



# Métodos para la Optimización y Resolución de Problemas en la Ingeniería

En Reconocimiento al  
Dr. Diego Adiel Sandoval Chávez  
Decano del TecNM-IT.  
Cd. Juárez, México

Coordinadores  
Ericka Berenice Herrera Ríos  
Lizette Alvarado Tarango  
Roberto Romero López

Ana Isela García Acosta  
Leonardo Alberto Alanís Castro  
Jorge de la Riva Rodríguez  
Adrián Francisco Loera Castro  
Cynthia Márquez Márquez  
Rigoberto Reyes Valenzuela  
Manuel de Jesús López Pérez  
Rubén Juárez Rodríguez  
Javier Antonio Lom Hernández  
Luz Angélica Aguilar Chávez

Arturo Paz Pérez  
Humberto García Castellanos  
Manuel Arnoldo Rodríguez Medina  
Lizette Alvarado Tarango  
Carlos Alberto Ronquillo Salas  
Ulises Martínez Contreras  
Adán Valles Chávez  
Gabriel Gómez Martínez  
Eduardo Rafael Poblano Ojinaga

# MÉTODOS PARA LA OPTIMIZACIÓN Y RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS EN LA INGENIERÍA

ISBN México (CENID): 978-607-8830-23-7  
ISBN España (AEVA): 978-84-09-52251-4  
<https://doi.org/10.23913/9786078830237>

Primera edición, 2023 Todos los derechos reservados.

© 2023. **Coordinadores.** Ericka Berenice Herrera Ríos, Lizette Alvarado Tarango y Roberto Romero López.

© 2023. **Autores.** Ana Isela García Acosta, Leonardo Alberto Alanís Castro, Jorge de la Riva Rodríguez, Adrián Francisco Loera Castro, Humberto García Castellanos, Cynthia Márquez Márquez, Rigoberto Reyes Valenzuela, Manuel de Jesús López Pérez, Rubén Juárez Rodríguez, Javier Antonio Lom Hernández, Arturo Paz Pérez, Luz Angelica Aguilar Chávez, Manuel Arnoldo Rodríguez Medina, Lizette Alvarado Tarango, Carlos Alberto Ronquillo Salas, Ulises Martínez Contreras, Adán Valles Chávez, Gabriel Gómez Martínez, Eduardo Rafael Poblano Ojinaga.

***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:** Orlanda Patricia Santillán Castillo.

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 del CONAHCYT.

© 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>Prólogo</b>	<b>4</b>
<b>Reseña</b> <i>Diego Adiel Sandoval Chávez</i>	<b>6</b>
<b>Optimización de refugios y rutas de evacuación en un campus universitario, un caso de estudio para ciudades inteligentes y logística en inundaciones.</b> <i>Adrian Loera Castro</i> <i>Humberto García Castellanos</i> <i>Cynthia Marquez Marquez</i>	<b>8</b>
<b>La neuroergonomía en el factor de descanso operacional: Revisión de Literatura.</b> <i>Ana Isela García Acosta</i> <i>Leonardo Alberto Alanís Castro</i> <i>Jorge de la Riva Rodríguez</i>	<b>48</b>
<b>Análisis aerodinámico de ala morfológica con envergadura variable.</b> <i>Arturo Paz Pérez</i> <i>Humberto García Castellanos</i> <i>Jorge de la Riva Rodríguez</i>	<b>64</b>
<b>Industria 4.0: Tendencia basado en análisis bibliométrico.</b> <i>Javier Antonio Lom Hernandez</i> <i>Adan Valles Chávez</i> <i>Eduardo Rafael Poblano Ojinaga</i>	<b>86</b>
<b>Validación de identidad en línea de bajo costo y requisitos mínimos de hardware para ingreso a Instituciones de Educación Superior del Tecnológico Nacional de México.</b> <i>Rigoberto Reyes Valenzuela</i> <i>Manuel de Jesús López Pérez</i> <i>Rubén Juárez Rodríguez</i>	<b>111</b>

**Redes bayesianas y sus aplicaciones contemporáneas.**

*Luz Angélica Aguilar Chávez*

*Manuel Arnoldo Rodríguez Medina*

*Lizette Alvarado Tarango*

**128**

**Introducción a la optimización robusta e ingeniería predictiva:  
una revisión de literatura.**

*Gabriel Gómez Martínez*

*Manuel Arnoldo Rodríguez Medina*

*Eduardo Rafael Poblano Ojinaga*

**156**

**Detección de anomalías en una impresora 3d bajo el paradigma de la industria  
4.0 usando unidades de medición inercial y aprendizaje profundo.**

*Carlos Alberto Ronquillo Salas*

*Ulises Martínez Contreras*

*Adán Valles Chávez*

**183**

**Curriculum Vitae**

**203**

## Prólogo

La globalización de los últimos tiempos ha llevado a las empresas a estandarizar y optimizar sus procesos de manera efectiva, dando paso a la cuarta revolución industrial, también conocida como Industria 4.0 (I4.0). Ésta ha incorporado los conocimientos anteriores al internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés), con el fin de mostrar la tendencia actual y pronosticar desarrollos futuros. Un ejemplo de ello lo constituyen los repositorios de publicaciones científicas, tales como Google Scholar, ResearchGate o Scopus, que son herramientas que permiten entender los esfuerzos actuales y justificar futuros proyectos en diferentes áreas de la ingeniería.

Además del IoT, se han integrado diversas tecnologías, tales como la inteligencia artificial de aprendizaje profundo con el propósito de transformar una cantidad masiva de datos en conocimiento. Así ocurre en la manufactura aditiva o la impresión 3D, en las que los métodos de optimización se aplican para identificar estados de operación atípicos mediante la detección de anomalías vibratorias, detectadas a través de sistemas de monitoreo de su estado de operación, reduciendo desviaciones del proceso que afectan la calidad de las piezas impresas y que traen consigo pérdida de recursos.

Estos métodos de optimización también se aplican en el campo de la investigación aeronáutica, centrada en las alas y el cambio de forma, aumentando la eficiencia del vuelo y reduciendo el consumo de combustible debido a la resistencia de vuelo, entre otros factores en aeronaves comerciales.

El principal reto de los métodos de optimización se presenta cuando las condiciones son adversas e inestables, pues el desempeño del proceso o producto se ve afectado. Por ello, la Ingeniería Predictiva (PI, por sus siglas en inglés) se ha utilizado para modelar comportamientos mediante una función de probabilidad, permitiendo predecir una ocurrencia o porcentaje de desempeño frente a ciertas condiciones operativas en el sistema. El objetivo de esto es proponer soluciones a problemas de diseño, manufactura, sistemas y logística.

En este capítulo, se presenta un modelo para la optimización de puntos de refugio y rutas de evacuación, considerando la logística humanitaria en caso de inundación, aplicando un modelo de programación lineal entero mixto (MILP) y una simulación de multitudes.

Este conocimiento tiene un impacto positivo no solo en la industria manufacturera o de servicios, sino también en las universidades, donde se gestan proyectos de investigación a partir del estudio del estado del arte. Por ejemplo, permite desarrollar software que valide la identidad de la persona que debe presentar un examen o tarea de manera remota, o maximizar los recursos de la Institución, la conectividad de la red y de los estudiantes, dado que tanto el hardware como las aplicaciones son costosas.

Por todo lo anterior, se presenta este tomo literario en el que se exponen diferentes métodos de optimización, resultado de la investigación multidisciplinaria de profesores y estudiantes de posgrado. Así, se contribuye al desarrollo de la región, mediante la solución de problemas y necesidades con un sentido humanístico y propositivo.

