento basado en la condición del equipo. Estas estrategias de mantenimiento, en lugar de aplicarse independientemente, se integran para aprovechar sus respectivas fortalezas con el fin de maximizar la confiabilidad del equipo mientras se minimizan los costos del ciclo de vida (Vishnu & Regikumar, 2016).

## 2.3 HERRAMIENTAS DE ANALISIS DE FALLA

### 2.3.1 Árbol de fallas

El árbol de fallas es un gráfico acíclico dirigido que representa el camino o cadena de eventos que originan un problema. Representa gráficamente la causa raíz de un problema dado, a través de una estructura de árbol donde la raíz representa la falla o evento superior, y las hojas representan la causa raíz, que también son llamados eventos básicos. En la Tabla 1 se muestran los símbolos utilizados para la construcción del árbol de fallas.

Adicionalmente, el árbol de fallas es un método estructural para determinar las causas potenciales de un incidente no deseado que puede tener riesgos de seguridad o repercusiones económicas.

**Tabla 1.** Simbología utilizada en este estudio para árbol de fallas.

Categoría	Símbolo	Nombre	Descripción
Evento		Círculo	Evento básico con datos suficientes: representa el nivel más bajo del nivel de los eventos por lo tanto el fin de la ramificación del árbol de fallas
		Rectángulo	Evento representado por un puerto, se refiere a un evento intermedio que puede ser más desarrollado.
		Diamante	Evento sin desarrollar debido a que no se tiene la información necesaria o porque las causas no tienen consecuencias suficientes
		Ovalo	Evento condicional que es usado en conjunto con otros puertos lógicos
		Casa	Evento casa, es un evento externo que no es en sí una falla que genere una salida
		Triángulo de entrada	Símbolo de transferencia de entrada que indica que el árbol de fallas continua con su desarrollo en otro lugar
		Triángulo de salida	Símbolo de transferencia de salida indica que esta porción del árbol de fallas debe ser conectado con su correspondiente símbolo de transferencia de entrada.

Lógico		Puerto AND	El evento de salida ocurre si todos los eventos de entrada ocurren en forma simultánea
		Puerto OR	El evento de salida ocurre si cualquiera de los eventos de entrada ocurre
		Puerto de INHIBICION	La entrada produce una salida cuando ocurre un evento condicional
		Puerto OR EXCLUSIVO	El evento de salida ocurre si solo uno de los eventos de entrada ocurre
		Puerto OR votación	El evento de salida ocurre si al menos k de n elementos de entrada ocurren.

Fuente: (Guangbin, 2007).

La probabilidad de ocurrencia de falla de la impresora 3D (evento superior) es posible determinarla con la información de probabilidad de falla de los eventos básicos. El árbol de fallas es una técnica de análisis usada principalmente en el campo de ingeniería de confiabilidad y seguridad y es de gran utilidad para encontrar la parte débil de un sistema. La probabilidad de los eventos en un árbol de fallas se expresa en álgebra booleana con puertos "AND" y "OR". Su probabilidad condicional tiene dos valores: 0 y 1 (Li, He, & Shuai, 2022). El diagrama se compone de eventos y símbolos lógicos.

### 2.3.1.1 Cut Set

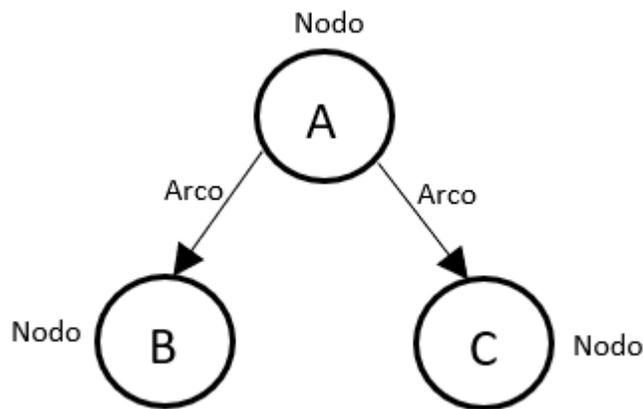
Un cut set se define como el conjunto de eventos básicos que, de ocurrir, causan que el evento superior ocurra. El cut set mínimo representa la combinación más pequeña de eventos que causan la ocurrencia del evento superior y provee información de los puntos vulnerables de un sistema complejo. Otra aplicación de los cut sets mínimos es el análisis de la causa común; una causa común es una condición o evento que ocasiona que múltiples eventos básicos ocurran. El análisis debe resultar en acciones recomendadas para minimizar la ocurrencia de causas comunes y proteger a los eventos básicos de causas de fallas comunes (Guangbin, 2007).

### 2.3.2 Redes Bayesianas

Las redes Bayesianas se pueden describir como un grafo acíclico dirigido (DAG, por sus siglas en inglés), el cual define una factorización de una distribución de probabilidad conjunta sobre las variables que están representadas por los nodos del DAG, donde la factorización está dada por los enlaces dirigidos del DAG. Los DAGs son modelos gráficos que no contienen ciclos en la estructura de la gráfica. La construcción de una red

Bayesiana se desarrolla en dos etapas. En la primera, se identifican las variables relevantes de un problema específico, así como sus relaciones causales. El DAG resultante especifica un conjunto de dependencia y suposiciones de independencia que se aplicarán en la distribución conjunta de probabilidad, que después es especificada en términos de un conjunto de distribuciones de probabilidad condicional, una para cada "familia" del DAG (Kjaerulff & Madsen, 2008).

En la Figura 3 se muestra una representación de una red Bayesiana sencilla, donde los nodos del grafo con variables denominadas A, B, C están representadas dentro de un círculo o elipse, y los arcos del grafo, los cuales representan las relaciones causales entre las variables. En este ejemplo se puede observar que las variables aleatorias B y C tienen una dependencia causal con la variable A; en otras palabras, la variable A es el "padre" de las "hijas" B y C.



**Figura 3.** Representación de una Red Bayesiana sencilla

Fuente: Elaboración propia

Las redes Bayesianas son especialmente útiles para representar visualmente distribuciones probabilísticas de alta dimensión con un reducido número de parámetros. Se han propuesto diferentes tipos de redes Bayesianas que pueden soportar diferentes tipos de datos: discretos, continuos e híbridos, usando el tipo apropiado de distribución de probabilidad condicional (Atienza, Bielza y Larrañaga, 2022).

Basado en el teorema de Bayes, la red Bayesiana usa probabilidades previas y condicionales para el análisis cuantitativo (Li et al., 2021). En una red Bayesiana pueden existir tres tipos de conexiones básicas: seriales, convergentes y divergentes, cada una con sus propiedades cualitativas que favorecen la propagación de probabilidades ante una nueva evidencia sobre el modelo. Una de las ventajas más importantes de las redes Bayesianas es que pueden representar tanto el aspecto cuantitativo de un problema como su aspecto cualitativo (López Puga, García García, Fuente Sánchez y de la Fuente Solana, 2007).

El Rev. Thomas Bayes abordó tanto los casos de distribución de datos continuos como discretos. En el caso de los datos discretos, el Teorema de Bayes relaciona las probabilidades marginal y condicional de los eventos A y B, asumiendo que la probabilidad de B es diferente de cero. Por lo tanto,  $P(A|B)$  se calcula de acuerdo a la ecuación (2):

$$P(A|B) = P(A) * \frac{P(B|A)}{P(B)} \quad (2)$$

Donde:

$P(A)$  Es la probabilidad a priori (también llamada probabilidad incondicional o marginal) de A;  $P(A|B)$  es la probabilidad condicional de A, dado B. (también llamado probabilidad posterior);  $P(B)$  es la probabilidad a priori o marginal de B, y  $\frac{P(B|A)}{P(B)}$  es factor de Bayes o radio de probabilidad (Conrady & Joufee, 2015).

$$\frac{P(B|A)}{P(B)}$$

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Construcción del árbol de fallas

Para la construcción del árbol de fallas, se toma en cuenta la experiencia del personal involucrado en el desempeño del equipo, además de su historial de mantenimiento y la retroalimentación del fabricante, con la finalidad de considerar los elementos más importantes al momento de realizar el análisis. En la Figura 4 se muestra el árbol de fallas construido, tomando como evento superior la falla no deseada de una impresora 3D, y ramificando en todas las posibles causas que pueden originar la falla.

Con la finalidad de una visualización más simplificada del árbol de fallas y facilitar el análisis utilizando el algebra booleana se codifican los eventos intermedios como  $E_1, E_2, \dots, E_n$  los eventos básicos como  $X_1, X_2, \dots, X_n$  y el evento superior como T. La tabla 2 muestra el listado de códigos del evento superior, de cada uno de los eventos intermedios y eventos básicos utilizados para la construcción del árbol de fallas. La Figura 6 muestra el árbol de fallas codificado.

El paso siguiente es calcular los Cut set mínimos para el árbol de fallas, empezando el proceso del nivel inferior y utilizando el algebra booleana obtenemos las ecuaciones para cada evento. Empezando en el nivel inferior calculamos el evento codificado como  $E_{11}$  obtenemos la ecuación 3.1.

$$E_{11} = X_8 + X_{13} + X_{14} \quad 3.1$$

Moviéndonos al nivel inmediato superior obtenemos las ecuaciones de los eventos  $E_{10}$  y  $E_9$

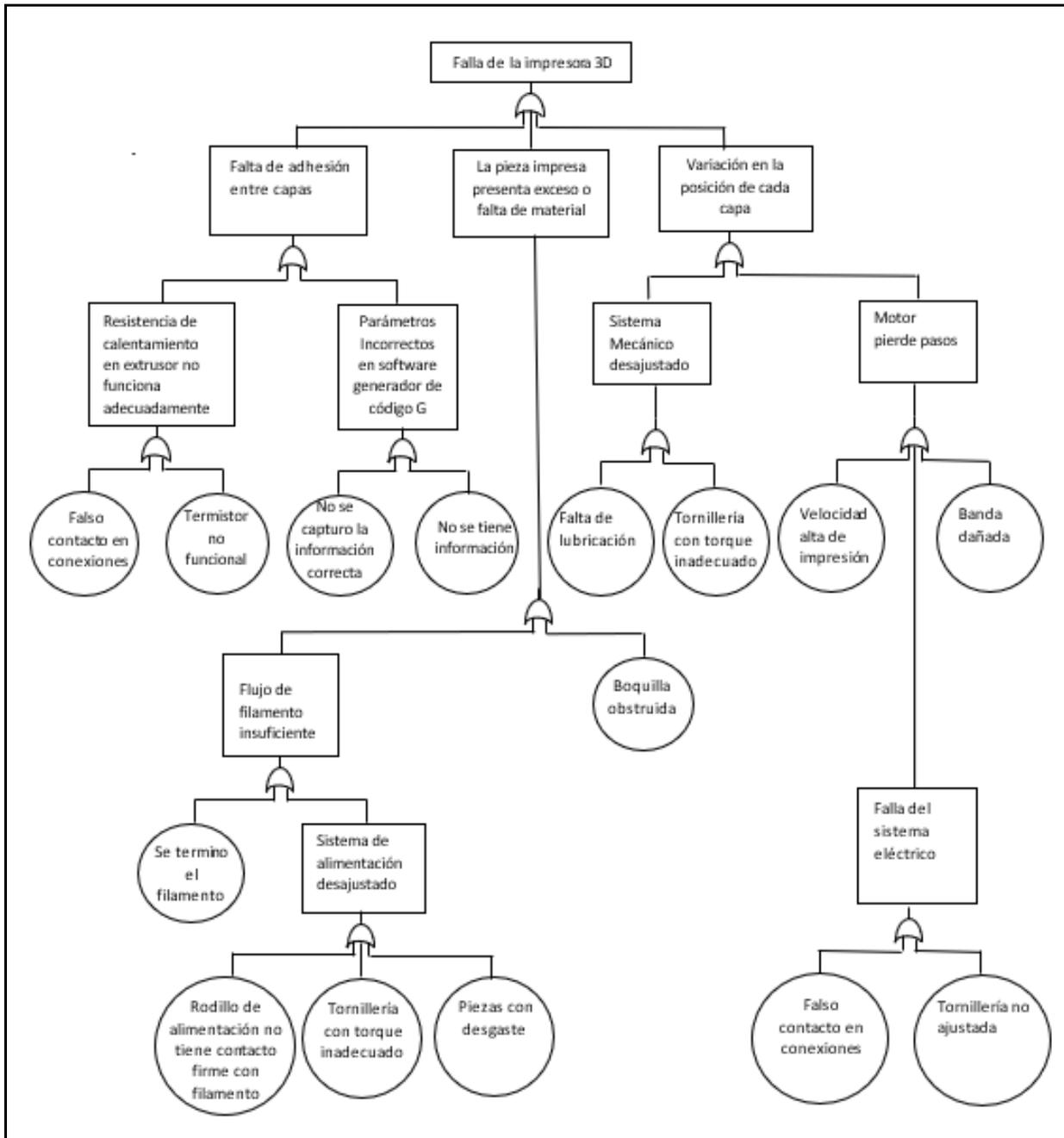
$$E_{10} = X_2 \cdot X_{12} \quad 3.2$$

$$E_9 = X_{11} + E_{11} \quad 3.3$$

Con la finalidad de obtener la ecuación 3.3 únicamente en términos de eventos básicos sustituimos la ecuación 3.1 en la ecuación .3.3 obteniendo la ecuación 3.4.

$$E_9 = X_{11} + X_8 + X_{13} + X_{14} \quad 3.4$$

**Figura 4.** Árbol de fallas para un equipo de impresión 3D.



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2.** Listado de codigos y sus probabilidades de ocurrencia

Código	Descripción	Probabilidad de ocurrencia (%)
T	Falla de la impresora 3D	7.5
E <sub>1</sub>	Falta de adhesión entre capas	33
E <sub>2</sub>	La pieza impresa presenta exceso o falta de material	15
E <sub>3</sub>	Variación en la posición de cada capa	5
E <sub>4</sub>	Resistencia de calentamiento en extrusor no funciona adecuadamente	50
E <sub>5</sub>	Parámetros incorrectos en software generador de código G	8
E <sub>6</sub>	Flujo de filamento insuficiente	5
E <sub>7</sub>	Sistema Mecánico desajustado	20
E <sub>8</sub>	Motor pierde pasos	3
E <sub>9</sub>	Sistema de alimentación desajustado	55
E <sub>10</sub>	Falla del sistema eléctrico	8
E <sub>11</sub>	Variación en la fuente de alimentación	40
X <sub>1</sub>	Boquilla obstruida	5
X <sub>2</sub>	Falso contacto en conexiones	45
X <sub>3</sub>	Termistor no funciona	25
X <sub>4</sub>	No se capturo la información correcta	6
X <sub>5</sub>	No se tiene información de parámetros de impresión	10
X <sub>6</sub>	Se termino el filamento	20
X <sub>7</sub>	Falta de lubricación	40
X <sub>8</sub>	Tornillería con torque inadecuado	24
X <sub>9</sub>	Velocidad alta de impresión	48
X <sub>10</sub>	Banda dañada	18
X <sub>11</sub>	Se termino el filamento	44
X <sub>12</sub>	Tornillería no ajustada	12
X <sub>13</sub>	Rodillo de alimentación no tiene contacto firme con filamento	10
X <sub>14</sub>	Pieza desgastada	43

Fuente: Elaboración propia

Subiendo un nivel obtenemos las ecuaciones para  $E_8, E_7, E_6, E_5$  y  $E_4$

$$E_8 = X_9 + X_{10} + E_{10} \quad 3.5$$

Sustituyendo ecuación 3.2 en la ecuación 3.5 obtenemos la ecuación 3.6.

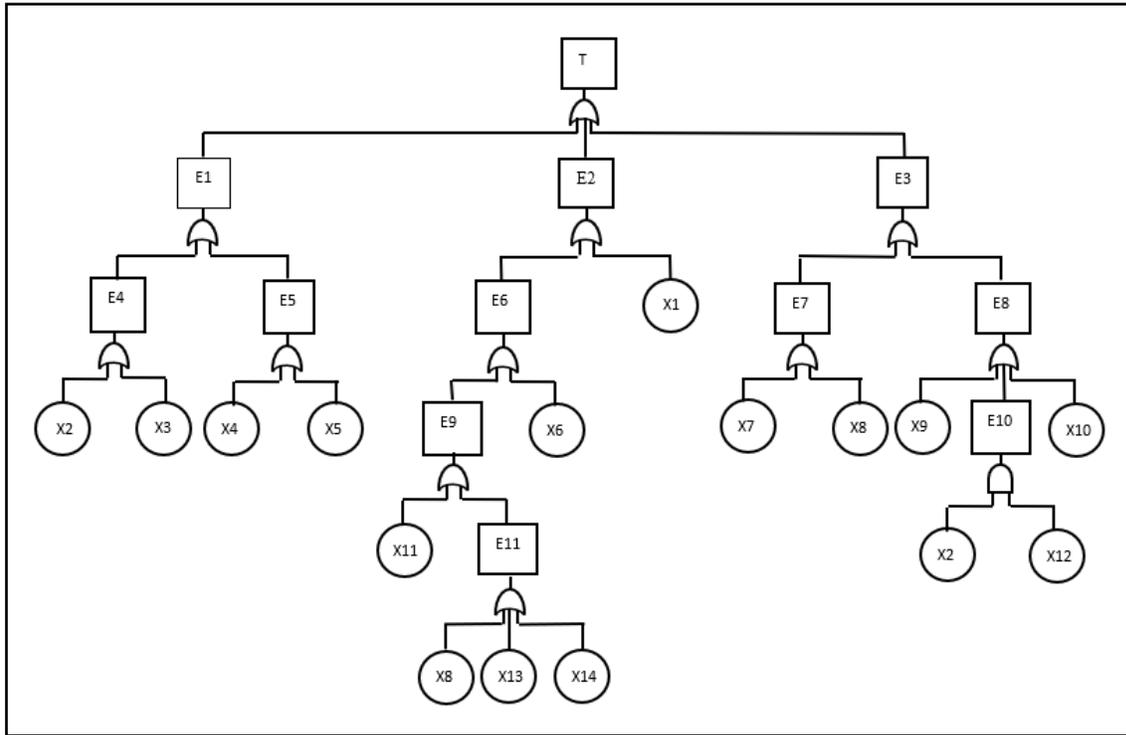
$$E_8 = X_9 + X_{10} + X_2 \cdot X_{12} \quad 3.6$$

De manera similar se obtienen las ecuaciones 3.7 y 3.8

$$E_7 = X_7 + X_8 \quad 3.7$$

$$E_6 = X_6 + E_9 \quad 3.8$$

**Figura 5.** Arbol de fallas codificado



Fuente: Elaboración propia

Sustituyendo la ecuación 3.4 en la ecuación 3.7 obtenemos la ecuación 3.9

$$E_6 = X_6 + X_{11} + X_8 + X_{13} + X_{14} \quad 3.9$$

Por último, en este nivel obtenemos las ecuaciones para  $E_5$  y  $E_4$ .

$$E_5 = X_4 + X_5 \quad 3.10$$

$$E_4 = X_2 + X_3 \quad 3.11$$

Subiendo un nivel más obtenemos las ecuaciones para  $E_3$ ,  $E_2$  y  $E_1$

$$E_3 = E_7 + E_8 \quad 3.12$$

Sustituyendo 3.7 y 3.6 en 3.12 obtenemos la ecuación 3.13

$$E_3 = X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_2 \cdot X_{12} \quad 3.13$$

$$E_2 = X_1 + E_6 \quad 3.14$$

Sustituyendo la ecuación 3.9 en la ecuación 3.14 obtenemos la ecuación 3.15 en términos de los eventos básicos.

$$E_2 = X_1 + X_6 + X_{11} + X_8 + X_{13} + X_{14} \quad 3.15$$

Enseguida calculamos el evento intermedio numero 1 obteniendo la ecuación 3.16.

$$E_1 = E_4 + E_5 \quad 3.16$$

La ecuación anterior queda expresada como la ecuación 3.17 después de sustituir la ecuación 3.10 y 3.11 en la ecuación 3.16.

$$E_1 = X_2 + X_3 + X_4 + X_5 \quad 3.17$$

Por último, calculamos el evento principal T

$$T = E_1 + E_2 + E_3 \quad 3.18$$

Sustituyendo las ecuaciones 3.17, 3.15 y 3.13 en la ecuación 3.18 obtenemos la ecuación 3.19 en términos de eventos básicos

$$T = X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_1 + X_6 + X_{11} + X_8 + X_{13} + X_{14} + X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_2 \cdot X_{12} \quad 3.20$$

La ecuación 3.20 es el equivalente lógico del árbol de fallas en la Figura 6 y cada termino de esta ecuación es un cut set, es decir provocaran la ocurrencia del evento superior, sin embargo, el número de cut sets no es el mínimo y puede ser reducido utilizando las reglas del álgebra booleana a la expresión en la ecuación 3.21

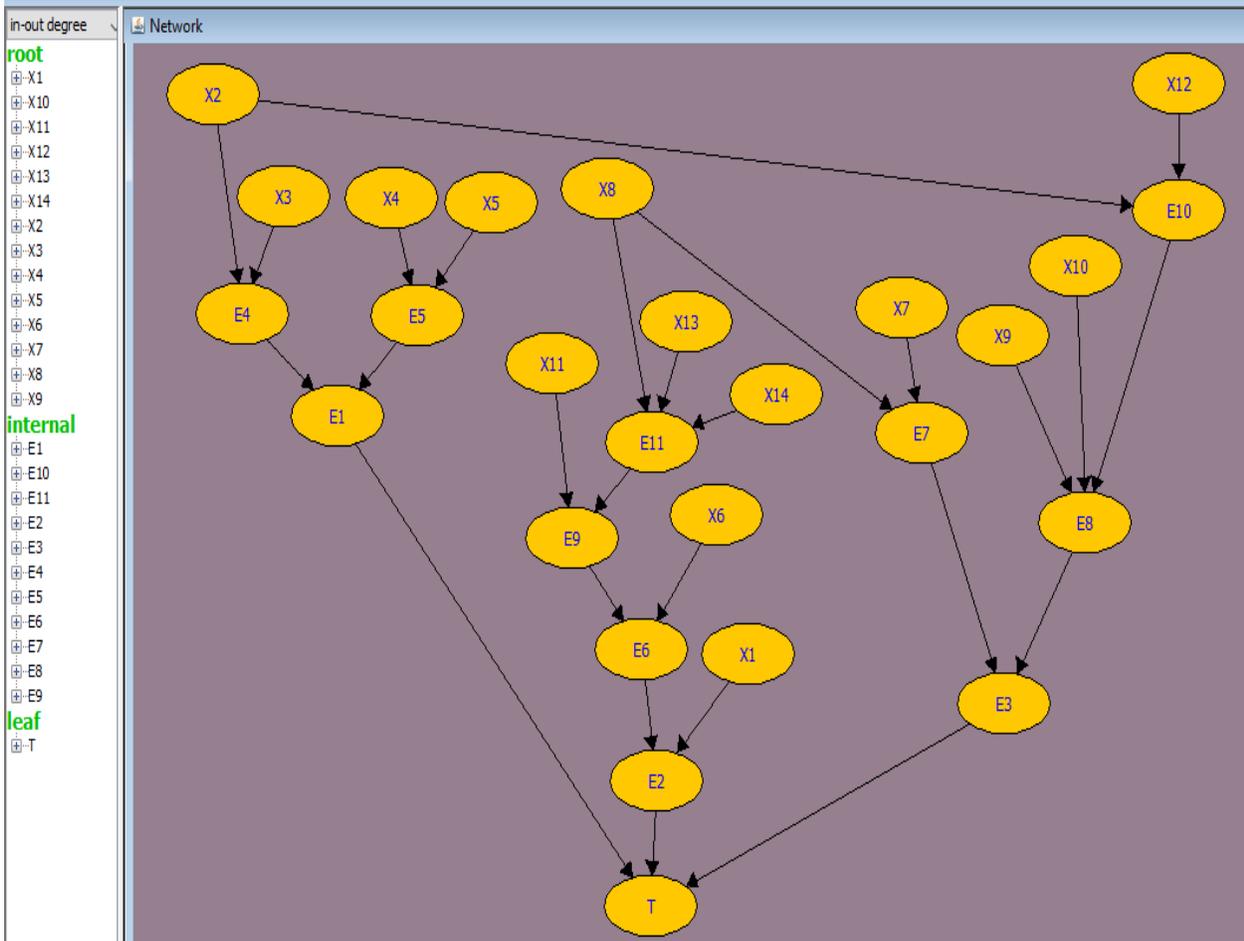
$$T = X_3 + X_4 + X_5 + X_1 + X_6 + X_{11} + X_{13} + X_{14} + X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_2 \quad 3.21$$

### 3.2 Construcción de la red Bayesiana

Una vez elaborado el árbol de fallas, el siguiente paso consiste en la elaboración de la red Bayesiana, donde los elementos básicos son los eventos representados por los nodos y sus dependencias son representados por los arcos. La figura 7 se muestra la red Bayesiana construida a partir del árbol de fallas de la figura 6, donde se pueden las relaciones causa efecto representado por los arcos y las variables por los nodos e en términos de padres e hijos.

Para visualizar los efectos de propagación de la evidencia se utiliza el software Samlam donde es posible realizar los diseños de la red bayesiana asignando a los nodos sus probabilidades simples o condicionales con la finalidad de obtener sus probabilidades conjuntas de cada variable. En la Figura 7 se presenta la parte cualitativa de la red Bayesiana construido a partir del árbol de fallas de la figura 6, en la parte izquierda las variables iniciales (root) o padres de la red, seguido de las variables internas (Internal), representando a los hijos y descendientes de otros nodos y por ultimo el evento de interés (leaf) T. Para el equipo de impresión 3D la red Bayesiana construida consta de 26 nodos y 27 arcos que proporcionan información de las relaciones existentes entre cada variable.

**Figura 6.** Red Bayesiana elaborada en software SamIAM



Fuente: Elaboración Propia.

Una vez terminada la red bayesiana, que incluye la captura de las probabilidades marginales y condicionales de cada variable, calculadas utilizando el software R, se visualizan las probabilidades conjuntas de cada nodo de la red mediante el software SamIAM. De esta manera, al cambiar la probabilidad en cualquiera de los nodos, se actualizan las probabilidades en los nodos dependientes. Por ejemplo, si se sustituye una refacción o se da mantenimiento a una sección del equipo, las probabilidades de falla de esta sección cambian. Al capturar esta información en el programa SamIAM en el nodo correspondiente, el software recalcula las probabilidades condicionales y muestra automáticamente los resultados en los nodos de las variables dependientes de la variable que se modifica.

#### **4. Conclusiones**

La programación de las tareas de mantenimiento, basadas en el análisis de redes bayesianas, hace más eficiente su programación. Esto se debe a que mejora el desempeño del equipo de una manera más eficaz, ya que nos permite establecer prioridades basadas en las tablas de probabilidad, resultado del análisis de la red bayesiana. Los resultados al realizar este tipo de análisis se reflejan en el desempeño del equipo, ya que, al enfocar las tareas de mantenimiento en las secciones del equipo con mayor probabilidad de fallas, permite incrementar el tiempo promedio entre fallas (MTBF) e incrementa la disponibilidad del equipo.

El método de análisis es aplicable no solamente al equipo o maquinaria, sino también sirve para hacer un análisis de los sistemas. Esto permite identificar oportunidades de mejoramiento en el sistema, tanto a nivel operativo como administrativo, lo que permite mejorar el servicio a las áreas productivas a un costo más eficiente. Adicionalmente, la efectividad de la metodología puede ser verificada mediante los métricos de mantenimiento utilizados comúnmente, dando seguimiento periódico y analizando tendencias.

Para la elaboración del árbol de fallas, que posteriormente sirve de base para la elaboración de la red Bayesiana, es importante la participación de un equipo multidisciplinario. Los integrantes de este equipo deben estar familiarizados con el tipo de equipo analizado con el objetivo de enriquecer el análisis desde diferentes puntos de vista. Así se cubren aspectos de seguridad, calidad y otros aspectos importantes que deben ser tomados en cuenta para mejorar el servicio a todas las áreas por parte del departamento de mantenimiento.

#### **5. Futuras Líneas de Investigación**

Dada la importancia del departamento de mantenimiento en el ámbito industrial, ya que es un departamento cuyo desempeño y servicio afecta directamente al logro de los objetivos a nivel de planta, y además de la necesidad de ser cada vez más competitivos, es recomendable introducir una técnica de análisis que es una extensión de las redes Bayesianas, llamada redes Bayesianas dinámicas. Esta técnica permite analizar las probabilidades de falla y el comportamiento de los procesos en el tiempo, lo que permite hacer pronósticos a corto y largo plazo del comportamiento del equipo.

#### **Agradecimientos**

Un agradecimiento especial al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología - CONACYT por el apoyo brindado a Secundino Ramos Lozano, a través del Programa Estancias Posdoctorales por México 2022, para la publicación de este artículo.

## Referencias

- Ali, M. H., Saif, A., & Ghasemi, A. (2022). Robust Job Shop Scheduling with Condition-Based Maintenance and Random Breakdowns. *IFAC Papers On Line* (págs. 1225-1230). Halifax, Canada: Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.557>
- Atienza, D., Bielza, C., & Larrañaga, P. (2022). PyBNesian: An extensible python package for Bayesian networks. *Neurocomputing*, 504, 204-209. doi:<https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.06.112>
- Conrady, S., & Joufee, L. (2015). *Bayesian Networks & BayesianLab-A practical Introduction for Researchers*. Franklin TN: Bayesia USA.
- Fang, L., & Zhaodong, H. (2015). System Dynamics Based Simulation Approach on Corrective Maintenance Cost of Aviation Equipments. *APISAT2014", 2014 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology*, (págs. 150-155). Elsevier Ltd. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.519>
- Guangbin, Y. (2007). *LIFE CYCLE RELIABILITY ENGINEERING*. Hoboken, New Jersey: John Willey & Sons, Inc. doi:DOI:10.1002/9780470117880
- Kjaerulff, U. B., & Madsen, A. L. (2008). *Bayesian Networks and Influence Diagrams. A guide to Construction and Analysis*. New York: Springer. doi:DOI: 10.1007/978-0-387-74101-7
- Li, J., Li, H., Wang, F., Cheng, A. S., Yang, X., & Wang, H. (2021). Proactive analysis of construction equipment operators' hazard perception error based on cognitive modeling and a dynamic Bayesian network. *Reliability Engineering and System Safety*, 107203. doi:<https://doi.org/10.1016/j.res.2020.107203>
- Li, Y.-T., He, X.-N., & Shuai, J. (2022). Risk analysis and maintenance decision making of natural gas pipelines with external corrosion based on Bayesian network. *Petroleum Science*, 1250-1261. doi:<https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.09.016>
- López Puga, J., García García, J., Fuente Sánchez, L., & de la Fuente Solana, E. I. (2007). Las redes Bayesianas como herramientas de modelado en psicología. *Anales de psicología*, 307-316. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=16723218>
- Nasrfard, F., Mohammadi, M., & Karimi, M. (2023). A Petri net model for optimization of inspection and preventive maintenance rates. *Electric Power Systems Research*, 109003. doi:<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.109003>
- Nunes, P., Rocha, E., Santos, J., & Antunes, R. (2023). Predictive maintenance on injection molds by generalized fault trees and anomaly detection. *4th International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing* (págs. 1038-1047). Elsevier B.V. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.302>
- Ribeiro, I. M., Godina, R., Pimentel, C., Silva, F., & Matias, J. (2019). Implementing TPM supported by 5S to improve the availability of an automotive production line. *29th International*

*Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*, (págs. 1574-1581). Limerick,Ireland. doi:<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.128>

- Ruane, P., Walsh, P., & Cosgrove, J. (2022). Development of a digital model and metamodel to improve the performance of an automated manufacturing line. *Journal of Manufacturing Systems*, 538-549. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.10.011>
- Singh, R., Gohil, A. M., Shah, D. B., & Desai, S. (2013). Total Productive Maintenance (TPM) Implementation in a Machine Shop: A Case Study. *Chemical, Civil and Mechanical Engineering Tracks of 3rd Nirma University International Conference* (págs. 592-599). Ahmedabad: Elsevier Ltd. doi:[doi:10.1016/j.proeng.2013.01.084](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.084)
- Vishnu, C. R., & Regikumar, V. (2016). Reliability Based Maintenance Strategy Selection in Process Plants: A case Study. *Global Colloquium in Recent Advancement and Effectual Researches in Engineering, Science and Technology (RAEREST 2016)* (págs. 1080-1087). Elsevier Ltd. doi:[doi:10.1016/j.protcy.2016.08.211](https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.211)
- Wolfartsberger, J., Zenisek, J., & Wild, N. (2020). Data-Driven Maintenance: Combining Predictive Maintenance and Mixed Reality-supported Remote Assistance. *10th Conference on Learning Factories, CLF2020* (págs. 307-312). Elsevier Ltd. doi:<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.022>

## **Desarrollo de un marco de evaluación de sostenibilidad basado en la confiabilidad para sistemas de energía renovable**

*Development of a reliability-based sustainability assessment framework for renewable energy systems*

**Manuel Iván Rodríguez Borbón**

New Mexico State University, USA

ivanrodr@nmsu.edu

<https://orcid.org/0000-0001-8405-4599>

**Hansuk Sohn**

New Mexico State University, USA

hsohn@nmsu.edu

<https://orcid.org/0000-0002-8126-730X>

**Eduardo Rafael Poblano Ojinaga**

Tecnológico Nacional de México/IT de Ciudad Juárez, México

eduardo.po@ciudadjuarez.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0003-3482-7252>

### **Resumen:**

Los sistemas de energía renovable, como las turbinas eólicas y los paneles solares, desempeñan un papel importante en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y en el logro de los objetivos globales de desarrollo sostenible. Estos sistemas ofrecen una alternativa más limpia y ecológica a las fuentes de energía basadas en combustibles fósiles y tienen el potencial de transformar la matriz energética de manera sostenible. Sin embargo, la confiabilidad de estos sistemas también es un factor crítico, ya que las paradas no planificadas pueden provocar cortes de energía, mayores costos de mantenimiento y cortes de suministro. Además de los aspectos técnicos, los factores económicos, sociales y ambientales también son decisivos en la evaluación de la sostenibilidad de los sistemas de energía renovable. A pesar de su importancia, las evaluaciones de sostenibilidad actuales de estos sistemas no consideran suficientemente los factores de confiabilidad, lo que puede conducir a evaluaciones inexactas de su desempeño en términos de sostenibilidad y, en última instancia, afectar las decisiones de planificación e implementación de proyectos de energía renovable. El objetivo de este estudio es investigar cómo se puede incorporar el análisis de confiabilidad en el marco de evaluación de la sostenibilidad de los sistemas de energía renovable. Esto incluirá una revisión de los métodos existentes de análisis de confiabilidad y evaluación de la sostenibilidad, y el desarrollo de métodos y herramientas para evaluar de manera más precisa y completa la sostenibilidad y la confiabilidad de los sistemas de energía renovable.

**Palabras clave:** Energía Renovable, Sostenibilidad, Análisis de Confiabilidad, Evaluación de Sostenibilidad.

**Abstract:**

Renewable energy systems, such as wind turbines and solar panels, play an important part in reducing greenhouse gas emissions and achieving sustainability goals globally. These systems offer a cleaner and greener alternative to fossil fuel-based energy sources and have the potential to transform the energy matrix sustainably. However, the reliability of these systems is also a critical factor, as unexpected downtime can result in loss of power generation, increased maintenance costs, and power outage. In addition to technical aspects, economic, social and environmental factors are also fundamental in assessing the sustainability of renewable energy systems. Despite their importance, current sustainability assessments for these systems do not adequately consider reliability factors, which can lead to inaccurate assessments of their sustainability performance and ultimately affect decision-making in the planning and implementation of renewable energy projects. This research proposes to explore how reliability analysis can be incorporated into a sustainability assessment framework for renewable energy systems. This will include reviewing existing approaches to sustainability assessment and reliability analysis, as well as developing methodologies and tools that enable a more accurate and comprehensive assessment of the sustainability and reliability of renewable energy systems.

**Keywords:** Renewable Energy, Sustainability, Reliability Analysis, Sustainability Assessment.

**Introducción**

La energía verde, también conocida como energía renovable o energía limpia, es una forma de producción de energía que utiliza recursos naturales inagotables y no emite gases de efecto invernadero ni otros contaminantes dañinos para el medio ambiente (IRENA, 2021). Esta forma de energía es esencial para combatir el cambio climático y la contaminación del aire y el agua.

Las fuentes de energía verde más comunes incluyen la energía solar, eólica, hidráulica, geotérmica y biomasa (IRENA, 2021). La energía solar se produce mediante el uso de paneles solares que convierten la energía del sol en electricidad. La energía eólica se produce mediante el uso de turbinas eólicas que transforman la energía del viento en electricidad. La energía hidráulica se produce mediante la utilización de presas y turbinas que convierten la energía del agua en electricidad. La energía geotérmica se produce mediante el uso de calor generado por el interior de la tierra para generar electricidad. La biomasa se produce mediante la quema de materia orgánica como madera, cultivos y residuos.

La energía renovable proviene de recursos naturales que se reponen constantemente y no se extinguirán con el tiempo. Los combustibles fósiles como el petróleo, el carbón y el gas natural tienen suministros limitados y tienen un gran impacto en el cambio climático y la contaminación del aire. Por otro lado, la energía renovable ofrece una alternativa más limpia y sostenible. Estas fuentes de energía son esenciales para combatir el cambio climático, reducir la dependencia de los combustibles fósiles, mejorar la seguridad energética y promover el desarrollo económico y social.

Ampliando, algunos ejemplos de fuentes de energía renovable incluyen:

- Energía solar: Se genera convirtiendo la luz solar en electricidad mediante paneles solares fotovoltaicos o en calor mediante colectores solares. Esta forma de energía es abundante, no contaminante y se considera una de las formas más rápidas de generar electricidad tanto a pequeña como a gran escala.
- Energía eólica: Se obtiene al transformar la energía cinética del viento en electricidad mediante turbinas eólicas que pueden ser instaladas en tierra o en el mar, ofreciendo una fuente limpia y eficiente de energía.
- Energía hidroeléctrica: Es causada por un movimiento de agua, generalmente gestionado por una presa e instalaciones de río y agua. Es una de las fuentes de energía renovable más antiguas y es una parte importante de la generación de electricidad en muchos países.
- Biomasa: Es material orgánico de origen vegetal y animal que se utiliza como fuente de energía y puede quemarse directamente para producir calor, o convertirse mediante fermentación anaeróbica en biogás, una mezcla de gases que se utiliza para producir electricidad y calor.
- La energía geotérmica se obtiene mediante el uso del calor de las profundidades de la tierra para generar electricidad o proporcionar calefacción y refrigeración. Las plantas de energía geotérmica utilizan pozos profundos para extraer agua caliente o vapor del suelo y emplean turbinas para convertir el calor en electricidad.
- La energía oceánica, que incluye tecnologías que utilizan el movimiento de las olas, las mareas y las corrientes oceánicas para generar electricidad, aún se encuentra en sus primeras etapas de desarrollo, pero se espera que se convierta en una importante fuente de energía renovable en el futuro.

Estas fuentes de energía renovable, utilizadas en combinación y adaptadas a las condiciones geográficas y climáticas específicas de cada región, pueden contribuir a una matriz energética más sostenible y diversa que reduzca el uso de combustibles fósiles, minimice las emisiones de gases de efecto invernadero y contribuya al desarrollo global sostenible. Además, las inversiones en tecnologías de energías renovables y la investigación en estas áreas pueden impulsar la creación de empleo e impulsar la innovación en el sector energético, generando beneficios económicos y sociales a largo plazo. En resumen, las fuentes de energía renovable son esenciales para enfrentar los desafíos del cambio climático y construir un futuro más sostenible y resiliente.

Por lo tanto, la creciente preocupación por el cambio climático y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero han llevado a un uso cada vez mayor de sistemas de energía renovable en todo el mundo (IPCC, 2018). Estos sistemas, como las turbinas eólicas y los paneles solares, juegan un papel importante en la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles (IRENA, 2020). A pesar de sus beneficios ambientales, la confiabilidad de los sistemas de energía renovable también es un aspecto clave a considerar, ya que los cortes de energía no

planificados pueden generar pérdidas económicas y mayores costos de mantenimiento (Aqlan et al., 2019). En este contexto, el análisis de confiabilidad y la evaluación de la sustentabilidad son aspectos esenciales para asegurar el éxito a largo plazo de los sistemas de energía renovable.

Según la Agencia Internacional de Energía Renovable, se espera que la energía renovable alcance el 30% de la producción mundial de energía para el año 2023 (IRENA, 2021). Además, el uso de energía verde también tiene beneficios económicos, ya que puede crear empleos y reducir los costos de energía a largo plazo (UNEP, 2021).

El análisis de confiabilidad es una técnica utilizada para evaluar la capacidad de un sistema de energía renovable para suministrar energía constante y confiable. La variabilidad inherente de las fuentes de energía renovable, como la energía solar y la energía eólica, puede dificultar la evaluación de su confiabilidad y su capacidad para proporcionar energía constante (Wang y Guo, 2019).

Según la Agencia Internacional de Energías Renovables, se prevé que la participación de las energías renovables en la producción mundial de energía alcance el 30% para 2023 (IRENA, 2021). Además, el uso de energía verde tiene beneficios económicos, ya que puede generar empleo y reducir los costos de energía a largo plazo (UNEP, 2021). El análisis de confiabilidad es una técnica utilizada para evaluar la capacidad de un sistema de energía renovable para proporcionar electricidad estable y confiable. La volatilidad asociada con las fuentes de energía renovables, como la solar y la eólica, puede dificultar la evaluación de su confiabilidad y suministro de energía estable (Wang y Guo, 2019). Aunque las fuentes renovables generalmente se consideran menos confiables que las fuentes no renovables, el análisis de confiabilidad puede ayudar a mitigar este problema. El análisis de confiabilidad puede ayudar a evaluar la interconexión de varias fuentes de energía renovable y su capacidad para proporcionar electricidad estable y confiable (Wang y Guo, 2019). Además, el análisis de confiabilidad puede ayudar a identificar las posibles causas de fallas en los sistemas de energía renovable y desarrollar planes de contingencia para abordarlas (Dahal et al., 2020).

Existen diferentes enfoques y métodos para analizar la confiabilidad de las fuentes de energía renovable, que van desde el análisis probabilístico hasta el análisis y modelado de fallas (Wang y Guo, 2019). Estos métodos pueden ayudar a evaluar la capacidad de un sistema de energía renovable para proporcionar un suministro de energía continuo y confiable en diversas condiciones, lo cual es especialmente importante en grandes sistemas de energía (Dahal et al., 2020).

Una revisión de la literatura sobre la evaluación de la sostenibilidad de los sistemas de energía renovable y el análisis de la confiabilidad revela que varios estudios recientes se han centrado en incorporar la confiabilidad en las evaluaciones de la sostenibilidad. La sostenibilidad se ha convertido en un tema central en la planificación y gestión de los sistemas energéticos, y muchos estudios han desarrollado sistemas de puntuación para medir la sostenibilidad de estos sistemas (Singh et al., 2017). Sin embargo, la mayoría de las evaluaciones de sostenibilidad actuales no se centran en la confiabilidad de los sistemas de energía renovable (Aqlan et al., 2019). La

confiabilidad es un aspecto crítico que afecta la disponibilidad y el desempeño de estos sistemas, e incluirla en una evaluación de sostenibilidad brinda una imagen más completa de su desempeño (Omer, 2008).

El análisis de confiabilidad es una herramienta de evaluación de sistemas de ingeniería ampliamente utilizada para predecir y mejorar la confiabilidad y disponibilidad del sistema

(Ebeling, 2010). En el contexto de los sistemas de energía renovable, el análisis de confiabilidad se puede utilizar para evaluar la probabilidad de falla y calcular el tiempo medio entre fallas (MTBF) y el tiempo medio de reparación (MTTR), lo que permite una mejor gestión de problemas, recursos de mantenimiento y optimización de rendimiento del sistema (Wang y Sun, 2019).

En la literatura, existen trabajos dedicados a la aplicación del análisis de confiabilidad en sistemas específicos de energías renovables. Por ejemplo, Karki y otros (2013) utilizaron el análisis de confiabilidad para evaluar el desempeño de los sistemas eólicos, y Radziemska (2003) aplicó este método a los sistemas fotovoltaicos. Sin embargo, todavía hay un vacío en la literatura sobre cómo integrar el análisis de confiabilidad en los marcos generales de evaluación de la sostenibilidad que cubren varios tipos de sistemas de energía renovable.

Como ya se mencionó, en los últimos años, el análisis de confiabilidad ha encontrado aplicación en varios estudios relacionados con el desarrollo sostenible, lo que indica su utilidad en la evaluación de modelos de sostenibilidad en diversos contextos.

En el área de infraestructura urbana, Yazdani et al. (2017) propusieron un modelo de resiliencia basado en la confiabilidad, la resiliencia y la vulnerabilidad para evaluar la resiliencia de los sistemas de infraestructura urbana, como las redes de transporte y las redes de abastecimiento de agua. En su estudio, los autores abogan por incluir medidas de confiabilidad en el proceso de evaluación para obtener una mejor imagen de la resiliencia de esos sistemas.

Otro ejemplo es de Zhang et al. (2018), quienes desarrollaron el sistema de calificación de sustentabilidad para sistemas de almacenamiento de energía que integran confiabilidad, desempeño y seguridad. El estudio encontró que la incorporación del análisis de confiabilidad en el marco de evaluación identificó áreas de mejora para optimizar el rendimiento de los sistemas de almacenamiento de energía para la sostenibilidad.

Estos ejemplos muestran que el uso del análisis de confiabilidad en el desarrollo de modelos de sustentabilidad es una tendencia creciente en varios campos. Incluir la confiabilidad en la evaluación de la resiliencia ayuda a comprender mejor los factores que afectan el rendimiento del sistema y, en última instancia, mejora la resiliencia a largo plazo.

A pesar de estos avances recientes, aún se necesita más investigación para integrar el análisis de confiabilidad en la evaluación de la sostenibilidad de los sistemas de energía renovable. Este estudio explorará el desarrollo de un sistema de calificación de sustentabilidad basado en la confiabilidad para sistemas de energía renovable que incluya métricas de confiabilidad para

brindar una evaluación más precisa de la sustentabilidad y confiabilidad de estos sistemas. Al mejorar la precisión de la evaluación de la sostenibilidad de los sistemas de energía renovable, este estudio tiene como objetivo apoyar el desarrollo de sistemas de energía más confiables y sostenibles que contribuyan al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible globales.

Esta investigación tiene como objetivo llenar este vacío en la literatura mediante el desarrollo de un sistema de evaluación de sostenibilidad que incluye un análisis de la confiabilidad de los sistemas de energía renovable. Por lo tanto, su objetivo es proporcionar una herramienta que permita a los responsables políticos e investigadores evaluar de forma más precisa y completa el rendimiento sostenible de los sistemas de energía renovable, posibilitando así mejorar la planificación, gestión y operación de estos sistemas en el futuro.

## **Metodología**

A continuación, se propone un método para desarrollar un sistema de evaluación para medir la sostenibilidad con énfasis en el análisis de confiabilidad. Tras una revisión exhaustiva de la literatura sobre el establecimiento de un marco de evaluación basado en la garantía, se han identificado varios pasos clave que deben tomarse para implementar un enfoque eficaz. Seguidamente, se presentan los pasos sugeridos en la metodología.

El marco de sostenibilidad basado en la confiabilidad se puede aplicar a una variedad de sistemas de energía renovable, como turbinas eólicas, paneles solares e hidroelectricidad, y los resultados se comparan con las evaluaciones de sostenibilidad tradicionales que no consideran los factores de confiabilidad. Esto puede ayudar a evaluar la eficacia del marco en diferentes contextos e identificar oportunidades de mejora.

Se recomienda realizar un análisis de sensibilidad para evaluar la robustez del sistema de calificación de sostenibilidad en función de los cambios en los datos y los parámetros de entrada. Esto puede ayudar a identificar los factores más importantes que contribuyen a la efectividad de la sostenibilidad y la confiabilidad y aumentar la precisión de la evaluación.

Un marco de sostenibilidad basado en la confiabilidad se puede combinar con otros marcos de sostenibilidad, como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) o los Tres Puntos Básicos (TBL, por sus siglas en inglés). Los Objetivos de Desarrollo Sostenible son un conjunto de objetivos globales establecidos por las Naciones Unidas para abordar los desafíos de sostenibilidad global como la pobreza, la desigualdad y el cambio climático. TBL es un enfoque para la evaluación del desempeño empresarial que considera no solo los beneficios económicos, sino también el impacto social y ambiental de la empresa.

La integración de diferentes marcos de sostenibilidad puede ayudar a proporcionar una evaluación más completa del desempeño de sostenibilidad de los sistemas de energía renovable y ayudar en el desarrollo de estrategias integrales de sostenibilidad. Por ejemplo, al combinar un sistema de evaluación de la sostenibilidad basado en la confiabilidad con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, no solo se puede evaluar la confiabilidad y la sostenibilidad del sistema de energía

renovable, sino también su contribución al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible globales. Al combinar un sistema con estos dos enfoques, no solo se puede evaluar el desempeño económico del sistema de energía renovable, sino también su impacto social y ambiental. Esta integración puede ayudar a garantizar que se tengan en cuenta las múltiples dimensiones de la sostenibilidad al evaluar los sistemas de energía renovable y ayudar a desarrollar estrategias integradas para abordar los desafíos económicos, sociales y ambientales.

También es recomendable realizar una evaluación a largo plazo de los sistemas de energía renovable evaluados utilizando un sistema de clasificación de la sostenibilidad basado en la confiabilidad. Esto puede ayudar a identificar tendencias o problemas a largo plazo que pueden no ser evidentes de inmediato en las evaluaciones a corto plazo.

Finalmente, es necesario evaluar las implicaciones políticas de un sistema y cómo se puede utilizar para apoyar el desarrollo de políticas energéticas sostenibles. Esto puede incluir aprender cómo usar el marco para comunicar incentivos de energía renovable y cómo usarlo para apoyar el desarrollo de principios de desarrollo sostenible.

Otro punto para considerar es el aspecto ético y social de cualquier modelo de evaluación de la sostenibilidad. La introducción de sistemas de energía renovable puede tener impactos sociales y ambientales significativos en las comunidades locales y los ecosistemas que las rodean. Por ejemplo, el desarrollo de proyectos de energía renovable puede afectar los derechos de las comunidades locales, especialmente aquellas cuyo sustento depende de los recursos naturales. Además, el desarrollo de proyectos de energías renovables puede causar impactos ambientales negativos como pérdida de biodiversidad, contaminación del agua y del aire.

Por lo tanto, es importante considerar estos factores éticos y sociales al desarrollar un sistema de evaluación de la sostenibilidad. Esto puede incluir identificar, abordar y consultar con las comunidades locales para garantizar el desarrollo sostenible y equitativo de los proyectos de energía renovable. Esto también puede incluir la inclusión de impactos ambientales en la evaluación de la sostenibilidad y la inclusión de indicadores para medir estos impactos.

### **Consideraciones técnicas del estudio**

Para llevar a cabo un estudio de evaluación de sostenibilidad con énfasis en la confiabilidad de sistemas de energía renovables, es necesario seguir una serie de pasos fundamentales que permitan una evaluación completa y precisa del rendimiento del sistema. Estos pasos son los siguientes:

1. Determinar el alcance de la evaluación: Defina el alcance de la evaluación, incluido el sistema de energía renovable que se está evaluando y la duración de la evaluación.

2. Determinar el coeficiente de confianza. Identifique los factores clave de confiabilidad relevantes para el sistema de energía renovable que se está evaluando, como las tasas de falla, el tiempo de inactividad y los costos de mantenimiento.
3. Determinación del factor de durabilidad. Identificar los principales impulsores de sostenibilidad relevantes para el sistema de energía renovable evaluado, como las emisiones de gases de efecto invernadero, el uso del agua y el uso de la tierra.
4. Definición del indicador. Desarrolle métricas para cada uno de los factores de confiabilidad y durabilidad identificados en los pasos 2 y 3. Estos indicadores deben ser cuantitativos y medibles.
5. Peso: asigne pesos a varias métricas en función de su importancia relativa para las medidas de solidez y confiabilidad.
6. Recolectar datos. Recopile datos sobre los diversos indicadores identificados en los pasos 2 a 5. Estos datos se pueden obtener de una variedad de fuentes, como fabricantes, agencias gubernamentales y auditores externos.
7. Cálculo del índice de estabilidad según confiabilidad. El índice de resistencia basado en la confiabilidad (RBSI) para un sistema de energía renovable se evalúa de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$RBSI = \frac{\sum R_i * W_i}{\sum S_i * W_i}$$

Dónde:

$R_i$  = Métrica de confiabilidad

$W_i$  = Peso para la métrica de confiabilidad

$S_i$  = Métrica de sostenibilidad

8. Interpretación de los resultados: Interpretar el RBSI para evaluar el rendimiento de sostenibilidad y confiabilidad del sistema de energía renovable que se está evaluando. Un RBSI más alto indica un mejor rendimiento de sostenibilidad y confiabilidad, mientras que un RBSI más bajo indica un rendimiento deficiente de sostenibilidad y confiabilidad.

Este procedimiento se puede adaptar al contexto específico del sistema de energía renovable que se está evaluando, y los pesos asignados a las diferentes métricas se pueden ajustar en función de los objetivos y prioridades específicos de la evaluación. El marco también puede actualizarse con el tiempo a medida que se disponga de nuevos datos o a medida que cambien los objetivos y prioridades de la evaluación.

Para garantizar que las medidas de confiabilidad se incorporen correctamente en un marco de sostenibilidad basado en la confiabilidad, hay varios aspectos importantes a considerar. Primero, es necesario considerar las medidas de confiabilidad relevantes para el sistema de energía renovable en particular que se está evaluando. Esto puede incluir métricas como tasas de falla,

tiempo de inactividad y capacidad de recuperación del sistema. Es importante señalar que los indicadores de confiabilidad también deben ser medibles y cuantificables. Esto puede incluir la recopilación y el análisis de datos relevantes, como registros de fallas y mantenimiento, para calcular de manera precisa y confiable las métricas de confiabilidad.

Además, se deben considerar los límites y fronteras de los indicadores de confiabilidad. Cabe señalar que no todas las mediciones de confiabilidad pueden ser apropiadas o aplicables en todos los contextos y que algunas mediciones pueden tener incertidumbre o sesgo de medición.

Finalmente, es importante incluir indicadores de confiabilidad de manera consistente y estructurada en la evaluación para garantizar que se incluyan todos los aspectos relevantes del índice de confiabilidad del sistema de energía renovable creado. Esto puede incluir definir claramente las medidas de confiabilidad bajo consideración, asignar los pesos apropiados e incorporar las medidas de confiabilidad en el cálculo del índice de resistencia basado en la confiabilidad. Siguiendo estos principios básicos, es posible desarrollar un sistema sólido y completo para evaluar la sostenibilidad de los sistemas de energía renovable.

Las métricas de sostenibilidad son herramientas que permiten medir y evaluar el desempeño ambiental, social y económico de una organización o sistema. A continuación, se presentan algunas de las métricas de sostenibilidad más comunes:

- Huella de carbono: la huella de carbono mide la cantidad total de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos por una organización o actividad en particular.
- Huella hídrica: la huella hídrica mide la cantidad de agua utilizada directa o indirectamente por una organización o actividad, incluyendo el agua utilizada en la producción de bienes y servicios.
- Huella ecológica: la huella ecológica mide el impacto humano en los recursos naturales, incluyendo la cantidad de tierra y agua utilizada, así como la cantidad de residuos producidos.
- Índice de sostenibilidad corporativa: el índice de sostenibilidad corporativa mide la sostenibilidad de una organización en términos de su desempeño ambiental, social y económico.
- Puntuación de sostenibilidad: la puntuación de sostenibilidad es una medida comparativa que permite a las organizaciones comparar su desempeño ambiental, social y económico con el de otras organizaciones.
- Indicadores de bienestar: los indicadores de bienestar miden el bienestar social y económico de una comunidad, incluyendo la salud, la educación y el empleo.
- Índice de calidad de vida: el índice de calidad de vida mide el bienestar social y económico de una comunidad, incluyendo la salud, la educación, el empleo y el acceso a los servicios básicos.

## **Estrategias de modelado para la implementación del marco de evaluación de sostenibilidad basado en la confiabilidad**

Se pueden utilizar varios métodos de modelado para implementar el concepto de evaluación de la sostenibilidad basada en la confiabilidad de los sistemas de energía renovable. La elección del enfoque adecuado dependerá del contexto específico del sistema de energía renovable que se esté evaluando y de los objetivos de la evaluación.

Uno de los enfoques de modelado más utilizados es el modelado de dinámica de sistemas, que es un método para modelar sistemas complejos que involucran retroalimentación y retrasos de tiempo. Este enfoque se puede utilizar para modelar interacciones entre diferentes factores de sostenibilidad y confiabilidad, y cómo los cambios en un factor afectan el rendimiento de todo el sistema. Como ejemplo, se puede mencionar el desarrollo de un modelo de dinámica del sistema para evaluar cómo los cambios en las prácticas de mantenimiento afectan la confiabilidad y durabilidad de un sistema de energía renovable.

Otro enfoque para el modelado es el análisis del ciclo de vida (ACV), que es un método para evaluar el impacto ambiental de un producto o proceso a lo largo de su ciclo de vida, desde la extracción de la materia prima hasta su eliminación. El ACV se puede utilizar para evaluar el rendimiento sostenible de los sistemas de energía renovable al considerar factores como las emisiones de gases de efecto invernadero, el uso de energía y el agotamiento de los recursos. Al integrar las mediciones de confiabilidad con el ACV, es posible implementar un marco de persistencia basado en confiabilidad utilizando este enfoque.

Además, la simulación de Monte Carlo es un método para evaluar la incertidumbre y el riesgo asociado con sistemas complejos. Este enfoque se puede utilizar para evaluar la confiabilidad operativa de un sistema de energía renovable al simular la ocurrencia de varias fallas y estimar el tiempo de inactividad y los costos de mantenimiento. Al incorporar elementos de sostenibilidad en el modelo utilizando este enfoque, se puede implementar un sistema de evaluación de la sostenibilidad basado en la confiabilidad.

Es importante tener en cuenta que estos enfoques de modelado no se excluyen mutuamente y se pueden combinar para proporcionar una evaluación más completa y precisa del rendimiento sostenido y la confiabilidad de los sistemas de energía. En última instancia, la elección del método de modelado dependerá del contexto específico del sistema de energía renovable que se esté evaluando y de los objetivos de la evaluación.

Al aplicar las simulaciones de Monte Carlo para desarrollar un sistema de evaluación de la sostenibilidad basado en la confiabilidad para los sistemas de energía renovable, se deben seguir varios pasos generales. Primero, es necesario identificar las variables de entrada que son relevantes para la confiabilidad y robustez del sistema bajo evaluación. Estas variables pueden incluir tasas de falla, costos de mantenimiento esperados y condiciones ambientales que afectan el rendimiento del sistema. Después de determinar las variables de entrada, es necesario definir distribuciones de probabilidad que describan las probabilidades de diferentes valores de cada

variable. Estas distribuciones pueden basarse en datos históricos, opiniones de expertos u otras fuentes de información. A continuación, se generan muestras aleatorias de cada variable de entrada en función de la distribución de probabilidad especificada en el paso anterior. El número de muestras debe ser lo suficientemente grande para garantizar la validez estadística de los resultados. Luego, se modela la eficiencia del sistema de energía renovable utilizando las muestras aleatorias generadas previamente. Esto incluye el modelado de fallas que ocurren según las variables de entrada y la estimación del tiempo de inactividad y los costos de mantenimiento. Con base en los resultados de la simulación de Monte Carlo, es posible calcular el Índice Basado en Confiabilidad (RBSI, por sus siglas en inglés), que se utiliza para evaluar la estabilidad y confiabilidad del sistema evaluado.

Una vez que se calcula el RBSI, los resultados se interpretan para evaluar la sostenibilidad y confiabilidad del sistema de energía renovable. Se identifican los factores más importantes que afectan la estabilidad y la confiabilidad, y se evalúa la medida en que cada factor afecta el rendimiento general. Finalmente, cuando sea posible, los resultados de la evaluación pueden usarse para hacer recomendaciones sobre cómo mejorar el sistema de energía renovable para una mayor sostenibilidad y confiabilidad.

### **Sistemas de paneles solares**

Los paneles fotovoltaicos son dispositivos que convierten la energía solar en electricidad mediante células fotovoltaicas. A medida que la energía renovable se vuelve cada vez más importante en todo el mundo, es fundamental evaluar la sostenibilidad de este tipo de sistema. El marco de sostenibilidad propuesto puede ayudar a evaluar eficazmente la capacidad de los sistemas fotovoltaicos para proporcionar energía sostenible y confiable a largo plazo. Este tipo de evaluación tiene en cuenta factores ambientales, emisiones de gases de efecto invernadero y consumo de agua, además de los factores económicos y sociales mencionados. En última instancia, el desarrollo de un sistema de evaluación de la solidez de los sistemas fotovoltaicos puede ayudar a desarrollar y operar sistemas más confiables en el futuro.

### **Simulación de Monte Carlo en paneles solares**

Existen varias direcciones posibles de investigación que podrían contribuir al desarrollo de evaluaciones más completas y precisas de la estabilidad de los sistemas solares utilizando simulaciones de Monte Carlo. Una opción es desarrollar una nueva simulación de Monte Carlo que se adapte al contexto del sistema solar que se está evaluando y tenga en cuenta los factores relevantes de sostenibilidad y confiabilidad. Este modelo puede evaluar el rendimiento del sistema solar en diferentes escenarios climáticos y el comportamiento del usuario, y ayuda a identificar los impulsores más importantes para la sostenibilidad y la confiabilidad.

Otra opción es realizar un estudio de caso de un sistema solar real para evaluar su estabilidad y confiabilidad utilizando una simulación de Monte Carlo. Este estudio de caso se puede utilizar para probar la precisión y el rendimiento del modelo de simulación, y para desarrollar mejores prácticas y recomendaciones para evaluar la resiliencia del sistema fotovoltaico.

Además, es importante evaluar las implicaciones políticas del uso de simulaciones de Monte Carlo para evaluar la sostenibilidad de los sistemas fotovoltaicos y explorar cómo se pueden utilizar los resultados de la evaluación para realizar un informe de elaboración de políticas de energía renovable. Esto puede incluir el desarrollo de programas de incentivos, regulaciones y otras iniciativas políticas que apoyen el desarrollo de sistemas de energía solar confiables y sostenibles.

### Evaluación del ciclo de vida en paneles solares

La Evaluación del Ciclo de Vida (ACV) es un método utilizado para evaluar el impacto ambiental de un producto o sistema a lo largo de su ciclo de vida, incluida la extracción de materias primas, la producción, el transporte, el uso, el uso final y la eliminación. La metodología ACV se puede utilizar para identificar puntos críticos ambientales en un producto o sistema y recomendar estrategias para mejorar su sostenibilidad.

El primer paso para realizar un ACV es definir el propósito y el alcance del estudio. En este caso, el objetivo es evaluar el impacto ambiental de los paneles fotovoltaicos a lo largo de su vida útil. El alcance de la investigación incluye la producción de materias primas, fabricación de paneles, transporte, instalación y eliminación al final de su vida útil.

El siguiente paso es recopilar datos sobre las entradas y salidas durante el ciclo de vida del panel solar, incluidos los costos de energía y materiales, así como las emisiones al aire, agua y tierra. Esto incluye materias primas como el silicio, el vidrio y el aluminio, así como los costos de energía para la producción y el transporte.

El tercer paso es evaluar el impacto potencial del ciclo de vida de los paneles solares en el medio ambiente en función de los datos recopilados durante el análisis de inventario. Esto implica el uso de categorías de impacto como el potencial de calentamiento global, el potencial de acidificación, el potencial de eutrofización y el potencial de toxicidad humana.

El paso final es interpretar los resultados del ACV e identificar áreas de mejora en la sostenibilidad del ciclo de vida de los paneles fotovoltaicos. Esto podría incluir estrategias como la reducción de los costos de energía, el uso de materiales reciclados o la mejora de los métodos de eliminación de productos al final de su vida útil. Para realizar un estudio cualitativo, también es necesario determinar qué tipo de impacto ambiental se debe evaluar. La Tabla 1 muestra las diferentes categorías que se pueden evaluar en un estudio de evaluación del ciclo de vida.

**Tabla 1:** Categorías de impacto ambiental evaluadas en estudios de ACV de paneles solares

Categoría de Impacto Ambiental	Descripción
Potencial de calentamiento global	Mide el impacto potencial de las emisiones de gases de efecto invernadero en el calentamiento global, típicamente reportado en unidades de dióxido de carbono equivalente (CO <sub>2</sub> e)
Potencial de	Mide el impacto potencial de los contaminantes ácidos en los sistemas

acidificación		de suelo y agua, típicamente reportados en unidades de dióxido de azufre equivalente (SO <sub>2e</sub> )
Potencial de eutrofización	de	Mide el impacto potencial del exceso de nutrientes en los ecosistemas acuáticos, típicamente reportado en unidades de nitrógeno o fósforo equivalente (N o P)
Potencial de toxicidad humana	de	Mide el impacto potencial de los contaminantes tóxicos en la salud humana, típicamente reportados en unidades de equivalentes tóxicos (EQT)
Potencial de agotamiento del ozono	de	Mide el impacto potencial de las sustancias que agotan la capa de ozono en la capa de ozono, típicamente reportado en unidades de potencial de agotamiento del ozono (PAO)

Fuente: Elaboración propia

La producción y uso de paneles fotovoltaicos tiene un impacto ambiental significativo en cada etapa de su ciclo de vida. Cada paso, desde la extracción de materias primas hasta el tratamiento final, puede contribuir a las emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación ambiental. La Tabla 2 muestra los principales impactos ambientales de las etapas del ciclo de vida de la energía fotovoltaica, incluyendo la extracción y producción de materiales, el transporte, la instalación y el mantenimiento, y la disposición final. La información proporcionada en esta tabla puede ser útil para identificar áreas críticas en el ciclo de vida de los paneles solares que necesitan mejoras en términos de sostenibilidad y reducción del impacto ambiental.

**Tabla 2:** Impactos ambientales clave de las etapas del ciclo de vida de los paneles solares

<b>Etapa del ciclo de vida</b>	<b>Impactos ambientales clave</b>
Extracción de materia prima	Uso del suelo, uso del agua, uso de la energía, emisiones de gases de efecto invernadero
Fabricación	Uso de energía, emisiones de gases de efecto invernadero, generación de residuos peligrosos
Transporte	Uso de energía, emisiones de gases de efecto invernadero, contaminación atmosférica
Fase de uso	Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, reducción de la contaminación atmosférica
Eliminación al final de su vida útil	Generación de residuos peligrosos, potencial de reutilización de materiales y reciclaje

Fuente: Elaboración propia

La evaluación del ciclo de vida de los paneles solares es importante para comprender los impactos ambientales y sociales de su producción y uso. La Tabla 3 muestra tres métodos comúnmente utilizados para el análisis del ciclo de vida de los paneles fotovoltaicos. La elección del método dependerá del alcance del análisis y la disponibilidad de datos. Debe recordarse que la evaluación

completa del ciclo de vida de las células solares debe incluir factores ambientales, económicos y sociales para garantizar una imagen completa de su sostenibilidad.

**Tabla 3:** Metodologías usadas en el análisis del ciclo de vida en paneles solares.

<b>Metodología</b>	<b>Descripción</b>
Modelado basado en procesos	Modelar los impactos ambientales de cada paso en el ciclo de vida del panel solar, basándose en datos sobre entradas de materiales y energía y salidas de emisiones
Modelado de entrada-salida	Modela los impactos ambientales del ciclo de vida del panel solar en función de las transacciones económicas y los flujos de materiales entre diferentes sectores de la economía.
Modelado híbrido	Combina modelos basados en procesos y de entrada-salida para capturar tanto los impactos ambientales detallados del proceso de producción como las implicaciones económicas y sociales más amplias del ciclo de vida del panel solar.

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4 proporciona una serie de recomendaciones para mejorar la vida útil de los paneles solares, según los estudios de Evaluación del Ciclo de Vida (ECV). La metodología ECV es una herramienta útil para evaluar el impacto ambiental de los paneles solares a lo largo de su ciclo de vida, incluida la extracción de materias primas, la producción, el transporte, el uso y la eliminación al final de su vida útil, como se mencionó anteriormente. Las recomendaciones de esta tabla se basan en los resultados de estudios ECV y ofrecen soluciones prácticas para aumentar la durabilidad de los paneles solares. Estas recomendaciones incluyen el uso de materiales reciclados,

la mejora de la eficiencia de la producción, la mejora del reciclaje al final de la vida útil, el uso de energía renovable en la fabricación y el transporte, el diseño de productos integrados y la implementación de programas de mantenimiento y monitoreo. La implementación de estas recomendaciones puede ayudar a reducir el impacto ambiental negativo asociado con la producción y el uso de paneles solares y facilitar la transición a sistemas de energía renovable más sostenibles.

**Tabla 4:** Recomendaciones para mejorar la sostenibilidad de los paneles solares basadas en estudios de ACV.

<b>Recomendación</b>	<b>Descripción</b>
Uso de materiales reciclados	Reduce los impactos ambientales de la extracción y fabricación de materias primas
Mejora de la eficiencia de fabricación	Reduce el uso de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la producción de paneles solares
Eliminación mejorada al final de la vida útil	Aumenta el potencial de reutilización y reciclaje de materiales y reduce la generación de residuos peligrosos
Uso de energía renovable en la fabricación y el transporte	Reduce las emisiones de gases de efecto invernadero y la dependencia de los combustibles fósiles
Diseño de producto integrado	Considera los impactos ambientales de todo el ciclo de vida del producto, desde el diseño hasta la eliminación al final de su vida útil

Fuente: Elaboración propia

Evaluar la durabilidad de los paneles solares es un tema complejo que requiere diferentes enfoques y métodos. Desde evaluaciones del ciclo de vida hasta simulaciones de Monte Carlo, se han desarrollado herramientas y métodos para evaluar los impactos ambientales, económicos y sociales de los sistemas solares. A medida que los sistemas solares se vuelven cada vez más importantes en la transición hacia una economía baja en carbono, es importante continuar con la investigación y el desarrollo de métodos de evaluación de la sostenibilidad para garantizar un futuro sostenible y próspero.

## Conclusiones

En síntesis, para que un sistema basado en la confiabilidad evalúe la sostenibilidad de los sistemas de fuentes renovables, se deben tener en cuenta varios aspectos, tanto técnicos como sociales. Además de realizar el análisis del ciclo de vida, la confiabilidad de los sistemas renovables también se puede evaluar mediante métodos como el análisis del árbol de fallas, los modelos de Markov y los diagramas de flujo de confiabilidad. Esto identificará los modos de falla críticos, estimará el tiempo de inactividad del sistema y los costos de mantenimiento, y además desarrollará estrategias para mejorar la confiabilidad del sistema.

Es necesario integrar algunos indicadores de sostenibilidad. Además del impacto ambiental, también se deben considerar otros indicadores de sostenibilidad como la viabilidad económica y la equidad social. Esto permite el desarrollo de un marco integral para evaluar la sostenibilidad general de los sistemas de energía renovable y para determinar los equilibrios y sinergias entre diferentes indicadores de sostenibilidad. Una vez que se hayan identificado los impactos ambientales más significativos y las preocupaciones sobre la confiabilidad de los sistemas renovables, se pueden usar técnicas de optimización para determinar la combinación óptima de componentes del sistema, procesos de fabricación y estrategias de mantenimiento para maximizar

la sustentabilidad y la confiabilidad. Esto puede implicar la realización de análisis de sensibilidad y la exploración de compensaciones entre diferentes métricas de sostenibilidad y confiabilidad.

Además de centrarse en un solo sistema, también se puede comparar la sostenibilidad y confiabilidad de otros sistemas de energía renovable. Esto identificará las fortalezas y debilidades de los diferentes sistemas de energía renovable y desarrollará estrategias para optimizar el uso de múltiples fuentes de energía renovable.

Es importante considerar los impactos sociales y éticos de la producción y el uso de energías renovables, incluidos temas como los derechos laborales, la salud humana y la justicia ambiental. Esto proporcionará un marco más completo para evaluar la resiliencia del sistema e identificar estrategias para garantizar la optimización de los sistemas de energía renovable.

En resumen, este capítulo presenta un sistema basado en la confiabilidad para evaluar la sostenibilidad de los sistemas de energía renovable, teniendo en cuenta factores de confiabilidad como las tasas de falla y el tiempo de inactividad. El estudio revisó la literatura existente sobre la evaluación de la sostenibilidad de los sistemas de energía renovable, analizó modelos de confiabilidad y desarrolló un sistema de evaluación de la sostenibilidad basado en la confiabilidad. La literatura sugiere que un marco de sostenibilidad basado en la confiabilidad puede proporcionar una evaluación más precisa del desempeño sostenible de los sistemas de energía renovable. El estudio también identifica áreas para futuras investigaciones, como análisis de sensibilidad y estudios de integración con otros marcos de sostenibilidad. En general, un sistema de evaluación de sostenibilidad basado en la confiabilidad puede contribuir al desarrollo de sistemas de energía renovable más confiables y sostenibles.

La importancia de este sistema de calificación de sostenibilidad basado en la confiabilidad es que las evaluaciones de sostenibilidad actuales para los sistemas de energía renovable no consideran adecuadamente los factores de confiabilidad. Esto puede dar lugar a una evaluación inexacta del rendimiento de la sostenibilidad y, en última instancia, a sistemas menos confiables y resistentes. Al incluir factores de confiabilidad en la evaluación de la sostenibilidad, el marco propuesto puede proporcionar una evaluación más precisa del desempeño sostenible de los sistemas de energía renovable, lo que puede conducir a un mejor diseño y mantenimiento. Al mismo tiempo, un sistema de evaluación de la sostenibilidad basado en la confiabilidad es esencial para lograr los Objetivos de Desarrollo Sostenible globales, ya que los sistemas de energía renovable son una parte integral de la transición hacia una economía baja en carbono. La capacidad de evaluar de forma precisa y confiable el rendimiento sostenible de los sistemas de energía renovable es fundamental para garantizar que se cumplan los objetivos de sostenibilidad, como la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la protección del medio ambiente.

### **Futuras líneas de investigación**

Cabe señalar que la sostenibilidad y confiabilidad de los sistemas de energía renovable, principalmente paneles solares, continúa siendo un área de investigación activa y en crecimiento. Si bien se ha logrado un progreso significativo en la comprensión y evaluación de los impactos

ambientales y socioeconómicos de los paneles solares, aún quedan muchas preguntas por responder. Una investigación futura debería explorar y desarrollar tecnologías y métodos innovadores para mejorar aún más la durabilidad y confiabilidad de los paneles solares y probar la efectividad de las soluciones existentes. Además, se necesita más investigación para comprender el impacto y la eficiencia de las fuentes de energía renovable en diferentes condiciones socioeconómicas y regionales, y para abordar cuestiones de equidad social y equidad en la introducción y el uso de la energía verde. En general, se espera que investigaciones futuras continúen mejorando la sostenibilidad y confiabilidad de los sistemas de energía renovable y su capacidad para satisfacer las necesidades energéticas de la sociedad de manera segura, equitativa y sostenible.

Para mejorar aún más el rendimiento y la confiabilidad de los sistemas de energía renovable, es necesario investigar y desarrollar continuamente nuevas tecnologías y métodos para evaluar la sostenibilidad. Además, es importante continuar estudiando los impactos ambientales y sociales de este tipo de energías a lo largo de su ciclo de vida, con un enfoque particular en la identificación de oportunidades para aumentar la sostenibilidad en todos los niveles de las etapas del ciclo de vida. La investigación futura también puede centrarse en combinar tecnologías de energía renovable, así como en optimizar los sistemas de almacenamiento de energía para mejorar la confiabilidad y la durabilidad. En general, existe un gran potencial para mejorar aún más la sostenibilidad de los futuros sistemas de energía renovable y la investigación en esta área será crucial para lograr un futuro más sostenible y más verde.

## Referencias

International Renewable Energy Agency. (2021). Renewable Energy Statistics 2021. <https://www.irena.org/publications/2021/Mar/Renewable-Energy-Statistics-2021>.

IPCC. (2018). Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.

International Renewable Energy Agency. (2020). Renewable Power Generation Costs in 2019.

Aqlan, F., Mustafa, S., & Ahmad, A. (2019). Sustainability and reliability assessment of wind energy systems. *Renewable Energy*, 139, 1095-1108.

Dahal, G., Pandey, S., & Lohani, S. (2020). A review on reliability of renewable energy systems: Concepts, methodologies, and future research directions. *Renewable Energy*, 160, 728-741. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.029>

Ebeling, C. E. (2010). An introduction to reliability and maintainability engineering. Waveland Press.

International Renewable Energy Agency. (2020). Renewable Power Generation Costs in 2019.

International Renewable Energy Agency. (2021). Renewable Energy Statistics 2021. <https://www.irena.org/publications/2021/Mar/Renewable-Energy-Statistics-2021>.

IPCC. (2018). Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.

Karki, R., Billinton, R., & Karki, R. (2013). Reliability modeling and performance analysis of a wind energy conversion system. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 28(1), 29-37.

Omer, A. M. (2008). Energy, environment and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), 2265-2300.

Radziemska, E. (2003). The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells. *Renewable Energy*, 28(1), 1-12.

Singh, R. K., Murty, H. R., Gupta, S. K., & Dikshit, A. K. (2017). An overview of sustainability assessment methodologies. *Ecological Indicators*, 15(1), 281-299.

United Nations Environment Programme. (2021). Global Trends in Renewable Energy Investment 2021. <https://www.fs-unep-centre.org/global-trends-in-renewable-energy-investment-2021/>.

Wang, H., & Guo, S. (2019). Reliability analysis of renewable energy system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 99, 101-110. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.032>

Wang, P., & Sun, W. (2019). Reliability evaluation of grid-connected photovoltaic systems considering climate and installation factors. *Renewable Energy*, 136, 841-853.

Yazdani, S., Jeffrey, P., & de Neufville, R. (2017). A framework for managing the resilience of urban infrastructure systems using an integrated Bayesian Network and robust optimization approach. *Reliability Engineering & System Safety*, 167, 250-263.

Zhang, H., Fu, J., Wang, L., & Li, Z. (2018). A sustainability evaluation method for energy storage systems using a reliability-based multi-objective optimization approach. *Applied Energy*, 230, 1193-1203.

## **Validación de Contenido del Instrumento de Medición Empleado para la Construcción del Modelo para Cuantificar la Capacidad de Innovación Empresarial.**

*Content Validation of the Measurement Instrument Used for the Construction of the Model to Quantify the Business Innovation Capacity.*

**Rafael García Martínez**

Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Hermosillo  
rafael.garciam@hermosillo.tecnm.mx  
<https://orcid.org/0000-0001-7175-5361>

**Salvador A. Noriega Morales**

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez  
snoriega@uacj.mx  
<https://orcid.org/0000-0001-7813-5835>

**Tomas Francisco Limones Meraz**

Tecnológico Nacional de México/ I T de Ciudad Juárez  
tlimones@itcj.edu.mx  
<https://orcid.org/0000-0002-2582-4909>

### **Resumen**

El instrumento de medición que se diseña para construir el modelo, en el que se relacionan las variables latentes o constructos: *Capacidad de Absorción, Capital Intelectual, Capacidad de Innovación, Gestión del Conocimiento e Inteligencia Competitiva* debe tener validez de contenido. Esto garantiza que los ítems o variables medibles considerados en cada constructo sean representativos de estas variables latentes o constructos. El objetivo de este trabajo es construir un instrumento de medición útil para modelar la relación entre estos cinco constructos y evaluar su validez de contenido. Para su construcción, se realiza una revisión de literatura, se recopilan, analizan y seleccionan los ítems que se incluyen en el instrumento de medición. La validación del contenido se lleva a cabo mediante el método de juicio de expertos, quienes evalúan la suficiencia, coherencia, claridad y relevancia de estos ítems seleccionados. Los resultados de las evaluaciones del instrumento de medición o juicios, reportados por los expertos, se analizan con los métodos del índice de validez de contenido de Lawshe y el de Lynn, para cada ítem y para el instrumento de medición. Los resultados muestran que los ítems son representativos de los constructos correspondientes y que el instrumento de medición tiene validez de contenido con un nivel de significancia del 5%. La contribución de este trabajo consiste en proporcionar un instrumento de medición con validez de contenido, útil para recopilar datos con los que es posible modelar las relaciones entre los cinco constructos aquí considerados.

**Palabras clave:** Validez de Contenido, Juicio de Expertos, Innovación, Gestión del Conocimiento, Capacidad de Absorción, Capital Intelectual, Inteligencia Competitiva.

### **Abstract**

The measurement instrument that is designed to build the model with which it relates the latent variables or constructs: Absorptive Capacity; Intellectual capital; Innovation Capacity; Knowledge Management; and Competitive Intelligence, must have content validity to guarantee that the items or measurable variables considered in each construct are representative of these latent variables or constructs. The objective of this work is to build a useful measurement instrument to model the relationship between these five constructs and evaluate their content validity. For its construction, a literature review is carried out, the items that are included in the measurement instrument are collected, analyzed and selected; Content validation is carried out using the expert judgment method, who evaluates the sufficiency, coherence, clarity and relevance of these selected items. The results of the evaluations of the measurement instrument or judgments reported by the experts are analyzed with the Lawshe and Lynn content validity index methods, for each item and for the measurement instrument. The results show that the items are representative of the corresponding constructs and that the measurement instrument has content validity with a significance level of 5%. The contribution of this work consists in providing a measurement instrument with content validity, useful for collecting data with which it is possible to model the relationships between the five constructs considered here.

**Keywords:** Content Validity, Expert Judgment, Innovation, Knowledge Management, Absorptive Capacity, Intellectual Capital, Competitive Intelligence.

### **Introducción**

Los constructos, o variables latentes: Capacidad de Absorción (CA), Capital Intelectual (CI), Capacidad de Innovación (CIn), Gestión del Conocimiento (GC) e Inteligencia Competitiva (IC), son considerados como bienes intangibles de las empresas y, a su vez, capacidades dinámicas empresariales. Estos conceptos constituyen herramientas con las que las empresas tienen la capacidad para modificar o adecuar sus operaciones con el objetivo de incrementar y sostener su competitividad o su desempeño (Zahra y George, 2002). De estos constructos, la CIn suele emplearse como un concepto equivalente a la competitividad. Entre las estrategias que se establecen para incrementar y sostener la competitividad, se considera la gestión de mejoramiento de esta competitividad como un proceso en el que participan al menos dos de estos cinco constructos, para construir modelos matemáticos con los cuales es posible representar las relaciones causales entre estas variables y predecir valores de las variables endógenas consideradas.

Diferentes autores proponen modelos matemáticos para representar el proceso para mejorar y sostener la competitividad, y en los que se considera al constructo CIn como la variable endógena. No existe consenso en el número de constructos a emplear en este tipo de modelos, es decir, se contemplan uno, dos, o tres, de estos cuatro constructos CA, GC, IC y CI como las variables exógenas de estos modelos. En la literatura revisada, no se encuentran modelos de este tipo en los que estén relacionados estos cuatro constructos como variables exógenas, por lo que se hace

necesario construir el modelo que relacione estas cuatro variables exógenas con la variable endógena CIn, y con ello determinar cuáles de estas variables exógenas tienen un efecto significativo sobre la variable CIn, además de sus efectos indirectos, en caso de que se puedan plantear, hipotéticamente, interacciones entre estas cuatro variables endógenas, es decir, asumir que el modelo no es de naturaleza lineal.

Para modelar las relaciones causales y predecir los valores de los bienes intangibles de una empresa a través de un modelo matemático al emplear variables latentes o constructos, es decir, modelar matemáticamente el proceso para mejorar y sostener la competitividad empresarial, es necesario identificar los componentes, dimensiones o constructos de cada uno de estos bienes intangibles. Dichos constructos a su vez requieren ser cuantificados a través de indicadores, variables medibles o ítems, los cuales deben ser una muestra representativa de cada constructo. Es decir, del total de ítems en cada dimensión o constructo deben: representar a la dimensión o constructo correspondiente; ser diseñados de tal forma que se comprenda lo que se quiere medir; presentar evidencia de estar relacionado con la dimensión a medir; tener la característica de que, si se elimina un ítem, entonces cambia el sentido de la dimensión o constructo y con ello pierde su utilidad en la medición. Además de la validez de contenido, que implica cumplir con las condiciones anteriores, también se requiere verificar la confiabilidad —lo que implica que la aplicación repetida del instrumento debe generar resultados similares o consistentes— y la validez, que implica que el conjunto de ítems mide realmente lo que se quiere medir con la dimensión.

La identificación de los componentes o dimensiones y la medición de estos constructos a través de sus ítems, es una actividad esencial para la evaluación de la competitividad o desarrollo de las empresas. Esto hace necesario contar con un instrumento de medición para cuantificar estos constructos. Sin embargo, para que estos instrumentos de medición sean valiosos o útiles, es necesario cuantificar su validez de contenido a través de un proceso de validación de contenido apropiado, además de evaluar su confiabilidad y validez (Almanasreh, et al., 2019). La verificación de la validez de contenido es un requisito fundamental de todos los instrumentos de medición y una consideración importante dentro del proceso de investigación, dado que las inferencias son de calidad dudosa si el instrumento no presenta validez de contenido, aun cuando otras medidas de validez se cumplan o sean satisfactorias (Almanasreh, et al., 2019). La validez de contenido de un instrumento de medición se define como la medida en que los ítems o variables medibles son relevantes y representativos de los constructos correspondientes. El método más utilizado para la evaluación de la validez del contenido es el método de juicio de expertos. En este caso, el proceso de evaluación consiste en reunir a un grupo de personas expertas en el tema que compete al instrumento de medición, quienes pueden evaluar si los ítems son suficientes, representan de manera completa a cada constructo, son claros, están redactados de una forma clara de interpretar, están relacionados o son coherentes con su constructo, y son relevantes. Esto implica determinar si se hace necesario agregar o eliminar ítems para cada constructo. Con este método se maximiza la verosimilitud de los instrumentos de medición de datos válidos en contenido y en construcción (Guillot, Guillén, y Buela-Casal, 2022).

En el proceso de validación del contenido del instrumento de medición se establecen tres etapas: primera, la etapa de desarrollo; segunda, la etapa de juicio y cuantificación; tercera, la etapa de

revisión y reconstrucción. La etapa de desarrollo inicia con la definición del dominio, en donde se define operacionalmente cómo el instrumento mide la variable latente o constructo. Es decir, se establece la teoría y las definiciones operacionales y lo que mide el instrumento. Posteriormente se lleva a cabo la selección de los ítems asociados a cada constructo y, finalmente, se elabora el instrumento de medición. En la segunda etapa, se constituye el grupo de expertos en los temas relacionados con los constructos. Se recomienda una cantidad de entre cinco y diez jueces, quienes evalúan la validez de contenido del instrumento de medición. Se recopilan los valores de los juicios emitidos por los jueces sobre cada ítem, que usualmente son cuantificados con una escala de Likert, para determinar, de acuerdo con un procedimiento estadístico apropiado, si en la evaluación de cada ítem y del instrumento de medición existe concordancia sobre los juicios emitidos por estos jueces y si esta concordancia es estadísticamente significativa. La etapa de revisión y reconstrucción consiste en que, una vez evaluada la concordancia de los juicios emitidos por los jueces, el investigador que elabora el instrumento de medición decide qué ítems deben permanecer en este instrumento. Además, si el nivel de validez de contenido no es apropiado, se sugiere desarrollar un nuevo proceso de validez de contenido con el mismo instrumento de medición, o una adecuación de este instrumento en función de los resultados observados. Es posible considerar al mismo grupo de jueces que evaluaron al instrumento de medición en la primera ocasión o invitar a participar en esta segunda evaluación a nuevos jueces.

En la segunda etapa, una vez que los jueces emiten su juicio sobre el instrumento de medición, se determina si estadísticamente existe concordancia en las valoraciones emitidas por los jueces en cada uno de los ítems y en el conjunto global de ítems. Es decir, se establece si estas concordancias son o no atribuibles al azar, para lo cual se pueden considerar varios índices: razón de validez de contenido (CVR, por sus siglas en inglés, Lawshe, 1975), el índice de validez de contenido (CVI, por sus siglas en inglés, Lynn, 1986), el Kappa modificado, prueba de concordancia de Kendall (Polit, Beck, & Owen, 2007).

Haynes, Richard y Kubany (1995) señalan que el índice empleado para evaluar la validez de contenido de un instrumento de evaluación está en función del objetivo a medir del instrumento, de la población a la que va dirigida la medición y las características circunstanciales de esta población. Por otro lado, Almasreh, et al., (2019) establecen que, de acuerdo a una revisión de literatura, el método de Razón de Validez de Contenido (CVR, por sus siglas en inglés) es el método más utilizado para determinar la significancia en la concordancia de los juicios de expertos en cada ítem y el instrumento de medición. Esto es, que los resultados que emitan los jueces no sean atribuibles al azar. El uso extendido de este criterio se debe a la simplicidad en su uso en comparación con los criterios alternativos. La facilidad con la que se calcula este índice y la disponibilidad de una tabla con valores críticos para un nivel de significancia de 0.05 para un número de entre 5 y 40 expertos lo hace muy atractivo. Sin embargo, los valores críticos para el CVR presentan un problema de monotonía con los valores críticos para el criterio de validez. Si el número de jueces expertos es igual a ocho, este valor crítico rompe la monotonía observada en el resto de estos valores (Wilson et al., 2012). Para resolver este problema, y asumiendo una distribución binomial con  $p=0.50$  y un número de expertos (N) mayor o igual que cinco, estos autores recalculan estos valores críticos considerando una aproximación de la distribución

binomial a la distribución normal para el cálculo de estos valores críticos. El valor del CVR para cada ítem se obtiene de acuerdo con la fórmula establecida en la ecuación 1.

$$CVR = \frac{\left(\frac{ne - \frac{N}{2}}{\frac{N}{2}}\right)}{\sqrt{\frac{N}{2}}}; \quad (1)$$

Donde *ne*, representa el número de jueces que califican al ítem como esencial, calificación 3 en una escala de Likert del 1 a 3, y N corresponde al total de jueces participantes en la evaluación. Los valores críticos  $CVR_{\alpha}$ , propuestos por Wilson, et al., (2012), para las magnitudes del CVR de cada ítem se presenta en la ecuación 2

$$CVR_{\alpha} = \frac{z_{\alpha}}{\sqrt{N}} \quad (2)$$

El Índice de Validez de Contenido (CVI, por sus siglas en inglés), propuesto por Lynn (1986) y considerado por Almanasreh, et al., (2019) como el índice de mayor uso como herramienta para medir la validez de contenido de un instrumento de medición, se clasifica en dos vertientes: Índice de Validez de Contenido del Ítem (I-CVI, por sus siglas en inglés), con el que se cuantifica el grado de concordancia entre los jueces para cada uno de los ítems, e Índice de Validez de Contenido de Escala (S-CVI, por sus siglas en inglés), con el que se evalúa la concordancia entre los jueces sobre todo el instrumento de medición. El autor de estos índices propone una tabla, generada con el error estándar de las calificaciones de los jueces, en la que se establecen los valores críticos que deben asumir estos indicadores para rechazar la hipótesis nula, con un nivel de significancia del 5%, de que el acuerdo entre los jueces, sobre los ítems y el instrumento de medición, es atribuible al azar.

El valor del I-CVI para cada ítem es calculado como la proporción de jueces que consideran esencial cada ítem, es decir, la proporción de jueces que asignan una calificación igual a 3 o 4 en una escala de Likert del 1 al 4. El valor del S-CVI se calcula a través de dos opciones: la primera corresponde a la media aritmética de los I-CVI para todos los ítems (I-CVI/ave); la segunda se determina como la proporción del total de ítems que logran calificación esencial por todos los jueces, para lo cual a cada ítem se le asigna el valor 1 si hay unanimidad entre los jueces, y se le asigna el valor igual a 0 si no existe unanimidad. Este segundo indicador es escasamente utilizado debido a que es difícil la concordancia de todos los jueces al evaluar un ítem, sobre todo cuando el número de jueces que participan en el juicio de expertos crece. Sin embargo, se sugiere presentarlo en los reportes como un indicador de carácter informativo (Wilson, et al., 2012). En la tabla 1, se presenta la fórmula para el cálculo de los valores de estos indicadores.

**Tabla 1.** Fórmulas para el cálculo del CVI

Indicador	Nombre	Definición	Formula
I-CVI	índice de validez de contenido para cada ítem	Proporción de jueces que declaran esencial al ítem	$I - CVI = \frac{k}{N}$ k= # de ítems esenciales; N= #de jueces
S-CVI/ave	Índice de validez de contenido para la escala, basado en el método del promedio	Media aritmética de: los I-CVI de los ítems; o de la proporción de ítems calificados como esenciales por cada juez ( $j_i$ ).	$S - CVI/ave = \frac{\sum_{i=1}^n (I - CVI_i)}{n}$ $S - CVI/ave = \frac{\sum_{i=1}^N j_i}{N}$ ( $I - CVI_i$ )= I-CVI del ítem i n= # de ítems. o
S-CVI/UA	Índice de validez de contenido para la escala, basado en el método del acuerdo universal	Proporción de ítems que son considerados relevantes	$S - CVI/UA = \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{n}$ $I_i = 1, \text{ si el ítem } i \text{ es esencial}$ $I_i = 0, \text{ si el ítem } i \text{ no es esencial}$

Fuente: tomada de (Yusoff, 2019)

Los valores críticos para el I-CVI para declarar excelente al ítem son los siguientes: 1 si el número de expertos es entre 3 y 5; y 0.78 si hay entre 6 y 10 expertos. Mientras tanto, el valor crítico del S-CVI/ave para declarar excelente el instrumento de medición es de 0.90. En cuanto al indicador S-CVI/UA, no se establece un valor crítico específico debido a la dificultad de lograr una concordancia del cien por ciento entre los jueces al evaluar un ítem. No obstante, se recomienda presentarlo en los informes de validez de contenido de un instrumento de medición como una medida informativa acerca del porcentaje o una estimación de la probabilidad de que un ítem de este instrumento sea declarado esencial con una concordancia total del 100% entre los jueces (Almanasreh, et al., 2019).

El valor crítico del indicador I-CVI disminuye conforme el número de jueces se incrementa. Esto significa que se considera constante la probabilidad de acuerdo entre los jueces para declarar un ítem como esencial, independientemente del número de jueces que participan en la evaluación. Por ejemplo, si el número de jueces es de seis a diez, el valor crítico del I-CVI es igual a 0.78. Polit, Beck y Owen (2007) proponen un indicador o índice para declarar un ítem como esencial que considera esta probabilidad de acuerdo o concordancia entre los jueces en función del número de jueces. Este índice se llama índice modificado de kappa y se presenta su fórmula de cálculo en la ecuación 3.

$$k = \frac{(I - CVI) - p_c}{1 - p_c}; \quad (3)$$

donde,  $p_c = \left[ \frac{N!}{A!(N-A)!} \right] * (0.5^N)$ , N representa al número total de jueces, A corresponde a el número de jueces que declaran al ítem como esencial, estos autores declaran la concordancia entre los jueces al evaluar un ítem, mediante el índice modificado de kappa como: razonable, bueno o excelente, si, respectivamente, el valor de  $k^*$  está entre 04.0 a 0.59; entre 0.60 a 0.74; y es mayor o igual que 0.75. por otro lado, Granat, et al., (2022) establecen que el valor crítico de  $k^*$  para declarar excelente la concordancia para un ítem es igual 0.78. Además, Polit, Beck, y Owen, (2007) recomiendan declarar excelente la concordancia del instrumento de medición, cuando el I\_CVI y el I-CVI/ave observen un valor, respectivamente, mayor o igual que 0.78 y 0.90.

Almanasreh, et al., (2019, p. 218) establecen que los índices: Cohen Kapps K; Fliess Kappa (kappa de múltiples evaluadores); Kappa ponderado; índice T; GTR ;  $r^*WG$  ; coeficiente de concordancia de Kendall (W); el coeficiente alfa de Krippendorff; y el AC1 de Gwet, son diseñados y desarrollados para: evaluar el acuerdo general entre un conjunto de evaluadores, pero no con el propósito de cuantificar la validez de contenido; medir el acuerdo completo entre evaluadores independientemente del tipo (acuerdo o en desacuerdo); ajustan el riesgo del acuerdo de azar; deben interpretarse con cuidado si se utilizan con fines de evaluar validez de contenido.

El objetivo del presente trabajo consiste en construir y validar el contenido de un instrumento de medición, cuyas mediciones permitan construir un modelo de ecuaciones estructurales con el que se establezcan las relaciones causales entre los constructos CIn, CA, CI, IC y GC.

Las hipótesis que se plantean en este trabajo son dos: la primera consiste en establecer que cada ítem del instrumento de medición es esencial, es decir, que existe concordancia no atribuible al azar en asignarle una calificación igual a 3 o 4 para cada ítem, en una escala de Likert del 1 al 4. La segunda es que el instrumento de medición tiene validez de contenido.

## **Materiales y Métodos**

El proceso de evaluar la validez de contenido de un instrumento de medición contempla tres etapas: la primera consiste en identificar y definir el dominio de cada constructo, y con ello definir los ítems que definen al constructo. La segunda implica someter cada ítem y al instrumento de medición al juicio de un grupo de expertos en el área, y validar estadísticamente los resultados emitidos por estos jueces. Posterior a esto, se determina la necesidad de redefinir los ítems y, en su caso, se procede a continuar con la tercera etapa, que consiste en someter a evaluación la validez de contenido del nuevo instrumento de medición con los ítems redefinidos o reestructurados (Almanasreh, et al., 2019; Haynes, et al., 1995; Wilson, et al. 2012).

### **Identificación y Definición del Dominio de los Constructos**

Para la definición del dominio de los constructos, se lleva a cabo una revisión de literatura en los motores de búsqueda Web of Science y Google Scholar, definiendo la búsqueda de artículos que consideran la construcción de modelos matemáticos que establecen la relación causal entre al menos dos de los cinco constructos CIn, CI, CA, IC y GC. Para ello, la búsqueda se dirige a encontrar artículos cuyo título involucra todas las posibles combinaciones de dos, tres, cuatro y cinco de estos constructos durante el periodo de tiempo del año 2017 al año 2023. Con los artículos encontrados bajo esta condición, se define el dominio de cada constructo, además de identificar

las dimensiones que para cada constructo se consideran. De los artículos revisados, se seleccionan aquellos en los que se presentan los ítems correspondientes a cada constructo, ítems que son analizados, clasificados para evitar su duplicidad, y seleccionados para con ellos construir el instrumento de medición contemplado en este trabajo de investigación.

### **Juicio de expertos**

Para llevar a cabo el proceso de juicio de expertos, se procede a reclutar a seis expertos en el área, todos ellos con más de 30 años de experiencia docente en el campo del conocimiento como un generador del desarrollo científico y tecnológico. A estos jueces se les entrega el formato de evaluación de este instrumento de medición, en el que se les solicita evaluar cuatro características: suficiencia, lo que corresponde a evaluar si el conjunto de ítems para cada constructo representa de manera completa al constructo; claridad, que determina si cada ítem está redactado de tal forma que pueda ser entendido por quien responde al instrumento de medición; coherencia, en la que se pregunta si cada ítem está asociado con el constructo; y relevancia, que para cada ítem determina si, al eliminarlo del conjunto de ítems considerados para un constructo, el conjunto de ítems restantes ya no es representativo de este constructo (Escobar y Cuervo, 2008).

### **Evaluación de Juicio de Expertos**

Con los valores asignados por los jueces para los ítems, en cada una de las cuatro características evaluadas, se procede a determinar la concordancia entre los jueces respecto a los juicios que emiten sobre los ítems a través del índice I-CVI, mientras que la calidad de los ítems es evaluada mediante el índice S-CVI/ave, índices que se describen en la tabla 1. El criterio para declarar que existe concordancia entre los jueces para declarar a cada ítem como esencial es que el indicador I-CVI asuma un valor mayor que 0.78; mientras que el criterio para asumir concordancia respecto al instrumento de medición es que el valor del I-CVI/ave sea mayor que 0.90. Se presenta el valor del indicador I-CVI/UA con carácter informativo sobre el porcentaje de ítems que son declarados esenciales por unanimidad por los jueces (Almanasreh, et al., 2019). La validez de contenido del instrumento de medición se califica como excelente si los valores de los ítems tienen un valor del I-CVI mayor o igual que 0.78 y el del I-CVI/ave es mayor que 0.90 (Polit, Beck, y Owen, 2007).