## Reseña

### ***Dr. Diego Adiel Sandoval Chávez***

Originario de Chihuahua, Chih., donde nació el 5 de diciembre de 1959. Cursó estudios básicos e intermedios en la Escuela Primaria Praxedis G. Guerrero 226, en la Secundaria Federal ES314-11 y en el Instituto Tecnológico Regional de Chihuahua. En 1978 llega a Ciudad Juárez como subadministrador del Hospital General de Zona #6 del Instituto Mexicano del Seguro Social.

Cursa la carrera de Ingeniero Industrial en Producción y obtiene el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Industrial en el Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez. Obtiene el grado de Master of Science in *Manufacturing Engineering en The University of Texas at El Paso* y cursa estudios de doctorado en *Texas Tech University*. Obtiene el grado de Doctor en Investigación con mención honorífica en El Colegio de Chihuahua.

Con 37 años de carrera académica, el Dr. Sandoval es profesor decano en el Tecnológico Nacional de México/IT de Ciudad Juárez. Ha sido jefe del laboratorio de Ingeniería de Métodos, coordinador de carrera de Ingeniería Industrial y jefe de la División de Estudios de Posgrado e Investigación. Ha sido presidente del Consejo de Posgrado, así como secretario y presidente del Consejo de la Maestría en Ingeniería Administrativa. Actualmente es presidente del Claustro Doctoral del programa Doctorado en Ciencias de la Ingeniería y líder del Cuerpo Académico “Enfoque de Sistemas en Organizaciones Públicas y Privadas”. Sus líneas de investigación incluyen: estudios organizaciones y empresariales, gestión de sistemas de calidad y manufactura, diseño experimental y robusto, gestión de sistemas sustentables, sistemas de energías limpias, ingeniería económica, economía ambiental, ingeniería de costos, gestión de espacio público, estudios urbanos, gestión de sistemas turísticos. Ha sido director o codirector de tesis de 67 alumnos de maestría y doctorado. Cuenta con el reconocimiento a perfil deseable de PRODEP y es Investigador Nacional Nivel I del CONAHCyT.

# MÉTODOS PARA LA OPTIMIZACIÓN Y RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS EN LA INGENIERÍA

Coordinadores

---

Ericka Berenice Herrera Ríos  
Lizette Alvarado Tarango  
Roberto Romero López

Autores

---

Ana Isela García Acosta  
Leonardo Alberto Alanís Castro  
Jorge de la Riva Rodríguez  
Adrián Francisco Loera Castro  
Cynthia Márquez Márquez  
Rigoberto Reyes Valenzuela  
Manuel de Jesús López Pérez  
Rubén Juárez Rodríguez  
Javier Antonio Lom Hernández  
Luz Angélica Aguilar Chávez  
Arturo Paz Pérez  
Humberto García Castellanos  
Manuel Arnoldo Rodríguez Medina  
Lizette Alvarado Tarango  
Carlos Alberto Ronquillo Salas  
Ulises Martínez Contreras  
Adán Valles Chávez  
Gabriel Gómez Martínez  
Eduardo Rafael Poblano Ojinaga



## **Optimización de refugios y rutas de evacuación en un campus universitario, un caso de estudio para ciudades inteligentes y logística en inundaciones.**

*Optimization of shelters and evacuation routes on a university campus: A case study for smart cities and logistics in the event of flooding*

**Adrián Loera Castro**

Tecnológico Nacional de México/ Campus Ciudad Juárez  
aloera@itcj.edu.mx  
<https://orcid.org/0000-0003-1694-6792>

**Humberto García Castellanos**

Tecnológico Nacional de México/ Campus Ciudad Juárez  
humber.gc@itcj.edu.mx  
<https://orcid.org/0000-0002-4684-4888>

**Cynthia Márquez Márquez**

Tecnológico Nacional de México/ Campus Ciudad Juárez  
cynthia.mm01@itcj.edu.mx  
<https://orcid.org/0009-8780-9539>

### **Resumen**

En este capítulo se presenta un modelo para la Optimización de puntos de refugio y rutas de evacuación en un campus universitario, considerando la logística humanitaria en caso de inundación, aplicando un modelo de programación lineal entero mixto (MILP) y una simulación de multitudes. Esta aplicación tiene una implementación en un entorno experimental ya pequeña escala.

**Palabras clave:** modelo de programación lineal entera mixta, simulación de multitudes, logística humanitaria, operaciones previas al desastre, teoría de la evacuación

### **Abstract**

This chapter presents a model for the Optimization of refuge points and evacuation routes on a university campus, considering humanitarian logistics in case of flooding, applying a mixed-integer

linear programming model (MILP) and a crowd simulation. This application has an implementation in an experimental and small-scale environment.

**Keywords:** mixed integer linear programming model, crowd simulation, Humanitarian logistics, Pre-disaster operations, Evacuation theory

## Prólogo

En un mundo cada vez más afectado por desastres naturales y emergencias, es fundamental que la asistencia humanitaria se aborde de manera efectiva optimización de los refugios de emergencia y las rutas de evacuación es muy importante, especialmente en entornos como los campus universitarios donde se concentran muchas personas en un espacio reducido.

Este capítulo se centra en el diseño de modelos para optimizar los sitios de evacuación y las rutas de evacuación en los campus universitarios, con un enfoque particular en situaciones de inundaciones repentinas. Para lograr este objetivo, se utilizan modelos MILP (Mixed Integer Linear Programming) y simulaciones de multitudes para analizar diferentes escenarios y poder evaluar la eficiencia de las estrategias propuestas.

La investigación presentada en este capítulo se basa en el contexto de las ciudades inteligentes y la importancia de la logística en emergencias. Este estudio de caso tiene como objetivo brindar información y recomendaciones aplicables no solo a las universidades sino también a otras áreas urbanas como parte de una estrategia integral de logística y gestión de desastres.

Este capítulo está organizado de la siguiente forma: En primer lugar, se explica el concepto de logística humanitaria y su relevancia en situaciones de inundación. Luego examina lo que sucedió antes del desastre y describe las fases de mitigación y preparación del proceso logístico. A continuación, se detallan los objetivos específicos del estudio y se presentan modelos matemáticos y simulaciones masivas como herramientas para la optimización de albergues y rutas de evacuación.

El enfoque interdisciplinario y multidisciplinario de esta investigación destaca la importancia de la cooperación entre la comunidad académica, las agencias gubernamentales, el sector privado y la

sociedad civil en la gestión de desastres. También cubre las dimensiones éticas y los principios fundamentales que guían la toma de decisiones humanitarias, como la justicia, la equidad y la equidad.

En resumen, este capítulo proporciona un análisis exhaustivo sobre la optimización de los refugios de evacuación y las rutas de evacuación en los campus universitarios como un caso de estudio de ciudades inteligentes y logística de inundaciones. Los hallazgos y recomendaciones presentados aquí tienen como objetivo mejorar la planificación y respuesta ante emergencias y promover la seguridad y el bienestar de las comunidades afectadas.

## **Introducción**

Cuando se habla de logística, la primera idea que se nos viene a la cabeza es el transporte de mercancías de las empresas a sus clientes, pero lo cierto es que la logística va mucho más allá de las transacciones económicas habituales. Un claro ejemplo es la logística humanitaria, en el caso de inundaciones repentinas que se caracterizan por el alto nivel de agua y la rapidez con la que se presentan, se estima que en unas horas o unos minutos la zona se inunda por completo.

Pueden ser causados por rotura de presas, diques o lluvias repentinas en zonas planas tales eventos no son posibles de detectar ni predecir lo que se le ha atribuido el peligro que existe en caso de inundación [1]-[3]. Las amenazas o emergencias se definen como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente destructivo como las inundaciones repentinas [3]. Los estudios presentados en este capítulo abordan la prevención ante un fenómeno natural para analizar cómo se desarrollan las etapas de mitigación y preparación que forman parte del proceso logístico humanitario para estimar, educar y distribuir el personal capacitado y los servicios requeridos en la zona afectada a través de una gran diversidad de actividades. realizadas en diferentes momentos, las cuales están destinadas a asistir a las personas que se encuentran expuestas a la vulnerabilidad de una emergencia. Con la ayuda del organismo, como espacios donde la población adquiere conocimientos para la mitigación, se convierten en espacios fundamentales para la formación de ciudadanos conscientes de la reducción del riesgo en los sectores de vulnerabilidad ante

inundaciones. La formación de una cultura de prevención y seguridad consiste en un conjunto de acciones orientadas no solo a reducir los riesgos sino también a desarrollar planes de mitigación.

El objetivo general de este trabajo es diseñar una aplicación que ayude a evaluar las rutas de evacuación en caso de inundación inmediata o repentina, optimizando los puntos a evacuar, los puntos de resguardo, su capacidad y la población a resguardar, considerando la logística pre-logística. modela el desastre en el caso de inundaciones repentinas, lo que permite que una ciudad inteligente o un campus universitario administre de manera eficiente la ubicación de puntos estratégicos y el enrutamiento de personal capacitado y no capacitado. Para lograr el objetivo, se determinaron los siguientes objetivos específicos:

- Analizar situaciones para identificar los factores y evaluar la atención previa al desastre ocasionado por una inundación repentina.
- Educar a la población con planificación para generar una cultura de prevención.
- Proponer un modelo matemático, el problema de la ubicación de las instalaciones (vías de evacuación, albergues) que presentan situaciones previas al desastre.
- La simulación de multitudes está diseñada para validar el modelo matemático y verificar la idoneidad del modelo.

### **Logística humanitaria.**

Las inundaciones son los desastres más frecuentes en el mundo y afectan principalmente al ser humano, nos preguntaremos ¿cómo entra la logística en este ámbito? Ante estos fenómenos, el trabajo de la logística humanitaria es de suma importancia ya que se caracteriza por tener una buena planificación, ejecución y control eficiente de los flujos de materiales e información para brindar perjuicio a las personas para dar una adecuada preparación al personal responsable que será asignado para ayudar con el plan de contingencia que sea más práctico y comprensible [4][5]. La aplicación de conocimientos y habilidades, además de la movilización de personas y recursos, es fundamental para atender a la población afectada de manera rápida y eficaz. De lo contrario, podría ser catastrófico para los individuos involucrados en la situación presentada. Actividades propuestas como:

- Educación. (Generando una cultura de prevención a la población).
- Plan de contingencia. (Plan de medidas para minimizar posibles pérdidas humanas).
- Ejercicios.
- Capacitación hacia el responsable del área correspondiente por parte de (Protección Civil).
- Directrices (Tendencia) frente a una inundación.

La implementación y ejecución de las actividades permitió que el individuo tenga un mayor grado de resiliencia, reduciendo así el impacto de las inundaciones repentinas ya que se presentan sin previo aviso provocando incertidumbre en la población por esto, la capacitación del personal de la organización busca que a través de la educación a la población involucrados en áreas vulnerables puede ser difundido entre los habitantes que se encuentran en áreas de contaminación, generando una cultura de prevención de emergencias[5]. De esta manera, buscamos evitar eventos negativos hacia la población para evitar tener pérdidas de vida que son ocasionadas por la falta de información, conocimiento y personal capacitado en el caso de verse involucrado en una emergencia. El personal capacitado es un recurso limitado en el manejo del pre-desastre ya que debe ser responsable del alivio de la incertidumbre y la seguridad de la población, pero para que esto incida de manera eficiente se debe controlar el uso óptimo de los recursos humanitarios al momento de operar los servicios médicos y asistencia psicológica resultante de una operación compleja, debido a la incertidumbre de la información utilizada para mantener informadas a las personas involucradas en este fenómeno natural. Las inundaciones son una de las amenazas más peligrosas de la naturaleza y con frecuencia son causadas por fuertes períodos de lluvia. No todas las inundaciones tienen el mismo comportamiento, ya sea por sus diferentes magnitudes, duraciones o efectos en diferentes regiones. Por lo tanto, se determina en tres etapas, Pre-desastre (Antes), desastre (Durante) y Post-desastre (después del evento), “Una vez determinadas las etapas, se busca una planificación ágil y flexible para la logística en un contexto humanitario eficiente. sistema de gestión previa al desastre” [5]. En cuanto a la tabla 1 se determina que esta investigación se enfocará en la mitigación que se tiene que realizar ante una emergencia poblacional ante una inundación que carezca de una planificación dirigida hacia el pre-desastre [6][7].

**Table 1.** Disaster timeline and operations. Adapted from Ergun et al. (2011)

<b>Pre-disaster</b>	<b>Disaster</b>	<b>Post-disaster</b>
<b>Mitigation and preparedness</b>	<b>Response</b>	<b>Recovery</b>
<i>Assessment</i>	<i>Relief operations</i>	1. Debris cleaning
1. Risk factors	1. First phase	2. Infrastructure rebuilding
2. Vulnerability	Medics, food, shelter	3. Reestablishing communities
<i>Planning</i>	<i>Second phase</i>	Measure the effects of:
1. Infrastructure	(a) Housing	1. Infrastructure
2. Policy making	(b) Food, supply chain building	2. Planning
3. Capacity building		3. Short – and – long term response
4. Pre-positioning resources		
<b>Training/Education</b>	Logistics stages	Lessons learned, feedback to logistics and response
	1. Mobilization and procurement	
	2. Long haul	
	3. The last mile	

Fuente: Elaboración propia

En el caso de la logística humanitaria en caso de una situación de inundación de emergencia; Una de las barreras para la modelación es que en la mayoría de los casos no existe infraestructura ni plan de emergencia para este tipo de contingencias (porque no hay información precisa sobre el evento, por lo que el acceso a la información sobre emergencias puede beneficiarse de la infraestructura y el plan de emergencia). para mitigar las contingencias a nivel pre-desastre contemplan la existencia de acciones de coordinación donde se planifiquen sistemas de alerta,

capacitación, equipos de trabajo, capacitación, todo esto para acelerar la ejecución de los diferentes servicios básicos de respuesta, tales como acceso y transporte, evaluación de emergencias y análisis y rescate de necesidades, información pública y gestión de respuesta general, entre otros.

Los recursos humanitarios son limitados, por lo que la toma de decisiones debe basarse en principios éticos, garantizando la equidad, la igualdad y la imparcialidad en la reducción de los daños a la población afectada por las medidas y acciones que se deben prever para prevenir los riesgos. Puede estar enfocada a evitar o neutralizar la amenaza de exposición y la amenaza a la misma de forma definitiva para evitar generar nuevos riesgos.

La distribución de la ayuda humanitaria se realiza a partir de las decisiones operativas de la gestión previa al desastre ya que suelen ser decisiones que se toman en tiempo real como consecuencia de la variabilidad de la demanda. La operación de distribución de la ayuda humanitaria se realiza una vez determinada la ubicación de los albergues y puntos de evacuación, previa asignación de recursos según la limitación de la población a atender [7]-[9].

La planificación con enfoque de conocimiento de todas las posibles situaciones que trae consigo cada tipo de desastre es un proceso que permite a las organizaciones tener el nivel de importancia multidisciplinario y multisectorial definido por una evaluación pericial realizada antes de que se presente. Por lo general, las personas no consideran la posibilidad de que un desastre pueda tener problemas o afectarlos, por lo que no se preparan física ni psicológicamente para enfrentarlos.