Las características o indicadores a considerar para la evaluación de este instrumento de medición a construir son: *suficiencia*, con la que se mide la completitud de los ítems, es decir, determinar si las dimensiones o constructos son plenamente representados por sus ítems contemplados en estos; *claridad*, con la que se mide si los ítems están bien redactados, en el sentido de que los ítems tienen semántica y sintaxis adecuadas; *coherencia*, con la que se califica si los ítems están totalmente relacionados con la dimensión o constructo que están midiendo; y *relevancia*, que califica la importancia de cada ítem para que permanezca incluido en la dimensión o constructo.

Los niveles para calificar los ítems en cada una de estas características se establecen con la escala Likert, numerada del 1 al 4, donde un ítem es declarado esencial si se le asigna una calificación igual a 3 o 4. A cada una de estas cuatro características se le asigna una calificación de acuerdo con los siguientes criterios:

#### Suficiencia:

1. No cumple: los ítems no son suficientes.
2. Bajo: los ítems miden pocos aspectos de la dimensión, pero no corresponden con la dimensión total.
3. Moderado: los ítems no son suficientes para evaluar la dimensión total.
4. Nivel alto: los ítems son suficientes.

#### Claridad:

1. No cumple: el ítem no es claro.
2. Bajo: se requiere una modificación muy grande en el uso de las palabras por su significado u orden.
3. Moderado: se requiere una modificación muy específica de algunas palabras del ítem.
4. Alto: el ítem es claro, tiene semántica y sintaxis adecuada.

#### Coherencia:

1. No cumple: el ítem no tiene relación lógica con la dimensión.
2. Bajo: el ítem tiene una relación tangencial con la dimensión.
3. Moderado: el ítem tiene una relación moderada con la dimensión que está midiendo.
4. Alto: el ítem está totalmente relacionado con la dimensión que está midiendo.

#### Relevancia:

1. No cumple: el ítem puede ser eliminado sin afectar la medición.
2. Bajo: el ítem tiene alguna relevancia, pero otro ítem puede estar incluyendo lo que mide este.
3. Moderado: el ítem es relativamente importante.
4. Alto: el ítem es muy relevante y debe ser incluido.

Una vez analizada la concordancia entre los expertos, se procede a analizar la necesidad de reconfigurar los ítems que no resultan apropiados y, en su caso, se somete el instrumento de medición modificado a un nuevo juicio de expertos, los cuales pueden ser los mismos que evaluaron en esta primera ocasión, o se puede considerar otro equipo de expertos (Almanasreh, et al., 2019).

## Resultados

### Definición del Dominio de los Constructos

En relación al dominio de definición de los conceptos capacidad de innovación, capital intelectual, gestión del conocimiento, inteligencia competitiva y capacidad de absorción, se presenta aquí la definición de cada uno de ellos, además de, en su caso, los elementos o dimensiones que constituyen a cada uno de estos constructos.

La Capacidad de Innovación (CI<sub>n</sub>) representa a la variable de respuesta o variable endógena de un proceso de innovación empresarial. La innovación empresarial, definición que aplica para cualquier tipo de empresa, es aquella acción que consiste en poner a disposición del usuario un producto nuevo o mejorado (bien o servicio) y/o proceso que difiera significativamente de los ya existentes. Según la OECD/Eurostat (2018), innovar representa el incremento de la competencia, la agilidad y la eficacia de una organización a través de la transformación de sus procesos empresariales. En la primera de estas definiciones, se identifican dos elementos distintivos y complementarios: la innovación, que es el resultado del conjunto de la totalidad de las actividades o acciones que se ejecutan para lograr la innovación empresarial; y el proceso de innovación, que consiste en este conjunto de actividades antes mencionadas. De estas, destacan ocho: investigación y desarrollo de actividad tecnológicas (ID); ingeniería, diseño y otras actividades de trabajo creativo; actividades de mercadotecnia y valor de marca; actividades relacionadas con la propiedad intelectual (PI); actividades de formación de empleados; actividades de desarrollo de software y de bases de datos; actividades relacionadas con la adquisición o el arrendamiento de activos materiales; actividades de gestión de la innovación. Los ítems que se utilizan para cuantificar a este constructo se presentan en la tabla 2.

El Capital Intelectual es un concepto para el cual, actualmente, no existe una definición aceptada universalmente y se considera un concepto en evolución. Del cual se pueden identificar características comunes que tienen como objetivo incrementar la competitividad de las organizaciones, en las diferentes definiciones que plantean para este concepto (Ficco, 2020). El Capital Intelectual (CI), suele interpretarse en el ámbito contable como los recursos intangibles de una empresa, mientras que en el económico como activos del conocimiento. Además, en el ámbito empresarial, este concepto se considera que está compuesto por estos tres elementos: Capital Humano (CH); Capital Estructural (CE) y Capital Relacional (CR). El CH está integrado por el conocimiento, las capacidades, las actitudes, la experiencia y habilidad, la resiliencia, y el nivel de compromiso y motivación de todos los empleados de la empresa u organización. El CE se refiere a todo el conocimiento que es propio de la empresa u organización, tales como los manuales de procedimiento, manual de organización, base de datos, patentes. El CR es el conjunto de relaciones que la empresa mantiene con sus clientes, proveedores, dependencias gubernamentales, centros de investigación y desarrollo (Kusi, et al., 2022). La integración del CH, CE y el CR tiene como objetivo incrementar la competitividad de la empresa, a través de incrementar su capacidad de innovación. Los ítems que se utilizan para cuantificar a este constructo se presentan en la tabla 2.

La Inteligencia Competitiva es una herramienta que permite a las empresas tener un conocimiento pasado, presente y futuro sobre su entorno operativo y su posición en referencia a sus competidores, lo que les permite tomar ventajas competitivas y aumentar las oportunidades de ingresos. Para lograr lo anterior, se hace necesario recopilar información interna y externa de manera ética, utilizando un conjunto de técnicas analíticas estructuradas. Los resultados deben ser comunicados en perspectivas con las ideas para mejorar la calidad de las decisiones de crecimiento de una organización.

La IC tiene como objetivo general hacer más competitiva a la empresa y siete objetivos secundarios principales: proporcionar las estrategias y tácticas de los competidores directos e indirectos para anticiparse a las oportunidades antes que ellos; analizar toda la información disponible (interna y externa) para coadyuvar a la mejor toma de decisiones de cada departamento y de la Dirección general; comprender las futuras necesidades del mercado y de los clientes para poder distribuir ese conocimiento al departamento que lo necesite; identificar las tendencias del sector a nivel de producto y servicios; monitorizar las innovaciones tecnológicas que pueden provocar un cambio en el mercado, en los competidores o en los proveedores; ir de la mano del Departamento de Seguridad para proteger la información, el conocimiento (know-how) y el personal (actual y anterior) para evitar el espionaje, la filtración de información sensible y la sobre-exposición; monitorizar las oportunidades, riesgos y vulnerabilidades a nivel político, económico y social a nivel internacional. El análisis de inteligencia es el proceso que consiste en recopilar y transformar los datos y la información en conocimiento útil, mediante el cual las empresas buscan alcanzar estos objetivos al utilizar técnicas, herramientas y metodologías concretas aplicadas en las diferentes fases del Ciclo de Inteligencia. Poblano (2019) menciona que existen varias definiciones de ciclos de inteligencia, y que la diferencia entre ellas es semántica. Los ítems que se utilizan para cuantificar a este constructo se presentan en la tabla 2.

La Gestión del Conocimiento es un concepto que surge a mediados de los años 80 del siglo pasado y que viene a coadyuvar en la resolución de las problemáticas sociales y empresariales que se presentaban en esas épocas. Actualmente no existe un consenso sobre la definición de este concepto. Se presentan las siguientes definiciones de GC: "La gestión del conocimiento (GC) puede definirse simplemente como 'hacer lo que es necesario para aprovechar al máximo los recursos de conocimiento', transferencia de conocimiento apropiado a la persona adecuada en el momento adecuado para ayudar a las personas a compartir información y mejorar la organización y su efectividad, además de adoptar métodos modernos que desarrollen las habilidades de los individuos para crear e innovar." Girard y Girard (2015, p.14) presentan un análisis de cien definiciones de GC, en donde contabilizan 90 palabras o términos que se repiten en al menos cuatro ocasiones en cada una de estas cien definiciones. Destacan 13 palabras o términos por su mayor cantidad de veces que se repiten: conocimiento, organización, proceso, información, uso, compartir, crear, gestionar, activos, gente, practica, mejoramiento, sistemático; con, respectivamente, 112, 69, 50, 44, 40, 36, 30, 19, 18, 15, 15 repeticiones. Y plantean dos definiciones a partir de las palabras o términos que se repiten en 30 o más ocasiones: "La gestión del conocimiento es el proceso de crear, compartir, utilizar y gestionar el conocimiento e información de una organización"; y "la gestión del conocimiento es el proceso de gestión para crear, compartir y utilizar información y conocimiento de la organización".

En el proceso de la GC, se consideran dos dimensiones: dimensión estática, que se refiere a la gestión del conocimiento y las capacidades internas de una empresa que permitan compartir, documentar y disponer del conocimiento, de tal forma que sea posible replicar y explotar estos conocimientos; y dimensión dinámica, que captura las capacidades externas de KM de una empresa, haciendo hincapié en la capacidad de una empresa para adquirir, convertir y aplicar el conocimiento que surge de fuentes externas a los límites de la empresa, por lo que la atención se centra en captar el conocimiento externo con el fin de analizar competidores y clientes e identificar desarrollos y tendencias generales del mercado.

La capacidad de absorción de una empresa es definida como el conjunto de habilidades con las que una empresa cuenta para reconocer la importancia de la nueva información, asimilarla y aplicarla con fines comerciales, por lo que se considera una condición necesaria para el éxito empresarial. Mientras tanto, Zahra y George (2002) establecen que desarrollar y mantener la capacidad de absorción es vital para la supervivencia y el éxito a largo plazo de una empresa, dado que esta capacidad puede fortalecer, complementar o reorientar la base de conocimientos de la empresa. La capacidad de absorción de una empresa se refiere a la capacidad que tiene la empresa para reconocer el conocimiento externo útil, asimilarlo e implementarlo (Martinkenaite, 2012). Adicionalmente, Zahra y George (2002) plantean una definición alterna de CA, a la cual consideran como un proceso con dos dimensiones: Capacidad de Absorción Potencial (CAP) y Capacidad de Absorción Realizada (CAR). En la primera de estas dimensiones se ejecutan las actividades de adquisición y asimilación, mientras que la segunda incluye las actividades de transformación y explotación de los conocimientos externos adquiridos por la empresa. Otra definición alternativa para la CA de una empresa es la capacidad de la empresa para identificar el conocimiento externo que se requiere, combinarlo con el conocimiento interno con el fin de aplicarlo para satisfacer las necesidades, actuales y futuras, de los clientes.

### **Construcción y evaluación de contenido del instrumento de medición**

El instrumento de medición, en el que se muestran los ítems que corresponden a cada dimensión de los constructos CIn, CA, IC, IC y GC, y que se elabora para obtener las mediciones o datos y con ellas construir el modelo en el que se establezcan las relaciones causales entre los constructos, se somete a evaluación por el juicio de expertos y se presenta en la tabla 2.

Los valores de los indicadores I-CVI, I-CVI/ave e I-CVI/UA, que se obtienen en la evaluación de los ítems del instrumento de medición que se realiza por los jueces, se muestran en la tabla 3. De acuerdo con estos valores y bajo el criterio de Polit, Beck y Owen (2007), el instrumento de medición tiene una validez de contenido en cada una de las características evaluadas: suficiencia, claridad, coherencia y relevancia, dado que en cada una de estas características los valores del I-CVI son mayores que 0.78 y el valor del I-CVI/ave es mayor o igual que 0.90. Esto

establece que este instrumento de medición, diseñado para la obtención de los datos requeridos para construir el modelo en el que se establecen relaciones causales entre los cinco constructos aquí referidos, tiene una validez de contenido excelente. Los valores del indicador I-CVI/UA son iguales a 0.9486 para dos de las características a evaluar del instrumento de medición, mientras que los dos restantes observan un valor igual a 0.896 y 0.758, valores que representan una estimación de la probabilidad de que los ítems, en cada característica a evaluar, sean declarados esenciales de manera unánime por los jueces que participan en el juicio de expertos.

**Tabla 2.** Instrumento de medición en formato de cuestionario para juicio de expertos

Ítems por dimensión o constructo a evaluar	Característica a evaluar			
	SUFICIENCIA	CLARIDAD	COHERENCIA	RELEVANCIA
<p><b>INTELIGENCIA COMPETITIVA</b> <i>Qué tan de acuerdo estoy de que la empresa</i></p>				
Los cambios en las políticas gubernamentales no afectan el desarrollo de la empresa. (1)				
Es capaz de adelantarse a sus principales competidores. (2)				
Cuando se presenta un problema, que no puede ser resuelto internamente en la empresa, siempre se busca información o conocimiento externo. (3)				
Realiza reuniones de planeación estratégica para definir y como obtener información o conocimiento externo que resulta importante para la empresa. (4)				
La recolección de información externa es permanente, aunque no se presenten problemas en la empresa. (5)				
Analiza la información externa para generar reportes con conocimiento estratégico. (6)				
Proporciona el conocimiento estratégico a los encargados de tomar decisiones. (7)				
<p><b>GESTIÓN DEL CONOCIMIENTO</b> <i>Qué tan de acuerdo estoy con la afirmación de que la empresa...</i></p>				
Sub-dimensión: ADQUISICION DE CONOCIMIENTO				

frecuentemente adquiere conocimientos útiles del exterior (clientes, centros de investigación y universidades, revistas, competencia, otras). (8)				
Cuenta con sistema de gestión de la innovación que promueve la generación de ideas y su implementación en la organización. (9)				
Motiva a los empleados a usar fuentes de información. (10)				
Los empleados identifican y adquieren rápidamente información interna y externa relevante sobre la organización y ambiente de la empresa. (11)				
<b>Sub-dimensión: ALMACENAMIENTO DE CONOCIMIENTO</b>				
Cuenta con un sistema de información que registra el conocimiento generado internamente y/o adquirido externamente. (12)				
Los empleados saben con quién o en donde obtener el conocimiento necesario para llevar a cabo sus funciones. (13)				
Realiza acciones de empoderamiento del empleado (capacitación inter-funcional, habilidades de liderazgo, toma de decisiones, etc.). (14)				
La organización utiliza patentes y licencias como una forma de almacenar conocimiento. (15)				
<b>Sub-dimensión: SOCIALIZACION DEL CONOCIMIENTO</b>				
Se alienta al personal con experiencia a tomar el papel de mentor del personal nuevo o con menos experiencia. (16)				
El intercambio de conocimientos es una medida del desempeño de los empleados en mi lugar de trabajo. (17)				
Para un departamento es fácil acceder a conocimientos de diferentes departamentos. (18)				
Comparte conocimientos con empresas asociadas (19)				
<b>Sub-dimensión: UTILIZACION DEL CONOCIMIENTO</b>				
Se utiliza el conocimiento existente para desarrollar nuevos conocimientos. (20)				
Se utiliza el conocimiento para resolver la mayoría de los problemas que encuentro en mi trabajo. (21)				
Se fomenta la aplicación los conocimientos y la experiencia adquirida de proyectos anteriores a proyectos posteriores. (22)				
Se aplican los conocimientos en el desarrollo de nuevos productos y servicios. (23)				
<b>CAPITAL INTELECTUAL</b> <i>Qué tan de acuerdo estoy con la afirmación de que la empresa...</i>	<b>SUFICIENCIA</b>	<b>CLARIDAD</b>	<b>COHERENCIA</b>	<b>RELEVANCIA</b>
<b>Sub-dimensión: CAPITAL HUMANO</b>				
Considera el nivel académico/profesional del personal para su contratación y promoción. (24)				
Proporciona Capacitación y Desarrollo a su personal de acuerdo con las competencias requeridas en la función a desempeñar y en gestión de la innovación. (25)				
Los empleados cuentan con la capacidad suficiente para realizar su trabajo. (26)				
Los empleados son creativos y brillantes. (27)				
Los empleados están altamente motivados en su trabajo. (28)				

La tasa de rotación del personal es baja. (29)				
<b>Sub-dimensión: CAPITAL ESTRUCTURAL</b>				
Cuenta con un sistema de información o archivo, donde se almacenan todas las habilidades, capacidades y competencias de los empleados. (30)				
Cuenta con un sistema de información o archivo, donde se almacenan todos los documentos de la empresa (manuales de organización, de procedimientos, layout de la planta, contratos, etc.). (31)				
Establece cláusulas de confidencialidad en los contratos de empleados, clientes y proveedores. (32)				
<b>Sub-dimensión: CAPITAL RELACIONAL</b>				
Mantiene relaciones con sus clientes y proveedores con el objetivo de mejorar sus procesos y productos. (33)				
Mantiene alianzas estratégicas con otras empresas para compartir información. (34)				
Mantiene Relaciones con organismos empresariales gubernamentales y centros de investigación y universidades (35)				
<b>CAPACIDAD DE INNOVACION</b> <i>Qué tan de acuerdo estoy con la afirmación de que la empresa...</i>	SUFICIENCIA	D CLARIDA	COHERENCIA	RELEVANCIA
<b>Sub-dimensión: INNOVACION PRODUCTOS</b>				
Promueve, de manera periódica, la generación de bienes o servicios y obtiene al menos un producto nuevo o mejorado. (36)				
Desarrolla nuevos bienes y servicios que son bien aceptados en el mercado. (37)				
Lanza nuevos bienes o servicios más rápido que sus competidores. (38)				
<b>Sub-dimensión: INNOVACION PROCESOS</b>				
Promueve la generación de procesos y obtiene al menos un proceso nuevo o mejorado de manera periódica. (39)				
Analiza diferentes procedimientos de operación para acelerar el logro de los objetivos de la empresa. (40)				
Desarrolla o mejora los procesos de fabricación o los procedimientos de operación de manera más eficiente que los competidores clave. (41)				
Cambia la división del trabajo entre diferentes departamentos de acuerdo a las necesidades del mercado. (42)				
<b>Sub-dimensión: INNOVACION DE PROCESOS ADMINISTRATIVOS</b>				
Adopta nuevos enfoques de liderazgo para dirigir a todo el personal hacia el logro de las metas. (43)				
Promueve la generación de propiedad intelectual (patentes, marcas, etc.) y obtiene al menos un registro de manera periódica. (44)				

De manera periódica, actualiza sus procesos administrativos (comercialización, mercadotecnia, organigrama, manuales de procedimiento, de organización, etc.). (45)				
Busca con frecuencia formas de acortar el tiempo de comercialización. (46)				
<b>CAPACIDAD DE ABSORCIÓN</b> <i>Qué tan de acuerdo estoy con la afirmación de que la empresa...</i>	SUFICIENCIA	CLARIDAD	COHERENCIA	RELEVANCIA
Sub-dimensión: CAPACIDAD DE ABSORCION POTENCIAL (asimilación)				
Los empleados reconocen rápidamente los cambios en el entorno a partir de la información que se les distribuye. (47)				
Los empleados comprenden rápidamente las demandas cambiantes del mercado, las nuevas oportunidades y amenazas a partir de la información. (48)				
Se realizan reuniones interdepartamentales periódicas para intercambiar nuevos desarrollos, problemas y logros. (49)				
La gerencia enfatiza el apoyo interdepartamental para resolver problemas. (50)				
Sub-dimensión: CAPACIDAD DE ABSORCION REALIZADA (transformación)				
Los empleados reconocen rápidamente la utilidad del nuevo conocimiento externo al conocimiento existente en la empresa. (51)				
Constantemente considera cómo explotar de mejor manera el existente y el nuevo conocimiento. (52)				
Transforma de manera eficiente las necesidades de los clientes en nuevos productos o procesos. (53)				
Sub-dimensión: CAPACIDAD DE ABSORCION REALIZADA (explotación)				
Se sabe claramente cómo se deben realizar las actividades dentro y entre los departamentos. (54)				
Los empleados tienen la capacidad de estructurar y aplicar el nuevo y el existente conocimiento. (55)				
Es fácil implementar el desarrollo de nuevos productos y nuevos procesos. (56)				
Reconsidera periódicamente las tecnologías y las adapta de acuerdo con los nuevos conocimientos. (57)				
Tiene la capacidad de trabajar de manera eficaz mediante la adopción de nuevas tecnologías. (58)				

Fuente: elaboración propia

Tabla 3. Calificaciones de las características *suficiencia, claridad, coherencia y relevancia* del instrumento del instrumento

Item	SUFICIENCIA CALIFICACION			CLARIDAD CALIFICACION			COHERENCIA CALIFICACION			RELAVANCIA CALIFICACION		
	I - CV	$\frac{I - CVI}{ave}$	$\frac{I - CVI}{UA}$	I - CV	$\frac{I - CVI}{ave}$	$\frac{I - CVI}{UA}$	I - CV	$\frac{I - CVI}{ave}$	$\frac{I - CVI}{UA}$	I - CV	$\frac{I - CVI}{ave}$	$\frac{I - CVI}{UA}$
1	1	0.96	0.9482	0.833	0.99	0.9482	0.833	0.96	0.896	1	0.96	0.758
2				1			1			1		
3				1			1			1		
4				1			1			1		
5				1			1			0.833		
6				1			1			1		
7				1			1			1		
8	0.833			1			1			1		
9				1			1			1		
10				1			0.833			1		
11				1			1			1		
12	1			1			1			1		
13				1			1			1		
14				1			1			0.833		
15				1			1			1		
16	1			1			1			1		
17				1			1			1		
18				1			1			1		
19				1			1			0.833		
20	1			1			1			1		
21				1			1			1		
22				1			1			0.833		
23				1			1			1		
24	1			1			1			1		
25				1			1			1		
26				1			1			1		
27				1			1			1		
28				1			1			0.833		
29				1			1			1		
30	1			1			1			0.833		
31				1			1			1		
32				1			1			1		
33	1			1			1			1		
34				1			0.833			0.833		
35				1			1			1		
36	1			1			1			1		
37				1			1			1		
38				1			1			1		
39	1			1			1			1		
40				1			1			1		
41				1			1			1		
42				1			1			1		
43	0.833			1			1			1		
44				1			1			1		
45				1			1			0.833		
46				1			1			1		
47	1			1			0.833			0.833		
48				1			1			1		
49				1			1			0.833		
50				1			1			1		

51	0.833	1	1	1
52		1	1	0.833
53		0.833	0.833	1
54	1	1	1	0.833
55		1	1	1
56		0.833	0.833	0.833
57		1	1	1
58		1	1	0.833

Fuente: elaboración propia

## Discusión

El instrumento de medición presentado en este trabajo tiene una validez de contenido excelente en las cuatro características que se evalúan, dados los valores numéricos observados en la tabla 3 para los indicadores I-CVI y I-CVI/ave y sus respectivos criterios establecidos para estos indicadores. Este resultado se obtiene en la primera ronda de evaluación, por lo que no se hace necesaria otra ronda de evaluación de este instrumento (Polit, Beck y Owen, 2007). Los valores del indicador I-CVI/UA se presentan con carácter informativo sobre la calidad del instrumento de medición. Este indicador carece de un valor crítico que delimite la frontera entre la buena o deficiente calidad del instrumento de medición, dado que la probabilidad de que los jueces lleguen a un consenso con respecto a asignarle el valor de esencial a cada ítem es inversamente proporcional al número de jueces que participan en el juicio de expertos. Además, este indicador ignora los desacuerdos fortuitos, es decir, los juicios emitidos por jueces que no logran captar o malinterpretan los ítems (Almanasreh et al., 2019; Polit, Beck y Owen, 2007).

La calificación excelente que se le asigna al instrumento de medición que se construye en este trabajo de investigación mediante los criterios I-CVI e I-CVI/ave corresponde a cada una de las cuatro características: suficiencia, claridad, coherencia y relevancia (Escobar y Cuervo, 2008). Con esto, se puede afirmar que los ítems considerados en cada constructo representan una muestra representativa de estos constructos al considerar que poseen la característica de completitud o exhaustividad. Además, si se omite un ítem en la construcción de alguno de estos constructos, cambia el significado o la esencia del constructo. Los ítems están bien redactados, en el sentido de que no admiten ambigüedad en su interpretación, y tienen una conexión o pertenencia natural o lógica al constructo.

Para evaluar la validez de contenido de un instrumento de medición mediante el indicador CVR, propuesto por Lawshe (1975), cuyo valor de este indicador para cada ítem se calcula de acuerdo con la ecuación 1, se requiere que cada ítem se califique con tres categorías. Los ítems considerados en este instrumento de medición se califican con cuatro categorías, por lo que no es viable utilizar este indicador para evaluar la calidad de la validez de contenido del instrumento de medición propuesto en este trabajo de investigación. Este indicador es omitido como un indicador para evaluar la validez de contenido en este trabajo, por la razón de que el cálculo del valor de este indicador, ecuación 1, se basa en la hipótesis de que, si ocurre que más del 50% de los jueces declaran esencial al ítem, este debe ser declarado esencial, y debe incrementar el valor de este

indicador de manera proporcional acorde al incremento del consenso entre los jueces, para lo cual y con el objetivo de desechar la posibilidad de que al declarar esencial ítem, no sea una decisión atribuible al azar, por lo que Lawshe, (1975) propone una tabla con los valores críticos para el indicador CVR, en pruebas de una sola cola y con un nivel de significancia igual a 0.05, cuya magnitud dependen del número de jueces que participan en el juicio de expertos, valores que son comparados contra los valores del CVR de cada ítem, y el ítem se declara estadísticamente esencial si el valor del CVR es mayor a su valor crítico correspondientes. En el caso donde participan seis jueces, este valor crítico es igual a uno. Para la construcción de esta tabla, no se establecen cuáles son los supuestos estadísticos que debe cumplir la variable aleatoria CVR, con la cual se establecen estos valores críticos, en función del número de jueces. Adicional a esto en la tabla presentada por este autor se observa un cambio en la monotonía decreciente, al observar un crecimiento inusual en el valor crítico para ocho jueces (Wilson, Wei, y Donald, 2012).

Para efectos de resolver esta situación, Wilson, Wei, y Donald, (2012) proponen la ecuación 2 para redefinir los valores críticos del indicador CVR, que para el instrumento de medición de este trabajo le corresponde el valor crítico de este indicador igual a  $z_{0.05} = \frac{1.96}{\sqrt{6}} = 0.800$ , bajo el supuesto de que la variable aleatoria CVR siga una distribución de probabilidad binomial con  $p=0.50$ , que es la condición que se establece, además de que el número de jueces sea mayor o igual cinco.

Bajo el supuesto de que la calificación, considerada en la escala Likert de 1 a 4, para cada ítem del instrumento de medición aquí propuesto, es equivalente a la calificación en la escala Likert de 1 a 3. Para ello, en la primera de estas escalas, la calificación con un valor igual a 3 o 4 se considera igual a 3, es decir, esencial. Entonces, bajo esta consideración y bajo el criterio del indicador CVR, se hace necesaria una segunda ronda del juicio de expertos para este instrumento de medición. Esto se debe a que, bajo este indicador y cualquiera de sus dos valores críticos (Lawshe, 1975; Wilson, Wei y Donald, 2012), son tres, tres, seis y quince los ítems, respectivamente, de las cuatro características suficiencia, claridad, coherencia, cuyos valores del indicador CVR no son mayores que los dos valores críticos establecidos por estos dos autores. Esto implica que estos ítems deben eliminarse o bien replantearse y volver a someter a evaluación en una segunda ronda, o en las rondas que sean necesarias.

Otro índice propuesto para evaluar la validez de contenido de un instrumento de medición es el conocido como porcentaje promedio de concordancia o congruencia (ACP, por sus siglas en inglés). Sin embargo, este índice no se considera en este trabajo dado que el índice ACP es idéntico al índice I-CVI/ave. Polit, Beck y Owen (2007) proponen una alternativa para el valor crítico del indicador I-CVI, que no contempla el incremento en la dificultad de acuerdo conforme se incrementa el número de jueces. Esta alternativa consiste en calcular el índice modificado de kappa, y presenta una tabla con los valores críticos de kappa y su equivalencia con el I-CVI. Bajo el criterio del índice modificado de kappa, con este indicador, este instrumento de medición es calificado con una validez de contenido excelente.

Los ítems que son contemplados, respectivamente, en los constructos de inteligencia competitiva y capacidad de absorción no tienen la característica de ser suficientes para representar a estos en

el contexto del análisis independiente de estos dos conceptos, ya que las actividades de adquisición y asimilación de conocimiento, que son los ítems o actividades que pertenecen o se llevan a cabo en estos dos constructos, son asignados al constructo de gestión del conocimiento. Lo anterior es consecuencia de que, en la revisión de literatura llevada a cabo para establecer el dominio de definición y los ítems con los que se construye el instrumento de medición a utilizar para modelar las relaciones causales entre los constructos CIn, GC, IC, CI y CA, se observan dimensiones que pertenecen a dos o más de estos constructos simultáneamente. En este caso, las dimensiones de adquisición y asimilación de conocimiento externo están contempladas en los constructos de capacidad de absorción, inteligencia competitiva y gestión del conocimiento. Esto hace necesario que, en este trabajo, se asignen estas actividades comunes a un solo constructo, a efectos de no duplicar o triplicar los ítems del instrumento de medición. Esta situación es informada a los jueces para su consideración antes de llevar a cabo la evaluación.

## **Conclusión**

El instrumento de medición que se presenta en este trabajo de investigación tiene validez de contenido, lo cual implica que los ítems asignados a cada constructo son una muestra representativa de estos constructos. Es decir, estos ítems son suficientes, claros, coherentes y relevantes con el dominio de definición de cada uno de estos constructos, por lo que su aplicación es válida para recopilar los datos con los que se han de llevar a cabo los análisis estadísticos para determinar la validez estadística de las hipótesis que se plantean sobre las relaciones causales entre los cinco constructos aquí considerados de manera global u holística. Esta validez de contenido se justifica bajo el criterio de los indicadores I-CVI e I-CVI/UA, que de acuerdo a Almasreh, et al. (2019) y Polit, Beck y Owen (2007), es el criterio más confiable para evaluar la validez de contenido.

## **Futuras líneas de investigación**

Un método alternativo para evaluar la validez de contenido de un instrumento de medición es el método de Análisis Formal de Validez de Contenido (FCVA, por sus siglas en inglés), el cual consta de tres etapas. La primera consiste en la elaboración del instrumento de medición, donde el autor o los autores llevan a cabo un análisis para determinar si los ítems propuestos pertenecen, exactamente, a una de las dimensiones o constructos y si estos ítems tienen la característica de suficiencia o completitud. Además de lo anterior, también se evalúa que las dimensiones o constructos no sean redundantes. En caso favorable a estas dos cuestiones, se procede con la siguiente etapa: etapa dos. Aquí se evalúan los juicios emitidos por los expertos para el conjunto completo de los ítems considerados, para cada ítem propuesto en la evaluación y para cada celda de ítem-constructo. Al cumplir estas condiciones, se sigue en la siguiente etapa: etapa tres. Aquí, el objetivo es lograr un acuerdo entre los juicios emitidos por los expertos y los juicios correspondientes de quienes construyen el instrumento de medición. Los autores de este método de evaluación, además de señalar ventajas de este método sobre los "métodos tradicionales", presentan un procedimiento para estimar las calificaciones que emiten los expertos a través de un procedimiento bayesiano, con las que es posible determinar la discrepancia entre los valores de

los juicios emitidos por los expertos, contra los valores estimados. Por lo que se recomienda, mediante simulación, validar este método comparando su eficiencia para evaluar un instrumento de medición contra la eficiencia de los métodos I-CVI y CVR.

## Agradecimiento

Un agradecimiento especial al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado a Rafael García Martínez mediante el Programa de Estancias Posdoctorales en México 22 (1).

## Bibliografía

- Almanasreh, E., Moles, R., & Chen, T. F. (2019). Evaluation of methods used for estimating content validity. *Research in social and administrative pharmacy, 15*(2), 214-221. <https://doi.org/10.1016/j.sapharm.2018.03.066>.
- Escobar, P. J., & Cuervo, M. A. (2008). Validez de contenido y juicio de expertos: una aproximación a su utilización. . *Avances en Medicina, 6*, 27-36.
- Girard, J., & Girard, J. (2015). Defining knowledge management: Toward an applied compendium. *Online Journal of Applied Knowledge Management, 3*(1), 1-20.
- Granat, L., Andersson, S., Hadziabdic, E., Brännström, M., & Sandgren, A. (2022). Translation, adaptation, and validation of the Self-efficacy in Palliative Care scale (SEPC) for use in Swedish healthcare settings. . *BMC Palliative Care, 21*(1), 48., <https://doi.org/10.1186/s12904-022-00940-5>.
- Guillot, V. M., Guillén, R. A., & Buela-Casal, G. (2022), (Content validity through expert Judgment for the Depression Clinical Evaluation Test. *International Journal of Clinical and Health Psychology, 22*(2), 100292., 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ijchp.2022.100292>.
- Haynes, S. N., Richard, D., & Kubany, E. S. (1995). Content validity in psychological assessment: A functional approach to concepts and methods. *Psychological assessment, 7*(3), 238., 238-247.
- Lawshe, C. H. (1975). A quantitative approach to content validity. *Personnel psychology, 28*(4), 563-575.
- Lynn, M. R. (1986). Determination and quantification of content validity. *Nursing research, 35*(6), 382-386.
- OECD/Eurostat. (2018). *Oslo Manual 2018. Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation. 4th Edition, The Measurement of Scientific, Technological and Innovation Activities, OECD*. Publishing, Paris/Eurostat, Luxembourg, <https://doi.org/10.1787/9789264304604-en>: OECD, European Union, 2018.
- Poblano, O. E. (2019). Modelo Estructural de los Factores Críticos de Éxito de la Inteligencia Competitiva basado en la Administración del Conocimiento. *Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura*.
- Polit, D. F., Beck, C. T., & Owen, S. V. (2007). Is the CVI an acceptable indicator of

content validity? Appraisal and recommendations. . *Research in nursing & health*, 30(4), 459-467. DOI: 10.1002/nur.20199.

- Wilson, F. R., Wei, P., & Donald, A. S. (2012). Recalculation of the Critical Values for Lawshe's Content Validity Ratio. *Measurement and Evaluation in Counseling and Development*, DOI: 10.1177/0748175612440286.
- Yusoff, M. S. (2019). ABC of content validation and content validity index calculation *Education in Medicine Journal*, 11(2), 49-54.
- Zahra, S. A., & George, G. (2002). Absorptive capacity: A review, reconceptualization, and extension. *Academy of management review*, 27(2), 185-203.

# **Factores Críticos de Éxito en el Despliegue de Proyectos Seis Sigma: Una Revisión Sistemática y Metaanálisis**

*Critical Success Factors in Implementing Six Sigma Projects: A Systematic Review and Meta-Analysis*

**Adán Valles Chávez**

Tecnológico Nacional de México/ IT de Cd. Juárez, México

avalles@itcj.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-6559-0123>

**Mariela Álvarez Argüelles**

Universidad Autónoma de Cd. Juárez, México

mariela.alvarez@uacj.mx

<https://orcid.org/0000-0003-4824-1244>

**Soledad Vianey Torres Argüelles**

Universidad Autónoma de Cd. Juárez, México

Vianey.torres@uacj.mx

<https://orcid.org/0000-0003-0978-3796>

## **Resumen:**

Seis Sigma (SS) es una importante estrategia empresarial de alto impacto en los procesos de la industria. Por lo tanto, se ha constituido un campo de estudio cuyo propósito principal es la eliminación de defectos en la producción y con ello incrementar beneficios económicos. Sin embargo, la literatura indica de forma recurrente que una fracción importante de las empresas que la aplican tienen dificultades para lograr sus objetivos y obtener beneficios en sus proyectos SS (Sony et al., 2020). Este artículo presenta una revisión de literatura y se identifican los factores que influyen en la implementación de la metodología Seis Sigma en proyectos de la industria manufacturera. Para ello, se realizó una búsqueda de artículos científicos relacionados entre los años 2017 al 2021, revisando un total de 130 artículos, de los cuales se preseleccionaron 61. Se analizaron 43 artículos por medio de metaanálisis para determinar los factores críticos para el éxito en la implementación de proyectos SS y su relación con la efectividad del equipo de trabajo que lo administra en las plantas industriales.

**Palabras Clave:** Seis Sigma, Efectividad, Factores Críticos de Éxito.

**Abstract:**

Six Sigma (SS) is an important business strategy with a high impact on processes in the industry, therefore, a field of study has been established whose main purpose is the elimination of defects in production and thereby increase economic benefits. However, the literature repeatedly indicates that a significant fraction of the companies that apply it have difficulties in achieving their objectives and obtaining benefits in their SS projects (Sony et al., 2020). This article presents a literature review and identifies the factors that influence the implementation of the Six Sigma methodology in projects in the manufacturing industry. For this, a search for related scientific articles was carried out between the years 2017 and 2021, reviewing a total of 130 articles, of which 61 articles were preselected, 43 being analyzed through Meta-Analysis to determine the critical factors for success in the implementation of SS projects and its relationship with the effectiveness of the work team that manages it in industrial plants.

**Keywords:** Six Sigma, Effectiveness, Critical Success Factors.

**Introducción**

La metodología SS es uno de los enfoques más impactantes que está revolucionando las prácticas de gestión de calidad. Esto se debe al éxito que han tenido numerosas organizaciones en el mundo de distintos giros y tamaños. En sus inicios, en la década de 1980, se desarrollaron estrategias que condujeron a la calidad e incremento de la rentabilidad, logrando optimizar aspectos como la mejora del servicio, el costo de fabricación, la mejora en la capacidad y productividad, así como la reducción de tiempos de comercialización y entrega. SS es un enfoque de gestión que basa sus proyectos para la mejora de productos, servicios y procesos en la reducción continua de los defectos, buscando la atención y satisfacción de los clientes. Esto representa una oportunidad para incrementar la competitividad en el mercado (López-Guerrero et al., 2019). Cabe mencionar que los equipos de trabajo son considerados como uno de los pilares en la implementación de la metodología. Su rendimiento efectivo es un proceso adaptativo dinámico y episódico que abarca los pensamientos, sentimientos y comportamientos entre los miembros. Para lograrlo, es necesario definir cómo alcanzar las tareas y los objetivos (Salas et al., 2015). Por lo tanto, la formación en equipo (Salas et al., 2015) y el liderazgo del equipo (Kozlowski, 2018) son considerados como intervenciones clave para mejorar los procesos del equipo y su eficacia.

Por otra parte, la literatura reporta que la problemática abordada en este documento surge de la necesidad de determinar un punto de inicio para que los líderes determinen qué factores podrían tener mayor impacto en el equipo de trabajo y la efectividad de estos en los resultados de los proyectos SS de su organización. Por eso es tan importante esta investigación.

El objetivo de esta investigación es determinar los Factores Críticos de Éxito en el Despliegue de Proyectos Seis Sigma mediante una revisión sistemática de la literatura y un metaanálisis.

## Antecedentes

Seis Sigma (SS) es una estrategia o metodología para la mejora de las operaciones, la cual se ha aplicado en diversas empresas. Hay varios enfoques de SS (Tjahjono et al., 2010), diferencias que se dan por los propósitos, entre ellos, el mejoramiento de procesos mediante la adopción de herramientas estadísticas dentro de la gestión de la calidad, el despliegue de la filosofía operativa de la gestión, considerando los beneficios compartidos entre clientes, accionistas, empleados y proveedores, y la cultura organizacional. Para esto, se requiere el compromiso de la alta dirección y el involucramiento de los empleados en la organización para reducir la variabilidad del proceso y eliminar las actividades de desperdicio. En virtud de estos beneficios, la investigación en SS, y específicamente en el trabajo en equipo y los factores que influyen en su efectividad, se ha extendido a la psicología y la gestión organizacional (Kozlowski, 2018).

Para el despliegue de proyectos SS, hay dos metodologías principales (Siddiqui et al., 2016): DMAIC (definir, medir, analizar, mejorar y controlar) y DFSS (Design for Six Sigma). La primera se utiliza para la mejora continua de la calidad del proceso (Poblano-Ojinaga et al., 2020; Erdoğan y Canatan, 2015; Srinivasan et al., 2014), y la segunda se aplica para el desarrollo de nuevos productos. Para mejorar el nivel de medidas de rendimiento de SS, se considera un análisis estadístico de los datos que reflejan los requerimientos del cliente. El principal indicador de calidad son las Partes por Millón (PPM) de oportunidades (Mitra, 2004), así como la desviación estándar, que muestra la desviación del promedio estadístico (tasa de defectos). El término "Sigma" se utiliza como escala para medir los niveles de calidad, cuyo objetivo es reducir los defectos a "casi cero". Su medida estadística de variación " $6\sigma$ " produce 3.4 defectos por millón de oportunidades.

Los Factores Críticos de Éxito (FCE) son variables que conducen al éxito de la organización (O'Sullivan, 2008), relativas a las capacidades de recursos y ventajas competitivas que caracterizan a la organización. Esto se debe a que representan áreas de interés para la toma de decisiones gerenciales (Suárez y Díaz, 2013). Específicamente, para la gestión adecuada de proyectos, los FCE se consideran como características, condiciones o variables que impactan significativamente el éxito del proyecto. Determinarlos implica que la teoría pueda explicar qué se requiere administrar para lograr el éxito del proyecto. En la práctica, permite que los responsables puedan desarrollar buenas medidas para administrar, centrando la atención en estos factores.

Los conocimientos y las habilidades descritas en los FCE de SS, así como la aplicación de las herramientas y técnicas relacionadas, tienen una función importante en el éxito de los proyectos de la industria manufacturera (Taner, 2013). En la literatura, hay un amplio listado de factores de los proyectos SS, predictores del éxito (Siddiqui et al., 2016). También se reporta que su mala administración puede llevar a la pérdida de tiempo, dinero y esfuerzo.

Uno de los pilares que dan soporte al despliegue de proyectos SS es el equipo de trabajo, considerando el trabajo en equipo como elemento fundamental para el éxito. Los factores que inciden en el éxito del equipo de trabajo son diversos. Entre ellos, es importante que los miembros tengan un alto conocimiento y comprendan la metodología, herramientas y técnicas de SS.

Además, deben poseer un liderazgo adecuado y desarrollar habilidades de comunicación efectiva, participativa y multifuncional en el equipo para agregar valor al trabajo y tener una visión general de las necesidades de la organización. Otros factores importantes son el involucramiento de los empleados en la organización (Pamfilie et al., 2012), sus habilidades y capacitación (Antony y Karaminas, 2016), la determinación de responsabilidades y roles específicos dentro de la estructura organizacional. Además, deben estar capacitados para utilizar herramientas y aplicar técnicas que resuelvan problemas y creen oportunidades de negocio (Gaikwad et al., 2016). SS emplea la terminología de las artes marciales bajo el sistema de cinturones para establecer la jerarquía y responsabilidad de los profesionales encargados de su implementación (Stankalla et al., 2019). No menos importante, es que el personal y la administración participen activamente en proyectos SS.

Para determinar los factores del éxito de SS y del equipo de trabajo, se revisaron los temas genéricos que muestra la Tabla 1: el despliegue de proyectos, los factores, el equipo de trabajo y su efectividad. Después de las dos fases de exclusión de la revisión sistemática, se consideraron 61 artículos.

**Tabla 1.** Temas de investigación y cantidad de artículos

<b>Tema Genérico</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad de Artículos</b>
<b>Implementación de SS</b>	Artículos relacionados con el despliegue de SS en proyectos de la industria	20
<b>FCE en la implementación de SS</b>	Artículos relacionados con los FCE en la implementación de SS	12
<b>Equipos de trabajo SS</b>	Artículos relacionados con los Equipos de Trabajo que despliegan proyectos SS	14
<b>Efectividad y Equipos de Trabajo</b>	Artículos relacionados con la Efectividad en los equipos de trabajo	15
	<b>Total</b>	<b>61</b>

Fuente: Elaboración propia

De la revisión de los artículos, se determinaron los factores en cada tema genérico, los cuales se exponen en los párrafos siguientes.

En lo que se refiere a la implementación de SS, los factores relacionados y que se reportan con mayor frecuencia son: el efecto de SS en calidad, capacidad de innovación y productividad en la industria llantera (Fahmi et al., 2021); la identificación y selección de proyectos SS (Flifel et al., 2017); el análisis bibliométrico de la literatura SS (Niñerola et al., 2021); la implementación de SS

como mediadora en la inversión de recursos humanos para el éxito económico y de sostenibilidad (J. García-Alcaraz et al., 2018); los proyectos de mejora SS en plantas de bloques de concreto (S. Noriega Morales et al., 2016); la metodología e implementación de SS (Navarro Albert et al., 2017); la mejora de la competitividad en recursos humanos con SS (Madhani, 2020); la revisión del sistema de cinturones SS en empresas PYMES manufactureras (Stankalla et al., 2019); la implementación de SS usando la teoría fundamentada (Krueger et al., 2014); los Factores Críticos de Éxito en la implementación de SS (Nancy y Rogelio, 2013); el papel de la experiencia en proyectos SS exitosos (Easton y Rosenzweig, 2012); la mejora en la calidad de fabricación y orientación para la gerencia en la implementación de SS (Antony et al., 2012); la gestión de SS en calidad educativa (Mehrabi, 2012); y Seis Sigma en empresas de servicios (Antony et al., 2007).

Con respecto a los Factores Críticos de Éxito (FCE) en la implementación de SS, se proponen: FCE de SS y sus beneficios sustentables en la industria aeroespacial (López-Guerrero et al., 2019); evaluación de FCE para la implementación de SS en la industria PYME de la India (Dharmendra et al., 2017); FCE de SS en la industria manufacturera (Mustafa y Jamaluddin, 2017); FCE en proyectos SS (Marzagão y Carvalho, 2016); FCE en mantenimiento total de la calidad total, SS y Lean SS (Sreedharan V. et al., 2018); FCE para la implementación de SS (Singh y Singh, 2020); priorización de FCE para la implementación exitosa de SS en la industria manufacturera de la India (Kumar, 2019); FCE de SS en la industria brasileña (Ribeiro de Jesus et al., 2016); FCE en implementación de SS en hospitales (Sabry, 2014); el fenómeno de SS en diversos casos de estudio (Nonthaleerak y Hendry, 2008); análisis de FCE en implementación de SS (Sharma y Chetiya, 2012); herramienta DMAIC de SS (Uluskan, 2016).

En lo que respecta a los equipos de trabajo SS, se presentan: la creación de trabajo en equipos de alto rendimiento (O'Neill y Salas, 2018); el rol de la gerencia y cinturones negros en el éxito de SS (J. L. García-Alcaraz et al., 2017); la comprensión y modelado de equipos como sistemas dinámicos (Gorman et al., 2017); el liderazgo transformacional y el desarrollo de equipos de alto rendimiento (Pico y Coello Yagual, 2018); la efectividad del equipo y el liderazgo de servicio y comportamiento (Mahembe y Engelbrecht, 2014); la efectividad de la capacitación en el comportamiento del equipo (McEwan et al., 2017); la mejora en las habilidades del equipo de ingeniería a través del profesionalismo (Al-Abbas et al., 2020); el cumplimiento de indicadores de un modelo de equipos de trabajo y su efectividad en la realización del proyecto (Garza et al., 2010); la aplicación y efectividad en equipos de trabajo, productividad y efectividad del trabajo en equipo (Tohidi, 2011).

Finalmente, en cuanto a los factores relacionados con la efectividad y los equipos de trabajo, se determinaron los siguientes temas: una revisión bibliográfica de los equipos de trabajo para identificar variables que afectan la eficiencia (Rangel Carreño et al., 2018); la integración del conocimiento y la efectividad del equipo (Mehta y Mehta, 2018); la disparidad en el intercambio líder-miembro en el comportamiento y la efectividad del equipo (Herdman et al., 2017); mejorar la eficacia de grupos y equipos de trabajo (Kozlowski, 2018); el concepto de equipo en la investigación sobre equipos de trabajo (Bayona Bohórquez y Heredia Cruz, 2012); efectividad en la gestión de proyectos (Ariza, 2017); efectividad en servicios hospitalarios (Riveros S et al., 2012); y comunicación para la efectividad laboral (Romero-Rodríguez et al., 2019).

## Materiales y Métodos

Esta Sección presenta los materiales y los métodos aplicados en el proyecto.

### Materiales

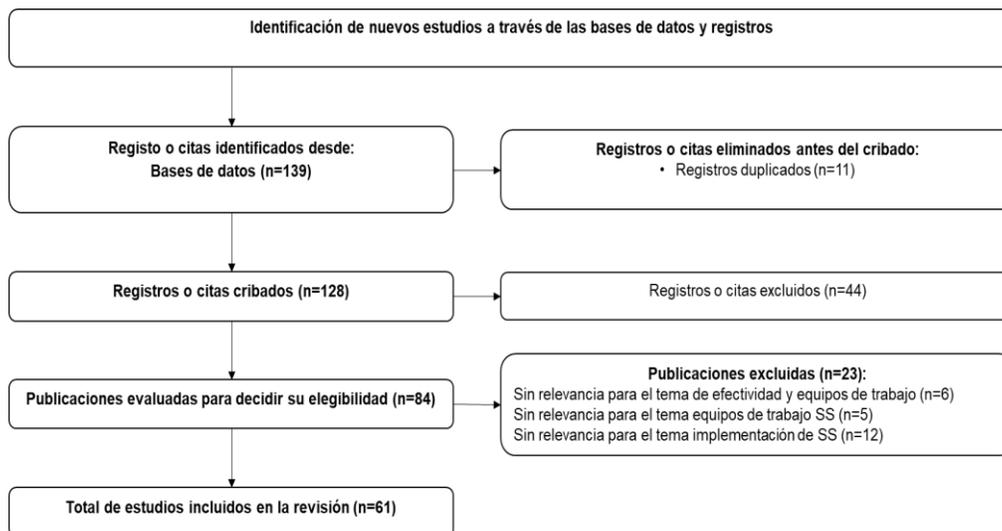
Los materiales utilizados en la investigación parten de una revisión de literatura para identificar los conceptos principales de esta investigación: Seis Sigma, Factores Críticos de Éxito, Equipos de Trabajo y Efectividad, en artículos científicos y documentos disponibles en bases de datos reconocidas por la calidad de información que ofrecen y la cantidad de artículos encontrados. Estas bases de datos son SPRINGER, SCIEDIRECT, IEEE, ELSEVIER, EMERALD, entre otras, durante el periodo de 2017 a 2021. Sin embargo, también se consideraron publicaciones de años anteriores.