### **Operaciones previas al desastre**

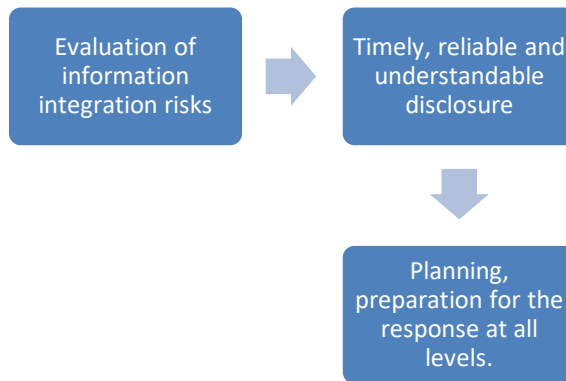
Es necesario estudiar la brecha de capacidad en la preparación y respuesta ante un desastre. Aunque estamos preparados, cuando se trata de responder, encontramos obstáculos. Por lo tanto, la logística humanitaria requiere de una evaluación de riesgos, para la gestión temprana de una amenaza. Ya que no podemos detener los desastres naturales o provocados, pero aún podemos reducir el riesgo considerablemente, a través de la planificación. Esfuerzos logísticos en labores humanitarias que absorben alrededor del 80% del costo total de los esfuerzos humanitarios, de los cuales gran parte del costo se absorbe en adquisiciones. Es necesario realizar una investigación seria

en esta área para mejorar la efectividad de la logística humanitaria en los esfuerzos humanitarios [5].

### Operación de evaluación

Esta etapa de evaluación es un componente importante de la gestión de emergencias. Las siguientes técnicas son las más compatibles con el proceso de planificación:

- Evaluación de emergencia: es una evaluación de la ubicación y la posibilidad de que ocurra un evento natural dentro de un tiempo determinado.
- Evaluación de vulnerabilidad: es una estimación de las pérdidas o daños que puede causar un evento natural de cierta severidad, incluyendo daños a la construcción, daños personales y al normal funcionamiento de las comunidades.
- Evaluación de riesgos: es una estimación de la probabilidad de pérdidas esperadas, ante un evento natural indeterminado. Ver figura 1.



**Figura 1.** Risk Assessment Process

Fuente: Elaboración propia

La comunidad académica juega un papel importante en la planificación ya que es la responsable de la enseñanza e investigación de la logística humanitaria para tener una planificación eficiente en el momento adecuado y cuando se requiere. Entonces, los roles clave de la comunidad académica son



la educación que cumpla con el objetivo de difundir el conocimiento de manera efectiva y clara a las personas en situación de vulnerabilidad, por lo que busca desempeñar diferentes roles en el contexto de la logística humanitaria, por fenómenos naturales o antrópicos, los cuales se dividen en los siguientes:

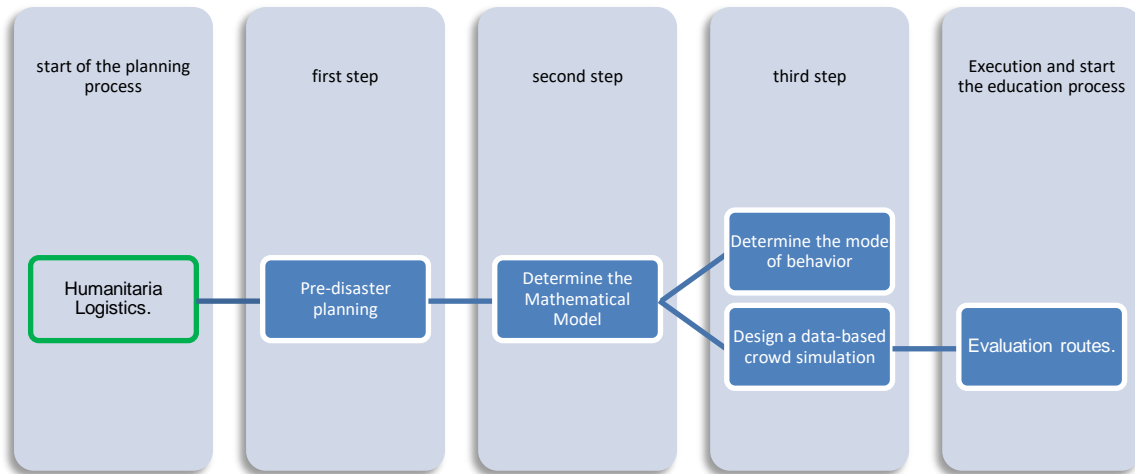
- Comunidad académica. (Difundir el conocimiento a través del maestro)
- Población.
- Organismos gubernamentales, sector privado y organismos de protección civil.
- Otros actores (comunidad local, comunidades afectadas por este evento).

El docente juega un papel importante en la docencia y la investigación en Logística humanitaria. La función clave de la comunidad es la educación para desarrollar una base de conocimiento para compartir las mejores prácticas que serán dirigidas a la población.

### **Planeación en el pre-desastre**

- Evaluación de emergencia: es una evaluación de la ubicación y la posibilidad de que ocurra un evento natural dentro de un tiempo determinado.
- Evaluación de vulnerabilidad: es una estimación de las pérdidas o daños que puede causar un evento natural de cierta severidad, incluyendo daños a la construcción, daños personales y al normal funcionamiento de las comunidades.

- Evaluación de riesgos: es una estimación de la probabilidad de pérdidas esperadas, ante un evento natural indeterminado. Ver figura 2.



**Figura 2** Planning methodology

Fuente: Elaboración propia

La comunidad académica juega un papel importante en la planificación ya que es la responsable de la enseñanza e investigación de la logística humanitaria para tener una planificación eficiente en el momento adecuado y cuando se requiere. Entonces, los roles clave de la comunidad académica son la educación que cumpla con el objetivo de difundir el conocimiento de manera efectiva y clara a las personas en situación de vulnerabilidad, por lo que busca desempeñar diferentes roles en el contexto de la logística humanitaria, por fenómenos naturales o antrópicos, los cuales se dividen en los siguientes:

- Comunidad académica. (Difundir el conocimiento a través del maestro)
- Población.
- Organismos gubernamentales, sector privado y organismos de protección civil.
- Otros actores (comunidad local, comunidades afectadas por este evento).

El docente juega un papel importante en la docencia y la investigación en Logística humanitaria. La función clave de la comunidad es la educación para desarrollar una base de conocimiento para compartir las mejores prácticas que serán dirigidas a la población.

## **Educación dirigida a la logística humanitaria**

En educación se pretende preparar a los grupos humanos involucrados, directa o indirectamente, con la formación de la población, que permitan anticiparse a un evento inesperado y minimizar sus consecuencias, ya sea a través de mejoras permanentes en las condiciones de la organización, a la implementación de programas de simulación, así como al diseño e implementación de sistemas de control de alarmas y riesgos.

El personal de la organización juega un papel clave en la sensibilización sobre el manejo de emergencias entre todos los sectores de la población. A nivel de la comunidad local, todos deben ser proactivos y comprender sus respectivos roles durante las diversas fases del ciclo de gestión de fenómenos naturales. La comunidad puede realizar evaluaciones de riesgo y análisis de vulnerabilidad de áreas específicas propensas a desastres y sugerir estrategias apropiadas para hacer frente a los desastres que es probable que enfrenten las personas en el área local.

Además, se debe llevar a cabo algún tipo de programas de desarrollo sobre los fenómenos naturales que pueden incluir aumentar los niveles de conciencia sobre la ocurrencia de fenómenos y mecanismos naturales. Esto nos llevará a la implementación de una aplicación que pueda enseñar en la población, cómo resolver escenarios previos al desastre, mapear su vulnerabilidad, desarrollar niveles y sistemas de comunicación, y prepararse para la disponibilidad de respuesta rápida.