Este cuerpo de conocimientos se analizó con metaanálisis, que es un proceso basado en métodos estadísticos que busca una síntesis válida de la información. Se utilizó Minitab para los análisis estadísticos.

### Métodos

La identificación de los factores críticos de éxito en el despliegue exitoso de SS se llevó a cabo a través de una revisión bibliográfica mediante metaanálisis (MA) (Ojinaga, 2018; McEwan et al., 2017; Noriega Morales et al., 2010). La Figura 1 muestra las fases descritas en la guía actualizada de la declaración PRISMA (Page et al., 2021) que se utilizaron en la revisión de literatura.

**Figura 1.** Diagrama de flujo de PRISMA 2020 para la revisión sistemática de literatura



Fuente: Page et al., 2021.

El soporte estadístico para obtener un alto grado de confiabilidad sobre los artículos seleccionados deriva de la metodología del metaanálisis. Sus ocho pasos (S. A. Noriega Morales et al., 2010) son:

**1. Definición del problema:** Se define el problema de forma clara y precisa, que es la identificación de Factores Críticos de Éxito que influyen en el despliegue y administración del proyecto SS para que sean efectivos.

**2. Identificación de las fuentes de información y los estudios a analizar:** Una vez que se determinan los límites del metaanálisis, se identificarán todos los estudios que se ajusten a esos límites. El propósito de este paso es enumerar las fuentes de la literatura. Para la investigación se consideraron 130 estudios, entre los que se encuentran trabajos de investigación y memorias de congresos.

**3. Discriminación informativa:** En este paso, la información se clasifica según el grado de rigor científico, credibilidad y confianza. Para este propósito, se desarrolla un conjunto de criterios de inclusión y exclusión y se aplica a todos los documentos, excluyendo los trabajos que no cumplen con los criterios. Este es uno de los dos filtros de calidad. En este paso, se redujo de 130 a 122 artículos.

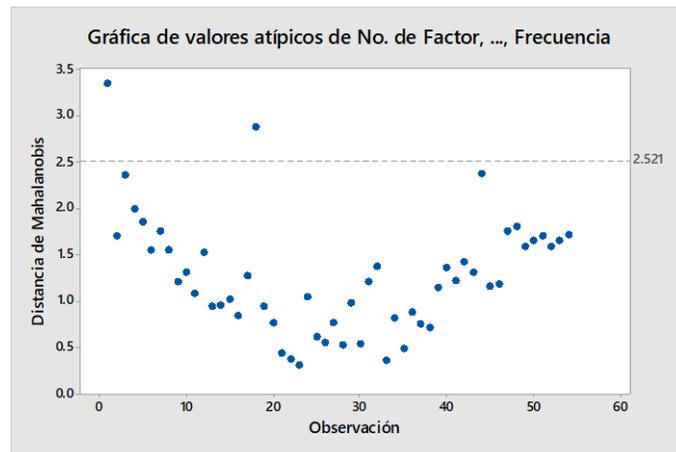
**4. Base de datos de publicaciones:** El objetivo de este paso es generar una base de datos de artículos con el objetivo de facilitar la gestión, localización y tratamiento de la información recopilada.

**5. Evaluación de artículos:** El propósito de la evaluación del artículo es determinar, en base a los criterios establecidos, si un artículo debe incluirse o no en la MA. En esta etapa se elige el documento por el título y su relación con las palabras clave, posteriormente se identifica en el resumen la información sobre los criterios de búsqueda, para finalmente dar lectura al documento completo; se eliminaron 61 artículos, por lo que el listado se redujo de 122 a los 61 artículos. Posteriormente se seleccionaron 43 (tabla del Anexo 1).

**6. Clasificación y codificación de la información:** En este proceso, la extracción de datos de cada estudio se basa en una hoja de codificación que especifica qué datos extraer y una clave que interpreta los diversos aspectos realizados. La información codificada se resume para identificar las variables moderadoras (medibles o ítem) que se utilizarán para la realización del MA, lo que se muestra en la Tabla 1 del Anexo. De esta forma se identificaron las 54 variables medibles (VM) y la frecuencia con que son reportadas en la literatura.

**7. Análisis estadístico:** En este paso, se aplican métodos estadísticos a los resultados obtenidos de estudios seleccionados para su inclusión en el MA. El primer paso fue la identificación de valores atípicos por medio de la distancia de Mahalanobis (Figura 2).

**Figura 2.** Gráfica de Distancia Mahalanobis para la identificación de datos atípicos

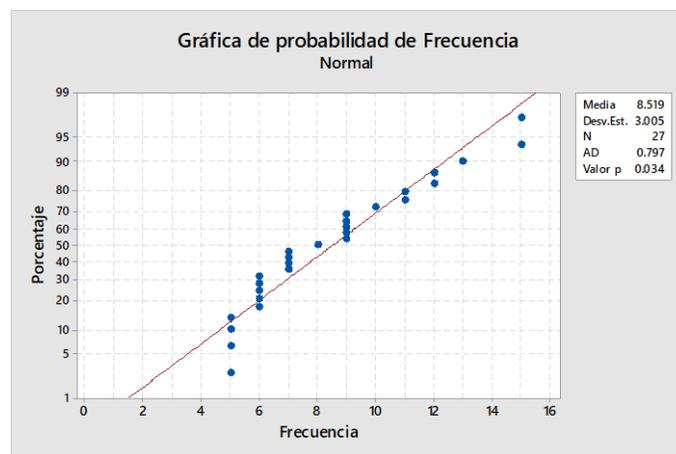


Fuente: Elaboración propia

Se identificaron dos factores atípicos, ya que la frecuencia con la que se encontró en la literatura es mayor que el resto de los factores, de tal forma que el número de variables pasa de 54 a 52. El siguiente paso fue calcular la mediana con la finalidad de identificar los factores que fueron mencionados con una frecuencia menor en la literatura. Se discriminaron los ítems con un valor menor a 5 que corresponde a la mediana, reduciéndose el número de factores de 52 a 27.

El siguiente paso es aplicar la prueba de normalidad (Figura 3) a los resultados ( $n= 27$ ). Los resultados empíricos muestran que los datos se alejan de la línea ajustada de una manera más evidente en el extremo izquierdo, y el valor p de la prueba de Anderson-Darling indica que en niveles mayores a 0.005, los datos no siguen una distribución normal.

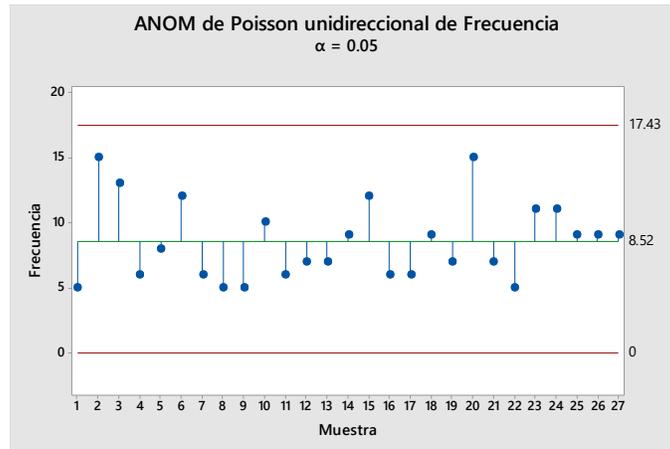
**Figura 3.** Gráfica de Probabilidad de Frecuencia (Normal)



Fuente: Elaboración propia

Hay evidencia de que los datos no siguen una distribución normal y por ello se realizó la prueba de diferencias en las medias (ANOM de Poisson) para identificar los factores con contribuciones relativas menores y, en su caso, proceder a su eliminación.

**Figura 4.** Gráfica de Prueba de Diferencia de Medias (ANOM de Poisson)



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4, se puede observar que los puntos se encuentran por encima del límite inferior de decisión, lo que indica que no hay evidencia de que la media de los niveles de los factores representados por esos puntos sea significativamente menor que la media general.

**8. Generación de conclusión.** Este es el último paso de esta metodología, que consiste en la interpretación de los resultados. Un resultado de MA es simplemente evidencia que puede usarse en el intento de integrar los resultados de múltiples estudios. Además, los supuestos necesarios para el MA deben ser evaluados para la adecuación del estudio.

## Resultados

En esta sección se presentan los resultados de la revisión sistemática de literatura. Se consideraron 130 publicaciones que incluyen investigaciones y memorias de congresos y, en su fase de elegibilidad, se redujeron a 61 publicaciones que se muestran en la Tabla 1 del Anexo. Posteriormente, se identificaron los factores críticos de los proyectos SS que influyen en el despliegue de la metodología Seis Sigma (Tabla 2 del Anexo), resumiendo la frecuencia con la que fueron encontrados en los documentos.

Se encontraron un total de cincuenta y cuatro factores críticos (FC) en las publicaciones revisadas. Una vez contabilizada la frecuencia total, se procedió a la identificación de datos atípicos con la prueba de Distancia Mahalanobis, dando como resultado dos factores con una mayor frecuencia, por lo que se decide excluirlos en esta etapa del análisis. Luego, se realizó el cálculo de la mediana en la frecuencia de los factores para identificar aquellos que sean menores a esta, reduciéndose el

listado de factores de 52 a 27. Se eliminaron los factores que resultaron por debajo de la media debido a que no representan relevancia en la investigación ya que su frecuencia es menor que 5.

La prueba de normalidad muestra que los datos no siguen una distribución normal, por lo tanto, se procedió al análisis de datos a través de la aplicación de un Análisis de Medias de Poisson (ANOM), considerando N = 27. Este análisis indica que los factores se encuentran consistentes dentro de los límites de especificación superior e inferior del Análisis de Medias de Poisson, y que hay una estabilidad en los datos, lo que indica que hay una causa asignable para que estos sean considerados en la investigación.

**Tabla 2.** Variables Medibles identificados en el Meta-Análisis

No.	Variable Medible	Frecuencia
1	Participación de la dirección *	20
2	Compromiso de la alta dirección	5
3	Infraestructura organizacional	15
4	Cooperación, comunicación efectiva y transmisión interna.	13
5	Gestión del cambio cultural (resistencia al cambio)	6
6	Planeación estratégica	8
7	Priorización y selección del proyecto	12
8	Selección, seguimiento y revisión del proyecto SS	6
9	Alineación del proyecto SS con los objetivos de la organización	5
10	Integrar SS con los beneficios financieros	5
11	Vincular SS con los clientes *	19
12	Vincular SS con los proveedores	10
13	Vinculación de SS con la gestión de recursos humanos	6
14	Programa de reconocimiento del desempeño	7
15	Enfoque basado en objetivos a corto y largo plazo	7
16	Inversión de recursos adecuados	9
17	Herramientas y técnicas de la metodología SS	12
18	Sistema adaptable a la implementación de SS	6
19	SS centrado en métricas	6

20	Sistema de análisis de datos y métodos estadísticos	9
21	Coordinación con sistemas de gestión e intercambio de conocimientos	7
22	Formación y entrenamiento continuo de equipos multifuncionales especializados	15
23	Selección de líderes de proyecto	7
24	Estructura de roles de la metodología SS	5
25	Equipo colaborativo	11
26	Trabajo en equipo	11
27	Participación y empoderamiento de los miembros del equipo de trabajo de SS	9
28	Sinergia entre la alta dirección y el equipo de trabajo del proyecto SS	9
29	Habilidades de liderazgo ejecutivo	9

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se integran a la lista los dos factores (\*) excluidos anteriormente, ya que estos tienen una mayor frecuencia por lo que son relevantes para la investigación, obteniendo así un total de 29 factores (variables medibles) identificados en el metaanálisis, Tabla 2.

Siendo los de 10 más mencionados, como también se aprecia en la Tabla 3, se puede discriminar los importantes por la frecuencia de citación.

**Tabla 3. Factores más Frecuentes**

No.	Factor	Frecuencia
1	Participación de la dirección	20
2	Vincular SS con los clientes	19
3	Infraestructura organizacional	15
4	Formación y entrenamiento continuo de equipos multifuncionales especializados	15
5	Cooperación, comunicación efectiva y transmisión interna.	13
6	Priorización y selección del proyecto	12
7	Herramientas y técnicas de la metodología SS	12

8	Equipo colaborativo	11
9	Trabajo en equipo	11
10	Vincular SS con los proveedores	10

Fuente: Elaboración propia.

Factores que se pueden clasificar en 4 categorías: organizacionales, administrativos, técnicos y de equipos de trabajo. Entre los organizacionales se encuentran la participación de la dirección, la infraestructura organizacional, la cooperación, la comunicación efectiva y la transmisión interna. Entre los administrativos están vincular Seis Sigma con los clientes, la priorización y selección del proyecto y la vinculación de Seis Sigma con los proveedores. En cuanto a los técnicos, se refiere a la aplicación de las herramientas y técnicas de la metodología Seis Sigma. Finalmente, los relacionados con el equipo de trabajo son la formación y entrenamiento continuo de equipos multifuncionales especializados, el equipo colaborativo y el trabajo en equipo.

## Conclusiones

Esta investigación muestra, como una primera aproximación, los factores críticos de éxito (FCE) identificados para el despliegue de la metodología Seis Sigma en la industria de la manufactura, lo que constituye una perspectiva novedosa para los profesionales e investigadores de SS. Los resultados indican que, al menos, 43 artículos de los 130 mencionan el FCE en diferentes casos o enfoques. Por lo tanto, la investigación para encontrar el FCE importantes en la práctica de SS es una contribución a la teoría de SS.

Cabe mencionar que puede variar la importancia de las consideraciones de acuerdo con los equipos y las organizaciones, sin embargo, siguen proporcionando un punto de inicio para que los líderes seleccionen los factores a administrar en el despliegue del proyecto, dado que podrían tener un mayor impacto en el trabajo en equipo y en los resultados de su organización.

En cuanto a la aplicación de la MA en las áreas de ingeniería, así como la adaptación de los procedimientos de la MA al marco de las prácticas de investigación de SS, puede considerarse exitoso, en virtud de que se determinaron los 29 factores importantes mencionados repetidamente en la literatura. Además, la Tabla 3 presenta los 10 factores que se pueden considerar de la mayor importancia para que las gerencias puedan desplegar proyectos SS y que les resulte factible centrar la atención en sólo 10 factores. Esta lista se utilizará para construir un cuestionario y en investigaciones de campo en empresas exitosas en SS para determinar los factores más importantes en la práctica de SS.

## Futuras Investigaciones

Se recomienda, como futura investigación, continuar con la validación de un Instrumento de Medición (IM) tipo cuestionario a través de juicio de expertos. El IM será diseñado a partir de la

identificación de criterios o factores llevada a cabo por medio de esta Revisión Sistemática de literatura en dos criterios: calidad y coherencia.

## Agradecimientos

Un agradecimiento Eduardo Rafael Poblano Ojinaga por su desinteresado apoyo en la elaboración y revisión de este artículo. Eduardo R. es beneficiario de Estancia Posdoctoral por México (2022), CONACYT.

## Referencias

- Al-Abbas, M., Fawaz, W., Ghajar, R., Rjeily, C. A., Ouais, I., Nakad, Z., Nasr, G. E., & Saab, S. S. (2020). Toward an Improvement of Engineering Teaming Skills Through an In-House Professionalism Course. *IEEE Transactions on Education*, 63(4), 273–282. <https://doi.org/10.1109/TE.2020.2980379>
- Antony, J., Gijo, E. V., & Childe, S. J. (2012). Case study in Six Sigma methodology: manufacturing quality improvement and guidance for managers. *Production Planning & Control*, 23(8), 624–640. <https://doi.org/10.1080/09537287.2011.576404>
- Antony, J., Jiju Antony, F., Kumar, M., & Rae Cho, B. (2007). Six sigma in service organisations. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 24(3), 294–311. <https://doi.org/10.1108/02656710710730889>
- Antony, J., & Karaminas, H. (2016). Critical assessment on the Six Sigma Black Belt roles/responsibilities, skills and training: a global empirical study. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 33(5), 558–573. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-08-2014-0106>
- Ariza, D. A. (2017). Efectividad de la gestión de los proyectos: una perspectiva constructivista. *Obras y proyectos*, 22, 75–85. <https://doi.org/10.4067/S0718-28132017000200075>
- Bayona Bohórquez, J. A., & Heredia Cruz, O. (2012). El concepto de equipo en la investigación sobre efectividad en equipos de trabajo. *Estudios Gerenciales*, 28(123), 121–132. [https://doi.org/10.1016/S0123-5923\(12\)70208-5](https://doi.org/10.1016/S0123-5923(12)70208-5)
- Dharmendra, T., Sony, V. K., & Khare, V. K. (2017). Evaluation of Critical Success Factors For Six Sigma Implementation in Indian Manufacturing SMES. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 7(6), 489–500. <https://doi.org/10.24247/ijmperdddec201756>
- Easton, G. S., & Rosenzweig, E. D. (2012). The role of experience in six sigma project success: An empirical analysis of improvement projects. *Journal of Operations Management*, 30(7–8), 481–493. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2012.08.002>
- Erdoğan, A., & Canatan, H. (2015). Literature Search Consisting of the Areas of Six Sigma's Usage. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 195(0212), 695–704. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.160>

- Fahmi, K., Mustofa, A., Rochmad, I., & Sulastri, E. (2021). The Effect of Six Sigma on Quality, Innovation Capability and Work Productivity of Tyre Industrie. *Journal Industrial Engineering & Management Research (Jiemar)*, 2(1), 1–12. <https://doi.org/10.7777/jiemar.v2i1.109>
- Flifel, A., Zakic, N., & Tornjanski, A. (2017). Identification and selection of six sigma projects. *Journal of Process Management. New Technologies*, 5(2), 10–17. <https://doi.org/10.5937/jouproman5-13748>
- Franco G., C. A. (2001). Factores Para La Dirección Y Efectividad De Los Equipos De Trabajo. *Estudios Gerenciales*, 81, 27–31.
- Gaikwad, L. M., Teli, S. N., Majali, V. S., & Bhushi, U. M. (2016). An Application of Six Sigma to Reduce Supplier Quality Cost. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 97(1), 93–107. <https://doi.org/10.1007/s40032-015-0200-2>
- García-Alcaraz, J., Alor-Hernández, G., Sánchez-Ramírez, C., Jiménez-Macías, E., Blanco-Fernández, J., & Latorre-Biel, J. (2018). Mediating Role of the Six Sigma Implementation Strategy and Investment in Human Resources in Economic Success and Sustainability. *Sustainability*, 10(6), 1828. <https://doi.org/10.3390/su10061828>
- Gardner, M. M., & Forrest W., B. I. (2000). Implementing Six Sigma: Smarter Solutions Using Statistical Methods. *Technometrics*, 42(3), 309. <https://doi.org/10.2307/1271088>
- Garza, J., Anwar, J., & Cortez, D. (2010). El cumplimiento de indicadores de un modelo de equipos de trabajo y su efectividad en la realizacion del proyecto (The performance indicators of a model of teamwork and effectiveness in project implementation). *Innovaciones de Negocios*, 7(2), 263–276. [http://www.web.facpya.uanl.mx/rev\\_in/Revistas/7.2/A4.pdf](http://www.web.facpya.uanl.mx/rev_in/Revistas/7.2/A4.pdf)
- Gorman, J. C., Dunbar, T. A., Grimm, D., & Gipson, C. L. (2017). Understanding and Modeling Teams As Dynamical Systems. *Frontiers in Psychology*, 8(JUL), 1–18. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01053>
- Herdman, A. O., Yang, J., & Arthur, J. B. (2017). How Does Leader-Member Exchange Disparity Affect Teamwork Behavior and Effectiveness in Work Groups? The Moderating Role of Leader-Leader Exchange. *Journal of Management*, 43(5), 1498–1523. <https://doi.org/10.1177/0149206314556315>
- Kozlowski, S. W. J. (2018). Enhancing the Effectiveness of Work Groups and Teams: A Reflection. *Perspectives on Psychological Science*, 13(2), 205–212. <https://doi.org/10.1177/1745691617697078>
- Krueger, D. C., Mellat Parast, M., & Adams, S. (2014). Six Sigma implementation: a qualitative case study using grounded theory. *Production Planning & Control*, 25(10), 873–889. <https://doi.org/10.1080/09537287.2013.771414>
- Kumar, M. (2019). Prioritization of Critical Success Factors for successful implementation of Six-Sigma in Indian manufacturing industry using Fuzzy TOPSIS. *International Journal of Research and Analytical Reviews*, 6(2), 13–20. [www.ijrar.org](http://www.ijrar.org)

- López-Guerrero, A., Hernández-Gómez, J. A., Velázquez-Victorica, K. I., & Olivares-Fong, L. D. C. (2019). Six sigma as a competitive strategy: Main applications, implementation areas and critical success factors (CSF). *DYNA (Colombia)*, 86(209), 160–169. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n209.76994>
- Madhani, P. M. (2020). Enhancing HR Competitiveness: A Six Sigma Approach. *SSRN Electronic Journal*, 27(2), 1–7. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3672993>
- Mahembe, B., & Engelbrecht, A. S. (2014). The relationship between servant leadership, organisational citizenship behaviour and team effectiveness. *SA Journal of Industrial Psychology*, 40(1). <https://doi.org/10.4102/sajip.v40i1.1107>
- Marzagão, D. S. L., & Carvalho, M. M. (2016). Critical success factors for Six Sigma projects. *International Journal of Project Management*, 34(8), 1505–1518. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.08.005>
- McEwan, D., Ruissen, G. R., Eys, M. A., Zumbo, B. D., & Beauchamp, M. R. (2017). The Effectiveness of Teamwork Training on Teamwork Behaviors and Team Performance: A Systematic Review and Meta-Analysis of Controlled Interventions. *PLOS ONE*, 12(1), e0169604. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169604>
- Mehrabi, J. (2012). Application of Six-Sigma in Educational Quality Management. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 47, 1358–1362. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.826>
- Mehta, A., & Mehta, N. (2018). Knowledge Integration and Team Effectiveness: A Team Goal Orientation Approach. *Decision Sciences*, 49(3), 445–486. <https://doi.org/10.1111/dec.12280>
- Mitra, A. (2004). Six sigma education: A critical role for academia. *TQM Magazine*, 16(4), 293–302. <https://doi.org/10.1108/09544780410541963>
- Mustafa, Z., & Jamaluddin, Z. (2017). Six sigma critical success factors in manufacturing industries. *AIP Conference Proceedings*, 1830, 080020. <https://doi.org/10.1063/1.4981004>
- Nancy, C. G., & Rogelio, R. H. (2013). Factores críticos de éxito en el proceso de implementación de seis sigma: una revisión de la literatura. *XVII Congreso Internacional en Ciencias Administrativas*, 1–19.
- Navarro Albert, E., Gisbert Soler, V., & Pérez Molina, A. I. (2017). METODOLOGÍA E IMPLEMENTACIÓN DE SIX SIGMA. *3C Empresa : Investigación y pensamiento crítico*, 6(5), 73–80. <https://doi.org/10.17993/3cemp.2017.especial.73-80>
- Niñerola, A., Sánchez-Rebull, M.-V., & Hernández-Lara, A.-B. (2021). Six Sigma literature: a bibliometric analysis. *Total Quality Management & Business Excellence*, 32(9–10), 959–980. <https://doi.org/10.1080/14783363.2019.1652091>
- Nonthaleerak, P., & Hendry, L. (2008). Exploring the six sigma phenomenon using multiple case study evidence. *International Journal of Operations & Production Management*, 28(3), 279–303. <https://doi.org/10.1108/01443570810856198>

- Noriega Morales, S. A., Valles, A., Sanchez, J., & Subramanian, A. (2010). Critical Success Factors of Cellular. *International Journal of Industrial Engineering*.
- Noriega Morales, S., Valles Ch., A., Torres-Argüelles, V., Martínez G., E., & Hernández G., A. (2016). Six Sigma improvement project in a concrete block plant. *Construction Innovation*, 16(4), 526–544. <https://doi.org/10.1108/CI-01-2015-0003>
- O’Neill, T. A., & Salas, E. (2018). Creating high performance teamwork in organizations. *Human Resource Management Review*, 28(4), 325–331. <https://doi.org/10.1016/j.hrmmr.2017.09.001>
- Ojinaga, E. R. P. (2018). *Exploratory study of competitive intelligence in Mexico*. *Journal of Intelligence Studies in Business*, 8(3). <https://doi.org/10.37380/jisib.v8i3.363>
- O’Sullivan, C. (2008). *A STUDY OF CRITICAL SUCCESS FACTORS FOR REGIONAL HEALTH ALLIANCES*. Central Michigan University.
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Alonso-Fernández, S. (2021). Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, 74(9), 790–799. <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>
- Pamfilie, R., (Draghici), A. J. P., & Draghici, M. (2012). The Importance of Leadership in Driving a Strategic Lean Six Sigma Management. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 58, 187–196. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.992>
- Pico, L., & Coello Yagual, R. R. (2018). Relación entre el liderazgo transformacional y el desarrollo de equipos de alto rendimiento. *INNOVA Research Journal*, 3(12), 28–37. <https://doi.org/10.33890/innova.v3.n12.2018.662>
- Poblano-Ojinaga, E., Sanchez-Leal, J., Rodriguez-Medina, M., Valles-Chaves, A., Gonzalez-Torres, A.. (2020). USE OF QUALITY ENGINEERING AS A PRODUCT QUALITY IMPROVEMENT STRATEGY. *DYNA*, 95(4). 353. DOI: <https://doi.org/10.6036/9663>
- Rangel Carreño, T. L. L., Lugo Garzón, I. K., & Calderón, M. E. (2018). Revisión bibliográfica equipos de trabajo: enfoque cuantitativo, características e identificación de variables que afectan la eficiencia. *Ingeniería Solidaria*, 14(24), 1–17. <https://doi.org/10.16925/in.v14i24.2164>
- Ribeiro de Jesus, A., Antony, J., Lepikson, H. A., & Peixoto, A. L. A. (2016). Six Sigma critical success factors in Brazilian industry. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 33(6), 702–723. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-08-2014-0120>
- Riveros S, J., Berné M, C., & García-Uceda, E. (2012). Un modelo estructural para medir la efectividad de los servicios hospitalarios: aplicación en hospitales públicos del sur de Chile. *Revista médica de Chile*, 140(5), 579–588. <https://doi.org/10.4067/S0034-98872012000500004>

- Rodriguez-Medina, M., Poblano-Ojinaga, E., Rodriguez-Borbon, M., Alvarado-Tarango, L. (2021). A HIGH IMPACT BUSINESS STRATEGY: THE SIX SIGMA METHODOLOGY. *DYNA*, 96(2). 128. DOI: <https://doi.org/10.6036/10010>
- Romero-Rodríguez, L., Castillo-Abdul, B., & Ravina Ripoll, R. (2019). Comunicación para la efectividad laboral y el happiness management: revisión crítico - analítica de la literatura. *Revista Mundo Indess*, 1(1), 17–27.
- Sabry, A. (2014). Factors critical to the success of Six-Sigma quality program and their influence on performance indicators in some of Lebanese hospitals. *Arab Economic and Business Journal*, 9(2), 93–114. <https://doi.org/10.1016/j.aebj.2014.07.001>
- Salas, E., Shuffler, M. L., Thayer, A. L., Bedwell, W. L., & Lazzara, E. H. (2015). Understanding and Improving Teamwork in Organizations: A Scientifically Based Practical Guide. *Human Resource Management*, 54(4), 599–622. <https://doi.org/10.1002/hrm.21628>
- Sharma, S., & Chetiya, A. R. (2012). An analysis of critical success factors for Six Sigma implementation. *Asian Journal on Quality*, 13(3), 294–308. <https://doi.org/10.1108/15982681211287810>
- Siddiqui, S. Q., Ullah, F., Thaheem, M. J., & Gabriel, H. F. (2016). Six Sigma in construction: a review of critical success factors. *International Journal of Lean Six Sigma*, 7(2), 171–186. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-11-2015-0045>
- Singh, G., & Singh, D. (2020). CSFs for Six Sigma implementation: a systematic literature review. *Journal of Asia Business Studies*, 14(5), 795–818. <https://doi.org/10.1108/JABS-03-2020-0119>
- Sony, M., Antony, J., Park, S., & Mutingi, M. (2020). Key Criticisms of Six Sigma: A Systematic Literature Review. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 67(3), 950–962. <https://doi.org/10.1109/TEM.2018.2889517>
- Sreedharan V., R., Sunder M., V., & R., R. (2018). Critical success factors of TQM, Six Sigma, Lean and Lean Six Sigma. *Benchmarking: An International Journal*, 25(9), 3479–3504. <https://doi.org/10.1108/BIJ-08-2017-0223>
- Srinivasan, K., Muthu, S., Prasad, N. K., & Satheesh, G. (2014). Reduction of paint line defects in shock absorber through Six Sigma DMAIC phases. *Procedia Engineering*, 97, 1755–1764. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.327>
- Stankalla, R., Chromjakova, F., & Koval, O. (2019). A review of the Six Sigma belt system for manufacturing small and medium-sized enterprises. *Quality Management Journal*, 26(2), 100–117. <https://doi.org/10.1080/10686967.2019.1580119>
- Suárez, A., & Díaz, J. (2013). Factores críticos de éxito en la investigación universitaria venezolana. September 2013.
- Taner, M. T. (2013). Critical Success Factors for Six Sigma Implementation in Large-scale. *International Review of Management and Marketing*, 3(4), 212–225.

- Tjahjono, B., Ball, P., Vitanov, V. I., Scorzafave, C., Nogueira, J., Calleja, J., Minguet, M., Narasimha, L., Rivas, A., Srivastava, A., Srivastava, S., & Yadav, A. (2010). Six Sigma: a literature review. *International Journal of Lean Six Sigma*, 1(3), 216–233. <https://doi.org/10.1108/20401461011075017>
- Tohidi, H. (2011). Teamwork productivity & effectiveness in an organization base on rewards, leadership, training, goals, wage, size, motivation, measurement and information technology. *Procedia Computer Science*, 3(December 2011), 1137–1146. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2010.12.185>
- Uluskan, M. (2016). A comprehensive insight into the Six Sigma DMAIC toolbox. *International Journal of Lean Six Sigma*, 7(4), 406–429. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-10-2015-0040>
- Viles, E., Jaca, C., Campos, J., Serrano, N., & Santos, J. (2012). Trabajo en equipo en los grados de Ingeniería: factores de efectividad y su aplicación. *Dirección y Organización*, 0(46), 67–76. <http://www.revistadyo.com/index.php/dyo/article/view/392/412>
- Zou, T. X. P., & Lee, W. B. (2016). Eliciting and mapping tacit knowledge on teamwork success of Six Sigma teams. *Knowledge Management Research and Practice*, 14(3), 246–255. <https://doi.org/10.1057/kmrp.2014.27>
- Zu, X., Robbins, T. L., & Fredendall, L. D. (2009). Mapping the critical links between organizational culture and TQM/Six Sigma practices. *International Journal of Production Economics*, 123(1), 86–106. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.07.009>

## Anexo

**Tabla 1 del Anexo.** Artículo Seleccionados en la Literatura

No.	Artículo	Frecuencia
1	Six Sigma critical success factors in Brazilian industry	(Ribeiro de Jesus et al., 2016)
2	Evaluation of Critical Success Factors for Six Sigma Implementation in Indian Manufacturing SMES	(Dharmendra et al., 2017)
3	Critical success factors of TQM, Six Sigma, Lean and Lean Six Sigma	(Sreedharan V. et al., 2018)
4	Six sigma critical success factors in manufacturing industries	(Mustafa y Jamaluddin, 2017)
5	Critical success factors for Six Sigma projects	(Marzagão y Carvalho, 2016)
6	CSFs for Six Sigma implementation: a systematic literature review	(Singh y Singh, 2020)

7	Six Sigma as a competitive strategy: main applications, implementation areas and critical success factors (CSF)	(López-Guerrero et al., 2019)
8	Prioritization of Critical Success Factors for successful implementation of Six-Sigma in Indian manufacturing industry using Fuzzy TOPSIS	(Kumar, 2019)
9	Knowledge Integration and Team Effectiveness: A Team Goal Orientation Approach	(Mehta y Mehta, 2018)
10	Revisión bibliográfica de equipos de trabajo: enfoque cuantitativo, características e identificación de variables que afectan la eficiencia	(Rangel Carreño et al., 2018)
11	How Does Leader-Member Exchange Disparity Affect Teamwork Behavior and Effectiveness in Work Groups? The Moderating Role of Leader- Leader Exchange	(Herdman et al., 2017)
12	Enhancing the Effectiveness of Work Groups and Teams: A Reflection	(Kozlowski, 2018)
13	El concepto de equipo en la investigación sobre efectividad en equipos de trabajo	(Bayona Bohórquez y Heredia Cruz, 2012)
14	Understanding and modeling teams as dynamical systems	(Gorman et al., 2017)
15	Creating high performance teamwork in organizations	(O'Neill y Salas, 2018)
16	Relación entre el liderazgo transformacional y el desarrollo de equipos de alto rendimiento	(Pico y Coello Yagual, 2018)
17	Enhancing HR Competitiveness: A Six Sigma Approach	(Madhani, 2020)
18	Metodología e implementación de Six Sigma	(Navarro Albert et al., 2017)
19	The Effect of Six Sigma on Quality, Innovation Capability and Work Productivity of Tyre Industrie	(Fahmi et al., 2021)
20	Six Sigma improvement project in a concrete block plant	(S. Noriega Morales et al., 2016)
21	Mediating Role of the Six Sigma Implementation Strategy and Investment in Human Resources in Economic Success and Sustainability	(J. García-Alcaraz et al., 2018)
22	Identification and selection of six sigma projects	(Flifel et al., 2017)
23	A review of the Six Sigma belt system for manufacturing small and medium-sized enterprises	(Stankalla et al., 2019)
24	Six Sigma literature: a bibliometric analysis	(Niñerola et al., 2021)

25	Factors critical to the success of Six-Sigma quality program and their influence on performance indicators in some of Lebanese hospitals	(Sabry, 2014)
26	Exploring the Six Sigma phenomenon using multiple case study evidence	(Nonthaleerak y Hendry, 2008)
27	An analysis of critical success factors for Six Sigma implementation	(Sharma y Chetiya, 2012)
28	Six sigma in service organizations	(Antony et al., 2007)
29	A comprehensive insight into the Six Sigma DMAIC toolbox	(Uluskan, 2016)
30	The relationship between servant leadership, organisational citizenship behaviour and team effectiveness	(Mahembe y Engelbrecht, 2014)
31	The Effectiveness of Teamwork Training on Teamwork Behaviors and Team Performance: A Systematic Review and Meta-Analysis of Controlled Interventions	(McEwan et al., 2017)
33	Toward an Improvement of Engineering Teaming Skills Through an In-House Professionalism Course	(Al-Abbas et al., 2020)
34	El cumplimiento de indicadores de un modelo de equipos de trabajo y su efectividad en la realizacion del proyecto (The performance indicators of a model of teamwork and effectiveness in project implementation)	(Garza et al., 2010)
35	Teamwork productivity & effectiveness in an organization base on rewards, leadership, training, goals, wage, size, motivation, measurement and information technology	(Tohidi, 2011)
36	Efectividad de la gestión de los proyectos: una perspectiva constructivista	(Ariza, 2017)
37	Un modelo estructural para medir la efectividad de los servicios hospitalarios: aplicación en hospitales públicos del sur de Chile	(Riveros S et al., 2012)
38	Comunicación para la efectividad laboral y el happiness management : revisión crítico - analítica de la literatura	(Romero-Rodríguez et al., 2019)
39	Six Sigma implementation: a qualitative case study using grounded theory	(Krueger et al., 2014)
40	Factores críticos de éxito en el proceso de implementación de seis sigma: una revisión de la literatura	(Nancy y Rogelio, 2013)

41	The role of experience in six sigma project success: An empirical analysis of improvement projects	(Easton y Rosenzweig, 2012)
42	Case study in Six Sigma methodology: manufacturing quality improvement and guidance for managers	(Antony et al., 2012)
43	Application of Six-Sigma in Educational Quality Management	(Mehrabi, 2012)

Fuente: elaboración propia

**Tabla 2 del Anexo.** Factores identificados en la literatura

No.	Variable Medible	Frecuencia
1	Participación de la dirección	20
2	Vincular SS con los clientes	19
3	Infraestructura organizacional	15
4	Formación y entrenamiento continuo de equipos multifuncionales especializados	15
5	Cooperación, comunicación efectiva y transmisión interna.	13
6	Priorización y selección del proyecto	12
7	Herramientas y técnicas de la metodología SS	12
8	Equipo colaborativo	11
9	Trabajo en equipo	11
10	Vincular SS con los proveedores	10
11	Inversión de recursos adecuados	9
12	Sistema de análisis de datos y métodos estadísticos	9
13	Participación y empoderamiento de los miembros del equipo de trabajo de SS	9
14	Sinergia entre la alta dirección y el equipo de trabajo del proyecto SS	9
15	Habilidades de liderazgo ejecutivo	9
16	Planeación estratégica	8
17	Programa de reconocimiento del desempeño	7

<b>18</b>	Enfoque basado en objetivos a corto y largo plazo	7
<b>19</b>	Coordinación con sistemas de gestión e intercambio de conocimientos	7
<b>20</b>	Selección de líderes de proyecto	7
<b>21</b>	Gestión del cambio cultural (resistencia al cambio)	6
<b>22</b>	Selección, seguimiento y revisión del proyecto SS	6
<b>23</b>	Vinculación de SS con la gestión de recursos humanos	6
<b>24</b>	Sistema adaptable a la implementación de SS	6
<b>25</b>	SS centrado en métricas	6
<b>26</b>	Compromiso de la alta dirección	5
<b>27</b>	Alineación del proyecto SS con los objetivos de la organización	5
<b>28</b>	Integrar SS con los beneficios financieros	5
<b>29</b>	Estructura de roles de la metodología SS	5
<b>30</b>	Seguimiento de resultados	4
<b>31</b>	Expectativas claras del proyecto SS	4
<b>32</b>	Vincular SS con la estrategia empresarial	4
<b>33</b>	Capacidad de respuesta a las influencias externas	4
<b>34</b>	Gestión de procesos	4
<b>35</b>	Determinar el rendimiento del proyecto a través de informes de resultados	4
<b>36</b>	Documentación de casos de éxito	4
<b>37</b>	Sistemas de gestión de la información para la toma de decisiones	4
<b>38</b>	Compromiso de los empleados	4
<b>39</b>	Motivación de la fuerza laboral	4
<b>40</b>	Habilidades de gestión de proyectos	4
<b>41</b>	Espíritu innovador de la empresa	3
<b>42</b>	Auditorías periódicas	3
<b>43</b>	Procedimiento estructurado de SS	3
<b>44</b>	Infraestructura en tecnologías de la información	2
<b>45</b>	Ambiente seguro	2

<b>46</b>	Programas de financiamiento de proyectos SS	2
<b>47</b>	Enfoque de resultados	2
<b>48</b>	Gestión de soportes para la actualización de necesidades del proyecto	2
<b>49</b>	Lenguaje y terminología uniforme	2
<b>50</b>	Diseño del producto	2
<b>51</b>	Gestión de la fuerza laboral del equipo del Proyecto SS	2
<b>52</b>	Evaluación continua del personal	1
<b>53</b>	Infraestructura industrial	1
<b>54</b>	Evaluación comparativa (Benchmarking)	1

Fuente: elaboración propia

# **Enfermedades Crónico-Degenerativas en Personal de Comedores Industriales en Ciudad Juárez**

*Chronic-Degenerative Diseases in Industrial Canteens Personnel in Juárez City*

**Alejandra Flores Sánchez**

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez  
alejandra.flores@uacj.mx  
<https://orcid.org/0000-0002-2002-1330>

**Ángel Noé Alvarado Pizarro**

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez  
noe.alvarado@uacj.mx  
<https://orcid.org/0000-00026841685X>

**Luis Raúl Aguilar Lujan**

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez  
al125887@alumnos.uacj.mx

## **RESUMEN**

Se ha detectado que la condición de salud puede verse afectada por condiciones genéticas y/o hereditarias, ambientales y culturales, como el estilo de vida de la persona en cuestión. Se menciona que existen cuatro factores determinantes de la salud que han tenido una gran influencia: el medio ambiente, los estilos y hábitos de vida, el sistema de salud y los recursos humanos, y la biología humana. Dadas las situaciones que podrían presentarse en el entorno de trabajo, la salud ocupacional es importante en un sector de mayor demanda en la ciudad, como lo es el sector industrial, en base a la revisión de los diferentes factores. Se realizó un examen médico de salud laboral, cumpliendo con el Art. 22 de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales 31/1995 del 8 de noviembre, donde el colaborador, datos y firma del mismo, dan pie a someterse a pruebas médicas que complementen la aptitud laboral conforme a los riesgos en su puesto de trabajo. Existe un mayor porcentaje de trabajadores masculinos que femeninos, con un 52.79% y un 46.21% respectivamente, con una edad promedio de 37 años. En cuestión de probabilidad, en hombres no sanos se presenta en un rango de edad de 40 a 50 años de edad con un 15.7%, representando un 13.6% de hombres no sanos; y en mujeres, en un rango de edad de 29 a 39 años de edad, con un 20.7% de no sanas. Lo anterior se realizó mediante un análisis con el Teorema de Bayes, ya que nos da resultados más certeros y confiables que un análisis descriptivo simple, el cual se presenta también en esta investigación para comprobar lo aquí escrito. Por lo tanto, se concluye que tanto la encuesta para la recopilación de datos como la aplicación del Teorema de Bayes son herramientas fiables para la detección y prevención de riesgos en lugares de trabajo. Sin embargo, existe la oportunidad de adentrarse e indagar más en este punto de crecimiento con estudios y análisis que ayuden y complementen un buen historial clínico.

**PALABRAS CLAVE:** Salud Ocupacional, Enfermedades Crónicas, Industria, Estadística Descriptiva, Teorema de Bayes

## **ABSTRACT**

It has been detected that the health condition can be affected by genetic and/or hereditary, environmental and cultural conditions, adding the lifestyle of the person in question. It is mentioned that there are 4 determinants of health, which have had a great influence: the environment, lifestyles and habits, the health system and human resources, and human biology. Based on the situations that could arise in the work environment, occupational health is important in a sector with the highest demand in the city such as the industrial sector, based on the review of the different factors. An occupational health medical examination was carried out in compliance with Art. 22 of the Occupational Risk Prevention Law 31/1995 of November 8, where the collaborator, data and signature of the same, give rise to undergoing medical tests that complement the work aptitude according to the risks in your job. There is a higher percentage of male workers than female workers, with 52.79% and 46.21% respectively, with an average age of 37 years. In a matter of probability in unhealthy men it occurs in an age range of 40 to 50 years of age with 15.7% representing 13.6% of unhealthy men and in women in an age range of 29 to 39 years of age with 20.7% of unhealthy. The foregoing by carrying out an analysis with Bayes' Theorem since it gives us more accurate and reliable results than a simple descriptive analysis, which is also presented in this investigation, to verify what is written here. Therefore, it is concluded that both the survey for data collection and the application of Bayes' Theorem are reliable tools for the detection and prevention of risks in workplaces, but with the opportunity to delve deeper and investigate more at this point of growth. with studies and analyzes that help and complement a good clinical record.

**KEY WORDS:** Occupational Health, Chronic Diseases, Industry, Descriptive Statistics, Bayes' Theorem

## **INTRODUCCIÓN**

Las enfermedades crónico-degenerativas son las principales causas de muerte en México (INEGI, 2021). La obesidad, que es el principal desencadenante de estas enfermedades, continúa siendo un problema de salud pública en México. Se ha documentado el incremento de la población con esta condición en la última década, con prevalencia en las mujeres, cuya principal causa es el alto consumo de alimentos industrializados (Barquera & Rivera, 2020). Un estudio reciente mostró que las enfermedades crónicas no se presentan solas; generalmente están relacionadas y generan un nivel más alto de letalidad ante infecciones como el COVID-19, entre otros padecimientos (Correa, Villarreal, Galicia, Vargas, Vázquez & Amaro, 2022).

Es de interés realizar una investigación al respecto. Según el INEGI en 2021, en el estado de Chihuahua, las principales causas de muerte fueron las enfermedades del corazón, con un 19.2%, y la diabetes mellitus, con un 12.8%. El patrón es muy similar en la zona fronteriza de Ciudad Juárez.

Por lo tanto, se describieron las enfermedades crónico-degenerativas que se presentan en los empleados de comedores industriales, ya que existe escasa evidencia en relación a la promoción de la salud de los trabajadores. Esto repercute de manera positiva en las empresas; un empleado sano tendrá un mejor desempeño y podrá realizar sus actividades de manera adecuada. Además, se requiere proponer y promover el autocuidado de la salud como parte esencial del personal que labora en las industrias. Asimismo, se pretende demostrar si existen diferentes técnicas para el análisis de datos, algunas más certeras que otras, que nos proporcionen mayor objetividad en el análisis estadístico.

### **Salud Ocupacional**

Bernardino Ramazzini (1633 – 1714) es considerado el padre de la medicina ocupacional. Buscaba promover las medidas de protección y prevención en el periodo en que vivía, contra las enfermedades de aquellas épocas del siglo XIX. De esta manera, se dio a conocer lo que se conoce como "Seguridad e Higiene del trabajo". Ramazzini mencionaba que *"la enfermedad no se conocía por los libros ni por las ciencias fundamentales, sino observando directamente al enfermo en su lugar de trabajo y las condiciones en que lo realizaba"*. Esto le daba una gran sensibilidad y altos valores humanos. Al observar que se trataba de trabajadores que hacían una actividad repetitiva en un lugar determinado, mostraba interés por descubrir las causas de ciertas enfermedades, dando pauta a la medicina preventiva y social (Losardo et al., 2019).

La salud ocupacional se refiere a la protección de la salud en personas activas, intentando controlar los accidentes laborales y/o enfermedades causadas por el desempeño laboral, y reduciendo el riesgo en las condiciones de trabajo, según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2022). La Organización Internacional del Trabajo (OIT) instituyó el 28 de abril como Día Mundial de la Seguridad y Salud en el Trabajo en 2003, considerándolo un entorno prioritario. Se calcula que las pérdidas debidas a indemnizaciones por días de trabajo, interrupciones en la producción, formación, gastos hospitalarios, etc., representan un gasto muy alto, ya que se reporta que anualmente ocurren 270 millones de accidentes laborales y 160 millones de enfermedades (Matabanchoy Tulcan, 2012).

### **Enfermedades crónico-degenerativas**

La calidad de vida relacionada con la salud es un indicador que incorpora la apreciación del individuo (Castillo, 2008). Las enfermedades crónico-degenerativas ponen en riesgo la vida de quien las sufre y alteran las actividades diarias de los demás integrantes de la familia, ya que tanto el enfermo como sus familiares experimentan cambios en diferentes aspectos (Reyes, 2010).

Estas enfermedades azotan a la humanidad; son de etiología compleja, de lenta y progresiva evolución, incurables y generalmente están acompañadas, es decir, quienes las padecen suelen tener más de una (González et al., 2015). La valoración sobre la salud no solo depende de las necesidades y los conocimientos del individuo, sino también de las condiciones de vida y trabajo. Se realizó un estudio que muestra los cambios sociales en el modo y estilo de vida de la población y su relación con el proceso salud-enfermedad, así como los cambios en el modo y estilo de vida que ayudan a promover la salud y prevenir enfermedades. Estos cambios se basan precisamente en la existencia de los factores determinantes del estado de salud y en la modificación que estos

sufren por el constante desarrollo social y científico-técnico. Se constató que el modo y estilo de vida de la población depende del sistema socioeconómico imperante. Los cambios en el modo y estilo de vida determinan cambios en las condiciones y la calidad de vida de las personas y modifican el proceso salud-enfermedad (Espinoza, 2004). Por lo anterior, es de interés describir cuáles son las enfermedades crónico-degenerativas para realizar acciones preventivas al respecto.

Existen enfermedades simples y complejas. En el caso de las simples, como la apendicitis, se puede resolver el problema con una cirugía sin modificar la fisiología del organismo. En contraste, las enfermedades complejas realizan una serie de modificaciones secuenciales en la fisiopatología de un individuo, y suelen ser el resultado de una predisposición genética y factores ambientales. Estas enfermedades pueden afectar en mayor o menor grado la mayoría de los órganos y/o tejidos del individuo y no tienen una solución terapéutica total ni definitiva, ya que son progresivas y crónicas en carácter. Entre las enfermedades crónico-degenerativas (ECD) más conocidas se encuentran:

- Diabetes Mellitus
- Obesidad
- Hipertensión Arterial Sistémica
- Osteomusculares
- Enfermedades Pulmonares
- Enfermedades Neuronales
- Enfermedades Psiquiátricas

El manejo y prevención de estas enfermedades consiste en minimizar y, en caso necesario, evitar la aparición de complicaciones. En el caso de que la enfermedad ya se haya presentado, es importante prevenir futuras secuelas y complicaciones. La falta de prevención puede facilitar la aparición de otras enfermedades oportunistas, ya que el estrés que causa en la persona en cuanto a su salud puede tener resultados letales a largo plazo (González, 2015).

## **METODOLOGIA**

Los materiales que se utilizaron fueron:

- Computadora
- Impresora
- Software (Minitab, Microsoft Windows)
- Encuestas con el personal (Anexo A)

## Métodos

Primero, se realizó una encuesta médica a todo el personal, sin hacer ninguna exclusión de edad y/o sexo, tomando en cuenta su historial médico, que se interroga, dando cumplimiento al Art. 22 de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales 31/1995 del 8 de noviembre. En este artículo se establece que el colaborador, sus datos y firma, dan pie a someterse a pruebas médicas que complementen la aptitud laboral, conforme a los riesgos en su puesto de trabajo. El contenido y/o resultados de los mismos procedimientos serán de conocimiento íntegro del personal de Seguridad e Higiene de la empresa. Dichos resultados se capturaron en una base de datos en Excel® con variables dicotómicas, porcentajes y medias dependiendo del cuestionamiento realizado. Se puede observar un ejemplo de esta encuesta en los Anexos 1a y 1b, variando en el apartado de antecedentes gineco-obstétricos, un apartado específico para mujeres. Se procedió a la clasificación de datos por género y, posteriormente, en dos grupos: "Sanos y No Sanos" para realizar el análisis de datos.

Dentro del análisis descriptivo, se obtuvieron los promedios y los totales de cada género y grupo, esto para tener un panorama general de los padecimientos de ambos grupos, los cuales se muestran en la Tabla I.

**Tabla I.** Promedios y Totales de cada grupo y subgrupo.

	EDAD (PROMEDIO)	LUGAR DE RESIDENCIA (TOTAL FORANEOS)	FUMADOR (TOTAL)	ALCOHOL (TOTAL)	DROGAS (TOTAL)	DEPORTES (TOTAL)	MEDICAMENTOS (TOTAL)	HORAS DE SUEÑO (PROMEDIO)	MADRE (TOTAL FINADO)	PADRE (TOTAL FINADO)
HOMBRES SANOS (140)	35	12	64	92	2	74	10	8	27	40
MUJERES SANAS	37	8	14	34	1	21	7	8	20	38

(72)										
HOMBRES NO SANOS (96)	41	7	25	69	0	54	45	7	28	36
MUJERES NO SANAS (139)	37	14	29	85	0	43	48	7	40	52
	<b>NUMERO DE HIJOS (PROMEDIO)</b>	<b>ENFERMEDAD FAMILIAR (PROMEDIO)</b>	<b>PROBLEMAS GINECOLOGICOS</b>	<b>NUMERO DE EMBARAZOS</b>	<b>ABORTOS</b>	<b>PROBLEMAS MAMARIOS</b>	<b>PAPANICOLAU</b>	<b>ANTICONCEPTIVOS</b>	<b>EMBARAZADA</b>	<b>ALTURA (Mts) (PROMEDIO)</b>
HOMBRES SANOS (140)	2	1	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1.7
MUJERES SANAS (72)	2	1	10	2	7	2	45	12	0	1.56
HOMBRES NO SANOS (96)	2	1	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1.71

MUJERES NO SANAS (139)	2	1	0	2	0	0	89	29	4	1.71
	<b>PESO (Kg) (PROM EDIO)</b>	<b>IMC (PROM EDIO)</b>	<b>ALERGI AS (TOTAL)</b>	<b>LENTES (TOTAL)</b>	<b>ENF. AUDITI VAS (TOTAL)</b>	<b>ENF. PULMO NES (TOTAL)</b>	<b>ENF. CORAZ ON (TOTAL)</b>	<b>PRESIO N ARTERI AL (TOTAL)</b>	<b>ENF. DIGESTI VAS (TOTAL)</b>	<b>DIABET ES (TOTAL)</b>
HOMBR ES SANOS (140)	79.67	27.58	0	0	0	0	0	0	0	0
MUJERES NO SANAS (72)	73.35	30.16	0	0	0	0	0	0	0	0
HOMBR ES NO SANOS (96)	85.15	29.02	23	41	0	4	2	27	7	19
MUJERES NO SANAS (139)	85.15	29.02	23	41	0	4	2	27	7	19
	<b>ENF. RENALES</b>	<b>ENF. NEURO LOGICA</b>	<b>ENF. PSIQUI ATRICA</b>	<b>PROBLE MAS OSTEO</b>	<b>INGRES OS HOSPIT</b>					

	(TOTAL)	S (TOTAL)	S (TOTAL)	MUSCULAR (TOTAL)	ALARIOS (TOTAL)					
HOMBRES SANOS (140)	0	0	0	0	0					
MUJERES SANAS (72)	0	0	0	0	0					
HOMBRES NO SANOS (96)	3	1	3	5	5					
MUJERES NO SANAS (139)	3	1	3	5	5					

### Análisis por Teorema de Bayes

Hoy en día, el Teorema de Bayes tiene un gran impacto en la inferencia estadística, así como en sus diversas aplicaciones en muchas ramas de la ciencia, tales como la genética, epidemiología, ingeniería, ciencia forense, medicina, ecología, psicología, entre otras.

El teorema de Bayes es uno de los teoremas más conocidos e importantes relacionados con la probabilidad. Es uno de esos resultados que, por su sencillez y utilidad, deberían ser conocidos por todos. ¿Utilidad? Sí, utilidad. Y no me refiero solamente a la utilidad dentro de las matemáticas, sino a la utilidad práctica en nuestra vida. Concretamente, vamos a ver cómo el teorema de Bayes nos ayuda a ser un poco más optimistas en el caso de que cierta prueba indique que es casi seguro que padecemos una enfermedad seria, como las enfermedades crónico-degenerativas.

El Teorema de Bayes es ahora una de las piedras fundamentales del trabajo estadístico. Sean  $B_1, B_2, \dots, B_k$  eventos mutuamente excluyentes y exhaustivos. Para cualquier evento se tiene. Teorema 1. Teorema de Bayes

$$P \quad (1)$$

Teorema 2. Teorema de Bayes para Variables Aleatorias. Sean  $X$  y  $\theta$  variables aleatorias con  $f(x \vee \theta)$  y  $\varepsilon(\theta)$

$$\varepsilon \quad (2)$$

Dentro del ensayo Bayesiano tenemos que:

$x$ : Datos (escalar o vector o matriz)

$\theta$ : Parámetro desconocido (escalar o vector o matriz)

$f(x_1, \dots, x_n \vee \theta)$  Verosimilitud de los datos dado el parámetro (desconocido)  $\theta$

$\varepsilon(\theta)$ : Distribución a priori de  $\theta$

Por el teorema anterior

$$\varepsilon(\theta \vee x_1, \dots, x_n) = \frac{f(x_1, \dots, x_n | \theta) \varepsilon(\theta)}{\int_{\Theta} f(x_1, \dots, x_n | \theta) \varepsilon(\theta) d\theta} \quad (3)$$

Esta es llamada la distribución posterior. La inferencia bayesiana se deriva de esta distribución. En la práctica, el denominador de la expresión anterior no necesita ser calculado en general, y la regla de Bayes se escribe como

$$\varepsilon(\theta | x_1, \dots, x_n) \propto f(x_1, \dots, x_n | \theta) \varepsilon(\theta) \quad (4)$$

Por lo tanto, solo necesitamos conocer la distribución posterior hasta una constante de normalización.

El aprendizaje bayesiano será

$$\varepsilon \quad (5)$$

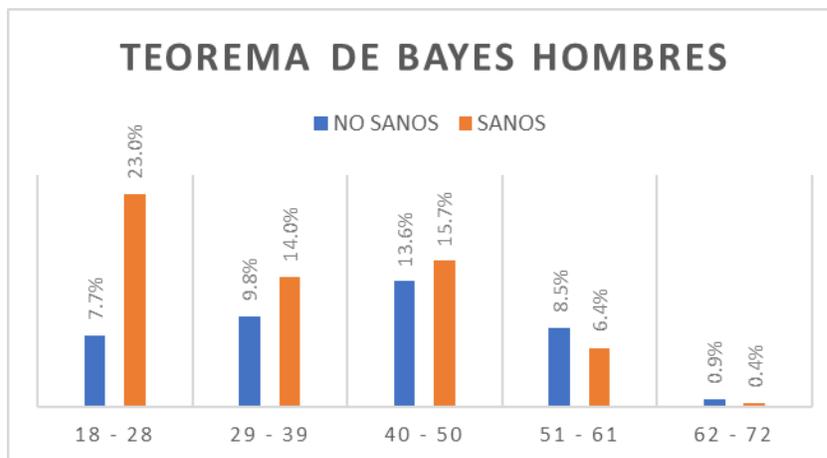
$$\varepsilon(\theta | x_1, x_2) \propto f(x_2 | \theta) f(x_1 | \theta) \varepsilon(\theta) \quad (6)$$

$$\propto f(x_2 | \theta) \varepsilon(\theta \vee x_1) \quad (7)$$

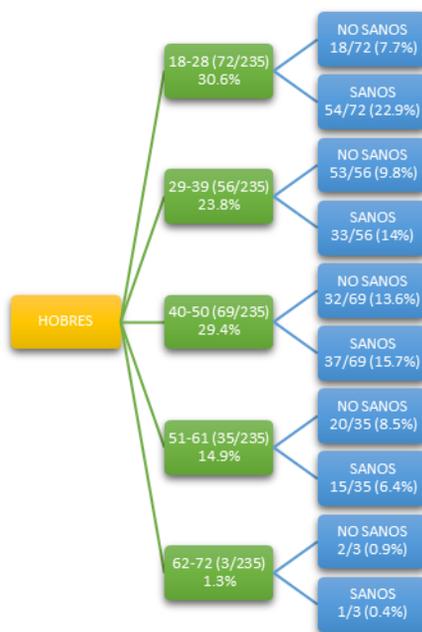
Por lo tanto, el Teorema de Bayes nos muestra como el conocimiento acerca del estado de la naturaleza representada por  $\theta$  es continuamente modificada a medida que nuevos datos son adquiridos (Flores y Rodríguez 2022).

Por lo anterior se aplicó el Teorema de Bayes a cada una de las variables a analizar, en la figura 1 se muestra el porcentaje de Hombres Sanos y No Sanos y en la figura 2 se muestra el árbol de probabilidad que se empleó para el análisis.

**Fig.1** Porcentaje de Hombres Sanos y No Sanos



**Fig.2** Árbol de probabilidades



## RESULTADOS

### Análisis Descriptivo

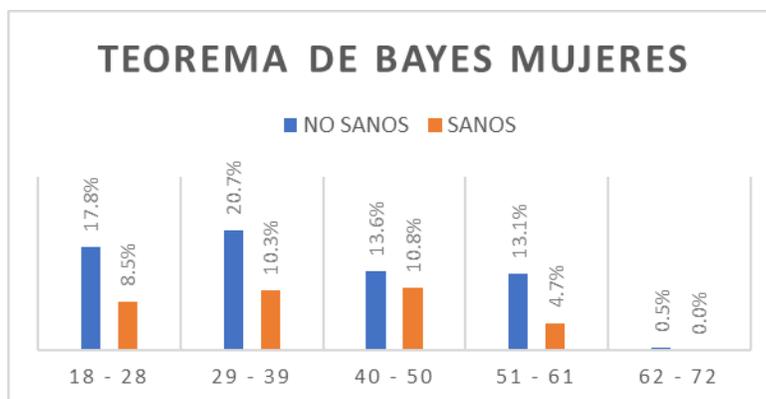
La población total descrita constó de 448 encuestados durante el semestre de enero a julio de 2022. Los resultados mostraron que el 46.21% eran mujeres y el 52.79% hombres. De estos, el 60% de los hombres eran sanos y el 40% no sanos, mientras que el 34% de las mujeres eran sanas y el 66% no sanas. Se observa un mayor porcentaje de mujeres no sanas en comparación con los hombres.

El promedio de edad de los hombres sanos fue de 35 años, mientras que el de los hombres no sanos fue de 41 años. Para las mujeres, el promedio de edad fue el mismo en ambas condiciones de salud. En términos de hábitos de fumar, el 26% de los hombres no sanos eran fumadores, seguido por el 20% de las mujeres no sanas. Sin embargo, el 19% de las mujeres sanas eran fumadoras, lo que podría sugerir que fumar no necesariamente condiciona la aparición de una enfermedad crónico-degenerativa.

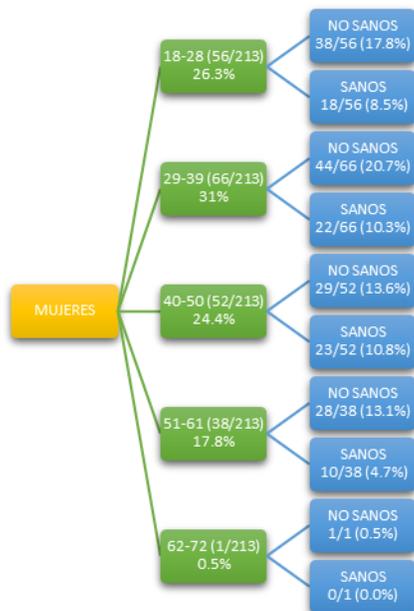
En cuanto al consumo de alcohol, el 71% de los hombres no sanos consumían alcohol. Los hombres no sanos también presentaban el mayor porcentaje (56%) de participación en deportes, así como en el uso de medicamentos. La misma población también mostró un mayor porcentaje de fallecimiento materno, uso de lentes, enfermedades pulmonares, cardíacas, presión arterial alta, enfermedades digestivas, diabetes, enfermedades renales, neurológicas, psiquiátricas, osteomusculares y hospitalizaciones. Todo lo anterior se analizó desde una visión general sin considerar la probabilidad condicional, lo que genera cierta incertidumbre.

Por lo tanto, se aplicó el Teorema de Bayes para obtener conclusiones más certeras y confiables de acuerdo con los datos recabados. A continuación, se muestran ejemplos de los resultados por variable de edades de la primera clasificación que se realizó con las mujeres, aplicando el árbol de probabilidades y los cálculos con el Teorema de Bayes. (Ver Figura 4).

**Fig. 4 (a)** Porcentaje de Mujeres Sanas y No Sanas



**Fig.4(b)** Arbol de probabilidades



Enseguida, basándose en una entrevista, se concentran los datos en la Tabla II con los datos más relevantes en cuanto al mayor porcentaje en las variables en cuestión, y tomando en cuenta los rangos de edad que tienen una probabilidad mayor de presentar alguna complicación en caso de no estar sanos.

**Tabla II.** Relación general de personal no sano en base a las diferentes variables (N/A: No aplica)

VARIABLE	HOMBRES (TOTAL 32)	MUJERES (TOTAL 44)
<b>EDAD</b>	40 - 50	29 - 39
<b>PESO</b>	79.92 kg	79.21 kg
<b>ESTATURA</b>	1.64 mts	1.64 mts
<b>FUMADOR</b>	28%	20%
<b>ALCOHOL</b>	72%	66%
<b>DEPORTES</b>	53%	30%
<b>MEDICAMENTOS</b>	63%	11%
<b>HORAS DE SUEÑO</b>	8 HORAS	8 HORAS
<b>NUM. DE HIJOS</b>	3 HIJOS	3 HIJOS

<b>PROB. GINECOLOGICOS</b>	N/A	11%
<b>ABORTOS</b>	N/A	9%
<b>PROB. MAMARIOS</b>	N/A	2%
<b>PAPANICOLAOU</b>	N/A	0
<b>ANTICONCEPTIVOS</b>	N/A	20%
<b>EMBARAZADA</b>	N/A	5%
<b>IMC</b>	29.88	29.43
<b>ALERGIAS</b>	13%	30%
<b>LENTES</b>	34%	59%
<b>ENF. PULMONARES</b>	2%	2%
<b>ENF. CORAZON</b>	3%	2%
<b>PRESION ARTERIAL</b>	28%	18%
<b>ENF. DIGESTIVAS</b>	16%	32%
<b>DIABETES</b>	28%	5%
<b>ENF. RENALES</b>	3%	5%
<b>ENF. NEUROLOGICAS</b>	0%	7%
<b>PROB. OSTEOMUSCULARES</b>	6%	2%

Con la aplicación del Teorema de Bayes, se obtuvieron resultados más específicos y certeros. Se encontró que las mujeres tienen una mayor probabilidad de tener una enfermedad crónico-degenerativa a una edad más temprana que los hombres, ya que las mujeres no sanas están entre los 29 y 39 años, mientras que los hombres se encuentran entre los 40 y 50 años. Además, se observó que los hombres destacan por ser fumadores, consumir alcohol, tener un índice de masa corporal alto, y padecer enfermedades del corazón, diabetes y enfermedades osteomusculares. Por otro lado, las mujeres se destacan por tener alergias, usar lentes, y padecer enfermedades digestivas, renales y neurológicas.

## **Discusión**

Este estudio proporciona un breve acercamiento al comportamiento de la salud de la población trabajadora en los comedores industriales. A través del análisis, se confirmó que el uso del Teorema de Bayes es más específico y confiable, ya que proporciona información más precisa. Esta información permite centrar la atención en la población más vulnerable a padecer este tipo de

enfermedades, y dirigir las acciones preventivas a la población con los porcentajes más altos. Esto permitirá a los profesionales de la salud contar con un panorama descriptivo para generar intervenciones en la prevención y/o disminución de la aparición de dichas enfermedades.

En este sentido, se demuestra la efectividad del análisis de datos relacionados con temas de salud, tal como lo han confirmado otros estudios en problemas crónicos de salud, como la infección por VIH, donde se determina la mortalidad en la población latina (Coello, Velasco, Mujica & Borbor, 2020); el desarrollo de modelos computacionales inteligentes que permiten realizar un prediagnóstico de las enfermedades crónicas con mayor exactitud (Reyes, Salgado & Velázquez, 2020); y la creación de técnicas de aprendizaje automático con la incorporación de algoritmos para la creación de estrategias en salud, específicamente en la diabetes (Cedeno-Moreno & Vargas-Lobardo, 2019).

Por lo tanto, se detecta la oportunidad de profundizar más en este área de crecimiento con estudios y análisis que ayuden y complementen un buen historial clínico.

## **CONCLUSIÓN**

Se puede observar que los rangos de edades tanto en hombres como en mujeres son muy variables. En cuestiones de enfermedades, no presentarán la misma sintomatología y complicaciones. Por esta razón, tanto hombres como mujeres se analizan por separado. Independientemente de que se encuentren bajo las mismas situaciones de estrés o factores de riesgo en su área laboral, se sugiere complementar las herramientas de trabajo implementadas por organismos gubernamentales para el bienestar de la salud ocupacional de cada empleado. Esto incluye, aparte de los controles sanitarios realizados y monitoreados periódicamente, pruebas bioquímicas de fiabilidad, como el análisis de diferentes analitos de importancia.

Los parámetros y análisis que se realizan para el estado de salud del personal solo se enfocan en la propagación de dichas enfermedades o la prevención de alguna intoxicación. No se cuida como tal al empleado que está detrás del proceso de este servicio. Este se deriva a la alimentación de una cantidad de empleados industriales en maquiladoras de diferentes sectores de la ciudad. Aunque se controle esta propagación, se dejan de lado ciertas cuestiones que son factores de riesgo importantes para la detección y seguimiento oportuno de estos casos. Es relevante complementar el análisis con estudios clínicos, encuestas psicométricas y consultas psicológicas previas a la incorporación a un entorno diferente. Esto permitirá tener un panorama más amplio para llegar a conclusiones más sólidas y certeras.

El personal que se incorpora a un nuevo trabajo o un nuevo entorno no cuenta con la información suficiente acerca del funcionamiento de los sistemas de salud. Por ello, se sugiere la implementación de mayores capacitaciones y pláticas para que estos conozcan el funcionamiento y la organización del sistema de salud y cómo pueden comenzar a atenderse para la prevención de enfermedades crónicas degenerativas, hereditarias y no hereditarias, que pudieran desarrollarse.

Así, se generaría una cultura de conciencia y prevención entre los mismos empleados, con un cuidado integral de su salud.

### **Futuras investigaciones**

Después de esta investigación, se abre un abanico de posibilidades para investigaciones más profundas. Se puede profundizar en el análisis más específico de variables biológicas, mediciones antropométricas por bioimpedancia, y valoración de conceptos como el autocuidado, autoeficacia, riesgo laboral, y el recordatorio alimenticio de 24 horas.

### **AGRADECIMIENTOS:**

Agradecemos a las empresas que nos permitieron aplicar las encuestas, así como al profesional de Enfermería que colaboró en la recolección de datos, a los entrevistados por aceptar participar en la investigación y a todos los involucrados para lograr este proyecto, que sin duda fue de impacto para la empresa y las personas que participaron en el.

### **REFERENCIAS:**

Ángeles Correa, M. G., Villarreal Ríos, E., Galicia Rodríguez, L., Vargas Daza, E. R., Frontana Vázquez, G., Monrroy Amaro, S. J., ... & Santibáñez Beltrán, S. (2023). Enfermedades crónicas degenerativas como factor de riesgo de letalidad por COVID-19 en México. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 46, e40.

Barquera, S., & Rivera, J. A. (2020). Obesity in Mexico: rapid epidemiological transition and food industry interference in health policies. *The Lancet Diabetes & Endocrinology*, 8(9), 746-747.

Castillo Guzmán, Antonio, Arocha Meriño, Carmen, Armas Rojas, Nurys B, Castillo Arocha, Ivette, Cueto Cañabate, Michel Ernesto, & Herrera Giró, Marys Leidis. (2008). Calidad de vida relacionada con la salud en personas con enfermedades crónicas degenerativas. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*, 27(3-4) Recuperado en 22 de abril de 2023, de [HYPERLINK "http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0864-03002008000300003&lng=es&tlng=es"](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03002008000300003&lng=es&tlng=es) \h  
[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0864-03002008000300003&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03002008000300003&lng=es&tlng=es) .

Cedeno-Moreno, D., & Vargas-Lombardo, M. (2019, October). Application of machine *International Engineering, Sciences* learning with supervised classification algorithms: In the context of health. In *2019 7th and Technology Conference (IESTEC)*(pp. 613-618). IEEE.

Coello, A., Velasco, J., Mujica, J., & Borbor, C. (2020). Estadística Bayesiana para medir la mortalidad por VIH en la ciudad de Guayaquil-Ecuador año 2017. *Ecuadorian Science Journal*, 4(1), 21-25.

Espinosa González, L. (2004). Cambios del modo y estilo de vida; su influencia en el proceso salud-enfermedad. *Revista cubana de estomatología*, 41(3), 0-0.

Flores Sanchez, A., & Rodríguez Medina, M. A. (2022). Construcción de modelo para determinar factores significantes en la adquisición del virus del papiloma humano (VPH). *Instituto de Ingeniería y Tecnología*.

González, R. G., Hernández, A. D., & Portillo, J. A. S. (2015). Visión panorámica de las enfermedades crónico-degenerativas. *Revista Internacional de Acupuntura*, 9(2), 57-69.

Instituto Nacional de Geografía y Estadística (2021). Estadística de defunciones resgistradas de enero a junio 2021 . Comunicado de presna Núm. 24/22. Disponible en : HYPERLINK "https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2022/dr/dr2021.pdf" \h  
https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2022/dr/dr2021.pdf

Losardo, D. R. J., Binvignat-Gutiérrez, O., & Pando-Miranda, J. R. (2019). Bernardino Ramazzini: un pionero de la medicina del trabajo. *Revista de la asociación Médica Argentina*, 132(4), p30.

Matabanchoy Tulcan, S. M. (2012). Salud en el trabajo. *Universidad y Salud*, 87-102. México, U. A. (enero de 2023). Division de Ciencias de la Salud, Biologicas y Ambientales. Obtenido de [https://dmd.unadmexico.mx/contenidos/DCSBA/BLOQUE2/GSS/04/HENC/unidad\\_01/descargas/HENC\\_U1\\_Contentido.pdf](https://dmd.unadmexico.mx/contenidos/DCSBA/BLOQUE2/GSS/04/HENC/unidad_01/descargas/HENC_U1_Contentido.pdf)

O.M.S. (5 de octubre de 2022). Obtenido de [who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/physical-activity](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/physical-activity)

Reyes León, P., Salgado Ramírez, J. C., & Velázquez Rodríguez, J. L. (2020). Pre-diagnóstico de enfermedades crónicas mediante la aplicación de modelos de cómputo inteligente. *Computación y Sistemas*, 24(3), 1313-1325.

Reyes Luna Adriana Guadalupe, Garrido Garduño Adriana, Torres Velázquez Laura Evelia, Ortega Silva Patricia, Cambios en la cotidianidad familiar por enfermedades crónicas, Vol.20 Num.1 2010, <https://doi.org/10.25009/pys.v20i1.623>

## **Diseño Robusto de Procesos con Mezclas**

*Robust Design for Mixture Process*

**Ericka Berenice Herrera Ríos**

Tecnológico Nacional de México/I.T. de Cd. Juárez

ericka.hr@itcj.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-6964-5830>

**Jaime Sánchez Leal**

University of Texas at El Paso

jsanchez@utep.com

<https://orcid.org/0000-0002-6324-2379>

**Diago Adiel Sandoval Chavez**

Tecnológico Nacional de México/I.T. de Cd. Juárez

dsandoval@itcj.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-2536-1844>

### **RESUMEN**

Las industrias alimenticias, metalúrgicas, manufactureras y farmacéuticas buscan la optimización de la calidad de sus productos mediante la correcta combinación de las proporciones de sus componentes, así como de las condiciones controlables y no controlables que influyen en los procesos de fabricación. Para lograrlo, se aplica una metodología robusta de diseño de experimentos y superficie de respuesta que optimice la calidad del producto, garantizando la reducción de la variabilidad mediante la incorporación de los efectos del ruido en la media y la varianza. El uso de transformaciones matemáticas permite incorporar los efectos de los factores de ruido a la media utilizada como respuesta. Esta, a su vez, se utiliza en transformaciones para el cálculo de los valores de la razón señal a ruido alternativos, tales como la respuesta dual, la capacidad de proceso y el logaritmo natural de la varianza. La finalidad es comparar y validar la metodología propuesta de diseño robusto contra la metodología tradicional mediante una combinación sistemática de componentes de mezcla, factores de proceso y factores de ruido, tanto en diseños factoriales completos como fraccionados, con y sin mediciones repetidas. En todos los casos, la metodología de valores alternos de la razón señal a ruido como respuesta mostró ser robusta, aun cuando se tiene un número mayor de variables de ruido que de variables de mezcla o de proceso. Los valores óptimos estimados de las variables de mezcla-proceso reducen los efectos de los factores de ruido, logran un mejor ajuste del modelo y reducen significativamente la variabilidad.

**Palabras clave:** Diseño Robusto de Parámetros, Mezclas, Superficie de Respuesta, Diseño de Experimentos

## **ABSTRACT**

Food, metallurgical, manufacturing and pharmaceutical industries seek to optimize the quality of their products through the correct combination of the proportions of their components and the controllable and uncontrollable conditions that influence the manufacturing processes. To achieve the latter, a robust methodology of design of experiments and response surface is applied to optimize the quality of the product, guaranteeing the reduction of variability by incorporating the effects of noise on the mean and variance. Mathematical transformations allow us to incorporate the effects of noise factors to the mean used as a response, which in turn is used in transformations for the calculation of alternative signal-to-noise ratio values such as the dual response, process capability and the natural logarithm of variance. The objective is to compare and validate the proposed robust design methodology against the traditional methodology through a systematic combination of mixture components, process factors and noise factors in complete and fractional factorial designs with and without repeated measurements. In all cases, the methodology of alternating signal-to-noise ratio values as a response was robust, even when there is a greater number of noise variables than mixture or process variables; estimated optimal values of mix-process variables reduce the effects of noise factors, achieve better model fit, and significantly reduce variability.

**Keywords:** Robust Parameter Design, Mixtures, Response Surface, Design of Experiments

## **INTRODUCCIÓN**

En la actualidad, se consumen y comercializan productos elaborados a partir de mezclas, tanto en el campo de la química como en la medicina, alimentos, hidrocarburos, etc. Estos productos requieren del intercambio o combinación de sus componentes, además del ajuste en las proporciones de los ingredientes de la mezcla que los conforman. Generalmente, las empresas desean optimizar los recursos y cumplir con las necesidades del consumidor sin sacrificar la calidad del producto. Por lo tanto, detectar, medir y controlar los factores de ruido a los que estos procesos están sujetos es de vital importancia. De lo contrario, la solución óptima puede no reflejar la realidad debido a la variabilidad en la información que se utiliza.

El diseño robusto de parámetros (DRP) es una herramienta útil en estas circunstancias, puesto que involucra el tamaño de los efectos, las restricciones de los componentes, las variables con efectos fijos en diseños mezcla-proceso (DMP) y mezcla-proceso-ruido (DMPR) para el diseño de productos y procesos robustos. Además, permite la determinación de la región de confianza alrededor de un punto que proporcione otras combinaciones de los componentes con calidad muy similar del producto. Desafortunadamente, la metodología tradicional no necesariamente puede asegurar la minimización de la varianza, sobre todo cuando se tienen situaciones donde los factores de ruido son discretos, pues no permiten obtener modelos con buen ajuste.

En los experimentos con mezclas, los niveles de los factores son dependientes entre sí, por lo que la variable de respuesta depende solamente de las proporciones relativas de cada uno de los componentes presentes en la mezcla y no de la cantidad de estos. El espacio de interés deberá ser

uniforme, la sumatoria de estas proporciones deberá ser la unidad y, por supuesto, ninguna proporción deberá ser negativa.

El diseño básico de los experimentos con mezclas es el Láttice Simplex, cuyo objetivo es encontrar el punto óptimo de la mezcla en la región de la superficie de respuesta donde se maximice la calidad del producto mediante polinomios canónicos. Sin embargo, el diseño Centroide Simplex incluye más puntos en el interior del láttice que sobre los límites del diseño, permitiendo soluciones más precisas.

Si en un diseño de mezcla se desea tomar en cuenta a los factores de proceso (controlables) tales como temperatura, tiempo, fuerza, etc., los cuales afectan la calidad del producto, estos deberán codificarse a dos niveles y disponerse en un arreglo externo el cual será cruzado con un arreglo interno definido para las variables de mezcla con  $2q-1$  observaciones. De este modo, se obtendrá un arreglo cruzado de variables mezcla proceso (VMP), los cuales han sido ampliamente estudiados por Scheffé (1959), Cornell (1988), Gorman y Hinman (1962), Piepel & Cornell (1985), y Myers R. H. (2009).

El DRP es una metodología de mejoramiento que insensibiliza productos y procesos a la variación introducida por factores de ruido (no controlables) de carácter discreto. En esta metodología, los procesos y productos, como sistema, tienen dos tipos de entradas: los factores de control "x" y los factores de ruido "z". En ellos se eligen los niveles óptimos de los factores controlables para obtener una respuesta óptima y minimizar los efectos de los factores de ruido. La respuesta de cada grupo de "x" se tratará como mediciones repetidas, siendo estos indicadores de la media y de la varianza de cierta característica predefinida según Montgomery D. C. (2012), Taguchi (1977), Yong Tan & Hui Ng (2009).

Según Goldfarb & Borror (2003) y Steiner y Hamada (1997), el enfoque de arreglo cruzado de Taguchi no necesariamente minimiza la variabilidad. Por ello, proponen el diseño de arreglo cruzado mediante superficies de respuesta para el problema de mezclas, donde se tienen "q" componentes o proporciones de mezcla ( $x_1, x_2, \dots, x_q$ ), "c" variables o factores de proceso controlables ( $w_1, w_2, \dots, w_c$ ) y "n" variables o factores de ruido no controlables ( $z_1, z_2, \dots, z_n$ ) con el objetivo de minimizar la función de pérdida sujeta a las restricciones de las proporciones. Las variables de proceso y de ruido aparecen de forma lineal, sin embargo, las variables de ruido son discretas. El objetivo es desarrollar una metodología directa y con menos cálculos para el diseño robusto de procesos con mezclas y variables de proceso bajo la influencia de ruido, la cual logre mejorar la capacidad de proceso y la calidad del producto.

## I. EXPERIMENTOS CON MEZCLAS

### I.1. Los Polinomios Canónicos

Los modelos de regresión están estrechamente relacionados con los diseños de experimentos, dado que expresan de manera cuantitativa los resultados de experimentos no planeados. El polinomio:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (1)$$

representa un modelo de regresión lineal múltiple con  $k$  variables regresoras que describe un hiperplano en el espacio  $k$ -dimensional donde  $\beta_0$  es la intersección del plano con la ordenada vertical, los parámetros  $\beta_j$  miden el cambio esperado en  $y$  por cada unidad de cambio en  $x_j$  cuando las variables independientes restantes  $x_i$  donde  $j=0,1,\dots,k$  e  $i \neq j$  se mantienen constantes, por último,  $\varepsilon$  es la variabilidad introducida por el error aleatorio. Ahora bien, si el polinomio de superficie de respuesta es de segundo orden con dos variables independientes el modelo se representa como:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon. \quad (2)$$

Por lo tanto, cualquier representación polinomial de los modelos de regresión de orden  $n$ , puede expresarse matricialmente como:

$$y = X' \beta + \varepsilon, \quad (3)$$

donde;  $y$  es un vector  $nx1$  de las observaciones,  $X$  es una matriz  $n \times p$  que contiene las variables del modelo,  $\beta$  es un vector  $px1$  de los coeficientes regresores y  $\varepsilon$  es el vector  $nx1$  de los errores aleatorios. Al estimar los coeficientes de las variables regresoras mediante el método de mínimos cuadrados, deberá cumplirse la condición de  $n > k$  observaciones de la variable de respuesta.

La Tabla 2.1 muestra el número de observaciones necesarias para formar un modelo, según el número de componentes participantes y el grado del polinomio deseado. En la Figura 2.1 se representa el espacio simplex para tres y cuatro componentes, cuyas proporciones son denotadas por  $x_1, x_2, x_3$  y  $x_4$ . Los puntos de éstos espacios deberán estar  $(m+1)$  uniformemente distribuidos con valores de  $x_i = 0, 1/m, 2/m, \dots, 1$ .

**Tabla 2.1** Observaciones Necesarias para los Diferentes Láttice {q,m}

Número de Componentes $q$	Grado del Polinomio $m$			
	Cuadrático ( $m=2$ )	Especial Cúbico ( $m=2$ )	Cúbico ( $m=3$ )	Cuártico ( $m=4$ )
3	6	7	10	15
4	10	14	20	35
5	15	25	35	70
6	21	41	56	126

Cornell (1988) advierte acerca de la necesidad de comprobar que el modelo sea el adecuado, sobre todo si se tiene especial interés en una región en particular; los puntos adicionales auxilian en la comprobación de la falta de ajuste y mejoran la estimación de la variabilidad de la respuesta de esta. Si la variable de respuesta para cualquiera de los polinomios canónicos es  $\eta$ , entonces los coeficientes con subíndice singular  $i$  representarán a los componentes puros, cuyo cálculo se estima a partir de:

$$\beta_i = \eta_i, \quad (4)$$

donde  $x_i = 1$ , mientras que  $x_j = 0$  para  $i \neq j$  y  $\eta = \eta_i$ . Aquellos que contienen a  $i$  y  $j$  representan a una mezcla binaria  $\eta_{ij}$  (1:1),  $\eta_{ij}$  (2:1),  $\eta_{ij}$  (1:2), si el coeficiente contiene a  $i, j, k$ , entonces la mezcla es ternaria  $\eta_{ijk}$  (1:1:1); el exceso de  $\eta$  sobre el valor calculado de la mezcla de las proporciones  $x_i$  es conocido como *sinergismo* de la mezcla o la no linealidad; si el valor es negativo se le conoce como *antagonismo*, entonces, el sinergismo de la ecuación cuadrática es  $\beta_{ij}x_i x_j$  y  $\beta_{ij}$  es el coeficiente cuadrático del sinergismo binario de los componentes  $i$  y  $j$ , que representa la máxima aportación en el punto  $x_1 = x_2 = \frac{1}{2}$ , es decir, la contribución máxima al modelo a partir de éste término es  $\beta_{12}/4$ .

## 2.2 Diseño Robusto de Parámetros

Según Montgomery (2012), el diseño robusto de parámetros (DRP) es una metodología de mejoramiento basada en el diseño de experimentos para el diseño de productos y procesos insensibles a la variación inducida por factores de ruido, los cuales, a diferencia de los factores de proceso, pueden controlarse durante la experimentación.

Taguchi, hace referencia a los procesos y productos como sistemas, los cuales tienen dos tipos de entrada: los factores de control denotados como  $x$  (los cuales son indicadores de la media y de la varianza de cierta característica predefinida y serán tratadas como réplicas), y los factores de ruido denotados como  $z$ ; el sistema cruza ambos factores, previamente dispuestos en arreglos ortogonales con el fin de elegir los niveles óptimos de los factores controlables para obtener una respuesta óptima e incluir los efectos de los factores de ruido, los cuales traen la variabilidad al sistema. Específicamente, lo que se desea es encontrar el valor óptimo de la respuesta con varianza mínima (Taylor, 1996), a través de una función que maximice (o minimice) una respuesta primaria sujeta a una restricción o respuesta secundaria.

Desafortunadamente, en el arreglo cruzado que propone Taguchi nos lleva a un experimento muy grande pero no necesariamente minimiza la variabilidad. Un diseño de arreglo combinado utilizado en superficies de respuesta no requiere la estructura del arreglo interior y exterior donde los factores tienen dos niveles (Cornell 1990). En el problema específico de mezclas, se tienen  $q$  componentes  $X = (x_1, x_2, \dots, x_q)$ ,  $c$  variables de proceso controlables  $W = (w_1, w_2, \dots, w_c)$  y  $n$  variables de ruido  $Z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$ , éstas dos últimas se asumen continuas. Si se desea minimizar la función de pérdida sujeta a las restricciones de las proporciones, la forma general del modelo es:

$$Y = f(x, w, z) = X' \beta + X' A w + X' \Delta z + X' \Lambda V z + \varepsilon, \quad (5)$$

donde:

- $Y$  es el valor de la función mezcla-proceso-ruido,
- $\beta$  son los coeficientes del modelo de mezclas,
- $A$  son los coeficientes de las interacciones de las variables de mezcla y controlables del proceso,
- $\Delta$  son los coeficientes de las interacciones de las variables de mezcla y el ruido,
- $\Lambda$  son los coeficientes de las interacciones de las variables de la mezcla, las de proceso controlables y las de ruido,
- $X, W$  y  $Z$  son los vectores de mezcla, proceso y ruido.

Según Goldfarb, et al. (2003), las variables de proceso y de ruido aparecen de forma lineal y pueden ser codificadas y centradas de tal manera que su media es 0; las variables de ruido pueden centrarse utilizando datos históricos o teóricos del proceso a  $\pm 1\sigma_{noise}$  o  $\sigma_z^2$ , así como también su varianza.

Entonces el valor esperado de la respuesta  $E(Y)$  está dado por :

$$E(Y) \approx f(X, W, Z = 0) = X' \beta + X' A W \quad (6)$$

cuya varianza será:

$$V(Y) = [\Delta' X + V' | \quad |' X]' \Sigma_z [\Delta' X + V' \Lambda' X] + \sigma^2 \quad (6)$$

y  $\Sigma_z$  es una matriz diagonal simétrica  $n \times n$  que contiene a los elementos  $\sigma_{z_i}^2$  y  $E(z_i) = 0$  y  $E(\varepsilon) = 0$ . Bajo el supuesto de que  $Z$  es aleatoria con media 0 y varianza  $\sigma_{z_i}^2$  conocida; los niveles de  $z_i$  están codificados a  $\pm \sigma_{z_i}^2$  por lo que esta será igual a uno. Las variables de ruido fueron tratadas como efectos aleatorios para llegar a la deducción de las expresiones anteriores, sin embargo, para el diseño y experimentación serán tratados como efectos fijos.

### 2.3 Índice de Capacidad Real del Proceso $Cpk$

La capacidad del proceso tiene un impacto considerable sobre muchos problemas de decisión gerenciales que se presentan en el ciclo del producto y la variación del proceso, además de estar directamente relacionado con el monitoreo de la proporción de no conformantes (NC) del mismo, por lo tanto, los índices de capacidad se utilizan para relacionar la media y la desviación estándar del proceso con las especificaciones de ingeniería tales como tolerancias y valores nominales (target)  $T$ .

El índice del desempeño del proceso  $Cpk$  relaciona la distancia entre la media del proceso y la especificación más próxima (Kane, 1986), como se muestra a continuación:

$$Cpk = \min \left( \frac{LES - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LEI}{3\sigma} \right), \quad (7)$$

siempre y cuando la media del proceso  $\mu$  sea diferente al target  $T$ ; se prefiere la utilización de este índice sobre el índice  $Cp$ , aunque no prevee la probabilidad de  $NC$  sin embargo la limita; es decir,

ésta nunca es mayor que  $P(NC) = 2\Phi(-3Cpk)$ . (Pearn, Kotz, & Johnson, 1992) El valor esperado del  $Cpk$  está dado por:

$$E[\hat{Cpk}] = \frac{1}{3b_f} \left\{ \frac{d}{\sigma} - \sqrt{\frac{2}{\pi n}} e^{-\frac{\lambda}{2}} - \frac{|\mu - T|}{\sqrt{n}} (1 - 2\Phi[-\sqrt{\lambda}]) \right\} \quad (8)$$

mientras que su varianza está dada por:

$$V[\hat{Cpk}] = \frac{f}{9(f-2)} \left\{ \left( \frac{d}{\sigma} \right)^2 - 2 \frac{d}{\sigma} * \left[ \sqrt{\frac{2}{\pi n}} e^{-\frac{\lambda}{2}} + \frac{\sqrt{\lambda}}{n} (1 - 2\Phi[-\sqrt{\lambda}]) \right] + \frac{\lambda+1}{n} \right\} - \{E[\hat{Cpk}]\}^2 \quad (9)$$

$$b_f = \sqrt{\frac{2}{f}} \frac{\Gamma\left(\frac{f}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{f-1}{2}\right)} \quad (10)$$

donde  $\lambda = n(\mu - T)^2 \sigma^{-2}$  es conocido como el parámetro de no centralidad  $\mu \neq T$ .

Generalmente, las compañías utilizan un  $Cpk = 1.66$  como objetivo mínimo aceptable para características de resistencia, seguridad o críticas, sin embargo, otras compañías requieren que sus procesos internos así como los de los proveedores alcancen un  $Cpk = 2.0$ , lo que produce una tasa de artículos defectuosos de 0.0018 ppm, a este proceso se le conoce como *proceso seis sigma*, debido a que la distancia desde la media del proceso hasta la especificación más cercana es de seis desviaciones estándar.

La razón por la que se requiere un índice mayor de 2.0 es que resulta difícil mantener la media del proceso centrada por periodos largos de tiempo. Si la media del proceso se desplaza fuera del centro 1.5 desviaciones estándar, el  $Cpk$  disminuye a  $4.5 / 3 = 1.5$ . Si se supone que el proceso tiene una distribución normal, el número de partes defectuosas del proceso desplazado es de 3.4 partes por millón.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se plantea a detalle la metodología propuesta de esta investigación, la cual comprende la transformación de las variables de ruido, el diseño del experimento para los datos transformados, la generación de las observaciones mediante funciones matemáticas, por último, la aplicación de la función transformadora que permitirá el análisis y verificación de la presente investigación.

### 3.1 Método Propuesto.

Sea  $f(X, W, Z) = Y_n \forall Y \in R^n$  la función de la respuesta de Goldfarb para modelos con mezclas, y sea  $g(X, W, \cdot) = Y_m \forall Y \in R^m$  una función de la respuesta en términos de mezcla y proceso; entonces se desea hacer una transformación  $T: Y_n \rightarrow Y_m$  cuya variabilidad introducida por el ruido  $Z$  está implícita, de tal manera que:

$$G(X, W, \cdot) = X' \beta + X' A W, \quad (11)$$

por lo tanto, la estimación de la media y la varianza introducida por  $Z$  es de tal manera que el arreglo interno está compuesto por los factores fijos  $X$  y  $W$  y el arreglo externo es la transformación de la función homogenizada de la varianza dado por el logaritmo natural de la varianza. La transformación está determinada por la relación entre el promedio de las medidas repetidas y las  $k$  variables de ruido como se muestra a continuación:

$$\hat{G}_i(X, W, \cdot) = \frac{1}{n} (\mathbf{1})'(Y_i) = \bar{Y}, \quad (12)$$

$$s_i^2 = \frac{1}{n-1} Y'Y - \mathbf{1}'YY'. \quad (13)$$

A partir de ésta transformación se obtuvieron los estimadores  $\ln(s^2)$  utilizado para homogenizar los efectos de los factores de ruido en la media, el  $Cpk$ , y la  $RD$  como señal razón a ruido alternos, donde éste último se obtiene a partir de una transformación del  $Cpk$  como se muestra a continuación, dado que el objetivo de la función es encontrar un punto óptimo máximo:

$$RD = LES - \bar{Y} - s^2 \quad (14)$$

### 3.2 Diseño del Experimento y Generación de los Datos

Se diseñaron experimentos con dos variables de mezcla, una variable de proceso y dos variables de ruido con seis medidas repetidas; las observaciones fueron generadas mediante el uso de la simulación utilizando la función de Rosenbrock para las variables de mezcla y proceso, en algunos casos la función esférica y en otros la función de Zakharov para las variables de ruido, el error se generó mediante la función de aleatoriedad bajo el supuesto de normalidad como se muestra a continuación:

$$f(X, W, Z) = f(X, W) + f(Z) + \varepsilon, \quad (15)$$

Los datos obtenidos se disponen en un arreglo cruzado, donde el arreglo interno se compone de las variables de mezcla y proceso y el arreglo externo por las variables de ruido con medidas repetidas. El radio de la respuesta se magnificó cinco y diez veces con la finalidad afinar la precisión y exactitud de los resultados, así como para verificar que el método propuesto es consistente con los resultados obtenidos por el método de Goldfarb.

### III. RESULTADOS

Se aplicó la función de transformación (12) a las observaciones generadas mediante (15) para el análisis con la media estimada y el  $\ln(s^2)$ , además se calcularon los estimadores  $\hat{C}_{pk}$ , y  $RD$  mediante las ecuaciones (7) y (14), además del enfoque de Goldfarb. Para precisar los resultados se diseñaron experimentos con un radio magnificado cinco y diez veces la respuesta bajo diferentes combinaciones de los factores mezcla, proceso y ruido.

#### 4.1 Resultados del Análisis con la Media y el Logaritmo Natural de $s^2$

##### 4.1.1 Diseño (3,1,2)

El análisis con la media y el logaritmo natural de la varianza utilizando las observaciones de la Tabla 4.1, dió como resultado el siguiente modelo cuyo análisis se muestra en las Figura 4.1 y 4.2:

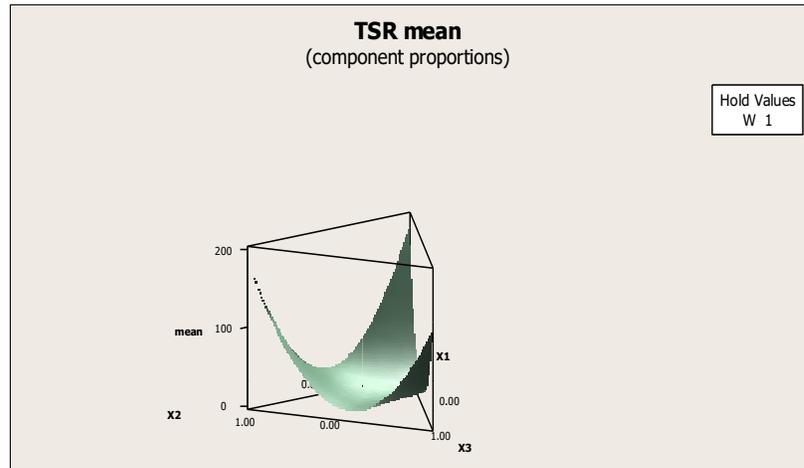
$$\begin{aligned} \text{Media} = f(x, w) = & 185.1x_1 + 193.0x_2 + 192.7x_3 - 649.3x_1x_2 \\ & - 620.0x_1x_3 - 656.3x_2x_3 + 1073.0x_1x_2x_3 \\ & + w[-69.5x_3 + 74.4x_1x_3 + 67.8x_2x_3] \end{aligned}$$

La Figura 4.2 muestra la superficie de respuesta del modelo cuyo punto óptimo se encuentra en (1/3, 1/3, 1/3, 1) con una respuesta mínima de 8.6516 como lo muestra la Figura 4.3.

**Tabla 4.1** Transformación de los Datos Respecto a las Variables de Ruido

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$w$	Media	RD	Cpk	$\ln(s^2)$
1.000	0.000	0.000	-1	185.986	154.660	11.7746	3.13084
0.000	1.000	0.000	-1	192.923	148.794	12.2017	2.97576
0.000	0.000	1.000	-1	260.432	81.507	7.2405	2.94203
0.500	0.500	0.000	-1	26.022	319.753	35.6618	2.24660
0.500	0.000	0.500	-1	52.097	290.198	23.8411	2.88678
0.000	0.500	0.500	-1	44.905	298.473	26.6809	2.70864
0.333	0.333	0.333	-1	21.704	322.256	30.1910	2.60575
1.000	0.000	0.000	1	184.757	157.886	13.7774	2.83118
0.000	1.000	0.000	1	191.693	153.024	15.8808	2.46382
0.000	0.000	1.000	1	122.813	218.261	16.6734	3.07023
0.500	0.500	0.000	1	26.985	319.126	36.8994	2.17251
0.500	0.000	0.500	1	17.283	327.950	34.5780	2.36076
0.000	0.500	0.500	1	10.981	331.426	27.3177	2.86910
0.333	0.333	0.333	1	7.622	336.084	30.7586	2.65126

**Figura 4.1** Superficie de Respuesta para la Media



**Figura 4.2** Análisis con la Media y Logaritmo Natural de  $s^2$

**Regression for Mixtures: mean versus X1, X2, X3, W**  
 Estimated Regression Coefficients for mean (component proportions)

Term	Coef	SE Coef	T	P	VIF
X1	185.1	0.4318	*	*	1.611
X2	193.0	0.4318	*	*	1.611
X3	192.7	0.4318	*	*	1.611
X1*X2	-649.8	2.1155	-307.15	0.000	1.796
X1*X3	-620.0	2.1155	-293.07	0.000	1.796
X2*X3	-656.3	2.1155	-310.25	0.000	1.796
X1*X2*X3	1073.0	14.8836	72.10	0.000	1.630
X3*W	-69.5	0.4299	-161.66	0.000	1.597
X1*X3*W	74.4	1.7887	41.62	0.000	1.284
X2*X3*W	67.8	1.7887	37.91	0.000	1.284

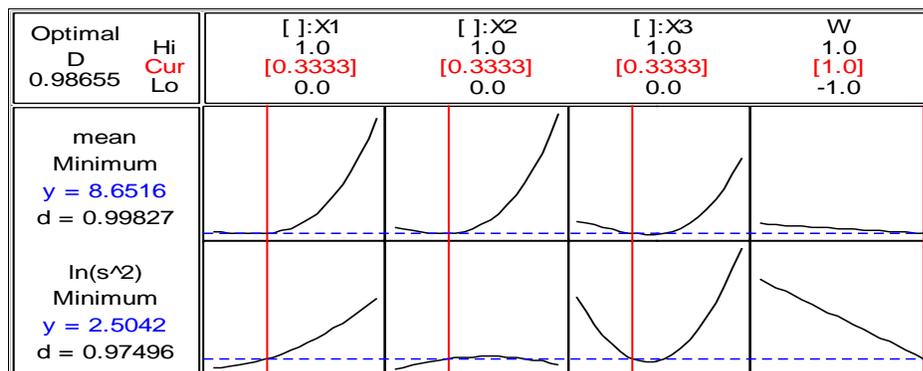
\* NOTE \* Coefficients are calculated for coded process variables.