## **Teoría de la evacuación**

Naser [21] menciona que la investigación sobre evacuación ha sido estudiada por académicos en diferentes disciplinas. Estas disciplinas científicas incluyen la ingeniería civil, la ingeniería industrial, la física e incluso la psicología y las ciencias sociales. El principal objetivo de la planificación de la evacuación es minimizar el tiempo total de evacuación. Sin embargo, existen varios modelos en la literatura de investigación operativa para este propósito, dependiendo del nivel de abstracción deseado y, en consecuencia, del nivel de complejidad. Se pueden establecer diferentes clasificaciones para estos modelos también en función de la metodología de solución, el alcance y los parámetros de entrada. Se pueden identificar tres clasificaciones diferentes en la investigación

de modelos de evacuación: modelos analíticos macroscópicos, modelos de simulación microscópicos y modelos de asignación de tráfico.

Dependiendo del alcance, los modelos de evacuación se pueden clasificar en modelos macroscópicos y microscópicos. Algunos problemas de evacuación consideran el movimiento de evacuados como un flujo homogéneo. Estos modelos se denominan modelos macroscópicos en los que se ignoran las interacciones entre los evacuados individuales. Como beneficio de esta simplificación, la mayoría de los modelos macroscópicos se resuelven utilizando técnicas matemáticas o analíticas [22]-[24]. Los modelos analíticos se basan principalmente en formulaciones de optimización de redes y algunos modelos de programación entera. Sin embargo, estos modelos sufren cierta pérdida de precisión, ya que el comportamiento individual puede influir en el tiempo total de evacuación. Otros modelos de evacuación, llamados modelos microscópicos, consideran el comportamiento individual y las interacciones entre los evacuados. Sin embargo, el nivel de complejidad resultante desalienta el uso de técnicas analíticas para resolver el problema. Estos problemas se modelan y resuelven principalmente utilizando el enfoque de simulación. Los modelos de simulación se basan cada vez más en autómatas celulares.

En un modelo microscópico, se pueden considerar las interacciones entre los evacuados. Sin embargo, la complejidad resultante prohíbe el uso de modelos analíticos para resolver el problema de manera eficiente. Por lo tanto, generalmente no se buscan soluciones óptimas en el modelado microscópico. En su lugar, se puede utilizar un enfoque de simulación para evaluar el rendimiento actual y predecir el rendimiento futuro en varios escenarios propuestos. Recientemente, los modelos de simulación para la planificación de la evacuación se basan cada vez más en autómatas de almacén. Los autómatas celulares son abstracciones matemáticas de algunos sistemas físicos. Estos sistemas se caracterizan por ser discretos en el tiempo y en el espacio, y en los que las cantidades físicas adquieren un conjunto finito de valores discretos, Wolfram S (1986) [25].

La evacuación del campus puede verse como un proceso en el que los evacuados son trasladados de áreas peligrosas a áreas seguras caminando por rutas de evacuación. Este movimiento masivo de peatones generalmente excede las demandas normales de recursos de vivienda y, por lo tanto,

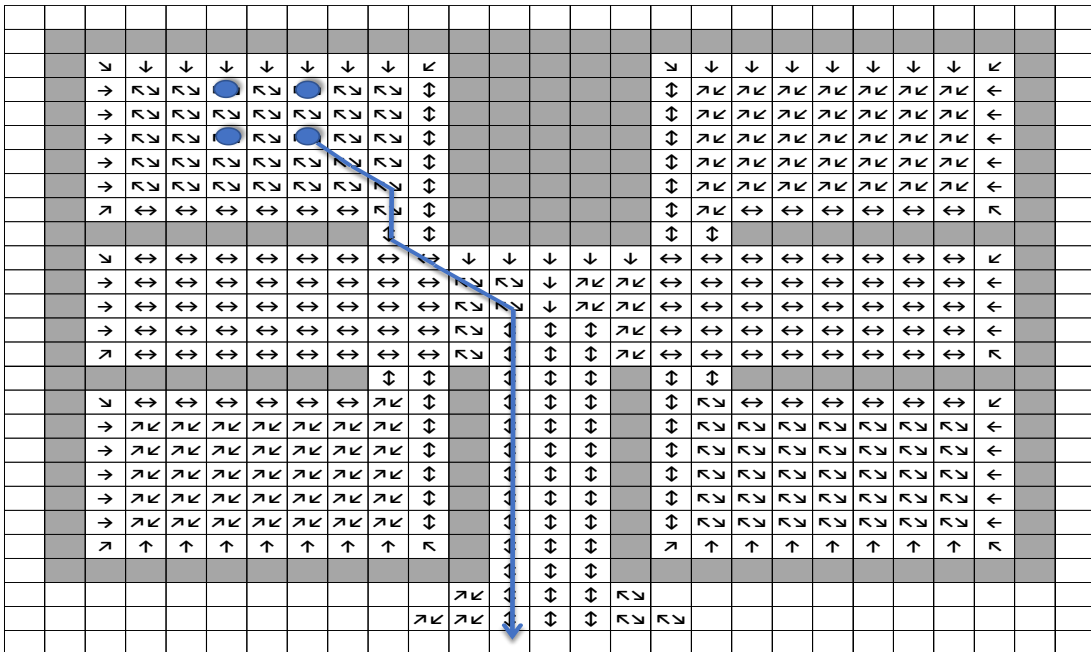
requiere una planificación y optimización cuidadosas. El mayor riesgo de un plan de evacuación deficiente es que las personas pueden perder la vida si no se les permite evacuar a tiempo.

En su forma más simple, un autómata celular consta de una matriz unidimensional de células o sitios. El estado del autómata celular está completamente especificado por los valores de las variables en cada celda. Un autómata celular evoluciona en pasos de tiempo discretos con el valor de una variable en una celda afectada por su celda "vecina" en el paso de tiempo anterior. Una ventaja importante de los autómatas celulares es que, a pesar de la simplicidad de su estructura, los autómatas celulares pueden producir comportamientos de sistemas complejos.

En la figura 3 se propone un modelo de autómata celular para simular la evacuación de la sección edilicia de un campus universitario. El principio básico de este modelo es el siguiente:

- La planta del edificio del campus está dividida en celdas cuadráticas iguales con una longitud de un lado igual a 0,4 m.
- El estado de cada celda en cualquier momento está vacío u ocupado por una persona.
- Las personas pueden tener parámetros que describen diferentes características o habilidades.
- El movimiento de las personas se define por la velocidad y dirección de la marcha que obedecen las leyes universales.

**Figura 3.** Modelo autómata celular para simular la evacuación de una sección del edificio.



Fuente: Elaboración propia

La planificación de la evacuación del campus implica un proceso iterativo para identificar las mejores rutas y estimar el tiempo necesario para evacuar las áreas en riesgo. Los pasos comunes en esta metodología son los siguientes:

- Identificar la región a ser evacuada. Las regiones se definen como subconjuntos de toda el área en riesgo y se basan en la ubicación y dirección de las amenazas en movimiento.
- Identificar la demanda (en vehículos) en cada región a ser evacuada. Exigir que la población se subdivide en residentes permanentes, empleados que trabajan en la zona de riesgo y transeúntes que transitan por la zona o permanecen en la zona temporalmente. Esta demanda se distribuye a los centroides zonales, que describen los cambios en la densidad de población en el área.
- Identificar los límites de las regiones seguras o lugares de refugio.
- Identificar la topología de la red de transporte (oferta).
- Estimar capacidades de enlaces viales en base a observaciones de campo y condiciones

climáticas en base a escenarios.

- Definir los destinos candidatos en la periferia de la región para cada centroide de origen. Estos destinos representan los puntos donde los enlaces de red cruzan los límites exteriores de la región.
- Calcular la ruta óptima de los viajes de evacuación fuera de la región a través de los nodos de destino especificados.
- Luego se aplica un modelo de simulación de tráfico para simular el movimiento de los vehículos durante la evacuación. El modelo debe describir explícitamente las condiciones del tráfico en el régimen de flujo saturado para tener en cuenta los efectos de la congestión.
- Revisar los resultados de la simulación para determinar la necesidad de gestión del tráfico para apoyar los movimientos de evacuación.