S = 0.610680 PRESS = 54.1443  
 R-Sq = 99.99% R-Sq(pred) = 99.95% R-Sq(adj) = 99.99%

Analysis of Variance for mean (component proportions)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	103497	103496.9	11499.7	30835.93	0.000
Component Only						
Linear	2	61	79.9	39.9	107.11	0.000
Quadratic	3	90575	77361.4	25787.1	69147.33	0.000
Special Cubic	1	1938	1938.4	1938.4	5197.75	0.000
Component*W						
Linear	1	9816	9746.1	9746.1	26133.74	0.000
Quadratic	2	1108	1107.7	553.8	1485.07	0.000
Residual Error	4	1	1.5	0.4		
Total	13	103498				

**Figura 4.3** Punto Óptimo con la Media y el Logaritmo Natural de  $s^2$



Los resultados de diseños adicionales bajo diferentes combinaciones de factores de mezcla, proceso y ruido se muestran por número de corrida y tipo de diseño como se muestra a continuación:

**Tabla 4.2** Resultados de los Diseños (3,1,2)

Corrida y Tipo	Tipo	Óptimo	Deseado	S	%R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>
02 Radio 5 Factorial Completo	(1/3,1/3,1/3, 1)	7.2057	0.000	0.785	99.95
Radio 5 Fact. Completo s/M. Rep.	(1/3,1/3,1/3, 1)	7.4271	0.000	1.32876	99.98%
01 Radio 10 Factorial Completo	(1/3,1/3,1/3, 1)	-30.396	0.000	4.9	99.99
02 Radio 10 Factorial Completo	(1/3,1/3,1/3, 0)	-35.958	0.000	107.59	99.34
03 Radio 10 Factorial Completo	(1/3,1/3,1/3, 1)	57.040	0.000	4.35	99.99

#### 4.1.2 Diseño (2,2,2)

**Tabla 4.3** Resultados de los Diseños (2,2,2)

Corrida y Tipo	Tipo	Óptimo	Deseado	S	%R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>
Radio 10 Factorial Completo	(1/2,1/2,1, 1)	1395.80	0.000	228.5	92.2
Radio 10 Fact. Fraccionado	(1/2,1/2,1, 1)	1486.28	0.000	129.074	96.77

### 4.1.3 Diseño (2,2,3)

Tabla 4.4 Resultados de los Diseños (2,2,3)

Corrida y Tipo				Tipo	Óptimo	Deseado	S	%R2adj
01	Radio	10	Factorial	(1/2,1/2,1,1)	1860.02	0.000	102.98	99.07
02	Radio	10	Factorial	(1/2,1/2,1,1)	1956.19	0.000	67.96	99.6
01	Radio	10	Fact.	(1/2,1/2,1,1)	2100.67	0.000	35.06	99.9
02	Radio	10	Fact.	(1/2,1/2,1,1)	1940	0.000	89.39	99.34

## 4.2 Resultados del Análisis con el $\hat{C}_{pk}$

### 4.2.1 Diseño (3,1,2)

Utilizando los datos de la tabla 4.1, obtuvimos el análisis de regresión de mínimos cuadrados de la figura 4.4 para el  $\hat{C}_{pk}$  como respuesta, a partir del cual se obtuvo el siguiente modelo cúbico especial:

$$\hat{C}_{pk} = f(x, w) = 14.8x_1 + 14.9x_2 + 12.6x_3 + 52.6x_1x_2 + 55.1x_1x_3 + 69.6x_2x_3 - 116.4x_1x_2x_3 + w[5.7x_3 + 11.5x_1x_3]$$

El punto máximo se encontró en (1/2, 0, 1/2, 1) con una respuesta óptima de 33.2332, lo cual indica que éste se localiza en una de las fronteras de la región de soluciones como lo muestra la Figura 4.5

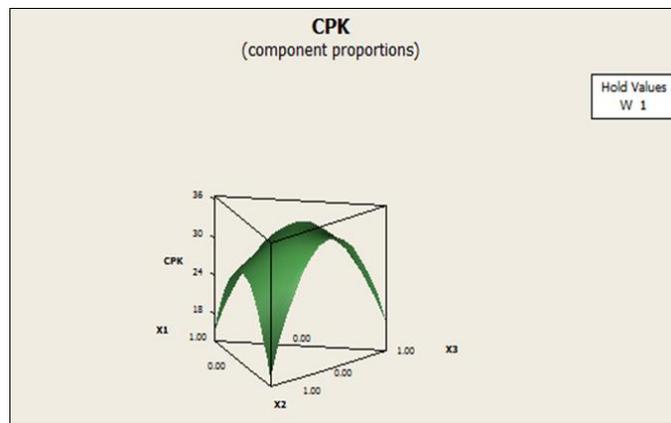
Figura 4.4 Análisis de Regresión del  $\hat{C}_{pk}$

Regression for Mixtures: CPK versus X1, X2, X3, W						
Estimated Regression Coefficients for CPK (component proportions)						
Term	Coef	SE Coef	T	P	VIF	
X1	14.8	1.0226	*	*	1.611	
X2	14.9	1.0226	*	*	1.611	
X3	12.6	1.0226	*	*	1.611	
X1*X2	52.6	5.0097	10.51	0.000	1.796	
X1*X3	55.1	5.0097	11.01	0.000	1.796	
X2*X3	69.6	5.0097	13.89	0.000	1.796	
X1*X2*X3	-116.4	35.2464	-3.30	0.021	1.630	
X3*W	5.7	0.9109	6.23	0.002	1.278	
X1*X3*W	11.5	4.2262	2.71	0.042	1.278	
S = 1.44618 PRESS = 174.928						
R-Sq = 98.92% R-Sq(pred) = 81.85% R-Sq(adj) = 97.18%						

Analysis of Variance for CPK (component proportions)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	8	953.437	953.437	119.180	56.98	0.000
Component Only						
Linear	2	5.706	6.804	3.402	1.63	0.286
Quadratic	3	759.149	672.140	224.047	107.13	0.000
Special Cubic	1	22.826	22.826	22.826	10.91	0.021
Component* W						
Linear	1	150.367	81.271	81.271	38.86	0.002
Quadratic	1	15.388	15.388	15.388	7.36	0.042
Residual Error	5	10.457	10.457	2.091		
Total	13	963.894				

Figura 4.5 Superficie de Respuesta del *Cpk*



La tabla 4.5 muestra los resultados de otras corridas bajo diferentes condiciones para éste diseño.

Tabla 4.5 Resultados de los Diseños (3,1,2)

Corrida y Tipo	Tipo	Óptimo	Deseado	S	%R2adj
02 Radio 5 Factorial Completo	(1/3,1/3,1/3, 1)	33.020	MAX	2.55	93.44
Radio 5 Fact. Completo s/M. Rep.	(0,1,0, 1)	45.7661	MAX	10.05	30.71

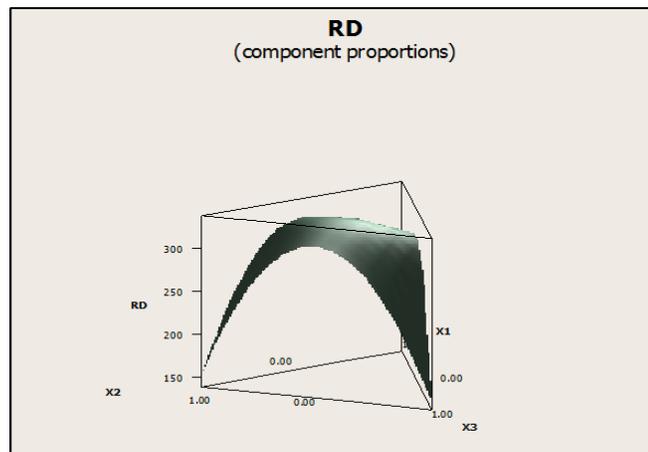
### 4.3 Resultados del Análisis con la Respuesta Dual

#### 4.3.1 Diseño (3,1,2)

El máximo óptimo de la  $RD$  se encontró en el punto  $(1/3, 1/3, 1/3, 1)$  con una respuesta de 336 ilustrado en la superficie de respuesta de la figura 4.7, mediante el siguiente modelo cúbico especial, el cual se obtuvo del análisis de regresión de la figura 4.8:

$$(RD) = f(x, w) = 158x_1 + 151x_2 + 150x_3 + 648x_1x_2 + 620x_1x_3 + 661x_2x_3 - 1076x_1x_2x_3 + w[69x_3 - 67x_1x_3 - 66x_2x_3]$$

Figura 4.6 Superficie de Respuesta de la RD.



#### Regression for Mixtures: RD versus X1, X2, X3, W

Estimated Regression Coefficients for RD (component proportions)

Term	Coef	SE Coef	T	P	VIF
X1	158	0.9994	*	*	1.611
X2	151	0.9994	*	*	1.611
X3	150	0.9994	*	*	1.611
X1*X2	648	4.8962	132.29	0.000	1.796
X1*X3	620	4.8962	126.62	0.000	1.796
X2*X3	661	4.8962	135.10	0.000	1.796
X1*X2*X3	-1076	34.4476	-31.24	0.000	1.630
X3*W	69	0.9950	69.73	0.000	1.597
X1*X3*W	-67	4.1398	-16.07	0.000	1.284
X2*X3*W	-66	4.1398	-15.82	0.000	1.284

\* NOTE \* Coefficients are calculated for coded process variables.

S = 1.41340 PRESS = 886.938

R-Sq = 99.99% R-Sq(pred) = 99.15% R-Sq(adj) = 99.98%

Analysis of Variance for RD (component proportions)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	103967	103967.4	11551.9	5782.62	0.000
Component Only						
Linear	2	70	89.1	44.5	22.29	0.007
Quadratic	3	90852	77620.6	25873.5	12951.66	0.000
Special Cubic	1	1950	1950.0	1950.0	976.10	0.000
Component* W						
Linear	1	10143	9713.9	9713.9	4862.53	0.000
Quadratic	2	952	952.0	476.0	238.27	0.000
Residual Error	4	8	8.0	2.0		
Total	13	103975				

Figura 4.7 Análisis de Regresión para la *RD*

Tabla 4.6 Resultados de los Diseños (3,1,2)

Corrida y Tipo	Tipo	Óptimo	Deseado	S	%R2adj
02 Radio 5 Factorial Completo	(1/3,1/3,1/3, 1)	336.00	MAX	2.024	99.95
Radio 5 Fact. Completo s/M. Rep.	(1/3,1/4,5/12,1)	339.606	MAX	6.27561	99.50
01 Radio 10 Factorial Completo	(1/3,1/3,1/3, 1)	5171.92	MAX	113.240	99.27
02 Radio 10 Factorial Completo	(1/3,1/3,1/3, 1)	5084.82	MAX	12.99	99.99
03 Radio 10 Factorial Completo	(1/3,1/3,1/3, 1)	5094.74	MAX	15.1924	99.99

#### 4.3.2 Diseño (2,2,2)

Tabla 4.7 Resultados de los Diseños (2,2,2)

Corrida y Tipo	Tipo	Óptimo	Deseado	S	%R2adj
Radio 10 Factorial Completo	(1/2,1/2, 1, 1)	3802.57	MAX	228.06	95.11
Radio 10 Fact. Fraccionado	(1/2,1/2,-1, 1)	3626.33	MAX	125.019	97.28

#### 4.3.3 Diseño (2,2,3)

Tabla 4.8 Resultados de los Diseños (2,2,3)

Corrida y Tipo	Tipo	Óptimo	Deseado	S	%R2adj
01 Radio 10 Factorial Completo	(1/2,1/2,1, 1)	3451.97	MAX	320	90.16
02 Radio 10 Factorial Completo	(1/2,1/2,-1, 1))	3453.69	MAX	135.82	98.22
01 Radio 10 Fact. Fraccionado	(1/2,1/2,0, 0)	2896.75	MAX	327.7	89.05
02 Radio 10 Fact. Fraccionado	(1/2,1/2, 0, 0)	3080.30	MAX	809.321	54.57

#### 4.4 Resultados del Análisis con la Metodología de Goldfarb

##### 4.4.1 Diseño (3,1,2)

Los datos del Anexo 1 se analizaron aplicando la metodología de mezclas propuesta por Goldfarb, cuyo modelo matemático se obtuvo del análisis de regresión mostrado en la figura 4.11:

$$\hat{Y} = f(x, w, z) = 185.1x_1 + 193.0x_2 + 192.7x_3 - 649.8x_1x_2 - 620.0x_1x_3 - 656.3x_2x_3 + 1073.0x_1x_2x_3 + w + 67.8x_2x_3 + wz_1z_2[5.8x_1x_3 - 47.1x_1x_2x_3],$$

donde el valor esperado para la media está dado por:

$$E(Y) = f(x, w, z = 0) = 185.1x_1 + 193.0x_2 + 192.7x_3 - 649.8x_1x_2 - 620.0x_1x_3 - 656.3x_2x_3 + 1073.0x_1x_2x_3 + w + 74.4x_1x_3 + 67.8x_2x_3$$

y la varianza es la razón de cambio respecto a  $z_1z_2$  como sigue:

$$\begin{aligned} \partial f / \partial z_1 &= 4.6415x_1x_3wz_2 - 62.94675x_1x_2x_3wz_2, \\ (\partial f / \partial z_1)z_2 &= 4.6415x_1x_3w - 62.94675x_1x_2x_3w, \end{aligned}$$

por lo tanto, la varianza estimada de la respuesta está dada por:

$$V(Y) = \sigma_{z_1}^2 \sigma_{z_2}^2 [4.6415x_1x_3w - 62.94675x_1x_2x_3w]^2 + \sigma^2.$$

Figura 4.8 Análisis de Regresión para la Media.

Regression for Mixtures: y versus X1, X2, X3, W, Z1, Z2						
Estimated Regression Coefficients for y (component proportions)						
Term	Coef	SE Coef	T	P	VIF	
X1	185.1	0.5526	*	*	1.611	
X2	193.0	0.5526	*	*	1.611	
X3	192.7	0.5526	*	*	1.611	
X1*X2	-649.8	2.7070	-240.03	0.000	1.796	
X1*X3	-620.0	2.7070	-229.03	0.000	1.796	
X2*X3	-656.3	2.7070	-242.45	0.000	1.796	
X1*X2*X3	1073.0	19.0456	56.34	0.000	1.630	
X3*W	-69.5	0.5501	-126.33	0.000	1.597	
X1*X3*W	74.4	2.2889	32.53	0.000	1.284	
X2*X3*W	67.8	2.2889	29.63	0.000	1.284	
X1*X3*W*Z1*Z2	5.8	2.2103	2.62	0.009	1.198	
X1*X2*X3*W*Z1*Z2	-47.1	16.3265	-2.88	0.004	1.198	
* NOTE * Coefficients are calculated for coded process variables.						
S = 3.82830 PRESS = 5110.49						
R-Sq = 99.81% R-Sq(pred) = 99.79% R-Sq(adj) = 99.80%						
Analysis of Variance for y (component proportions)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	11	2484084	2484084	225826	15408.54	0.000
Component Only						
Linear	2	1455	1917	959	65.41	0.000
Quadratic	3	2173787	1856671	618890	42228.10	0.000
Special Cubic	1	46521	46521	46521	3174.23	0.000
Component* W						
Linear	1	235577	233908	233908	15959.98	0.000

Quadratic	2	26584	26584	13292	906.95	0.000
Component* W * Z1 * Z2						
Quadratic	1	37	101	101	6.87	0.009
Special Cub	1	122	122	122	8.32	0.004
Residual Error	324	4749	4749	15		
Lack-of-Fit	44	440	440	10	0.65	0.958
Pure Error	280	4309	4309	15		
Total	335	2488832				

La respuesta mínima óptima de 7.5491 se localizó en el punto (1/3,1/3,1/3,1.0,1.0,1.0) como lo muestra la Figura 4.12 así como también la superficie de respuesta de la Figura 4.13.

Figura 4.9 Optimización de la Media como Respuesta

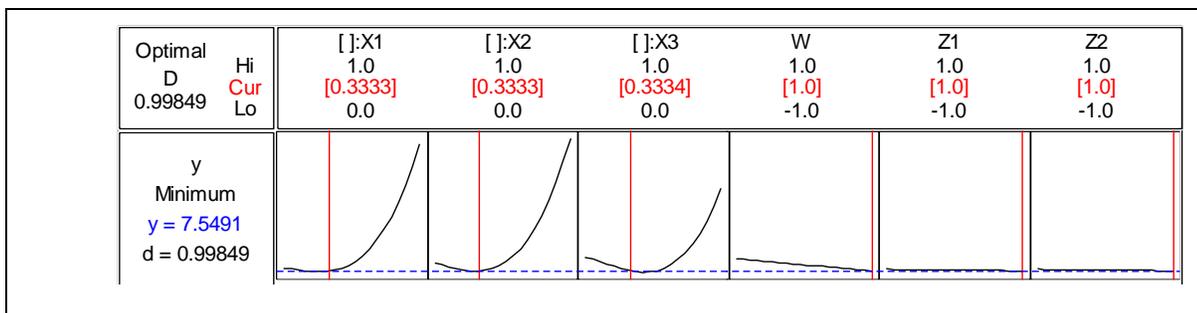
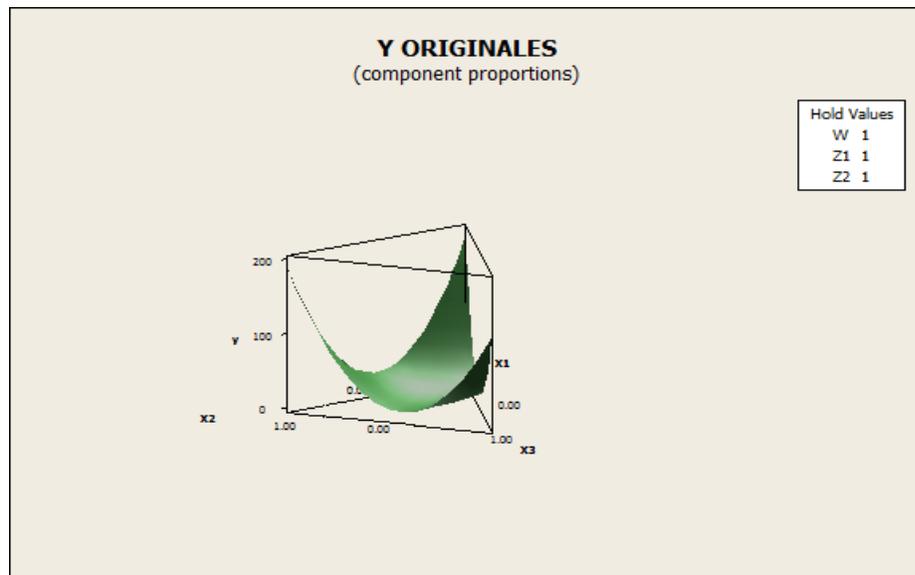


Figura 4.10 Superficie de Respuesta de la Media de Goldfarb



La tabla 4.9 muestra los resultados de otras corridas bajo diferentes condiciones para éste diseño de experimentos

Tabla 4.9 Resultados de los Diseños (3,1,2)

Corrida y Tipo	Tipo	Óptimo	Deseado	S	%R2adj
02 Radio 5 Factorial Completo	(1/3,1/3,1/3,1,0,-1)	6.86648	0.000	3.92	99.79
Fact.Completo s/M.Repetidas	(1/3,1/3,1/3,1,-1,1)	0.97081	0.0000	1.6227	99.36
01 Radio 10 Factorial Completo	(1/3,1/3,1/3,1, 1,1)	49.1519	0.000	30.24	99.24
02 Radio 10 Factorial Completo	(1/3,1/3,1/3, 1,0,1)	36.2184	0.000	28.93	99.95
03 Radio 10 Factorial Completo	(1/3,1/3,1/3,1,-1,-1)	42.870	0.000	29.17	99.25

#### 4.4.2 Diseño (2,2,2)

Tabla 4.10 Resultados de los Diseños (2,2,2)

Corrida y Tipo	Tipo	Óptimo	Deseado	S	%R2adj
Radio 10 Factorial Completo	(1/2,1/2,1,1,-1,1)	1271.15	0.000	691.068	55.85
Radio 10 Fact. Fraccionado	(1/2,1/2,-1,1,1,-1)	1465.90	0.000	673.469	50.27

#### 4.4.3 Diseño (2,2,3)

Tabla 4.11 Resultados de los Diseños (2,2,3)

Corrida y Tipo	Tipo	Óptimo	Deseado	S	%R2adj
01 Radio 10 Factorial Completo	(1/2,1/2,1,1,-1,1,1)	1755.86	0.000	688.25	68.76
02 Radio 10 Factorial Completo	(1/2,1/2,1,1,-1,-1,1)	1784.92	0.000	695.6	68.87
01 Radio 10 Fact. Fraccionado	(1/2,1/2,1,1,1,1,-1)	1772.41	0.000	704.09	69.03
02 Radio 10 Fact. Fraccionado	(1/2,1/2,1,1,1,1,-1)	1772.42	0.000	658.81	71.96

#### 4.5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El resultado del análisis para un diseño factorial completo con 2 variables de mezcla, 2 variables de proceso y 2 factores de ruido (2,2,2), se encuentra el punto mínimo óptimo (1/2, 1/2, 1, 1) en 1395.80 y 1486.28 cuando el diseño es fraccionado; ambas respuestas son mayores comparadas con el resultado arrojado por la metodología de Goldfarb en el mismo punto, sin embargo la metodología propuesta exhibe un mejor ajuste de 92.2% contra 55.85% y una variabilidad menor 228.5 contra 691.068. Si se desea explorar el comportamiento de los diseños factoriales fraccionados, encontramos que de manera similar la media mínima óptima es de 1486.25 contra 1465.9 de la metodología de Goldfarb con una variabilidad significativamente menor de 129.074 y un ajuste de 96.77%, contra 673.469 y 50.27%, ahora bien, la RD supera el ajuste de los modelos anteriores con 95.11% y variabilidad similar coincidiendo en el mismo punto, sin embargo, en modelos fraccionados el Cpk reduce significativamente la variabilidad a 0.067.

Al agregar una variable de ruido a un diseño similar (2,2,3), se encontró que la media óptima se encuentra en el punto (1/2, 1/2, 1, 1) con diferentes resultados (1860.02 y 1956.19) con un ajuste por encima del 99% en ambas corridas. Al contrastar estos resultados con la metodología de Goldfarb, se observa que el punto mínimo óptimo es el mismo, los valores de la respuesta son ligeramente menores, no obstante, la variabilidad es seis veces mayor con un ajuste del 68% aproximadamente. En el caso de los diseños fraccionados el punto óptimo coincide con el diseño factorial y aunque la respuesta óptima es un valor más alto (2100.67 y 1940), existe una diferencia muy grande entre la variabilidad y el ajuste de Goldfarb. Confirmando los resultados anteriores mediante el RD y Cpk se encontró que la variabilidad arrojada por éste último en todos los casos es menor a 0.2 con un ajuste muy cercano o mayor en algunas ocasiones al de las otras respuestas

Experimentos con tres componentes de mezcla, un componente de proceso y dos de ruido (3,1,2) con radio cinco como respuesta, localizan el punto mínimo óptimo en el centroide (1/3,1/3,1/3,1) con valores de 7.20 y 8.65 en ambas corridas y variabilidad menor de 1.5. La corrida sin medidas repetidas exhibe el mismo comportamiento con una variabilidad ligeramente mayor, por lo que se decide magnificar el radio de la respuesta a diez con el fin de observar más precisión en los resultados; se encontró que el comportamiento es consistente con el punto de la superficie de respuesta con un ajuste superior al 99% y variabilidad menor a los resultados por la metodología de Goldfarb. La RD y el Cpk confirman la ubicación del punto óptimo, sin embargo, la variabilidad disminuye en por lo menos 60% con un ajuste del 99.99% en todos los casos de análisis. De éste punto en adelante sólo se analizaron diseños con respuestas de radio diez para diseños factoriales y fraccionados con medidas repetidas debido a la precisión de los cálculos.

En los diseños factoriales completos, conforme aumentan las variables de ruido, los modelos exhiben diferentes localizaciones del punto óptimo en la superficie de respuesta por lo que la RD y el Cpk se utilizan para encontrar la solución óptima. En el método de Goldfarb el valor de la media como respuesta siempre es menor, sin embargo, la variabilidad se triplica y el ajuste se reduce a la mitad. En los diseños factoriales completos los resultados anteriores son aún más marcados, es más difícil la coincidencia del punto óptimo, sin embargo, la variabilidad disminuye

dramáticamente y mejora el ajuste (los cambios son extremos) por lo que se debe tener cuidado. El Cpk es más sensible y consistente, en la mayoría de los casos con mejores propiedades

#### IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La función de transformación  $G(X, W, \cdot)$  incorpora los efectos de los factores de ruido al modelo de superficie de respuesta, lo cual permite estimar los valores óptimos de las variables de mezcla y proceso  $x^*$  y  $w^*$  de la media en conjunto con logaritmo natural de la varianza como respuesta, minimizando así los efectos de los factores de ruido.

La expresión de la varianza de la superficie de respuesta cuyas variables de ruido han sido incorporadas, es menor en todos los casos probados a la propuesta por Goldfarb sin necesidad de un arreglo cruzado, esta metodología alterna de diseño robusto permite optimizar problemas de mezclas con factores de control y de ruido de una manera más directa, sencilla y además reduce su variabilidad.

Por todo lo anterior, se afirma que la metodología propuesta es robusta, sencilla y directa para el diseño de procesos con mezclas y variables de proceso bajo la influencia de ruido, las cuales impactan directamente en la capacidad del proceso, en la calidad del producto y en la práctica profesional, lo cual facilita su aplicación.

#### REFERENCIAS

Bisell, A. F. (1990). How Reliable is Your Capacity Index. *Journal of the Royal Statistical Society*, 39(3), 331-340. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/2347383>.

Cornell, J. A. (1990). Experiments With Mixtures: Designs, Models and the Analysis of Mixture Data. In J. A. Cornell, *Experiments With Mixtures: Designs, Models and the Analysis of Mixture Data*. John Wiley & Sons.

Goldfarb, H. B., Borror, C. M., & Montgomery, D. C. (2003). Mixture-Process Variable Experiments with Noise Variables. *Journal of Quality Technology Vol. 35*, 393-405.

Gorman, J. W., & Hinman, J. E. (1962). Simplex Lattice Designs for Multicomponent Systems. *Technometrics, Vol. 4, No 4*, 463-487.

Kocherlakota, S. (1992, December). Process Capability Index: Recent Developments. *Sankhya: The Indian Journal of Statistics*, 54(3), 352-369. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/25052756>

Montgomery, D. C. (2012). *Diseo de Experiementos*.

Myers, R. H. (2009). *Response Surface Methodology* (Third ed.). Hoboken, New Jersey, usa: Wiley.

Pearn, W. L., Kotz, S., & Johnson, N. L. (1992, October). Distributional and Inferential Properties of Process Capability Indices. *Journal of Quality Technology*, 24(4), 216-231.

Piepel, G. F., & Cornell, J. A. (1985). Models for Mixture Experiments When Response Depends on the Total Amount. *Technometrics Vol. 25*, 219-227.

Scheffé, H. (1959). Experiments with Mixtures. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B. Vol. 21 No. 1*, 238.

Steiner, S. H., & Hamada, M. (1997). Making Mixture Robust to Noise and Mixing Measurement Errors. *Journal of Quality Technology Vol. 29* , 441-450.

Taguchy, G. (1977). *Experimental Design*. Tokyo: Maruzen.

Taylor, W. A. (1996). Comparing Three Approaches to Robust Design: Taguchi Versus Dual Response Versus Tolerance Analysis. *Fall Technical Conference*. Taylor Enterprises, Inc.

Yong Tan, M. H., & Hui Ng, S. (2009). Estimation of the mean and variance response surface when the means and variances of the noise variables are unknown. *IIE Transactions*, 942-956.

## **Establecimiento de Factores de Riesgo para Mujeres con Cáncer Cérvico Uterino mediante Mahalanobis-Taguchi**

*Establishment of Risk Factors for Women with Uterine Cervical Cancer by Mahalanobis-Taguchi*

**Luz Elena Terrazas Mata**

Tecnológico Nacional de México

lterrazas@itcj.edu.mx

<https://0000-0003-1396-1751>

**Manuel Alonso Rodríguez Morachis**

Tecnológico Nacional de México

mmorachis@itcj.edu.mx

<https://0000-0003-1581-7737>

**Francisco Zorrilla Briones**

Tecnológico Nacional de México

fzorrilla@itcj.edu.mx

<https://0000-0003-1581-7737>

### **Resumen:**

En este documento se muestran los resultados obtenidos para establecer los factores de riesgo principales que afectan a las poblaciones que sufren de cáncer de cuello uterino (CaCu) en el norte de México, específicamente en el estado de Chihuahua. Esta es una investigación transversal exploratoria en donde se reportan los resultados derivados de un análisis estadístico utilizando el sistema Mahalanobis Taguchi (MTS) realizado con datos adquiridos de expedientes y entrevistas a un grupo de 127 pacientes diagnosticadas con CaCu durante el período 2013-2017 en la clínica de colposcopia de la Jurisdicción Sanitaria II. El análisis se realizó considerando dieciocho factores para destacar los determinantes significativos, además de demostrar las diferencias existentes entre dos grupos: mujeres que obtienen resultados negativos de cáncer y aquellas a las que se les diagnostica esta enfermedad. Los factores destacados en esta investigación son: resultados de citología (Coef S/R=5.8537), antecedentes de infecciones de transmisión sexual (Coef S/R=1.07491), cervicitis (Coef S/R=0.56.39) y estado civil (Coef S/R=.41830). El MTS es un modelo que sirve como una herramienta no invasiva para determinar los factores que desarrollan el CaCu en las mujeres de un área geográfica determinada. Este modelo minimiza el número de variables necesarias para un diagnóstico efectivo y establece las áreas de tratamiento para un producto o paciente en función de la gravedad de las condiciones.

**Palabras clave:** Sistema de Mahalanobis Taguchi, Cáncer de Cuello Uterino; Factores de Riesgo; modelo estadístico

## **Abstract**

This document shows the results obtained to establish the main risk factors that affect populations suffering from cervical cancer (CCU) in northern Mexico, specifically in the state of Chihuahua. This is an exploratory cross-sectional investigation where the results derived from a statistical analysis using the Mahalanobis Taguchi (MTS) system are reported, carried out with data acquired from records and interviews with a group of 127 patients diagnosed with CCU during the period 2013-2017 in the colposcopy clinic of the Jurisdicción Sanitaria II. The analysis was carried out considering eighteen factors to highlight the significant determinants, in addition to demonstrating the differences between two groups, women who obtained negative cancer results and those who were diagnosed with this disease. The factors highlighted in this research are: Cytology results Coef S/R=5.8537; History of sexually transmitted infections Coef S/R=1.07491; Cervicitis Coef S/R=0.56.39 and Marital status Coef S/R=.41830. The MTS is a model that serves as a non-invasive tool to determine the factors that develop CCU in women of a given geographic area. This model minimizes the number of variables necessary for an effective diagnosis and establishes treatment areas for a product or patient based on the severity of the conditions.

**Key words:** Mahalanobis Taguchi system, Uterine Cervical Cancer, risk factors

## **Introducción**

La salud es un encargo social ineludible del Estado y de la sociedad en su conjunto, incluida la academia. Las muertes por cáncer parecen mantener su incidencia, especialmente aquellas que afectan a las mujeres, como el cáncer cérvico-uterino (CaCu). Ahora se reconoce que, mediante un enfoque integral y multidisciplinario que incluya la prevención, el diagnóstico temprano y el tratamiento eficaz, sería posible abatir la alta tasa de mortalidad mundial por CaCu y otras patologías de alta incidencia (Donatus et al., 2019). En este sentido, los métodos estadísticos tienen el potencial de jugar un rol protagónico en la identificación de los factores significativos que se asocian con grupos determinados de pacientes.

El CaCu es la segunda causa de muerte por cáncer en la mujer en México. Cada año se presentan 13,960 defunciones, lo que representa una incidencia de 23.3 casos por cada 100,000 mujeres. Tan solo en el año 2013, en el grupo etario de 25 años y más, se registraron 3,771 defunciones, es decir, una tasa de 11.3 muertes por cada 100,000. Las entidades con mayor tasa de mortalidad fueron Morelos (18.6), Chiapas (17.2) y Veracruz (16.4). En ese mismo año ocurrieron 269,332 decesos de mujeres, de las cuales 37,361 (13.8%) se asociaron con tumores malignos (www.gob.mx, 2023).

En cuanto al estado de Chihuahua, este ocupa el tercer lugar a nivel nacional en mortalidad por tumores malignos. La entidad supera la tasa a nivel nacional, que actualmente es de 76 defunciones por 100,000 habitantes (Heraldo de Chih., 2022).

El sistema MTS se utiliza para encontrar variables significativas utilizando el reconocimiento de patrones en las variables que forman parte de un sistema multidimensional. Este sistema es una

combinación de la distancia de Mahalanobis (DM) con los conceptos de la metodología Taguchi (Nafarrate, 2015).

La determinación de factores de riesgo con el sistema MTS no está limitada a investigaciones médicas; este puede ser ampliamente utilizado en cualquier sector: económico, industrial, educativo, etc. Por ejemplo, la investigación realizada por Sans-Martín et al., en 2016, para determinar el liderazgo educativo con el modelo MTS, destacó los factores relevantes para el estudio del capital educativo de un país, en donde hay la posibilidad de estimar similitudes entre países respecto a las variables medidas. Otra investigación, realizada por Ketkar y Vaida en 2014, clasificó candidatos a ingresar en el programa de Maestría en Administración de acuerdo a su idoneidad para este, seleccionando y preseleccionando los criterios que influyen en la evaluación de los mejores estudiantes para el programa. Presentaron una evaluación multicriterio utilizando el enfoque MTS, el cual puede ayudar a otras instituciones a seleccionar estudiantes de mejor calidad.

### **Historia natural del CaCu**

Según la literatura referente a la historia natural del CaCu, diferentes estudios han demostrado que está precedida por una serie de lesiones celulares dentro del epitelio endocervical. Estas lesiones, consideradas preinvasivas, son denominadas como neoplasia intraepitelial cervical (NIC) o lesiones intraepiteliales escamosas (LIE) según el sistema Bethesda. Histológicamente, la clasificación de LIE depende del grado de la lesión celular dentro del epitelio, y esta clasificación está diseñada para estandarizar el sistema de informes para la prueba del Papanicolaou (PAP). Se basa en la descripción morfológica de las lesiones, lo que permite identificar datos que sugieren la infección por el virus del papiloma humano (VPH) y las alteraciones celulares relacionadas con el desarrollo del CaCu, que se identifican como células escamosas atípicas de importancia indeterminada (CEA-II) y lesión intraepitelial escamosa (LIE) de grado bajo y alto (Hernández, 2015).

Un gran número de estudios epidemiológicos, moleculares y experimentales realizados en la búsqueda de asociaciones causales ha demostrado que el VPH es el principal agente etiológico del CaCu; el factor principal está relacionado con la infección por el virus del papiloma humano, que actúa como una causa necesaria pero no suficiente (Hernández, 2015).

El sistema MTS se utiliza para encontrar variables significativas utilizando el reconocimiento de patrones en las variables que forman parte de un sistema multidimensional. Este sistema es una combinación de la distancia de Mahalanobis (DM) con los conceptos de la metodología Taguchi (Nafarrate, 2015).

Con el propósito de especificar los factores significativos destacados en las mujeres diagnosticadas con CaCu que viven en el norte de México, en comparación con mujeres sanas de la misma zona, se analizaron los registros de la historia clínica de 40 pacientes diagnosticadas con CaCu obtenidos mediante una biopsia y con el informe para la prueba de Papanicolaou. La recolección de datos se realizó en la clínica de colposcopia que forma parte de la Jurisdicción Sanitaria II, ubicada en Ciudad Juárez, Chihuahua, México, durante el periodo 2013 a 2017. Por otro lado, para obtener la

información a analizar de mujeres sanas, se aplicó un cuestionario para registrar la historia clínica con los aspectos más importantes del grupo No Saludable (mujeres diagnosticadas con CaCu) a 120 mujeres que obtuvieron como resultado sin lesiones en la prueba de Papanicolaou y un cuello uterino aparentemente sano en el examen realizado en el laboratorio del Hospital de la Mujer en Cd. Juárez, Chihuahua, durante el último semestre del año 2019.

Esta investigación tiene como objetivo determinar los factores más significativos a través de arreglos con factores correlacionados y no correlacionados, utilizando la distancia de Mahalanobis, los arreglos ortogonales de Taguchi (AO) y la relación señal a ruido (S/N).

### **Materiales y Métodos.**

Esta investigación es un estudio basado en el reconocimiento de patrones de varias variables con diferentes escalas de medida, útiles para la toma de decisiones.

La investigación se ajusta a las disposiciones de la Declaración de Helsinki en 1995 (revisada en [www.wma.net](http://www.wma.net), 2020), y se siguieron todas las directrices éticas según lo requerido para llevar a cabo una investigación humana, incluido el cumplimiento de los requerimientos legales en México.

El análisis de datos se realizó con Microsoft Excel®, Minitab™ y Matlab.

### **Análisis de datos de sistemas multidimensionales.**

Un sistema multidimensional puede contener un número muy alto de variables; sin embargo, no todas serán útiles para el diagnóstico de la situación. Por lo tanto, es importante identificar y elegir las que tienen el mayor impacto en el fenómeno observado, con el fin de reducir el conjunto de factores a analizar (Nafarrate, 2015).

Encontrar variables importantes es un proceso extenso y repetitivo porque las inferencias sobre cada variable no se pueden hacer de forma independiente, ya que podrían correlacionarse entre sí.

A lo largo de este proceso de aprendizaje iterativo, las variables a menudo se agregan o eliminan del estudio.

Por lo tanto, la complejidad de la mayoría de los fenómenos requiere que el investigador recopile las observaciones de muchas variables diferentes (Johnson, 2007).

En el MTS, el Espacio Mahalanobis (EM, grupo de referencia) se obtiene utilizando las variables estandarizadas de datos saludables o normales. El EM se puede utilizar para discriminar entre objetos normales y anormales. Una vez establecido este EM, el número de atributos se reduce usando Arreglos Ortogonales (AO) y una relación Señal a Ruido S/R, evaluando la contribución de

cada atributo del sistema (Rodríguez, M.A. et al., 2009). Las diferentes etapas del método MTS se resumen a continuación:

Etapa I: Construcción de una Escala de Medición

- Seleccione un grupo de referencia con variables adecuadas y observaciones que sean lo más uniformes posible.
- Utilice el grupo de referencia como base o punto de referencia de la escala.

Etapa II: Validación de la Escala de Medición

- Identificar las condiciones fuera del grupo de referencia.
- Calcule la DM de estas condiciones y verifique si coinciden con el juicio del tomador de decisiones.
- Calcule las relaciones S/R para determinar la precisión de la escala.

Etapa III: Identificar las Variables útiles (Etapa de desarrollo)

- Determine el conjunto útil de variables utilizando matrices ortogonales y relaciones señal-ruido.

Etapa IV: Diagnóstico Futuro con Variables útiles

- Supervise las condiciones utilizando la escala, que se desarrolla con la ayuda del útil conjunto de variables. Con base en los valores de las DM, se pueden tomar las acciones correctivas apropiadas.

### 2.1.1. Arreglos ortogonales (AO)

La optimización del diseño, como parte del diseño de experimentos, implica el uso de relaciones señal-ruido, gráficos lineales y arreglos ortogonales.

Los AO se aplican en la metodología Taguchi para evaluar el diseño de un producto con respecto a la robustez en relación con el ruido. Esto indica lo resistente que es un producto a los efectos de factores incontrolables.

La forma convencional de denominar los arreglos es:

$$L_a(b^c) \quad (1)$$

Donde:

- a. es el número de ejecuciones.
- b. es el número de niveles de cada factor.
- c. es el número de columnas del arreglo.

Un arreglo puede tener factores con muchos niveles, aunque es común que se utilicen factores de dos o tres niveles. (Taguchi, G., Chowdhury, S., Wu, Y, 2020)

Los AO se utilizan en MTS para seleccionar las variables o factores importantes que se estudian, ya que reducen las diferentes combinaciones del conjunto original de variables.

### 2.1.2. Distancia de Mahalanobis (DM)

La DM es una medida de distancia entre variables que se dio a conocer en 1936. Es diferente de la distancia euclidiana porque tiene en cuenta la correlación entre variables. Esta distancia se utiliza para determinar la similitud o los patrones entre dos variables aleatorias multidimensionales. Si hay dos variables aleatorias con la misma distribución de probabilidad definida como:  $\vec{x} \rightarrow y$  y  $\vec{y} \rightarrow$  con matriz de covarianza  $\Sigma$  es:

$$dm = \sqrt{(\vec{x} - \vec{y})^T \Sigma^{-1} (\vec{x} - \vec{y})} \quad (2)$$

Esta ecuación es muy sensible a la estructura de correlaciones del grupo de referencia. En los métodos clásicos, la DM se utiliza para hallar la proximidad de un punto desconocido a la media del grupo. La observación se clasifica en un punto cuyo centro tenga la distancia más corta (Escobedo, M.S, 2008)

En el MTS, la DM se modifica mediante una escala adecuada. Se trata de definir una base o punto de referencia de la escala y medir las distancias de las observaciones desconocidas con respecto al punto de referencia (Cudney, E.A., Hong, J., Jugulum, Rajesh.,; Paryani, K.; Ragsdell, K.M; Taguchi, G., 2007)

### 2.2. Sistema Mahalanobis Taguchi (MTS)

Una de las ventajas del MTS es introducir una escala basada en todas las características de las variables para medir el grado de anormalidad. Para obtener esta escala, la DM se adapta dividiendo la distancia original por el número de variables  $n$ ; también minimiza el número de variables necesarias para un diagnóstico eficaz (que es el objetivo principal de este análisis), predice el desarrollo de un sistema multidimensional en diversas condiciones; establece zonas de tratamiento para un producto o paciente en función de la gravedad y el coste, con lo que el responsable de la toma de decisiones puede adoptar acciones apropiadas (Cudney, et al. 2007)

El MTS es superior a otros métodos como se puede ver en (Aragón, 2010) donde se compara con el modelo Logit para datos binarios muestra varias limitaciones en el análisis de datos.

Entre otros métodos, se puede encontrar el análisis de componentes principales, que se centra en reducir los datos analizados e interpretarlos, pero su desventaja es que todas las variables originales son necesarias para calcular los componentes principales, por lo que este método no ayuda a reducir la dimensión en términos de variables originales. ( Nafarrate, 2015)

### 2.3. Metodología para desarrollar MTS de pacientes con cáncer de cuello uterino

La figura 1. representa la metodología para desarrollar el modelo aplicado para resaltar los factores en mujeres con CaCu de Ciudad Juárez, Chih, Mex. Registradas en Jurisdicción Sanitaria II.

### 2.4. Cuatro pasos en el MTS.

Se crea un conjunto de datos estándar con sujetos sanos, en el que se definen las variables consideradas de condición Saludable.

#### 2.4.1. Creación del espacio de Mahalanobis (EM)

La información de 118 mujeres a las que se les realizó el examen citológico en el Hospital de la Mujer durante el periodo enero-mayo de 2019 y que sus resultados fueron libres de cáncer y sin displasias leves o severas, además se realizó una encuesta para obtener la información relacionada con la historia clínica de cada una de ellas, este grupo de datos se considera Saludable. La tabla 2 muestra los factores a analizar.

A continuación, se calcula la matriz de correlaciones con la información del grupo de mujeres Saludables, así como su inversa. La tabla 3 muestra la matriz de correlaciones y la tabla 4 muestra la matriz inversa de correlación de la matriz.

**Tabla 2.** Factores relacionados con el CCaCu en la Jurisdicción Sanitaria II

Variable	Nombre	Descripción	Consulta (S/R)
$x_1$	Edad	Años	A
$x_2$	Estado Civil	Soltera, Casada, Divorciada y Unión Libre	B
$x_3$	Escolaridad	Primaria, secundaria, bachillerato, universidad , sin estudios	C
$x_4$	Religión	Católicos, cristianos, testigos de Jehová, otros	D
$x_5$	Antecedentes familiares de cáncer	Si/No	E
$x_6$	Menarquia	Edad de la primera menstruación	F
$x_7$	Ritmo menstrual	Regular, Irregular, abundante, escaso	G
$x_8$	IVSA	Inicio de vida sexual activa	H
$x_9$	Parejas	Número de parejas sexuales	J
$x_{10}$	Embarazos	Número de embarazos	K
$x_{11}$	Partos Vaginales	Partos Vaginales	L
$x_{12}$	Tipo de anticonceptivo	Hormonal, oral, inyección hormonal, implante, OTB, DIU, Ninguna	M
$x_{13}$	Prevención Citológica	Primera vez en la vida, primera vez después de tres años, posteriores	N
$x_{14}$	Situación ginecobs tétrica	Posparto o post aborto, uso de hormonales, DIU, histerectomía, tratamiento farmacológico, embarazo actual, tratamiento colposcópico previo, ninguno.	O
$x_{15}$	Exploración	Cérvix aparentemente sano, cérvix anormal, lesión del cérvix, cervicitis, leucorrea, hemorragia anormal, cérvix no observado.	P

<b>X<sub>16</sub></b>	Antecedentes de enfermedades de transmisión sexual	Si/No	Q
<b>X<sub>17</sub></b>	Cervicitis	Si/No	R
<b>X<sub>18</sub></b>	Resultado de la citología	Negativo para lesión intraepitelial o malignidad, dentro del límite normal, carcinoma in situ, carcinoma de células escamosas, adenocarcinoma endocervical in situ, edencarcinoma, endometrial o extrauterino)	S

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.** Matriz de correlaciones del grupo sano.

	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>	X <sub>14</sub>	X <sub>15</sub>	X <sub>16</sub>	X <sub>17</sub>	X <sub>18</sub>
<b>X<sub>1</sub></b>	1.0 000																	
<b>X<sub>2</sub></b>	0.2 921	1.0 000																
<b>X<sub>3</sub></b>	- 0.2 264	- 0.2 444	1.0 000															
<b>X<sub>4</sub></b>	- 0.1 341	- 0.1 250	0.0 172	1.0 000														
<b>X<sub>5</sub></b>	- 0.0 886	- 0.0 296	0.0 448	- 0.2 105	1.0 000													
<b>X<sub>6</sub></b>	- 0.0 230	- 0.0 288	0.1 241	- 0.1 052	- 0.0 116	1.0 000												
<b>X<sub>7</sub></b>	- 0.1 816	- 0.0 229	0.0 641	- 0.1 050	- 0.0 396	0.0 045	1.0 000											
<b>X<sub>8</sub></b>	0.2 494	- 0.1 261	0.2 800	- 0.1 696	0.0 218	0.2 932	- 0.0 591	1.0 000										
<b>X<sub>9</sub></b>	- 0.1 425	- 0.0 832	0.1 642	0.2 924	- 0.1 685	0.0 390	- 0.0 056	- 0.0 936	1.0 000									
<b>X<sub>10</sub></b>	0.4 507	0.1 877	- 0.3 202	0.2 022	- 0.1 970	- 0.0 987	- 0.1 494	- 0.2 752	0.0 140	1.0 000								
<b>X<sub>11</sub></b>	0.4 344	0.1 101	- 0.3 308	0.1 642	- 0.1 639	- 0.0 953	- 0.1 047	- 0.2 112	- 0.1 231	0.7 937	1.0 000							
<b>X<sub>12</sub></b>	- 0.0 484	0.0 077	0.0 215	- 0.1 489	0.1 920	0.0 241	0.0 148	0.1 944	- 0.0 825	- 0.1 924	- 0.2 444	1.0 000						
<b>X<sub>13</sub></b>	0.3 371	0.0 104	0.0 039	- 0.1 107	- 0.1 106	- 0.0 538	0.0 152	0.0 607	0.0 854	0.1 641	0.1 210	- 0.1 384	1.0 000					
<b>X<sub>14</sub></b>	- 0.3 171	- 0.0 228	0.0 829	- 0.0 354	- 0.0 088	- 0.0 194	0.1 172	0.0 342	0.0 018	- 0.1 268	- 0.2 826	0.3 322	0.0 751	1.0 000				

X <sub>15</sub>	0.2 278	0.0 928	- 0.0 011	0.0 387	- 0.1 083	- 0.0 766	- 0.1 037	0.0 822	0.0 325	0.0 495	- 0.0 273	- 0.0 180	- 0.0 198	- 0.0 854	1.0 000			
X <sub>16</sub>	0.0 854	- 0.0 246	- 0.1 447	- 0.1 221	- 0.0 659	- 0.1 414	- 0.0 625	0.0 339	0.0 774	0.1 253	0.0 055	0.0 437	0.0 023	0.1 388	0.0 313	1.0 000		
X <sub>17</sub>	- 0.0 486	0.1 636	- 0.1 206	- 0.1 168	0.1 877	- 0.0 280	- 0.0 736	0.0 156	0.2 042	0.0 314	0.0 963	0.1 378	0.0 788	0.0 956	0.0 689	0.1 106	1.0 000	
X <sub>18</sub>	0.0 854	- 0.0 699	- 0.1 057	- 0.0 595	- 0.0 155	0.0 817	0.0 817	0.0 484	0.0 061	- 0.0 752	- 0.0 013	- 0.1 901	0.0 798	0.0 967	0.2 081	- 0.1 300	- 0.0 507	1.0 000

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.** Matriz de correlación inversa del grupo sano.

2.7 396	- 0.6 208	0.2 322	0.3 210	- 0.0 337	0.1 499	0.2 076	- 1.0 074	0.1 807	- 1.1 152	- 0.1 047	- 0.2 896	- .70 41	0.7 999	- 0.3 056	- 0.2 469	0.3 930	- 0.1 486
- 0.6 208	1.3 134	0.1 735	0.1 020	0.0 559	- 0.0 438	- 0.1 232	0.3 043	- 0.0 347	0.0 427	0.1 067	0.0 792	0.1 657	- 0.1 779	- 0.0 840	0.1 060	- 0.2 571	0.1 690
0.2 322	0.1 735	1.4 223	0.0 762	0.0 470	0.0 308	0.0 618	0.4 182	0.1 201	0.1 449	0.2 116	0.1 015	0.1 167	0.0 983	0.0 848	0.2 544	0.1 235	0.2 717
0.3 210	0.0 20	- 0.0 762	1.3 804	0.1 492	0.1 075	0.1 201	0.0 151	0.3 451	0.3 833	0.0 927	0.0 965	0.1 853	0.0 033	0.0 550	0.2 553	0.0 696	0.0 121
- 0.0 337	0.0 559	- 0.0 470	0.1 492	1.1 926	0.0 537	0.0 980	0.1 081	0.1 352	0.1 973	0.0 262	- 0.1 853	0.0 659	0.0 983	0.1 119	0.1 365	- 0.1 473	- 0.0 106
0.1 449	- 0.0 438	0.0 308	0.1 075	0.0 537	1.1 813	0.0 040	- 0.4 271	- 0.0 736	- 0.0 602	0.0 487	0.0 372	0.0 631	0.1 198	0.0 940	0.1 704	0.0 525	0.1 056
0.2 076	- 0.1 232	0.0 618	0.1 201	0.0 980	0.0 040	1.1 129	0.0 679	0.0 372	0.1 404	0.0 768	0.0 405	0.0 649	0.0 374	0.0 976	0.0 158	0.0 994	0.1 273
- 1.0 074	0.3 043	- 0.4 182	- 0.0 151	0.1 081	- 0.4 271	0.0 679	1.7 635	0.1 039	0.7 015	- 0.0 595	- 0.1 618	0.0 895	0.2 590	0.0 177	0.0 032	0.1 688	0.0 697
0.1 807	- 0.0 347	- 0.1 201	- 0.3 451	0.1 352	- 0.0 736	0.0 372	0.1 039	1.2 956	- 0.2 529	0.4 338	- 0.0 595	0.2 174	0.0 986	0.2 046	0.0 757	0.2 311	- 0.0 403
- 1.1 152	0.0 427	0.1 449	- 0.3 833	0.1 973	- 0.0 602	0.1 404	0.7 015	- 0.2 529	3.9 758	- 2.5 923	0.1 339	- 0.0 162	- 0.6 219	- 0.2 080	0.6 351	- 0.4 474	0.4 114
- 0.1 047	0.1 067	0.2 116	- 0.0 927	0.0 262	0.0 487	0.0 768	0.0 595	0.4 338	- 2.5 923	3.4 561	0.0 985	0.0 230	0.5 984	0.3 496	0.2 099	0.4 092	0.1 517
- 0.2 896	0.0 792	0.1 015	0.0 965	- 0.1 853	0.0 372	- 0.0 405	- 0.1 618	- 0.0 595	0.1 339	0.0 985	1.3 937	0.2 679	- 0.5 244	- 0.0 328	- 0.0 417	- 0.1 724	0.2 535
- 0.7 041	0.1 657	- 0.1 167	0.1 853	0.0 659	0.0 631	- 0.0 649	0.0 895	- 0.2 174	- 0.0 162	0.0 230	0.2 679	1.3 500	- 0.3 894	0.1 521	- 0.0 556	- 0.0 674	0.0 602

0.7	-	0.0	-	0.0	0.1	-	-	0.1	-	0.5	-	-	1.6	0.0	0.1	0.3	0.0
999	0.1	983	0.0	983	198	0.0	0.2	986	0.6	984	0.5	0.3	051	479	215	300	162
	779		033		374		590		219		244	894					
-	-	-	-	0.1	0.0	0.0	-	-	-	0.3	-	0.1	0.0	1.2	-	0.0	-
0.3	0.0	0.0	0.0	119	940	976	0.0	0.0	0.2	496	0.0	521	479	017	0.0	935	0.2
056	840	848	550				177	046	080		328				537		726
-	0.1	0.2	-	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.6	-	-	-	0.1	-	1.2	-	0.2
469	060	544	553	365	704	158	032	757	351	099	417	556	215	537	830	516	772
0.3	-	0.1	0.0	-	0.0	0.0	-	0.2	-	0.4	-	-	0.3	0.0	-	1.2	-
930	0.2	235	696	0.1	525	994	0.1	311	0.4	092	0.1	0.0	300	935	0.1	671	0.0
	571			473			688		474		724	674			516		381
-	0.1	0.2	0.0	-	0.1	-	-	-	0.4	-	0.2	-	0.0	-	0.2	-	1.2
0.1	690	717	121	0.0	056	0.1	0.0	0.0	114	0.1	535	0.0	162	0.2	772	0.0	506
483				106		273	697	403		517		602		726		381	

Fuente: Elaboración propia

$$Z_i = \frac{x_i - m_i}{s_i} \quad (3)$$

Los datos del grupo Saludable se estandarizan obteniendo la propia matriz. Para estandarizar los datos Saludables debe hacerse en función de la media y la desviación típica de cada una de las columnas de los mismos datos del grupo de los saludables, como se presenta en la tabla 5 con la Ecuación (3). Con esta información obtenemos la matriz vectorial estandarizada que es necesaria para calcular las distancias de Mahalanobis del grupo sano y construir la escala. Donde  $x_i$  son los valores de la  $i$ -ésima característica,  $m_i$  es la media de la  $i$ -ésima característica y  $s_i$  la desviación típica de la  $i$ -ésima característica.

**Tabla 5.** Tabla de  $\bar{X}$  y  $s$  de los datos del grupo sano.

.	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$
$\bar{X}$	42.5	2.3644	3.2881	1.8136	.5763	12.6356	1.4831	17.8898	2.9407
$s$	13.216	1.0350	.9254	1.2537	.4963	1.8148	.8031	3.5537	5.0065
	$X_{10}$	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{14}$	$X_{15}$	$X_{16}$	$X_{17}$	$X_{18}$
$\bar{X}$	2.8729	1.9492	4	2.4915	5.7119	3.8305	.9661	.7542	1.9661
$s$	1.6929	1.7387	2.1523	.6887	2.7615	1.9841	.1817	.4324	.7727

Fuente: Elaboración propia

Calcular las distancias de Mahalanobis de todas las observaciones utilizando la matriz inversa de correlación definiendo así el punto cero. Este punto servirá como punto de referencia o base para la escala de medida (Nafarrate, 2015; Cudney, E. A et.al, 2007; Shakeran, H et al., 2019) Las DM del conjunto de datos sanos se calculan mediante Ecuación (4).

$$MD_i = \frac{1}{k} z_i C^{-1} z_i^T \quad (4)$$

Donde:

k = Número de características

T = Transposición del vector

C-1 = Matriz inversa de la matriz de correlación

#### 2.4.2. Validación de la escala de medición

Aquí es necesario identificar y recoger los datos de las condiciones anormales, calcular la DM de cada observación, luego normalizar utilizando la media y la desviación estándar de las variables utilizadas en el grupo de datos sanos. La matriz de correlación inversa del grupo normal se utiliza para calcular la MD de condiciones anormales. Si la escala es buena, la DM del grupo anormal tendrá valores más altos que los sanos, por lo que la escala queda validada (Nafarrate, 2015; Cudney E. A et al., 2007).

Para este estudio, se registran los factores de la Tabla 1, establecidos en la historia clínica de los expedientes de 40 pacientes diagnosticadas con CaCu mediante citología vaginal y verificadas con biopsia, en el periodo comprendido de 2013 al 2017 en la Jurisdicción Sanitaria II de Cd. Juárez, Chihuahua. Este conjunto representa al grupo de los insalubres. En la Tabla 7 se muestran las distancias obtenidas para el grupo de los saludables y no saludables.

#### 2.4.3. Identificación de Variables Significativas

Para hallar el conjunto de variables significativas, se utilizan arreglos ortogonales y relaciones señal-ruido. La relación señal/ruido se obtiene a partir de la DM de los datos anormales; se utiliza como respuesta para cada combinación de disposiciones ortogonales. El conjunto de variables significativas se obtiene evaluando la ganancia de la relación señal/ruido (Nafarrate, 2015; Cudney E. A et al., 2007).

Utilizando las relaciones en las disposiciones ortogonales y S/R, se seleccionan las características útiles. En SMT, las matrices ortogonales se utilizan para reconocer características significativas, disminuyendo el número de conjuntos de características establecidos inicialmente (Cudney E. A et al., 2007).

Con esto se optimiza el sistema; en el experimento, cada factor se asigna a una columna en el arreglo ortogonal (AO) y cada fila representa la combinación del experimento a ejecutar. Un AO de dos niveles se utiliza para representar la inclusión o la exclusión. En un AO de dos niveles, el nivel 1 corresponde a la presencia de una variable y el nivel 2 corresponde a la ausencia de la variable. Cada variable se incluirá con respecto a la combinación en el AO, se obtendrá la DM y se calculará la relación S/R (Cudney E. A et al., 2007).

El diseño Taguchi representado en la ecuación correspondiente a este análisis es L32 218, un arreglo de 32 corridas para 18 factores con 2 niveles. La Tabla 8 presenta los AO utilizados en este análisis.

#### 2.4.4. Relación señal-ruido (S/R)

SMT trabaja con una población única y separada en datos normales o sanos y datos anormales. El grupo principal de datos analizados se denomina normal, y lo que queda fuera del grupo sano se denomina anormal. El grado de anormalidad se mide en referencia al grupo normal.

**Tabla 7.** Distancias de Mahalanobis

	DM Grupo sin cáncer de cuello de uterino	DM Grupo con cáncer de cuello uterino
1	.9587	2.3568
2	1.1755	10.2643
3	.8246	4.5155
4	0.7707	3.2170
5	1.0676	1.8132
6	0.7121	3.6679
7	0.9017	3.6646
8	1.1455	2.2349
9	0.7905	3.0990
10	0.8302	3.7264
11	1.9947	3.0476
12	1.1266	3.0850
13	0.7291	2.8390
14	0.818	2.9846
15	0.8999	4.2843
16	1.0283	3.5322
17	0.864	1.9860
18	0.7379	3.9340
19	1.0049	2.2572
20	15275	4.4129
21	0.7872	3.8948
22	0.706	2.7195
23	1.005	4.2206

24	0.8744	3.7115
25	0.8742	5.0928
26	0.7485	3.1115
27	0.5955	3.9522
28	1.0252	3.3401
29	0.6631	3.3891
30	0.3646	4.3724
31	0.7301	2.0831
32	0.8406	3.9377
33	0.93	5.8973
34	0.6079	3.0050
35	0.8782	2.7332
36	0.8772	8.6702
37	.9086	2.8486
38	1.4617	7.9687
39	2.0211	3.5750
40	0.7645	2.3289

---

Fuente: Elaboración propia

La relación señal/ruido (S/R) es una medida de la funcionalidad del sistema que aprovecha la interacción entre el ruido y los factores de control. En los sistemas multidimensionales, esta medida se aplica para minimizar el número de variables que se analizan y desempeña un papel importante en la predicción de condiciones anormales.

Utilizando S/R, se puede obtener un conjunto de variables útiles para la toma de decisiones en diversos contextos. En el ámbito de la salud, por ejemplo, ayuda a encontrar factores importantes para diferentes enfermedades, pues puede evaluar el desarrollo de una afección con diferentes anomalías y encontrar un conjunto ventajoso de variables (Nafarrate, 2015).



un espacio de Mahalanobis con las variables útiles. También se calculan las distancias de Mahalanobis de las observaciones anómalas a partir del conjunto de variables útiles. La distancia media del grupo normal se compara con la distancia media del grupo anormal (Nafarrate, 2015; Cudney E. A. et al., 2007; Sakeran, H. et al., 2019).

La Tabla 9 presenta la relación S/R para las 18 variables calculadas y muestra los resultados donde el valor más alto destaca los factores significativos.

**Tabla 9.** Coeficiente estimado del modelo.

<u>Plazo</u>	<u>S/R</u>	<u>T calculado</u>	<u>P valor</u>
A. Edad	-0.1951	-0.840	0.416
B. Estado Civil	-0.4183	-1.801	0.095
C. Escolaridad	0.1673	0.72	0.484
D. Religión	-0.1309	-0.564	0.582
<b>E. Antecedentes Familiares con Cáncer</b>	<b>0.2791</b>	<b>1.202</b>	<b>0.251</b>
F. Menarquia	-0.0219	-0.094	0.926
G. Ritmo Menstrual	-0.3330	-1.434	0.175
H. IVSA(ASLB)	0.0745	0.321	0.753
J. Parejas	-0.3332	-1.435	0.175
K. Embarazos	0.0030	0.0130	0.9900
L. Partos Vaginales	0.0817	0.3520	0.730
M. Tipo de Anticonceptivo	-0.2401	-1.034	0.320
N. Prevención Citológica	0.1648	0.710	0.491
O. Situación ginecobstetricia	0.3910	1.684	0.116
P. Exploración	0.3401	1.464	.167
Q. Antecedentes de Enfermedades de Transmisión Sexual	1.074	4.628	0.000
R. Cervicitis	-0.5639	-2.428	0.030
<b>S. Resultados de la Citología</b>	<b>5.8537</b>	<b>25.201</b>	<b>0.000</b>

Fuente: Elaboración propia

#### 2.4.4.1. Diagnóstico futuro con variables significativas

Al encontrar las variables significativas, se pueden utilizar para diagnosticar situaciones futuras, tomar decisiones y llevar a cabo acciones correctivas o de mejora. Una gran distancia indica una gran desviación entre los pacientes sanos y los pacientes con CaCu. La ME se reconstruye utilizando las variables registradas en el paso 3 y se calculan las MD de las variables controladas. Los sujetos están sanos si las DM están dentro de la EM. Si las MD están fuera de la ME, entonces los sujetos revelan comportamientos anormales (cancerosos) [5]. (Nafarrate, 2015)

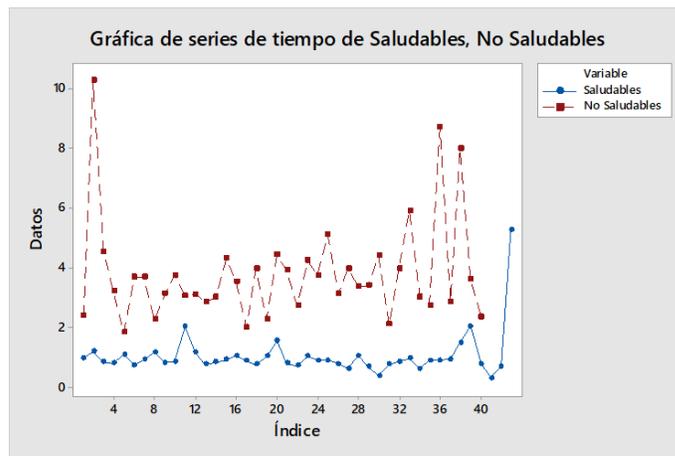
### 3. Resultados

#### 3.1. Distancia de Mahalanobis (DM)

Mediante la SMT, destacamos qué variables aumentan la probabilidad de obtener CaCu. Así, las DM calculadas con la Ecuación 3 se presentan en la Tabla 2 y corresponden a la presencia de todos los factores. Debemos considerar que las DM del grupo no saludable deben ser mayores que las del grupo saludable, así como considerar que las distancias mostradas corresponden a la primera ejecución del AO, donde se incluyen todos los factores.

La figura 2 muestra una notable diferencia entre las distancias mostradas entre los dos grupos de referencia: pacientes saludables y pacientes no saludables diagnosticados con CaCu.

**Figura 2.** Gráfico comparativo de las distancias de Mahalanobis.

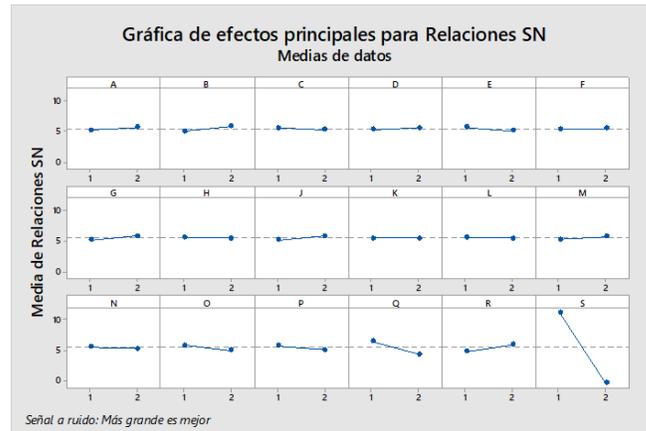


a figura 3 muestra los efectos principales para las relaciones S/R, revelando que las casillas con las letras B, Q, R y S, correspondientes a los factores Estado civil, Antecedentes de infección de transmisión sexual, Cervicitis y Resultados Citológicos, son los más destacados dentro de los factores ya establecidos. Estos factores tienen una mayor pendiente y, por tanto, una mayor significación.

El modelo destaca las variables con mayor coeficiente S/R en este análisis, como el Resultado Citológico con Coef S/R = 5.85376, T = 25.201, valor p = 0.000; Antecedentes de infección de transmisión sexual con Coef S/R = 1.07491, T = 4.628, valor p = 0.000; Cervicitis con Coef S/R = -0.56390, T = -2.428, valor p = 0.030 y Estado civil con Coef S/R = -0.41830, T = -1.801, valor p = 0.095.

La tabla 8 verifica que si el valor T calculado originado por las dos muestras es excesivo, entonces se rechaza la hipótesis nula de que no existe diferencia en la media de las dos poblaciones.

**Figura 3.** Relación señal/ruido (S/R).



Los factores resaltados en este análisis indican valores  $p < 0.05$ , por lo que podemos afirmar que existe una diferencia en las medias de estas dos muestras. Los resultados de esta investigación muestran como uno de los factores determinantes y con una mayor S/R, como explicado por SMT, el resultado de la citología con un  $S/R = 5.85376$ ,  $T = 25.201$  y un  $p\text{-valor} = 0.000$ , donde mayor es mejor, pone de manifiesto la diferencia significativa entre los resultados de la citología de una mujer sana frente a una mujer con sospecha de cáncer de cuello uterino, corroborada por una biopsia. Estos resultados son coherentes con este factor evaluado, ya que es la diferencia entre saber si la enfermedad está presente o no.

#### 4. Discusión

Este estudio presenta un método para resaltar los factores de riesgo que presentan las mujeres con CaCu en mujeres del norte de México utilizando SMT y ruido de señal (S/R).

El SMT es superior a otros métodos, como se puede observar en Aragón Chacón (2010), donde se compara con el modelo Logit para datos binarios y se perciben varias limitaciones en el análisis de datos. Según Aragón Chacón, el SMT representa una mejor opción que el Modelo Logit para Datos Binarios, sin importar si la muestra es pequeña o grande. La primera metodología es capaz de identificar las variables significativas, todo lo contrario que la segunda metodología, donde para identificar estas variables se requiere analizar grandes muestras, lo que en muchas ocasiones y debido al ámbito de aplicación en el que se realiza el análisis, no están disponibles o no son fáciles de obtener. La creación de una base de datos lo suficientemente grande como para obtener resultados fiables que se utilizarán en esta metodología también supondrá elevados costos, tanto financieros como de tiempo.

Entre otros métodos se encuentra el análisis de componentes principales, que se centra en reducir los datos que se analizan e interpretan, pero tiene el inconveniente de que se necesitan todas las variables originales para calcular los componentes principales. Por lo tanto, este método no ayuda a reducir la dimensión en términos de variables originales (Nafarrate, 2015).

Para Sánchez Mangas, la técnica del análisis de Componentes Principales consiste en analizar un conjunto de datos de entrada que contiene diferentes observaciones descritas por múltiples variables independientes o dependientes. Las relaciones entre estas variables no tienen por qué conocerse, y su principal objetivo es reducir el tamaño del conjunto de datos de entrada tratando de mantener la mayor cantidad de información posible. De esta manera, se puede analizar más fácilmente, y en etapas posteriores, como clasificadores o regresores, se pueden simplificar los criterios de decisión. Se busca que la mayor cantidad de información esté contenida en el menor número posible de variables de variables posibles. Mediante esta técnica, se puede procesar un amplio conjunto de datos y reducir su dimensionalidad con una pérdida mínima de información. La principal desventaja reside en el hecho de que cada componente principal es una combinación lineal de todas las variables originales, lo que hace muy difícil analizar la importancia de cada variable original en el nuevo espacio. Este método no ayuda a reducir la dimensión en términos de variables originales, ya que todas las variables originales son necesarias para el cálculo de los componentes principales. Cálculo de los componentes principales; y la MD es una medida basada en correlaciones entre las variables y diferentes patrones que pueden identificarse y analizarse con respecto a un grupo de referencia base de referencia. Estas correlaciones son una medida aproximada de la interacción entre las variables.

## **5. Conclusiones**

Como se ha destacado a lo largo del texto, la utilidad del SMT radica en que es una forma de determinar la similitud entre dos variables aleatorias multidimensionales. Esto se debe a que, en los sistemas multivariantes, la existencia de multicolinealidad (incidencia de fuertes correlaciones) dificulta que el análisis verifique diferencias o patrones de comportamiento.

La diferencia entre la DM y la distancia euclidiana es que la primera tiene en cuenta la correlación entre las variables aleatorias. La DM nos ayuda a distinguir si un determinado conjunto de condiciones similares pertenece al conjunto de condiciones ideales.

Los factores registrados como relevantes a considerar en la historia clínica y el análisis citológico de mujeres para la vigilancia de la salud y la prevención del CaCu ya están calificados por diferentes sanitarios de todo el mundo. El SMT nos ayuda a destacar las variables más significativas, describiendo así a las mujeres de Ciudad Juárez, Chihuahua, que acuden a recibir atención al Hospital de la Mujer para prevenir esta enfermedad. Si bien los factores registrados en esta investigación pueden considerarse como los habituales señalados en las investigaciones antes mencionadas, la posibilidad de analizar factores como la química sanguínea o los perfiles hormonales de las pacientes con CaCu es inaccesible, al menos en esta comunidad, debido al alto costo que esto representa para el Sector Salud. Sin embargo, se demostró aquí que el modelo SMT establece jerarquías, clasifica y determina significancia.

Este tipo de estudio puede ser utilizado por las autoridades competentes y especialistas en el área para la toma de decisiones en materia de salud pública, ya que pone de relieve las principales características sociodemográficas y los factores clínicos que afectan a las mujeres del norte de México, siendo replicable en otras comunidades.

## **Bibliografía**

Aragón, F. M. Análisis Comparativo del Sistema Mahalanobis Taguchi (MTS) con Modelo Logit para Datos Binarios Considerando Diferentes Tamaños de Muestra. Master's Thesis. Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez 2010. Ciudad Juárez, MEX.

Cudney, E. A.; Hong, J.; Jugulum, Rajesh.; Paryani, K.; Ragsdell, K.M; Taguchi, G. An Evaluation of Mahalanobis-Taguchi System and Neural Network for Multivariate Pattern Recognition. Journal of Industrial and Systems Engineering 2007, 1(2), 139-150.

Escobedo, M. S. P. Ch. Mahalanobis y las aplicaciones de su distancia estadística. Cultura Científica y Tecnológica CULCyT, 2008,13-20.

Hernández, D.M.; Apresa,T.; Patlán, M. Panorama epidemiológico del cáncer cervicouterino. Revista Médica Instituto Mexicano Seguro Social 2015, (2),154-161

. Johnson, R. A. Applied Multivariate Statistical Analysis .6th ed.; Pearson-Prentice Hall: New Jersey, USA, 2007

Ketkar Manisha, Vaidya Omkarprasad S, Evaluating and Ranking Candidates for MBA Program: Mahalanobis Taguchi System Approach, Procedia Economics and Finance, Volume 11, 2014, Pages 654-664, ISSN 2212-5671, [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00231-7](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00231-7).

Nafarrate, Á. Determinación de Factores de Riesgo Significativos en Mujeres con Cáncer de Mama Mediante el Sistema Mahalanobis Taguchi. Master's Thesis. Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez 2015.Ciudad Juárez. MEX.

Rodríguez, M.A.; Limón, J.; Rodríguez, I.; Tlapa, D. A. ; Olgúin, J.E.; Báez, Y.A.; Camargo, C. A Robustness Evaluation of Mahalanobis Taguchi System Using Fractional Factorial Designs. International Journal of Industrial Engineering. Special Issue-Anaheim Conference. 2009, 479-486.

Sans Martín, A., Guàrdia Olmos, J., & Triadó Ivern, X. M. (2016). El liderazgo educativo en Europa: Una aproximación transcultural. *Revista de Educación*.

DOI: 10.4438/1988-592X-RE-2015-371-309

Sakeran, H.; Abu Osman, N.A.; Abdul Majid, M.S. Gait Classification Using Mahalanobis-Taguchi Systems Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. Applied Sciences. 2019,(9),3306.

Sanchez, A. Análisis de Componentes Principales: Versiones Dispersas y Robustas al Ruido Impulsivo. Available on line: <https://core.ac.uk/download/pdf/30046374.pdf> (accesed on 28 May 2020)

Taguchi, G; Chowdhury, S; Wu, Y. Appendix A: Orthogonal Arrays and Linear Graphs. Tools for Quality Engineering. Available on line: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9780470258354.app1>. (accessed on 24 February 2020).

World Medical Association. Declaration of Helsinki. World Medical Association 2000. Available online: <https://www.wma.net/wp-content/uploads/2018/07/DoH-Oct2000.pdf> (accessed on 26 February 2020).

<https://www.elheraldodechihuahua.com.mx/local/chihuahua/ocupa-chihuahua-tercer-lugar-a-nivel-nacional-en-mortalidad-por-tumores-malignos-8769098.html>

tumores malignos cáncer chihuahua Rescatado 2 de marzo 2023

[https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00231-7](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00231-7)

## **Laboratorios remotos como ambientes para la enseñanza y experimentación de sistemas digitales y control en ingeniería.**

*Remote Labs like environments for teaching and experimentation of digital systems and control in engineering*

**Jeovany Rafael Rodriguez Mejía**

Tecnológico Nacional de México, IT de Ciudad Juárez, México

jrodriguez@itcj.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0003-4154-0778>

**Manuel de Jesús Nandayapa Alfaro**

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México

mnandaya@uacj.mx

<https://orcid.org/0000-0002-5928-9561>

**Jorge Adolfo Pinto Santos**

Tecnológico Nacional de México, IT de Ciudad Juárez, México

jorge.ps@itcj.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0001-9614-2764>

### **Resumen**

En este documento se presentan los resultados del diseño y puesta en marcha de un laboratorio remoto el cual permite realizar experimentos con sistemas digitales y de control a través de un ambiente remoto y a distancia para la potenciación de la enseñanza de tecnologías de control en la educación superior, particularmente en ingenierías afines. Teniendo en cuenta el avance tecnológico y la intención de lograr el proceso de enseñanza-aprendizaje a lugares cada vez más extensos, cruzado fronteras y llegando cada vez más lejos este desarrollo de plataforma permite experimentar el cómo potenciar los laboratorios para la experimentación de la ciencia usando herramientas tecnológicas cada vez más potentes con el apoyo del internet, para llegar a lugares antes no logrado. Por lo tanto, en este documento se describe el cómo fue diseñado el sistema de laboratorio remoto, en si se establece la metodología para vincular diversas plataformas e integrarlas en un solo sistema denominado laboratorio remoto de sistemas digitales y control. Es importante resaltar que el uso de un FPGA y la vinculación de una Raspberry Pi, Arduino, ESPCAM-32 y Latte Panda es posible al tener el software que los vincule efectivamente, mismo que fue el mayor aporte de esta investigación.

**Palabras Clave:** Laboratorio Remoto, FPGA, Procesamiento Digital de Señales.

## Abstract

*This document presents the results of the design and implementation of a remote laboratory which allows experiments with digital and control systems to be carried out through a remote and distance environment to promote the teaching of control technologies in higher education, particularly in engineering purposes. Taking into account the technological advance and the intention of achieving the teaching-learning process in increasingly extensive places, crossing borders and reaching further and further, this platform development allows experimenting on how to enhance laboratories for science experimentation using increasingly powerful technological tools with the support of the internet, to reach places not previously achieved. Therefore, this document describes how the remote laboratory system was designed, and establishes the methodology to link various platforms and integrate them into a single system called remote laboratory of digital systems and control. It is important to highlight that the use of an FPGA and the linking of a Raspberry Pi, Arduino, ESPCAM-32 and Latte Panda is possible by having the software that links them effectively, which was the greatest contribution of this research.*

**Key words:** Remote Lab, FPGA, PDS

## Introducción

Con el avance en la tecnología y sobre todo en la disponibilidad de esta para llegar a la mayor parte de la población, el proceso de enseñanza-aprendizaje tradicional ha cruzado fronteras y cada vez llega más lejos. Pero aun, los métodos y técnicas de enseñanza no han evolucionado a la par, ni con la rapidez deseada. Por esta razón, el sistema educativo ha aplicado una gran variedad de herramientas y técnicas didácticas para lograr evolucionar dicho proceso [1-3].

En la actualidad, las tecnologías inmersivas introducen al usuario en diversos ambientes a través de información sensorial que puede ser gráfica, de movimiento o sonido. Además, estas tecnologías se concentran en la interacción, en la percepción, en la robótica y en la inteligencia artificial, por comentar algunas, [4-6].

Por lo tanto, se ha identificado que el uso de las tecnologías inmersivas motiva a los estudiantes en su proceso de aprendizaje al ser para ellos una herramienta de apoyo en el proceso de enseñanza. De forma adicional, se ha estudiado el fortalecimiento del método de enseñanza en el sistema educativo a través de los recursos digitales aplicados como herramientas didácticas. Estos recursos digitales permiten que el estudiante desarrolle las habilidades kinestésicas referentes a la teoría de su campo de estudio; como lo son las plataformas de cursos en línea Moodle, software de modelado y simulación en línea como OnShape u Octave, por citar algunos. Pero, en muchas ocasiones el proceso de enseñanza requiere de laboratorios y experimentación. Sin embargo, los laboratorios no siempre son suficientes y en ocasiones no se logra el acceso por la falta de infraestructura escolar, e incluso contingencias causadas por situaciones extraescolares [7-10].

El uso de laboratorios virtuales o remotos en la enseñanza de ingeniería constituye una parte esencial en la preparación del estudiantado y dentro de esos laboratorios I-lab es una gran

propuesta en donde se considera integrar las características y estrategias de aprendizaje de los laboratorios en sitio solo que, a través de internet, logrando así el enriquecimiento de la educación de ciencias e ingeniería debido a la gran capacidad de expandir enormemente el rango de los experimentos. La visión de estos laboratorios es compartir los equipos de gran inversión, así como los materiales educativos asociados con todos los experimentos de laboratorio de una manera más amplia. (11-13)

El avance y el desarrollo tecnológico ha permitido la creación de laboratorios remotos en electrónica, química, análisis de materiales, análisis mecánico estructural, procesamiento digital de señales solo con el propósito de hacer comprender a los estudiantes los ambientes de los experimentos entre laboratorios y simulación, además de escalar su uso a estudiantes en cualquier parte del mundo. Por lo general, estos laboratorios desarrollan un conjunto de herramientas de software que permiten ponerlos en línea y administrar los experimentos de diversos laboratorios. (14)

La tendencia de arquitectura compartida permite minimizar el esfuerzo de desarrollo, así como la administración efectiva para los clientes y proveedores de cualquier tipo de laboratorio remoto. Entonces el proporcionar un conjunto común de servicios, aplicaciones y herramientas de desarrollo se permea el ambiente estudiantil y sobre todo permite ser escalable a un gran número de usuarios en el mundo. Logrando en forma atractiva que las universidades con gran infraestructura de red y de laboratorios puedan compartir el acceso. Sin duda alguna, el diseño de este tipo de laboratorios que interconectan diversos módulos de servicio a través de una efectiva arquitectura de servicio web puede ampliarse hasta donde la creatividad y capacidad de la red lo permita. (15)

Entendiendo el diseño de este tipo de laboratorios remotos, se identifica que una parte medular la integra el servidor el cual debe ser operado por el propietario del I-Lab, es decir es quien se ocupa del funcionamiento real del hardware en el laboratorio. Otro elemento importante es el cliente del I-Lab quien es el que ejecuta a través de la computadora, la sensación de inmersión al usuario final y le proporciona la interfaz para la operación del I-Lab. Adicionalmente, se encuentra el elemento denominado como broker que es aquel interconecta e interactúa con el cliente y el servidor, particularmente con el intercambio de información, servicios de administración y almacenamiento del mismo. (16-18)

Sin embargo, aprovechando el internet se le permite al estudiante utilizar instrumentos reales a través de laboratorios remotos en línea, y lo más importante es que a diferencia de un laboratorio tradicional, se pueden compartir con una universidad a otro en el mundo. Por lo tanto, los experimentos permiten al estudiante comparar la realidad con la simulación, colaborar entre sí y aprender de manera más efectiva y reflexiva. Sin tomar en cuenta que el costo de la experimentación en ocasiones no se logra cubrir particularmente por el espacio, seguridad y gasto asociada al experimento. (19-20)

Los pioneros en el desarrollo de laboratorios remotos fue el MIT con el denominado ilab, mismo que fue creado con el propósito de tener laboratorios remotos accesibles a través de la web. Considerando que la infraestructura intuitiva este constituida por software el cual debe hacer que el proceso de experimentación sea simple y económico. Sin embargo, es importante la pedagogía

utilizada por el cuerpo académico, así como las políticas académicas y éticas implementadas en el uso del laboratorio. (21-25)

Mediante la búsqueda de cooperación interinstitucional aplicada a la creación de laboratorios remotos es necesario considerar que las escuelas compartan el costo de la infraestructura, incorporen la participación del gobierno, los centros de investigación y los laboratorios nacionales, para lograr un uso más eficiente del equipo de laboratorio. Considerando que, al trabajar en forma activa, la experimentación y resolución de problemas, se logran adquirir los conocimientos aplicables en donde la experimentación es considerada como el método de aprendizaje basado en la experiencia. Por lo general, las estrategias de aprendizaje en laboratorios remotos incluyen la repetición de los conocimientos teóricos necesarios para comprender y diseñar un experimento. La aplicación de modelos y conceptos teóricos en situaciones prácticas, en la que el usuario prueba la validez y los límites del modelo teórico o matemático. El entrenamiento de sus habilidades prácticas en referencia a los instrumentos de medición, prueba, control y software. El entrenamiento de sus habilidades prácticas sociales y de comunicación con trabajo en equipo para potenciar la habilidad de escritura, redacción técnica, documentación, razonamiento lógico, expresión exacta y lenguaje en el marco de situaciones complejas. Finalmente, la reflexión crítica sobre los resultados del experimento, modelo utilizado y los métodos. (30-34)

En lo que compete a esta investigación se han valorado diversos pioneros de laboratorios remotos y en línea como los son: Open ilabs el cual proporciona un portal abierto a laboratorios remotos en donde los estudiantes, educadores y autodidactas tienen acceso sin restricciones a los ilabs de algunas instituciones, en su caso particular es patrocinado por Microsoft. VELO, Laboratorio electrónico virtual, espacio en el cual es posible realizar trabajos de laboratorio independientemente del tiempo y lugar, particularmente orientado a electrónica básica, este laboratorio fue implementado en la Universidad de ciencias aplicadas de Carintia misma que integro plataformas como MAtLab, Orcad, Pac designer, Max+, y su particularidad es que los experimentos, tareas, materiales están en html. Otro espacio fue el desarrollado por Weblab Deusto, de la Universidad de Deusto el cual se considera como una herramienta didáctica de la docencia universitaria que incluye al menos siete experimentos diferentes, dispositivos lógicos programables en Xilinx, microcontroladores Pic microchip, Robot móvil programable, electrónica e instrumentación, por citar algunos. El impacto de Deusto WebLab fue el fomentar el interés de los alumnos por las plataformas STEM mediante el uso de dos recursos tecnológicos virtualización en 3d y programación de robots móviles. REL, laboratorio electrónico remoto, es una plataforma que permite realizar experimentos electrónicos a través de internet, control remoto de instrumentos de laboratorios reales y no en simulación, en donde el servidor REL es una computadora con interfaz de propósito general conectada a un sistema de análisis de señales, con control remoto. Finalmente, el proyecto VISIR se llevó a cabo en Suecia en conjunto entre el Instituto de Tecnología de Blekinge, NI y Axiom EduTech. VISIR es una plataforma abierta, es decir un laboratorio remoto creado para el diseño, cableado y medición de circuitos eléctricos. Esta plataforma convierte el diseño del estudiante en un circuito cableado real y envía los resultados de la medición a la pantalla, el objetivo es que los estudiantes se familiaricen con los instrumentos, componentes, manuales y experimentos básicos. (35-40)

El departamento de metal mecánica del Tecnológico Nacional de México Campus Ciudad Juárez en conjunto con el departamento de Manufactura e Ingeniería Industrial de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez se desarrolló este proyecto de innovación para la educación superior en ramas de la ingeniería con el objetivo de integrar las bondades de los laboratorios remotos en la docencia y el desarrollo de técnicas y metodologías para las asignaturas de control, procesamiento digital de señales y automatización.

En este artículo se presenta la integración y uso de un sistema de laboratorio remoto de control y señales digitales basado en plataformas de alta capacidad, para su uso en asignaturas de grado y postgrado de las áreas de control automático y procesamiento digital de señales. Este laboratorio permite la realización de prácticas en forma remota para estudiantes de un par de universidades y mediante la administración de recursos físicos y tiempo se logra un eficiente y efectivo alcance de conocimientos en áreas técnicas y aras del auge la industria 4.0.

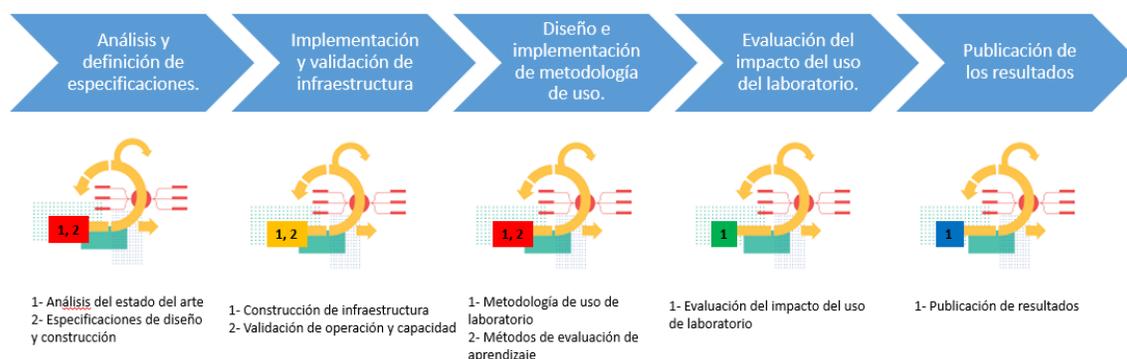
Para este trabajo el objetivo fundamental fue determinar el impacto que tiene el ampliar los conocimientos teórico-prácticos a través de laboratorios remotos, además de demostrar las posibilidades de reutilización del laboratorio en diversas instituciones educativas con una inversión de menor costo. En particular su utilizaron un par de prácticas para validar la infraestructura física y capacidad de transmisión del servidor.

Para el desarrollo del proyecto se propone una metodología híbrida que permita integrar las particularidades de las metodologías tradicionales principalmente la incremental y de diseño, pero a la vez tenga la suficiente flexibilidad como la Scrum. Por lo tanto, se designan cinco módulos macro que representen la secuencia de la metodología incremental principalmente para lograr los objetivos planteados, pero dentro de cada macro modulo se aplicará la metodología Scrum para tener la suficiente flexibilidad y obtener resultados en cada iteración planificada [26-29].

En el primer macro módulo se realizará al análisis del estado del arte de los laboratorios remotos. Además, las especificaciones para el diseño y construcción de la infraestructura se definirán respecto a las topologías existentes y configuraciones posibles dentro de los medios educativos e industriales para la enseñanza y entrenamiento. En el segundo módulo se implementará el diseño de la infraestructura del laboratorio remoto. Adicionalmente, serán determinados los indicadores que permitan validar la operación y capacidad de interconexión del laboratorio remoto, y determinar la eficacia de las plataformas de acceso abierto. En el tercer módulo se establecerá la metodología para el uso del laboratorio remoto. Además, se definirán los métodos de evaluación del aprendizaje a partir de la infraestructura desarrollada.

El en cuarto módulo se evaluará el impacto del uso del laboratorio remoto con tecnologías en alumnos de grado y posgrado. En el quinto módulo se publicarán los resultados más relevantes del proyecto. Por esta razón, la metodología híbrida es necesaria de aplicarse; porque permite durante el desarrollo del proyecto obtener resultados significativos y así ampliar la cantidad de publicaciones de impacto como se observa en la Fig. 1.

**Figura 1** Metodología híbrida laboratorio remoto de control y señales digitales



### Características del sistema de laboratorio remoto de control y señales digitales

El laboratorio remoto presenta características semejantes a los laboratorios virtuales implementados. La primera es la disponibilidad, la cual refiere que el sistema se encuentra disponible las 24 horas con una protección y administración adecuada. La segunda es la accesibilidad, debido a que el laboratorio remoto puede ser accedido a través de internet desde cualquier parte del mundo. Otra de ellas es la facilidad de uso, debido a que para su uso efectivo se deben tener los conocimientos básicos de la asignatura de prácticas. Otra es la interfaz de usuario, la cual está basada en Web y JS, lo que permite que los usuarios accedan al sistema de forma rápida sin la necesidad de instalar o usar un software. La administración de tareas permite atender múltiples solicitudes en paralelo, pero centraliza al usuario al momento de acceder a la plataforma. Finalmente, la capacidad para el desarrollo de controladores y sistemas de práctica establecidos por el usuario, pero en particular el diseño de experimentos de cada asignatura.

La arquitectura del laboratorio remoto es un conjunto de sistemas que forman un servidor, un cliente y una infraestructura física que permiten la interacción entre al menos dos usuarios con un alto desempeño y seguridad.

El servidor es un sistema que proporciona recursos, datos, servicios o programas a otros ordenadores, conocidos como clientes, a través de una red. En teoría, se consideran servidores aquellos ordenadores que comparten recursos con máquinas cliente. Existen muchos tipos de servidores, como los servidores web, los servidores de correo y los servidores virtuales. Un sistema individual puede, al mismo tiempo, proporcionar recursos y usar los de otro sistema. Esto significa que todo dispositivo podría ser a la vez servidor y cliente. Al nivel más básico, cuando un navegador necesita un archivo que está almacenado en un servidor web, el navegador requerirá el archivo al servidor mediante el protocolo HTTP. Cuando la petición alcanza al servidor web correcto, el servidor HTTP acepta la solicitud, encuentra el documento requerido y lo envía de regreso al navegador, también a través de HTTP. Podemos encontrarnos con dos tipos de servidores web: el servidor web estático y el servidor web dinámico. El servidor web estático o también llamado "Pila" consiste en una computadora con un servidor HTTP, es decir, software. Lo

llamamos estático debido a que envía los archivos que aloja tal como se encuentran en su memoria, a tu navegador.

Por otra parte, el servidor web dinámico consiste en un servidor web estático con software adicional, habitualmente una aplicación servidor y una base de datos. Se le llama dinámico debido a que la aplicación servidor actualiza los archivos alojados, antes de enviar el contenido a tu navegador mediante el servidor HTTP.

El cliente es quien inicia un requerimiento de servicio. El requerimiento inicial puede convertirse en múltiples requerimientos de trabajo a través de redes LAN o WAN. La ubicación de los datos o de las aplicaciones es totalmente transparente para el cliente. En otras palabras, un cliente no es más ni menos que un ordenador o software que accede a un servidor y recupera servicios especiales o datos de él. Es tarea del cliente estandarizar las solicitudes, transmitir las al servidor y procesar los datos obtenidos para que puedan visualizarse en un dispositivo de salida, como una pantalla. Un cliente no ejecuta tareas de servidor, sino que es simplemente un elemento intermedio. Los clientes típicos son los navegadores web o los clientes de correo electrónico. El cliente envía una petición a un servidor o a varios servidores y recibe datos que interpreta y envía de forma legible a un usuario. El cliente debe utilizar un protocolo específico para comunicarse con el servidor.

Lo más importante a la hora de hablar de la comunicación de datos es resolver el problema de lograr llevar la información de un punto A a un punto B sin error alguno o con la menor muestra de error, utilizando redes con la codificación correspondiente para su transmisión. Para esto se utilizan los canales de comunicación que establecen la unión entre los puntos A y B. En estos puntos se encuentran los equipos transmisores y receptores de datos y sus convertidores encargados de la codificación y decodificación de la información. Un componente importante en el sistema de comunicación es un protocolo de comunicación. Un protocolo de comunicaciones es un conjunto de normas que deben cumplir todas las máquinas y programas que intervienen en una comunicación de datos entre ordenadores; sin estas, la comunicación resultaría caótica y, por tanto, imposible. El protocolo de comunicación se define, pues, como las reglas para la transmisión de la información entre dos puntos. Este es un conjunto de reglas que gobierna el intercambio ordenado de datos dentro de la red.

La familia de protocolos de internet es un conjunto de protocolos de red en los que se basa internet y que permiten la transmisión de datos entre computadoras. En ocasiones se le denomina conjunto de protocolos TCP/IP, en referencia a los dos protocolos más importantes que la componen, que fueron de los primeros en definirse, y que son los dos más utilizados de la familia: TCP (Protocolo de Control de Transmisión) e IP (Protocolo de Internet).

A su vez, dicho protocolo cuenta con tres capas para funcionar correctamente. Dichas capas se denominan como sigue:

- 1. Capa de interred:** Esta capa es la que mantiene unida toda la arquitectura. El objetivo de esta capa es permitir que los nodos inyecten paquetes en cualquier red y los hagan viajar de forma independiente a su destino. Los paquetes pueden llegar incluso en un orden diferente al que se enviaron. Esta capa define un formato de paquete y un protocolo oficial

llamado IP. Aquí, el objetivo más importante es claramente el enrutado de los paquetes y también evitar la congestión.

**2. Capa de transporte:** En esta capa encontramos dos protocolos de extremo a extremo. Uno de ellos, TCP (protocolo de control de la transmisión), es un protocolo confiable orientado a la conexión. El segundo protocolo de esta capa es UDP (protocolo de datagrama de usuario), un protocolo sin conexión, no confiable; su uso es para aplicaciones que no necesitan la asignación de secuencia ni el control de flujo.

**3. Capa de aplicación:** El modelo TCP/IP no tiene capas de sesión ni presentación. Aquí encontramos los protocolos de más alto nivel, como el de correo electrónico SMTP, transferencia de archivos FTP, etc.

La conexión LAN abarca dispositivos y periféricos conectados a un servidor dentro de un área relativamente pequeña, como una oficina, sucursal o edificio. Este tipo de red fue desarrollado para transmitir grandes cantidades de datos en poco tiempo, cuando el internet doméstico daba sus primeros pasos y las velocidades de transferencia eran muy lentas. Asimismo, se desarrolló para compartir recursos de hardware en un mismo y limitado espacio. Los dispositivos conectados con este tipo de enlace comparten herramientas y recursos como la misma conexión a internet, impresoras, escáneres, cámaras, discos duros u otro dispositivo de almacenamiento, y programas que permiten intercambiar archivos, mensajes, realizar llamadas por IP o sesiones de video.

Normalmente, una WAN consiste en dos o más redes de área local (LAN). Una red del tipo WAN es similar en funcionamiento y características a las redes de área local, solo que en mayor escala y con mayores prestaciones. Su funcionamiento consta de poder intercomunicar gran cantidad de ordenadores con otros mediante algún medio de transmisión, por lo general cableado o fibra óptica, para poder comunicarse con alguna otra central a varios cientos de kilómetros.

El Single Board Computer (SBC) es un ordenador completo en el que una placa de circuito único comprende la memoria, la entrada/salida, un microprocesador y todas las demás características necesarias. Sin embargo, a diferencia de un ordenador personal, no depende de expansiones para otras funciones. Un PC de placa única reduce el costo global del sistema, ya que se reduce el número de placas de circuito, conectores y circuitos conductores.

Para la configuración de este laboratorio remoto, se opta por hacer uso del microcontrolador programable ESP32-CAM, ya que éste cuenta con características de conexión inalámbrica y una facilidad de programación, y además incluye una pequeña cámara en la parte superior del microcontrolador, lo que nos brinda la pieza de hardware perfecta para utilizar como parte del monitoreo en tiempo real de nuestro laboratorio virtual.

La ESP32-CAM es un dispositivo que puede considerarse como "todo en uno". Además de la conectividad Wi-Fi y Bluetooth que viene de fábrica, cuenta con pines GPIO, una pequeña cámara de video integrada y una conexión para una tarjeta MicroSD donde se pueden almacenar fotos o videos. La tercera ventaja es su bajo precio, lo que lo convierte en un dispositivo muy utilizado en IoT. Además, conectarlo a Home Assistant y hacer que forme parte de tu sistema domótico es muy fácil, como se puede observar en la Figura 2.

**Fig 2.** Camara ESP32-CAM



El Raspberry Pi 4 es el servidor principal del laboratorio virtual, ya que cuenta con las características de un computador básico pero más compacto y barato. La Raspberry Pi es la pieza central del servidor, donde se procesa toda la información adquirida por los módulos programables y, en el futuro, las imágenes de las cámaras a implementar.

Una Raspberry Pi es un ordenador del tamaño de una tarjeta de crédito. Consiste en una placa base que soporta distintos componentes de un ordenador, como un procesador ARM de hasta 1500 MHz, un chip gráfico y una memoria RAM de hasta 8 GB, como se observa en la Figura 3.

**Figura 3.** Procesador Raspberry Pi.



Al igual que la Raspberry Pi, el LattePanda es una SBC que funciona como un microordenador. En el laboratorio virtual, su función es enviar a los módulos programables la información de programación necesaria para que los estudiantes realicen los procesos deseados.

El dispositivo LattePanda es un microcomputador con hardware robusto en comparación con otras tarjetas de su misma clase. La placa es capaz de trabajar con sistemas operativos de nivel

Windows 10 y ejecutar cualquier tipo de programa gracias al uso de potentes procesadores, como el chipset Intel Atom Cherry Trail. Esto garantiza una buena calidad al momento de ejecutar varias tareas simultáneamente. Además, el dispositivo incorpora una tarjeta Arduino en su hardware, utilizando un coprocesador ATMMega32u4 y varios puertos, como salida HDMI, Ethernet, jack de 3,5 mm, Bluetooth 4.0, WIFI, USB 2.0 - 3.0, tarjeta microSD y salida para pantalla táctil, entre otros, como se puede ver en la Figura 4.

**Figura 4** Procesador LattePanda



Para este primer laboratorio virtual, se ha establecido como módulo programable un FPGA conformado por un CoreEP4CE6 y una placa DVK601, como se observa en la Figura 5. Dicho FPGA será nuestro módulo programable a monitorear por nuestra cámara de transmisión de video hacia el estudiante, para que pueda visualizarlo de manera remota al momento de estar realizando sus prácticas. Las siglas para FPGA se refieren al término en inglés Field Programmable Gate Array, lo cual significa un arreglo de compuertas lógicas programables por efecto de campo. La carga de información para este módulo programable se pasa a través de la SBC LattePanda con el código que el estudiante ha desarrollado o planea visualizar dentro del laboratorio virtual.