El objetivo final de cualquier esfuerzo de planificación de evacuación es minimizar el número de víctimas frente a posibles amenazas. Un factor importante que lleva a minimizar el número de bajas es el tiempo total de evacuación, es decir, el tiempo que transcurre desde el inicio de la evacuación hasta el momento en que el último evacuado alcanza la seguridad (tiempo de limpieza de la red). Minimizar el tiempo total de evacuación puede ayudar a eliminar el riesgo de exposición a amenazas, así como minimizar las dificultades sufridas en el proceso de evacuación. También se pueden buscar otros objetivos durante la planificación de la evacuación, incluida la minimización del tiempo promedio de evacuación por evacuación, minimizando la distancia de evacuación recorrida y maximizando el número de evacuados que llegan a un lugar seguro.

La principal ventaja de la mayoría de los modelos analíticos es la capacidad de encontrar las "mejores" rutas para evacuar, mientras que el principal inconveniente es que implican un tiempo de viaje (velocidad) constante. Bajo una suposición de velocidad constante, el problema de evacuación se puede resolver utilizando la literatura de optimización de red existente. Una red es un grafo  $G = (N,A)$  con un conjunto de nodos,  $N$  y un conjunto de arcos,  $A$ . Un arco  $(i,j)$  conecta dos nodos  $i$  y  $j$  en el grafo de modo que  $i,j \in N$ . En el contexto del transporte, los caminos están representados por arcos, y las intersecciones, rampas y stocks están representados por nodos. Cada arco  $(i,j)$  puede tener dos parámetros: tiempo de viaje ( $\tau_{ij}$ ) y capacidad ( $u_{ij}$ ). Cada nodo  $i$  también

puede tener un parámetro,  $b(i)$ , que representa la oferta o demanda que debe satisfacerse en ese nodo. Este suministro es igual a la diferencia entre el flujo total que ingresa al nodo y el flujo total que sale del nodo. El siguiente es un ejemplo de una red simple. En la literatura aparecen varios problemas de optimización de redes que pueden adaptarse a la planificación de la evacuación según su objetivo:

- Un objetivo típico en una evacuación es minimizar el tiempo total de evacuación (tiempo para despejar la red). Este objetivo es conocido en la literatura de optimización de redes como el problema de flujo más rápido, y surge cuando se puede estimar el número de evacuados que necesitan ser despejados.
- Cuando se desconoce el número de ocupantes iniciales de la red, el objetivo es mover la mayor cantidad posible de evacuados dentro de un horizonte de tiempo específico. Este objetivo es equivalente a un problema de flujo dinámico máximo, donde la solución se logra enviando la mayor cantidad de flujo posible desde las áreas de peligro hacia las zonas seguras dentro del horizonte de tiempo.
- Un objetivo más conservador es maximizar el número de evacuados que alcanzan la seguridad no solo dentro del horizonte de tiempo general sino dentro de cada período más pequeño en el horizonte. El mismo problema se conoce como el flujo máximo universal o el problema de llegada más temprana.

Los modelos de simulación pueden predecir el viaje en el tiempo en función del flujo, pero actúan simplemente como una herramienta para evaluar diferentes escenarios y formular recomendaciones [26]-[28]. El principal inconveniente de los modelos de simulación es que no tienen la capacidad de identificar las “mejores” rutas (optimización). La idea principal es utilizar una rutina de simulación para propagar el flujo a lo largo de los arcos. Una vez que llegan al nodo principal, una rutina de optimización selecciona las mejores rutas para dirigir el flujo fuera del nodo principal. Se desarrolla un modelo de optimización para minimizar el tiempo total de evacuación. Se basa en formulaciones y principios de optimización de redes.

Para la evaluación del modelo, la teoría principal de este capítulo es que una solución de enrutamiento que se obtiene asumiendo que la velocidad constante puede producir, si se aplica en entornos de la vida real, resultados poco prácticos e ineficaces [29]-[31]. El nuevo enrutador debe superar y superar esta deficiencia. Para probar esta teoría, se desarrolla una simulación de multitudes a través del software Menge, que es un marco modular multiplataforma para la



simulación de multitudes desarrollado en la Universidad de Carolina del Norte - Chapel Hill; aplicado a un caso de estudio en una sección de un campus universitario. Cada caso de estudio se resuelve primero utilizando un algoritmo de velocidad constante (tiempo de viaje). Esta solución se simula a través del caso de estudio utilizando el modelo de simulación de Menge y se registra el tiempo de evacuación resultante. Para el mismo estudio de caso, el nuevo enrutador se usa para encontrar las mejores rutas de evacuación y el tiempo de evacuación resultante se registra y compara con el resultado del tiempo de viaje constante.

### **Modelo de optimización de rutas de evacuación**

El modelo constituido representa la selección de las ubicaciones óptimas y la asignación de capacidad entre los puntos de evacuación y los puntos de refugio en un área geográfica limitada, cuyo objetivo es decir cuál es la red que maximiza la capacidad de los puntos de refugio.

Las suposiciones utilizadas en este problema son:

- Se conoce el número de puntos de evacuación y refugio con su demanda y capacidades.
- La red consta de múltiples puntos de evacuación y diferentes puntos de refugio dispersos geográficamente.
- La población puede disponer de cualquiera de los puntos de acogida.
- Localización de puntos de abrigo, a través de un modelo de localización con aforo limitado desde una única fuente:

$n$  = número de puntos de refugio

$m$  = número de evacuación

$D_j$  = población a evacuar en el punto  $j$

$K_i$  = capacidad de refugio en el refugio  $i$

$c_{ij}$  = costo de evacuar y albergar una unidad en albergue  $i$  para evacuación  $j$

$f_i$  = costo de mantener el refugio abierto

$y_i = 1$  si el punto de refugio está ubicado en el sitio, si no  $i=0$

$x_{ij}=1$  si el punto a evacuar  $j$  lo proporciona el punto de refugio  $i$ , en caso contrario 0

El problema se formula como el siguiente programa:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n f_i y_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m D_j c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i \in n, \forall j \in m \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^m D_j x_{ij} \leq K_i y_i \quad \forall i \in n, \forall j \in m \quad (3)$$

$$x_{ij}, y_i \in \{0,1\} \quad (4)$$

Las restricciones de la ecuación 2 aseguran que se satisfaga toda la demanda del punto a evacuar y las de la ecuación 3 aseguran que ningún punto de refugio reciba más de su capacidad (Lógicamente, la capacidad es 0 si el refugio está cerrado, y  $K_i$  si está abierto). Las restricciones de las ecuaciones 2 y 4 aseguran que cada punto de evacuación se dirija exactamente desde un punto de refugio.

### Simulación de multitud

La simulación de grupos de humanos virtuales autónomos (agentes) en entornos complejos y dinámicos es un tema importante para muchas aplicaciones prácticas [32]-[35]. Un aspecto clave de los agentes autónomos es su capacidad para navegar (conducir) de un lugar a otro en su entorno mientras evitan colisiones con obstáculos estáticos y dinámicos. Los requisitos de un enfoque de dirección difieren significativamente entre aplicaciones y dominios de aplicación. Por ejemplo, los juegos de computadora generalmente se preocupan por minimizar la sobrecarga computacional y,

a menudo, sacrifican la calidad por la eficiencia, mientras que los estudios de evacuación a menudo tienen como objetivo generar un comportamiento plausible de la multitud que minimice los tiempos de evacuación y mantenga el orden.

### **Configuración de la simulación**

Para simular comportamientos consistentes en un proceso de evacuación, se utilizó Menge. Su objetivo principal es reproducir computacionalmente el movimiento y los comportamientos de la multitud durante escenarios de evacuación y también presentar algunos datos que se utilizan para estimar la comodidad y seguridad de las personas en un entorno específico [36]-[39]. Menge permite a los usuarios definir la información que especifica las regiones transitables teniendo en cuenta la estructura del entorno y las limitaciones físicas. Además, en este módulo, se solicita al usuario que defina otro conjunto de parámetros: número de agentes a simular, regiones de interés que se considerarán durante el movimiento de los agentes (objetivos) y regiones donde se crearán los agentes durante la

- **Búsqueda de objetivos:** los agentes deben buscar sus objetivos de forma inmediata o vaga, realizando movimientos aleatorios.
- **Seguir esperando:** los agentes, cuando alcanzan una región específica del entorno, pueden pasar un tiempo en ella antes de buscar otro objetivo.
- **Realizar movimiento aleatorio:** los agentes pueden elegir destinos aleatorios por un tiempo específico, antes de intentar identificar la mejor ruta para lograr el objetivo principal.

Al definir el entorno, los parámetros y las regiones transitables, así como los comportamientos deseados, el usuario puede ejecutar la segunda simulación. Este módulo considera como entrada el escenario previamente definido en el módulo de configuración para simularlo. Teniendo en cuenta esta información, este módulo puede calcular las rutas a cada agente para lograr un objetivo específico. Las rutas se pueden calcular en función de las especificaciones del usuario (es decir, un

gráfico determinado por el usuario) o utilizando las mejores rutas solo teniendo en cuenta los criterios de distancia.

Además, durante la simulación de movimiento, Menge puede evitar colisiones entre agentes y/u obstáculos (utilizando un método de geometría local simple). Cada conjunto de rutas definidas por el usuario o calculadas automáticamente por Menge se denomina plan de evacuación. El resultado de cada plan de simulación contiene la siguiente información: (i) trayectorias de los agentes durante la simulación; (ii) variación de velocidad para cada agente; (iii) tiempo de simulación del agente; (iv) densidad local en el tiempo, es decir, considerando un agente en el centro de una región de  $1 \text{ m}^2$ , calculamos la densidad local; y (v) tiempo de simulación global. Las siguientes secciones describen dos escenarios que han sido simulados y comparados con estudios de casos de evacuación en la vida real.

### **Escenario**

Consiste en recopilar y analizar la información disponible de fuentes oficiales, se pretende evaluar la vulnerabilidad física de los elementos expuestos en el área de estudio de inundación. Los problemas de inundaciones están asociados a las fuertes lluvias provocadas por fenómenos meteorológicos y al aumento de la zona urbana que invade los cauces de los arroyos. Este último refleja la falta de planificación y ordenamiento en el aumento de su área urbana, por lo que el peligro de inundaciones en la población debe ser considerado como un riesgo inducido por la actividad humana.

Ya que la construcción de los posibles escenarios de peligro de inundación se asume como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino sobre el medio natural y humano en su área de influencia. Debido a la ubicación geográfica de la población, no se puede eliminar el riesgo de inundaciones, pero se pueden reducir sus efectos planificando el incremento de su casco urbano.

Una vez conocidos los factores de riesgo, es necesario saber cómo actuar ante los escenarios que componen dichos factores, por lo que a continuación pasaremos a detallar qué es la Gestión de Riesgos. Es la capacidad de las organizaciones y sus actores sociales para transformar sus

condiciones de riesgo, actuando sobre las causas que lo producen. Incluye medidas y formas de intervención que tienden a reducir, mitigar, prevenir y responder a los desastres.

Cuando se habla de posibles escenarios ante una inundación repentina donde se ve involucrado un campus, lo primero que viene a la mente son las pérdidas humanas, la vulnerabilidad de la población, entre otros aspectos negativos. Esta investigación pretende minimizar estos escenarios, viéndolo desde otro ángulo, volcando esos temas negativos tratándolos con educación provocando una cultura de prevención en la población. Ante esta situación y con el fin de reducir afectaciones a la comunidad estudiantil, que a través de las autoridades académicas con el apoyo de Protección Civil, se han implementado acciones de limpieza de drenajes, así como la definición de espacios que puedan servir como albergues, en el mismo plantel. [40]-[42]. Del mismo modo, se han detectado las principales áreas de riesgo, ubicadas en laderas donde la acumulación de agua es más propensa, ya que carece de drenajes y varias edificaciones de un solo nivel, áreas que aumentan sus posibilidades de inundación. Las comunidades educativas se dan a la tarea de realizar una

planificación eficiente para evaluar la situación previa al desastre para mitigar los eventos de emergencia considerando los siguientes factores:

- Drenajes libres de escombros. (ver figura 4a)
- Infraestructura con mantenimiento adecuado (Campus Seguro).
- Formación de profesores.
- Zonas peligrosas detectadas. (Acumulación de agua precipitada ver figura 4b).
- Ubicación de edificios seguros. (Evacuación segura).
- Planificación efectiva para contar con una adecuada logística humanitaria.
- La ubicación geográfica del campus (ver figura 4 c)



Foto de autor desconocido está bajo licencia

[CC BY](#)



Foto de autor desconocido está bajo licencia CC [BY-SA](#)



Foto de autor desconocido está bajo licencia CC [BY-ND](#)

**Figuras 4 a,b,c.** Factores para mitigar eventos de emergencia

## Comportamiento

El comportamiento del ser humano está fuertemente influenciado por su personalidad y estado de ánimo, la formación de una cultura de prevención consiste en el conjunto de acciones orientadas no solo a reducir los riesgos en los entornos (amenazas y vulnerabilidades) sino también a desarrollar valores, actitudes y prácticas de las poblaciones de tal manera que garanticen el bienestar de las poblaciones, esa es la gran tarea de la educación en gestión del riesgo que se implementa sistémicamente en el marco de una educación enfocada a la prevención de una emergencia[25] . La mayoría de las personas no han tenido la experiencia de estar en una situación de peligro y, cuando esto sucede, algunos toman decisiones que aumentan el peligro para ellos y para otros. Así, las conductas que se presentan van desde una actitud de calma hasta un verdadero pánico.

La educación implica un proceso o conjunto de acciones encaminadas a desarrollar una cultura de prevención en los miembros de la institución, los docentes tienen un papel importante que desempeñar en la gestión previa a los desastres, desarrollando conocimientos para reducir los riesgos existentes y/o responder a los desastres. Es importante aprender a no generar nuevos riesgos porque cada acción diaria puede aumentar o reducir nuestra vulnerabilidad. Identificar las acciones humanas que ponen en riesgo nuestra supervivencia e intervenir para modificarlas. La organización dentro de la institución debe promover actividades que modifiquen aquellas circunstancias de riesgo producidas por el ser humano. Reconocer las condiciones de vulnerabilidad que generamos a diario se convierte en un aprendizaje fundamental para la población.

La experiencia ha demostrado que los mejores argumentos para reducir nuestra vulnerabilidad los aportan personas comprometidas y organizadas, que conocen los riesgos y las medidas e instrumentos para gestionarlos. También debe significar entender cómo no construir vulnerabilidad desde nuestras decisiones, la institución como parte de la comunidad y su organización, las autoridades capacitadas por protección civil son personas básicas para implementar medidas de reducción de emergencia. Los docentes deben ser actores clave en los procesos de planificación y elaboración del Plan de Manejo Pre-desastre. Conocer cómo se comporta una persona en situaciones de emergencia es de fundamental importancia para orientar las acciones preventivas. Sería deseable que los responsables de seguridad instalen sistemas de seguridad, implementen



planes de emergencia y los integren en sus respectivos campos de actuación si queremos optimizar la seguridad de las personas ante inundaciones [43][44].