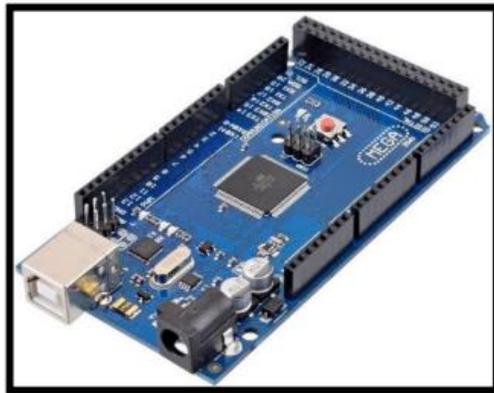
**Figura 5** FPGA CoreEP4CE6



La función que cumple el Arduino Mega en este Laboratorio Virtual es la de analizador lógico, el cual permite la lectura de señales que tendrán como salidas o entradas el módulo de programación, en este caso el FPGA. Una vez obtenidas las lecturas del FPGA, estas pueden ser visualizadas en un apartado dentro de la aplicación del laboratorio virtual.

Arduino Mega, al igual que el FPGA, se trata de un módulo programable. Más específicamente, se trata de un microcontrolador basado en una placa ATMMega2560, como se observa en la Figura 6. Esta pieza de hardware programable cuenta con 54 terminales de entradas/salidas digitales totales, de las cuales 14 de ellas tienen la posibilidad de ser utilizadas como salidas PWM o de tipo analógico. De igual forma, también cuenta con 16 entradas analógicas, las cuales pueden ser configuradas como entradas o salidas digitales, dependiendo de la función que se les quiera brindar. Cuenta con un cristal oscilador de 16 MHz, una conexión USB, un alimentador Jack y su propio botón de reinicio. Por estas características, ha sido elegido para implementar en el laboratorio virtual, ya que permite configurar una gran cantidad de entradas/salidas a voluntad, lo que facilita la lectura de múltiples señales, como las obtenidas por la programación del FPGA y otros módulos programables que se deseen implementar en el futuro dentro del laboratorio virtual.

**Figura 6** Procesador Arduino Mega

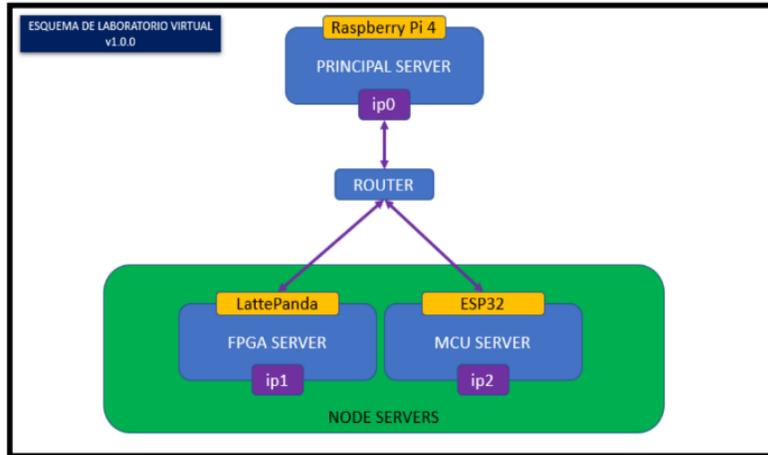


## RESULTADOS

La arquitectura del laboratorio remoto es la siguiente: servidor principal, servicios de nodo, router y microservidores. Como se puede apreciar en la Figura 7, se tienen como piezas de hardware el Raspberry Pi 4, la LattePanda y el módulo ESP32, respectivamente. En el Raspberry Pi 4 es donde se ejecuta el "Principal Server", que es el servidor principal de todo el laboratorio virtual. Aquí se procesa toda la información obtenida por los diferentes dispositivos externos. La dirección IP de la Raspberry Pi es la "0", ya que es la primera dirección IP que se toma para el funcionamiento del servidor. A su vez, tenemos la LattePanda, que también obtiene la dirección IP "1". Este es el apartado encargado del "FPGA SERVER", que recibe y carga la información al módulo programable que el estudiante haya cargado. Por último, nos encontramos con el ESP32, que es el encargado de generar el "MCU SERVER", con el cual se obtiene la tercera dirección IP, la IP "2". Estas tres

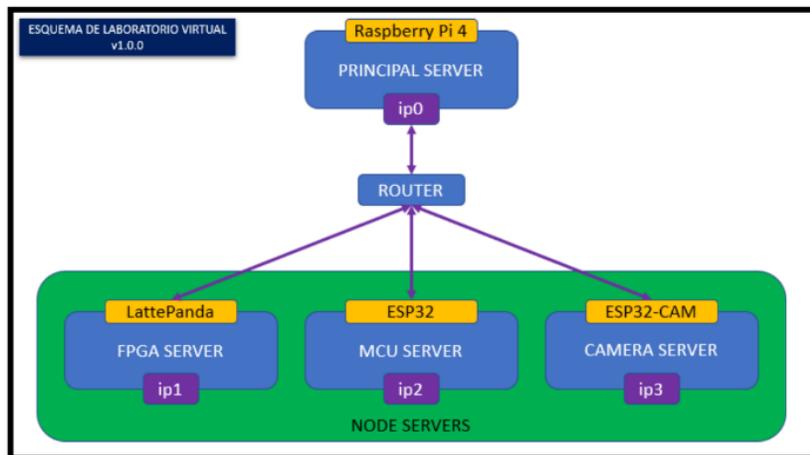
direcciones IP generadas son asignadas por el router de internet, que les asigna puertos de conexión a los diferentes módulos que se conecten a él. Las direcciones IP obtenidas por el "FPGA SERVER" y el "MCU SERVER" sirven para ser agregadas al "PRINCIPAL SERVER" y poder formar juntos una sola sala de laboratorio virtual.

**Figura 7** Arquitectura del laboratorio remoto



Estado actual del laboratorio virtual. A continuación, se representará la implementación física de la cámara de video dentro del diagrama principal del laboratorio. Como se puede apreciar en la Figura 8, únicamente se agregaría un tercer módulo a la sala del laboratorio virtual, el cual nos brindará una cuarta dirección IP (IP3) que, al igual que las otras, será proporcionada por el router de internet. Una vez asignada la dirección IP, esta se agregará al "PRINCIPAL SERVER" para ser utilizada dentro de la sala que el estudiante se encuentre utilizando en sus prácticas.

**Figura 8** Esquema de laboratorio virtual



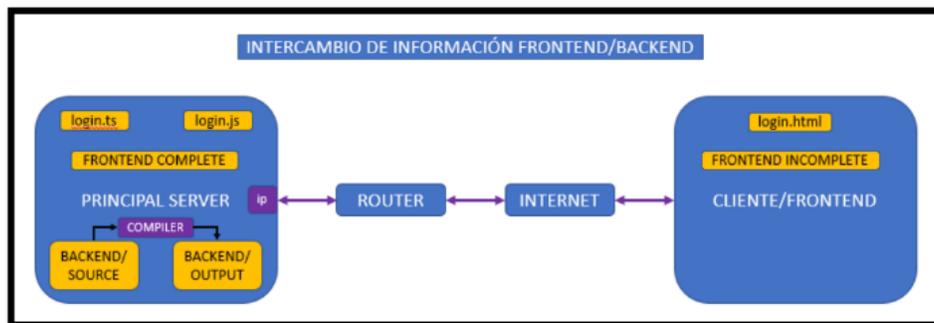
Una parte importante de entender en todo este sistema de intercambio de información es cómo se da dicho intercambio de manera interna. Para esto, se puede apreciar en el siguiente diagrama que muestra de manera resumida cómo funciona.

A modo de resumen en la Figura9, podemos apreciar cómo se da el intercambio de datos entre el cliente (frontend) y el servidor (backend). Primeramente, por el lado del servidor, nos encontramos con los archivos de tipo “.ts”, que son la programación elaborada en lenguaje TypeScript que, posteriormente compilado, nos dará como resultado los archivos de tipo “.js”, que son los que han sido creados gracias a la interpretación del compilador con TypeScript a JavaScript.

Estos archivos JavaScript son colocados posteriormente en el apartado de “BACKEND/OUTPUT”, archivos que serán utilizados para el funcionamiento del frontend gracias a los scripts que se encuentran dentro de los archivos “.html”. Esto hace que pueda funcionar correctamente la interfaz principal que estaría viendo el estudiante en una sala del laboratorio virtual.

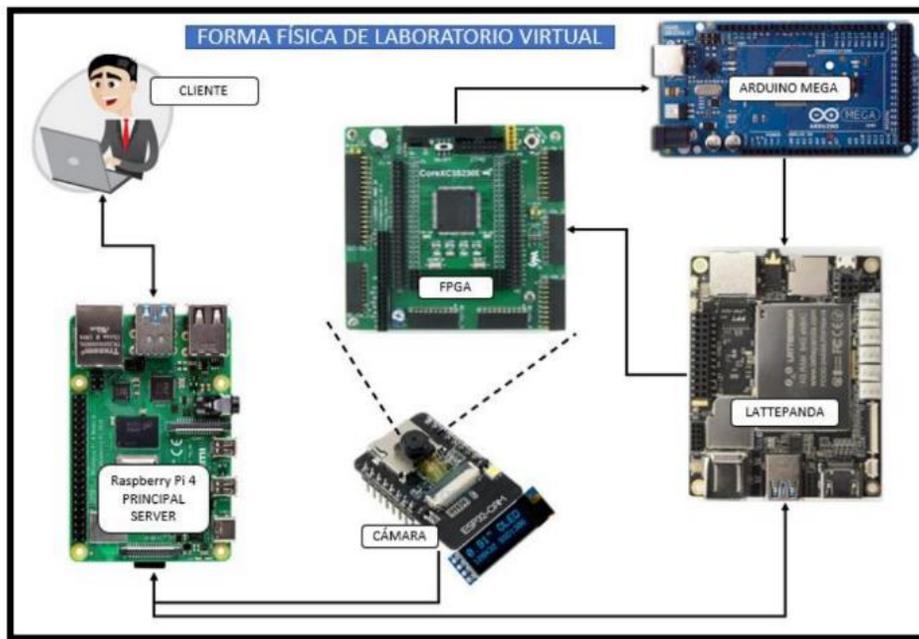
Toda esta información es enviada a través de internet hasta llegar a nuestro “PRINCIPAL SERVER”, que nos permite procesar los requerimientos que está pidiendo el cliente en el frontend y actuar de acuerdo a las acciones que se necesitan ejecutar gracias al código almacenado dentro del servidor.

**Figura 9** Intercambio de información Frontend/backend



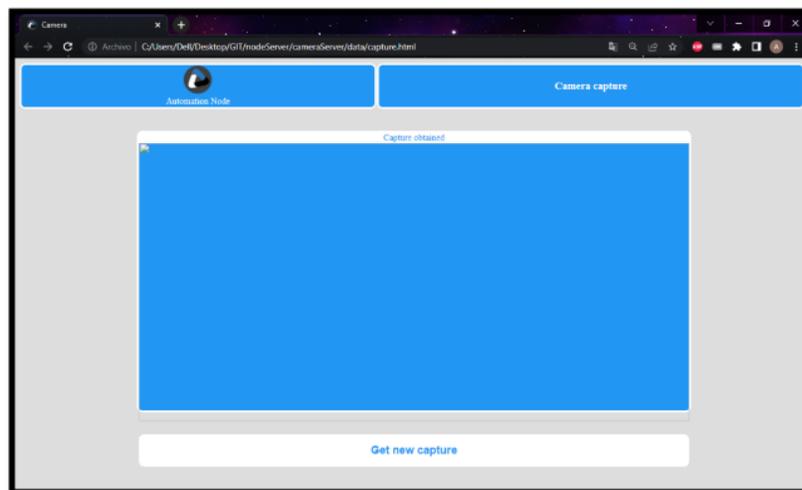
En la Figura 10 se puede observar de manera más clara el estado físico de una sala del laboratorio virtual y cómo se conectan sus componentes entre sí. También se muestra la implementación de la cámara de video en la sala. La información de la cámara será capturada y enviada hacia el servidor principal (Raspberry Pi 4), y posteriormente estas imágenes podrán ser vistas por el estudiante que se encuentre en la sala del laboratorio virtual. Asimismo, el estudiante podrá enviar información para cargar código hacia el FPGA, que a su vez enviará datos del comportamiento de sus salidas al Arduino Mega. Estas lecturas también pueden ser visualizadas por el estudiante a través de gráficos en la interfaz de usuario.

**Figura 10** Sala del laboratorio remoto



La interfaz gráfica del cliente permite visualizar una captura tomada por la cámara, la programación de la interfaz se realiza en el archivo "capture.html", como se observa en la Figura 11.

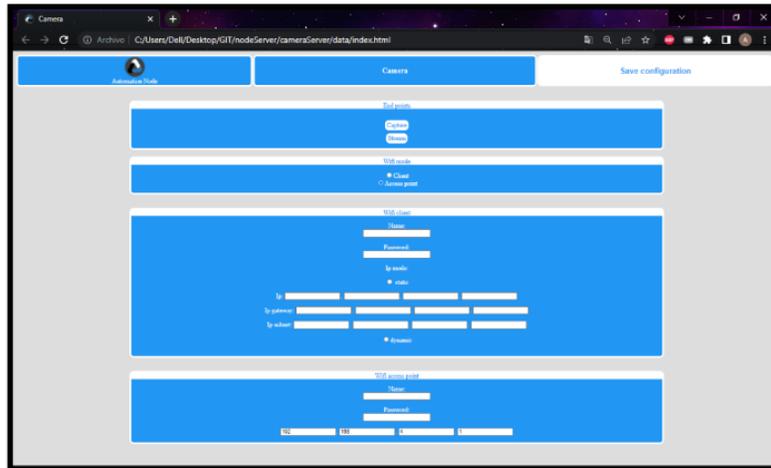
**Figura 11** Interfaz de cliente



El código de index.html describe la renderización de la interfaz gráfica, como se observa en la Figura 12 para el agregado de la información de la cámara al laboratorio virtual. Será necesario agregar los datos correspondientes, como definir el tipo de captura, ya sea una captura simple de

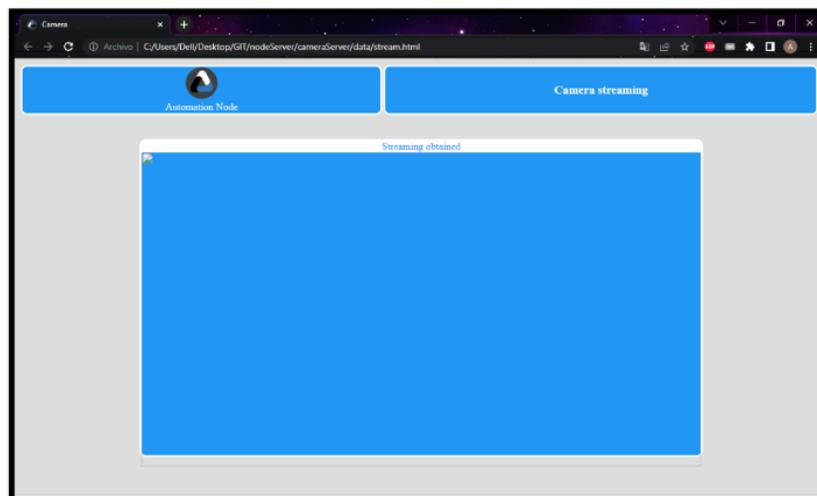
imagen o directamente un stream de video, el modo de Wi-Fi, el agregado de una dirección IP estática o dinámica, y el agregado de la dirección IP obtenida por la cámara una vez conectada al router.

**Figura 12** Interfaz gráfica para administración del laboratorio



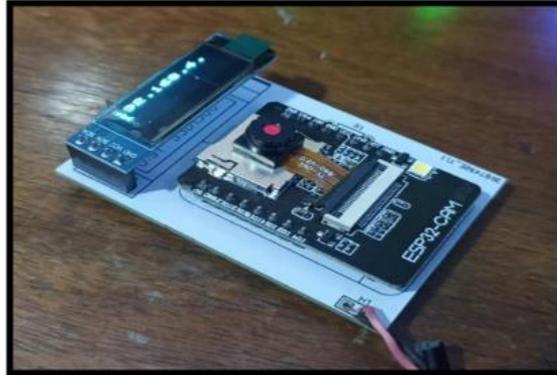
El código para stream.html nos permitirá básicamente mostrar una captura continua de imágenes que dará como resultado imagen de video vía internet hacia el frontend del Cliente, como se observa la Figura 13.

**Figura 13** Visualización de streaming



También es importante mencionar que una vez que se haya cargado la información con el código mencionado en el punto 3.4.1, fue necesario soldar el microcontrolador ESP32-CAM a la PCB diseñada. Además, se requirió soldar en la misma el display que mostrará la información de conexión IP y de red con la que cuenta el módulo de la cámara. Una vez hecho esto, es necesario conectar la cámara a una alimentación de 5V y 2 amperios para que funcione correctamente y esté bien energizada. En la Figura 14 se muestra un módulo de cámara conectado y en su módulo denominado como Nodo-Cam, como se observa en la Figura 15.

**Figura 14** ESP32-CAM con Oled



**Figura 15** Modulo Nodo Cam



Guardamos los cambios realizados en el código para actualizar la imagen e iniciamos el servidor para realizar la prueba. Una vez que el servidor se ha iniciado, es necesario agregar el dispositivo de la cámara al servidor principal, como se muestra en la Figura 16. Para hacer esto, la cámara debe estar conectada a nuestra red de internet, lo que nos proporciona la dirección IP "1680.92.1.73". Con esta información, ya podemos agregar nuestro dispositivo y realizar las pruebas necesarias.

**Figura 16** Servidor y modulo Nodo-Cam



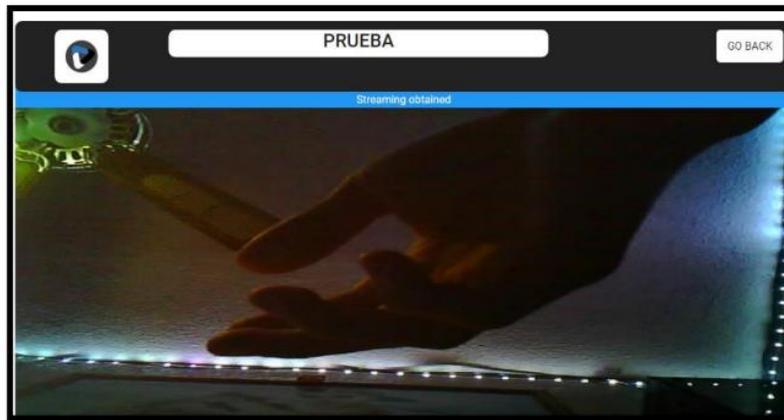
Gracias a esta prueba, podemos darnos cuenta de que se logra una correcta conexión entre el servidor principal y la cámara, la cual se encuentra enviando correctamente las imágenes que está capturando en un período de 4000 milisegundos, o bien, cada 4 segundos. Evidentemente, al tratarse de un tiempo de refresco demasiado alto, el servidor no tiene problema alguno para soportarlo, como se observa en la Figura 17.

**Figura 17** Visualización Streaming



El equivalente de tener una toma cada 4 segundos nos indica una velocidad de fotogramas por segundo (FPS) de 0.25 FPS. A continuación, se adjunta el enlace al video con la primera prueba de video. En esta prueba, se sigue apreciando que el servidor no presenta problemas al estar mandando actualizaciones de imagen cada segundo, por lo cual se considera que se puede disminuir más el tiempo de refresco de imagen, como se observa en la Figura 18.

**Figura 18** Prueba de Streaming



Terminadas las pruebas de rendimiento sobre la actualización de imagen para el video del laboratorio virtual, se obtuvieron los siguientes resultados correspondientes a los valores asignados en cada prueba, como se observa en la Tabla 1. En la columna de rendimiento nos encontraremos con 3 colores, los cuales serán señal para “Rendimiento Estable” (verde), “Rendimiento Medio” (amarillo) y “Bajo Rendimiento” (rojo).

**Tabla 1.** Rendimiento de imagen y video

PRUEBA	TIEMPO DE ACTUALIZACIÓN	FPS	RENDIMIENTO
1	4000 milisegundos (4 segundos)	0.25	Rendimiento Estable
2	1000 milisegundos (1 segundo)	1	Rendimiento Estable
3	500 milisegundos (0.5 segundos)	2	Rendimiento Estable
4	100 milisegundos (0.1 segundos)	10	Rendimiento Estable
5	50 milisegundos (0.05 segundos)	20	Rendimiento Medio

Gracias a la información obtenida por las pruebas realizadas podemos establecer un rango de tiempo que nos permita la actualización de imagen sin presentar alguna sobrecarga de información en el servidor principal. Dados estos resultados se plantea tener un tiempo de actualización de imagen de 100 milisegundos, ya que presenta un rendimiento estable en la transmisión de video, y aunque no presente una fluidez muy alta de FPS, nos permite visualizar correctamente el entorno que se encuentra capturando la cámara. Por estos motivos se descarta el tiempo de 50 milisegundos ya que el servidor principal comienza a tener problemas de rendimiento aún y cuando nos puede brindar una mejor fluidez de video.

## **Conclusiones**

En este documento se logró establecer los primeros criterios para el diseño, desarrollo y validación de un sistema integral denominado laboratorio remoto para sistemas digitales y control en ingeniería. Este sistema incluye la vinculación de diversas plataformas siendo la principal un FPGA que tiene como elemento de vinculación a un Latte Panda y como servidor para exponerlo a la red mundial un Raspberry Pi. Por lo que, para poder vincular estas tres plataformas se desarrolló un software basado en Web y JavaScript para poder tener el control de administración del servidor y a la par el control del Latte Panda que controla al FPGA. Por lo tanto, las primeras pruebas realizadas establecen la interconexión con la red global y local en donde físicamente se encuentra el FPGA. Además, en tiempo real se está monitoreando con un ESP32CAM, que particularmente tiene como propósito dar una retroalimentación en tiempo real al usuario sobre las prácticas de sistemas digitales y control.

En conclusión, para los objetivos definidos en la investigación fue posible mostrar como interactúan los sistemas vinculados del laboratorio remoto, además se denota la interfaz gráfica de usuario y administrador para el control del servidor y monitoreo con las ESP32CAM. Por lo tanto, el detalle del software basado en JS, la metodología de interconexión y protocolos de comunicación del laboratorio remoto fueron establecidos y validados a través de las pruebas de conexión remota en el Laboratorio del Tecnológico Nacional de México Campus Ciudad Juárez y diversos nodos en la región de Ciudad Juárez. En la fase de validación que está en curso, se buscará validar las conexiones remotas con el Campus Ciudad del Conocimiento del ITCJ y la UACJ.

## **Agradecimientos**

Este proyecto de laboratorio remoto para la enseñanza universitaria en sistemas digitales y de control se realiza gracias al apoyo recibido en la estancia posdoctoral por México (2022), CONACYT.

## **Bibliografía**

- Alrin N, Böhne A, Tuttas J, Wagner B (2002) Distributed Team Learning in an Internet -Assisted Laboratory, Proceeding of the ICEE2002, Manchester UK.
- Revans R (1982) Origins and Growth of Action Learning, Bratt - Institute für Neues Lernen, Sweden.
- Geyken A, Mandl H, Reiter W (1998) Selbstgesteuertes Lernen mit Tele-Tutorin. Multi Media und Tele-Learning, Lernen im Cyberspace, Frankfurt.
- Christou IT, Efremidis S, Tiropanis T, Kalis A (2007) Grid-Based Virtual Laboratory Experiments for a Graduate Course on Sensor Networks. IEEE Transactions on Education, USA, pp 17-26
- García Zubía J, Lopez-de-Ipiña D, Orduña P, Hernández U, Trueba I (2006) Evolution of the WebLab at the University of Deusto. European Workshop on Microelectronics Education, EWME 2006. Sweden.
- Gustavsson I, Zackrisson J, Håkansson L, Claesson I, Lagö T (2007) The VISIR project - an Open Source Software Initiative for Distributed Online Laboratories. REV Conference, Porto.
- Javier García-Zubia, Diego López-de-Ipiña, Unai Hernández, Pablo Orduña, Iván Trueba, WebLab Deusto, Proceedings of the ICBL conference, Florianopolis, May 2007
- Schmid C (2007) Grid Technologies for Virtual Laboratories in Engineering Education. REV Conference 2007, Porto.
- Tuttas J, Wagner B (2001) Distributed Online Laboratories. Proceedings of the International Conference on Engineering Education. Norway .
- William B. Gail (2007), Remote Sensing in the coming decade: the vision and the reality. Journal of Applied Remote Sensing, Vol. 1, 012505,
- De Vora A (2006) A General Framework for a Module Based Distributed Online- Lab Network based on Open Source Technologies. University of Limerick Ollscoil Luimnigh. Limerick, Ireland.
- Donzellini G., Ponta D., Garcia-Zubia J. & Del Moral A. (2008). PBL en Electrónica Digital: Un Ejemplo. Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica TAEE 2008.
- Linge N. & Parsons D. (2006). Problem based learning as an effective tool for teaching computer network design. IEEE Transactions on education, 49(1), 5-10.

- Dormido R., Vargas H., Duro N., Sanchez J., Dormido Canto S., Farias G., Esquembre F., & Dormido, R. (2008). Development of a web-based control laboratory for automation technicians: The three-tank system. *IEEE Transactions on Education*, 51(1), 35–44.
- Dabroom A., Refie W. & Matmti R. (2013). Microcontroller-based learning kit: Course design using constructive alignment principles, *Control & Automation (MED) 2013 21st Mediterranean Conference*, 558- 566.
- Yazidi A., Henao H., Capolino G., Betin F., & Filippetti, F. (2011). A web-based remote laboratory for monitoring and diagnosis of ac electrical machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(10), 4950- 4959.
- Lei C., So H., Lam E., Wong K., Kwok R. & Chan C. (2012). Teaching introductory electrical engineering: Project-based learning experience, *Teaching, Assessment and Learning for Engineering (TALE)*, 2012 IEEE International Conference.
- Lamar D., Miaja P., Arias M., Rodriguez A., Rodriguez M., Vazquez A., Hernando M. & Sebastian J. (2012). Experiences in the Application of Project-Based Learning in a Switching-Mode Power Supplies Course, *Education, IEEE Transactions*, 55 (1), 69-77.
- Pastor Mendoza J. (2008), Evaluación de las mejoras en la formación en aptitudes y competencias de los estudiantes de ingeniería que participan en competiciones de robots móviles autónomos. Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica TAEE 2008.
- Biggs J. & Tang C. (2007), *Teaching for Quality Learning at University: What the Student does*. McGraw-Hill.
- Arana-Arexolaleiba N., Markiegi-Gonzalez U., Oyarzun J. & Velez I. (2013). Adapting PBL instantiation to promote students' engagement, *4th International Research Symposium on Problem-Based Learning (IRSPBL) 2013*.
- Besada-Portas, E., Lopez-Orozco, J., de la Torre, L., & de la Cruz, J. (2012). Easy java simulations meets twincat: Remote real-time control experiments using programmable logic controllers. *IFAC Symposium on Advances in Control Education*, Russia.
- Grau, A. & Bolea, Y. (2008). Remote laboratory for control engineering degree. *Proceedings of the 17th World Congress of The International Federation of Automatic Control*, Seoul, Korea.

- Besada-Portas, E., Lopez-Orozco, J., de la Torre, L., & de la Cruz, J. (2013). Remote control laboratory using EJS applets and twincat programmable logic controllers. *IEEE Transactions on Education*, 56(2), 156–164.
- Papadimitriou M., Fumero J., Stratikopoulos A., Zakkak F., Kotselidis C. (2020). Transparent Compiler and Runtime Specializations for Accelerating Managed Languages on FPGAs. *The Art, Science, and Engineering of Programming*, 5(2), 8-28.
- Bouhachmir González Y. & Llamas Nistal M. (2014). Análisis de Funcionalidades de Evaluación en Plataformas E-learning, XI Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica, XI CONGRESO TAAE 2014.
- Šimíčková J., Baganová K., Mošková E., Specifics of the Agile Approach and Methods in Project Management and its Use in Transport, *Transportation Research Procedia* 55 (2021) 1436–1443.
- D. I. K. Sjøberg, A. Johnsen and J. Solberg, "Quantifying the Effect of Using Kanban versus Scrum: A Case Study," in *IEEE Software*, vol. 29, no. 5, pp. 47-53, Sept.-Oct. 2012, doi:10.1109/MS.2012.110.
- N. Mena Mamani, F. J. García-Peñalvo, M. Á. Conde and J. Gonçalves, "A systematic mapping about simulators and remote laboratories using hardware in the loop and robotic: Developing STEM/STEAM skills in pre-university education," in *Proceedings of the 2021 International Symposium on Computers in Education (SIIE) (23-24 September 2021, Málaga, Spain)*, A. Balderas, A. J. Mendes and J. M. Doderó, Eds., USA: IEEE, 2021. doi: 10.1109/SIIE53363.2021.9583622.
- Guna Permana P. A., Scrum Method Implementation in a Software Development Project Management, (*IJACSA*) *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, Vol. 6, No. 9, 2015.
- Tavassolia S., Brandta M., Qiana M., Areniusa P., Kianianb B., Adoption and Diffusion of Disruptive Technologies: The Case of Additive Manufacturing in Medical Technology Industry in Australia, *Procedia Manufacturing* 43 (2020) 18–24
- Limpraptono F. Y., Nurcahyo E., Faisol A., Ajiza M., and Sunaryo D. K., Development Architecture of Remote Laboratory as Learning Solution in Industrial Revolution 4.0 Era, *Journal of Industrial and Intelligent Information* Vol. 8, No. 2, December 2020
- Herrero-Villareal D., Arguedas-Matarrita C. and Gutiérrez-Soto E., Remote laboratories:

Educational resources for remote experimentation in times of pandemic from the students' point of view, Revista de enseñanza de la física, Vol. 32, no. extra (2020) PP. 181-189 ISSN 2451-6007

Lavayssière C., Larroque B., Luthon F., Laborem Box: A scalable and open source platform to design remote lab experiments in electronics, HardwareX 11 (2022)

Alzeer I. M., Abushams M. F., Online Remote Smart Grid Lab, Design Engineering (Toronto) November 2021

Reid D. P., Burrige J., Lowe D.B., and Drysdale T.D., Open-source remote laboratory experiments for controls engineering education, International Journal of Mechanical Engineering Education 1–21, 2022.

DOI: 10.1177/03064190221081451

Migue M. R., A Change in the 21st Century: Realizing the Effect of Replacing Actual Laboratories with Virtual Laboratories, International Journal of Science and Research (IJSR) ISSN: 2319-7064 SJIF (2020): 7.803

Monzo, C.; Cobo, G.; Morán, J.A.; Santamaría, E.; García-Solórzano, D. Remote Laboratory for Online Engineering Education: The RLAB-UOC-FPGA Case Study. Electronics 2021, 10, 1072.

<https://doi.org/10.3390/electronics10091072>

Samuelson D. A. H., Graven O. H., Remote Laboratories in Engineering Education — an Overview of Implementation and Feasibility, 14th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Engineering Innovations for Global Sustainability”, 20-22 July 2016, San José, Costa Rica.

Grout I., Remote Laboratories as a Means to Widen Participation in STEM Education, Educ. Sci. 2017, 7, 85; doi:10.3390/educsci7040085

Grupo Galileo, Laboratorio remoto del grupo galileo. Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Litoral, 2008

[iLab Organizer :: login \(ilabsolutions.com\)](#)

[iLabs \(mit.edu\)](#)

[Educational Transformation through Technology at MIT - iLABS](#)

[MIT iLabs Project: Remote Online Laboratories | ILP](#)

[Gallery of Educational Innovation: iLabs | OEIT \(mit.edu\)](#)

[Con iLab, tú puedes ser el próximo innovador reconocido por el MIT | iLab](#)

[Consultora en innovación | iLab](#)

[iCampus — The MIT-Microsoft Alliance](#)

[References \(deusto.es\)](#)

## Curriculums autores

---

### **Manuel Iván Rodríguez Borbón**

Profesor de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez por 15 años. Además, es profesor en la Universidad Estatal de Nuevo México (NMSU) en el departamento de ingeniería industrial. Sus áreas de investigación son el Análisis de Confiabilidad, Análisis de Datos, Diseño de Experimentos y Calidad. Ha sido miembro del Sistema Nacional de Investigación Nivel 1 por más de 10 años. Además, el Dr. Rodríguez ha sido consultor industrial por más de 15 años en el área de Calidad, Análisis de Confiabilidad, Seis Sigma y Análisis de Datos. El Dr. Rodríguez obtuvo su doctorado en la Universidad Estatal de Nuevo México (NMSU) en 2011. Actualmente desarrolla modelos de predicción para investigación, así como la optimización y mejora continua de procesos industriales y de servicio.

### **Hansuk Sohn**

Profesor asociado del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad Estatal de Nuevo México (NMSU). El Dr. Sohn recibió la maestría y el doctorado en ingeniería industrial de la Universidad de Iowa, Iowa City, EE.UU. en 1995 y 2004, respectivamente. También fue asociado postdoctoral en el Centro de Diseño Asistido por Computadora de la Universidad de Iowa en 2004. El área de investigación del Dr. Sohn se centra en el estudio de la ciencia computacional y la ingeniería a gran escala. Las aplicaciones específicas de interés son la gestión de riesgos en el sistema de distribución de energía y agua, el sistema de prestación de atención médica sostenible, la resiliencia de la cadena de suministro y la optimización logística. Es miembro senior del Instituto de Ingenieros Industriales y de Sistemas (IISE) y del Instituto de Investigación de Operaciones y Ciencias de la Gestión (INFORMS).

### **Eduardo Rafael Poblano Ojinaga**

Profesor durante 35 años en Ingeniería Industrial en el Tecnológico Nacional de México, Campus La Laguna. Obtuvo su doctorado en Tecnología en la Universidad Autónoma de Cd. Juárez-México (2019) y es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (México). Su área de investigación es Planificación Estratégica, Ingeniería de Calidad y Modelado de Ecuaciones Estructurales. Tiene experiencia profesional industrial como gerente de producción, calidad y comercialización. También ha sido consultor industrial en ingeniería de calidad, seis sigma y trabajo en equipo. Actualmente es jefe de la división de estudios de posgrado e investigación del Tecnológico Nacional de México campus ciudad Juárez.

### **Alejandra Flores Sánchez**

Doctora en Ciencias de la Ingeniería, egresada del Tecnológico Nacional de México Campus Ciudad Juárez. Docente con 15 años de experiencia, actualmente como docente de Medio Tiempo en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Investigadora interdisciplinaria, con varias publicaciones científicas y de difusión con aplicaciones estadísticas en diversas áreas como: manufactura, enfermedades y situaciones de impacto social. Líder de la Red de Estudios Latinoamericanos en Estudios de Género en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Directora y codirectora de varios proyectos de titulación. Evaluadora en semanas de investigación en el Tecnológico de Ciudad Juárez. Impartición de cursos en los diferentes niveles educativos sobre ciencia, ingeniería, tecnología y algunas enfermedades de impacto social.

### **Luz Elena Terrazas Mata**

Profesora investigadora de la División de Estudios de Posgrado e Investigación, del Tec NM/ I.T. Ciudad Juárez, es Ingeniero Industrial en Producción con una Maestría en Ciencias en Ingeniería Administrativa y Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, forma parte del Sistema Nacional de Investigadores del CONAHCyT, con más de 15 años de experiencia profesional ocupando varios cargos a nivel coordinación en áreas de manufactura, ingeniería, y materiales. Con 15 años de experiencia docente y administrativa en los niveles de licenciatura y maestría. Dirección y codirección de tesis de investigación, con publicaciones científicas y de aplicación en revistas científicas y congresos nacionales e internacionales

### **Manuel Alonso Rodríguez Morachis**

Profesor investigador de la División de Estudios de Posgrado e Investigación, del Tec NM/ I.T. Ciudad Juárez, es Ingeniero Industrial en Producción con una Maestría en Ciencias en Ingeniería Industrial y Doctorado en Ingeniería Industrial, forma parte del Sistema Nacional de Investigadores del CONAHCyT, tiene más de 35 años de experiencia profesional ocupando varios cargos directivos y gerenciales en áreas de manufactura, ingeniería, materiales, diseño, mantenimiento y operaciones, de planta. Tiene 25 años de experiencia docente y administrativa en los niveles de licenciatura maestría y doctorado. Dirigiendo y codirigiendo más de 20 tesis de investigación, ha escrito más de 25 artículos científicos y de aplicación en revistas científicas y congresos nacionales e internacionales.

### **Francisco Zorrilla Briones**

Profesor investigador de la División de Estudios de Posgrado e Investigación, del Tec NM/ I.T. Ciudad Juárez, es Ingeniero Industrial Mecánico con una Maestría en Ciencias en Ingeniería Administrativa y Doctorado en Ciencias en Ingeniería Industrial, forma parte del Sistema Nacional de Investigadores del CONAHCyT, tiene más de 20 años de experiencia profesional ocupando varios cargos administrativos en áreas de manufactura, ingeniería y mantenimiento. Tiene más 25 años de experiencia docente y administrativa en los niveles de licenciatura maestría y doctorado. Dirigiendo y codirigiendo más de 20 tesis de investigación, ha escrito más de 25 artículos científicos y de aplicación en revistas científicas y congresos nacionales e internacionales.

### **Ángel Noé Alvarado Pizarro**

Maestro en Enfermería. Profesor de Tiempo Completo, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez; Ciudad Juárez, México egresado de la Licenciatura en Enfermería y la Maestría en Enfermería de la Universidad Autónoma de Chihuahua. Su línea de investigación se centra en: conductas sexuales de riesgo en población adolescente, jóvenes y migrantes. En el área de docencia con experiencia en más de 7 años, imparte clases de Educación para la Salud, Enfermería Fundamental, Enfermería Familiar y Comunitaria, Historia y Filosofía del Cuidado Humano. Cuenta con experiencia clínica por 10 años con énfasis en las áreas quirúrgicas, oncológicas y prevención de ITS.

### **Luis Raúl Aguilar Lujan**

Egresado de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, con experiencia de 3 años en laboratorio clínico en las diferentes áreas y fases del mismo, hematología, microbiológica, química clínica, toxicología, serología y endocrinología y manejo de farmacias por 2 años desde la administración hasta la atención al cliente. Capacitación continua en el área de laboratorio clínico, seguridad e higiene industrial, en el cual desarrollo el puesto de Supervisor de Analisis Clínicos desde hace 2 años. Actualmente cursando Diplomado en Flebotomía y toma de muestras biológicas.

### **Secundino Ramos Lozano**

Profesor en la Universidad Tecnológica de Cd. Juárez y la Universidad Autónoma de Cd. Juárez. Egresado de ingeniero Electromecánico en planta y mantenimiento en el Instituto Tecnológico de Cd. Juárez y de la Maestría en Ingeniería Industrial del mismo Instituto. El Doctorado en Tecnología lo obtuvo en la Universidad Autónoma de Cd. Juárez. Su línea de investigación es en área de manufactura aditiva enfocándose en la optimización de la impresión 3D que usa tecnología de deposición de filamento fundido, y en el mejoramiento de la metodología de análisis y solución de problemas mediante el uso de diferentes herramientas estadísticas con la finalidad de dar acciones correctivas más eficaces. Tiene 19 años de experiencia en la Industria maquiladora principalmente en el área automotriz, en una corporación de clase mundial, desempeñando diferentes puestos en las diferentes plantas de la compañía principalmente en las áreas de mantenimiento de equipo y mantenimiento de planta, Ingeniería Industrial, manufactura e Ingeniería de procesos

### **Manuel Arnoldo Rodríguez Medina**

Profesor-investigador de tiempo completo en el Instituto Tecnológico de Cd. Juárez. Egresado de la licenciatura de Ingeniería Química de la Universidad Autónoma de Sinaloa y de la Maestría y Doctorado en Ciencias en Ingeniería Industrial, del Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez. Sus líneas de investigación y de trabajo son optimización robusta, diseño de producto, administración de la tecnología, confiabilidad, Optimización de Productos y procesos. Es Integrante del núcleo académico básico del Doctorado en Ciencias en Ingeniería y de la Maestría en Ingeniería Administrativa en el ITCJ. Sus trabajos están enfocados en el análisis y solución de problemas relacionados con la mejora de la calidad de productos y procesos industriales. Ha sido consultor de la industria maquiladora durante 31 años, enfocándose principalmente en el área de calidad, en los temas relacionados con la Normatividad, tales como: Norma ISO 9001:2015, IATF 16949, Proceso de Planeación Avanzada de la Calidad, Proceso de Aprobación de Partes de Producción, Análisis del Modo de Falla y Efecto (FMEA), Control Estadístico de Procesos (SPC), Análisis del

Sistema de Medición (MSA), Diseño de Experimentos, Muestreo de Aceptación, etc. Ha publicado más de 60 artículos en revistas nacionales e internacionales.

### **Ma. De los Ángeles De la Torre Mora**

Estudiante de Maestría en Administración de Negocios Internacionales en el Instituto Tecnológico de Cd. Juárez. Egresada de la Licenciatura en Contaduría del mismo. La experiencia laboral es que ha trabajado como auxiliar de contabilidad en empresas privadas, también ha sido contadora general de una empresa dedicada a la construcción de casas habitación llamada Laza Constructora. Ha sido docente durante doce años, empezó por ser docente de primaria y secundaria en el ICHEA, ha sido docente en la Universidad Tecnológica de Cd. Juárez impartiendo diferentes materias tanto en el área contable, administrativa e ingenierías. También ha sido docente en la Universidad Cultural impartiendo distintas materias en el área contable como en el área administrativa y en las ingenierías. Por último, ha sido también maestra a nivel preparatoria impartiendo algunas materias desde el primer semestre hasta el sexto semestre en la Preparatoria Bachillerato Integral de Cd. Juárez.

### **Ericka Berenice Herrera Ríos**

Doctora en Ciencias en Ingeniería Industrial del Instituto Tecnológico de Cd. Juárez con área de especialidad en Optimización de Productos y Procesos. Maestro en Ciencias en Ingeniería Industrial (ITCJ) con especialidad en Corridos Cortos de Producción. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores como Candidato con publicaciones en revistas indizadas y de divulgación científica. Representante Institucional ante PRODEP con el Reconocimiento al Perfil Deseable. Coordinadora del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería y de la Maestría en Ingeniería Administrativa del ITCJ. Directora y Codirectora de Tesis de Titulación. Catedrática en materias del área de Calidad, Estadística y Matemáticas.

### **Jaime Sánchez Leal**

Doctor en Filosofía de la Universidad Estatal de Nuevo México. Maestro en Ciencias en Matemáticas (NMSU). Maestro en Ciencias del Instituto Tecnológico de Cd. Juárez Su área de especialidad es estadística aplicada, optimización experimental robusta y programación matemática. Profesor Emérito otorgado por ANFEI, Ex-Director del Instituto Tecnológico de Cd. Juárez, Profesor-Investigador, Decano de la División de Estudios de Posgrado e Investigación, Miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel 1. Autor de dos libros de estadística y diseño de experimentos, además de autor y coautor de más de 50 artículos publicados en congresos y revistas internacionales.

### **Diego Adiel Sandoval Chávez**

Doctor en Investigación en Medioambiente, Energía y Sociedad (El Colegio de Chihuahua). Master of Science in Manufacturing Engineering (The University of Texas at El Paso). Maestro en Ciencias en Ingeniería Industrial (TecNM/IT Ciudad Juárez). Graduated from the Applied Leadership for Renewable Energy and Energy Efficiency Program (School of Public Health, Harvard University). Ingeniero Industrial en Producción (TecNM/IT de Ciudad Juárez). Profesor-Investigador Decano de la División de Estudios de Posgrado e Investigación, Miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel 1 (SIN-I). Perfil deseable PRODEP. Presidente del Claustro del Programa

Doctorado en Ciencias de la Ingeniería. Líder del Cuerpo Académico “Enfoque de Sistemas en Organizaciones Públicas y Privadas. Autor y coautor de 75 publicaciones indizadas, director de 53 tesis de posgrado.

#### **Rafael García Martínez**

Profesor de Tiempo Completo con perfil PRODEP del Tecnológico Nacional de México. Candidato a Investigador del SNI del CONACYT. perfil PRODEP. Línea de investigación: modelación mediante Modelos de Ecuaciones Estructurales; optimización experimental. evaluador en los programas: Fondo Mixto CONACYT-Gobierno del Estado de Baja California; Fondo Mixto CONACYT-Gobierno del Estado de Tlaxcala; Programa de Estímulos a la Innovación Tecnológica de Alto Valor Agregado 2010, CONACYT, AMSDE y la Rednacecyt. Coordinador regional de la zona noroeste del programa SUPERA ANUIES. Director del Instituto Tecnológico del Valle del Yaqui (2010-2017).

#### **Salvador A. Noriega Morales**

Profesor de Tiempo Completo de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Profesor de Tiempo Parcial en la Universidad Autónoma de México. Perfil PRODEP. Investigador perteneciente al nivel I del Sistema Nacional de Investigadores del CONACYT con ocho años de antigüedad, con más de 50 publicaciones en revistas internacionales (jcr), más de 200 memorias de conferencias, tres libros en coautoría. Empresario. Experiencia a nivel gerencial en la industria.

#### **Tomás Francisco Limones Meraz**

Profesor de Tiempo Parcial con perfil PRODEP del Tecnológico Nacional de México. Candidato a Investigador del SNI del CONACYT. Con 18 publicaciones en revistas a nivel nacional e internacional. Jefe de Departamento en ITCJ agosto 2015-mayo 2016 Metal Mecánica y agosto 2017-sept 2022 Ingeniería Industrial. Con reconocimientos a nivel nacional primer lugar premio RMG 2016 y primer lugar premio estatal mi trabajo, mi futuro noviembre 2019. Con 2 registros en propiedad intelectual y 2 en derechos de autor.

#### **Adan Valles Chavez**

Doctor en Ciencias en Ingeniería Industrial por el Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez. Desde 2011 es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI). Es docente e investigador del Tecnológico Nacional de México campus de Ciudad Juárez, maestro investigador con más de 40 años de servicio, impartiendo cátedra en Ingeniería Industrial nivel Licenciatura, Maestría y Doctorado, área de investigación en Mejoramiento, Manufactura Esbelta, Metodología Seis Sigma, Tecnología y Estrategia de Manufactura. Manufactura en Industria 4.0 y cuenta con más de 90 publicaciones en revistas científicas y 90 artículos en memorias de conferencias. Asesor de más de 100 tesis y residencias de Licenciatura y Maestría en los temas de Manufactura Esbelta y Seis Sigma. Participación en congresos de ingeniería industrial nacionales e internacionales en Japón, Alemania, Francia, España, Colombia, Estados Unidos y México. Distinciones programa para el desarrollo profesional docente (prodep) desde el 2010 hasta el 2025. Distinciones asociación nacional de facultades y escuelas de ingeniería (anfei) nombre de la distinción: año: mérito académico 2014, de la región I.

**Mariela Alvarez Arguelles**

Estudiante del programa de Doctorado en Tecnología de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Maestría en Administración de Negocios, de la Universidad del Valle de México. Es profesora en el Instituto de Ingeniería y Tecnología de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, en las materias de contabilidad general, contabilidad administrativa, contabilidad y costos, administración esbelta, modelos económicos para la toma de decisiones e ingeniería económica.

**Soledad Vianey Torres Argüelles**

Maestra en Ciencias y Doctora en Ingeniería por la Universidad Autónoma de Querétaro; Profesora investigadora en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel I, cuenta a la fecha con más de 60 publicaciones, en forma de artículos de investigación y divulgación, y capítulos de libro; los cuales alcanzan ya las 250 citas. Ha dirigido proyectos de titulación y de investigación, a nivel licenciatura 27 proyectos de titulación, a nivel maestría ha dirigido 12 proyectos y a nivel doctorado ha formado cuatro doctoras y cuatro están en formación. Los temas de investigación de interés son el análisis de sistemas complejos y la sostenibilidad en la industria, enfocados a disminuir el impacto que los procesos productivos tienen sobre el ambiente.

**Jeovany Rafael Rodriguez Mejia**

Profesor durante 7 años en Ingeniería Mecánica en el Tecnológico Nacional de México, Campus Ciudad Juárez. Obtuvo su doctorado en Ciencias de la Ingeniería en el Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez-México (2021) y actualmente cuenta con reconocimiento de perfil PRODEP. Su área de investigación es Sistemas Dinámicos y Complejos, Control y aplicaciones en energías alternas. Tiene experiencia profesional industrial como ingeniero de producción, diseño y comercialización. También ha sido consultor en ingeniería en áreas de energías alternas, control y trabajo en equipo. Actualmente se desempeña como subdirector académico del Tecnológico Nacional de México, Campus Ciudad Juárez.

**Manuel de Jesus Nandayapa Alfaro**

Profesor investigador de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez por más de 19 años, actualmente es miembro activo de la IEEE. Es Doctor en Mecatrónica por la Universidad Nagaoka (2015) y es miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel I (México). En su trayectoria a ocupado diversos cargos dentro del Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, tal como coordinador de posgrado, entre otros. Actualmente desarrolla su línea de investigación en Sistemas Mecatrónicos, Robótica, e interfaces Hápticas.

**Jorge Adolfo Pinto Santos**

Profesor investigador de la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez (ITCJ), con 15 años de experiencia docente en Instituciones de Educación Superior. Se tituló de la Maestría en Ingeniería Industrial del Instituto Tecnológico de la Laguna. Obtuvo su doctorado en Tecnología en Tecnología en la Universidad Autónoma de Cd. Juárez-México (2021). Su área de investigación se enfoca en la Ingeniería de Calidad, Seis Sigma y en Estadística Multivariable. Así mismo, su experiencia profesional ha estado relacionada a las áreas de Aseguramiento de Sistemas de Calidad, Control de la Producción, Sistemas de Almacenamiento y Compras. También se desarrolla como evaluador de competencias clave del Consejo de Normalización y Certificación.

## **Enfoques y métodos para resolver problemas sociales y productivos de manera sostenible**

Se terminó de editar en julio del 2023 en los talleres de Editorial Centro de Estudios e Investigaciones para el Desarrollo Docente. CENID AC Pompeya # 2705. Colonia Providencia C.P. 44670 Guadalajara, Jalisco. México Teléfono: 01 (33) 1061 8187