### **Resolución de la colación**

Casi todos los métodos propuestos en la literatura para la simulación de multitudes humanas proponen la inspección visual como "la" forma de comparar sus resultados con la vida real. Para la simulación para resolver las colisiones se utiliza un marco óptimo para evitar colisiones recíprocas (ORCA). El marco ORCA permite que cada agente en una simulación seleccione una velocidad sin colisiones, sin oscilaciones y con una eficiencia increíblemente óptima al resolver un programa lineal simple de baja dimensión para cada agente.

### **Casos prácticos simulados y comparación con la realidad**

Simular el comportamiento de multitudes humanas requiere una comprensión de la interacción entre individuos, que puede ser compleja e impredecible. En ocasiones, las multitudes muestran comportamientos colectivos espontáneos, cuyo surgimiento es formulado por científicos sociales utilizando diferentes teorías, como modelos de contagio o hipótesis de predisposición. [25] Las principales categorías de esta taxonomía son audiencias y multitudes. Tanto las audiencias como las multitudes están compuestas por individuos con propósitos comunes. Sin embargo, las audiencias son multitudes pasivas, mientras que las multitudes son activas. Ejemplos de audiencias incluyen estudiantes en un salón de clases y peatones que están polarizados alrededor de un jugador de la calle.

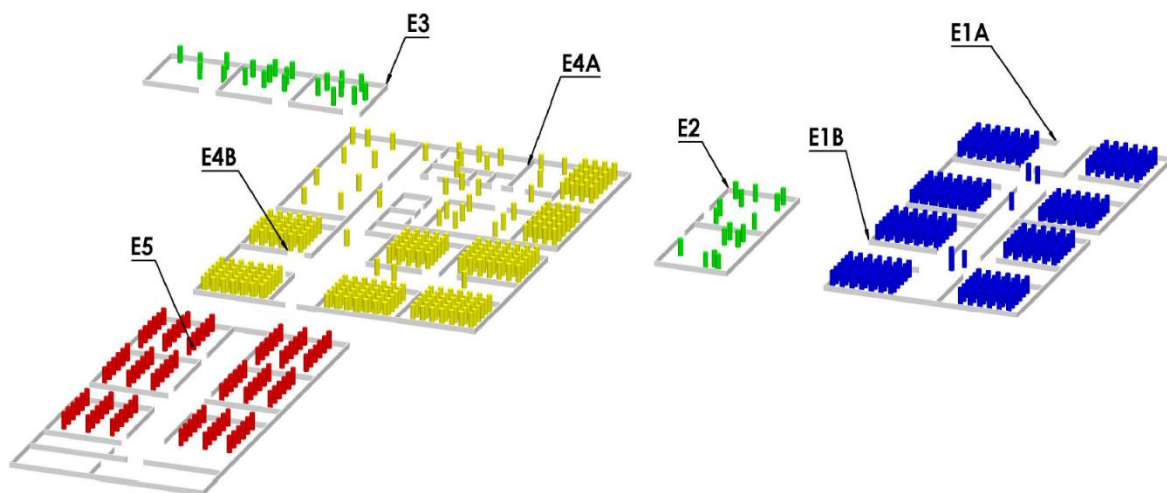
### **Escenario**

Al igual que las personas reales, los agentes virtuales toman sus decisiones de dirección considerando el entorno que los rodea y sus objetivos. El entorno suele consistir en obstáculos estáticos y otros agentes. En esta sección, describimos cómo representamos todos los elementos de un problema de dirección, al que nos referimos como un escenario. Definimos un escenario como una posible configuración de obstáculos y agentes en el entorno. La configuración de un obstáculo es su posición en el entorno junto con la información de su cuadro delimitador (suponemos

obstáculos rectangulares). La configuración de un agente incluye su posición inicial, la ubicación del objetivo y la velocidad deseada. La configuración de agentes y obstáculos se puede ampliar o modificar para satisfacer las necesidades de cualquier aplicación. El espacio de escenarios se define como el espacio de todos los escenarios posibles que un agente puede encontrar mientras conduce en entornos dinámicos. La relación del subespacio de escenarios que un algoritmo de dirección puede manejar con éxito se define como la cobertura del algoritmo. Un algoritmo de dirección ideal sería capaz de manejar con éxito todos los escenarios en este espacio de dimensiones extremadamente altas, por lo que tendría una cobertura de 1. Para poder determinar la cobertura de un algoritmo de dirección, necesitamos la capacidad de muestrear el espacio del escenario en de manera representativa y para determinar objetivamente el desempeño de un algoritmo para un escenario [45]-[50].

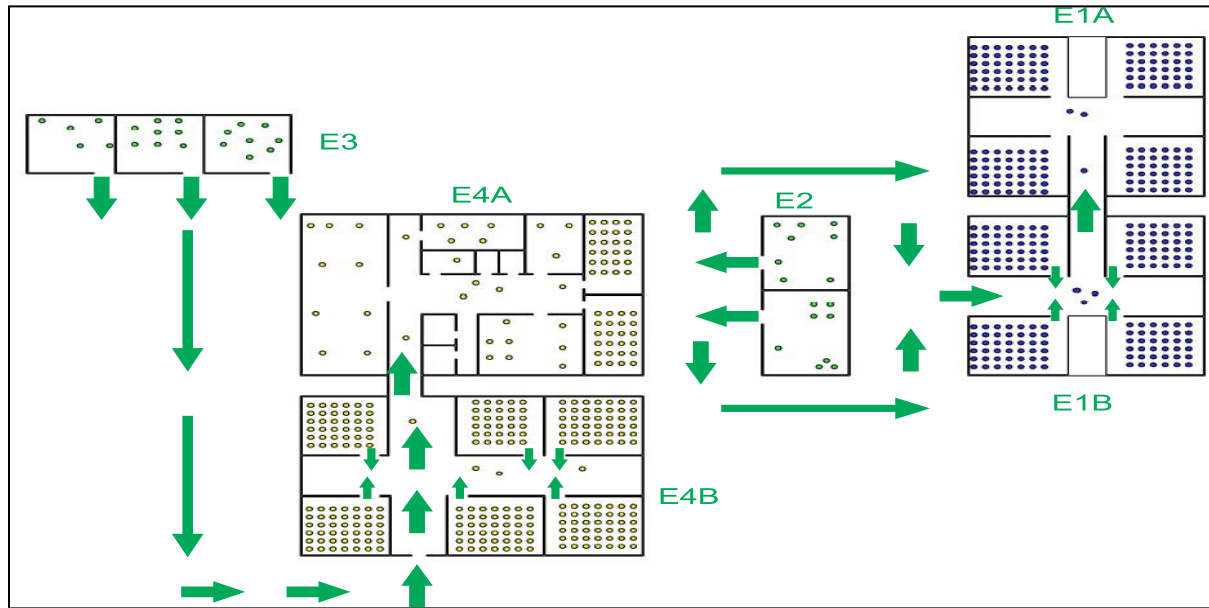
El escenario a considerar para este caso de estudio está constituido por 5 edificios, estos representan una sección de un campus universitario. Solo dos de estos edificios pueden albergar a los evaluados, ya que cuentan con suficiente espacio de albergue y están ubicados en un piso alto. Estos se identifican por E1A y E4A como se muestra en la figura 5.

**Figura 5.** Sección simulada del campus.



Configuración del escenario: el escenario está compuesto por 745 (ver tabla 2) agentes, en representación de estudiantes, docentes y personal administrativo. Los estados de evaluación inicial

de los individuos incluyen objetivos generales desagradables debido a la "angustia" causada por una tormenta y una inundación repentina. Suena la alarma para evacuar a las zonas seguras, en condiciones sin entrenamiento previo de los individuos, correrán enloquecidos y sin ningún sentido. Provocando la saturación de puntos de refugio y otros con bajo aforo. Ver figura 6.



**Figura 6** Posibles rutas de evacuación

**Tabla 2.** Población simulada en cada edificio del Campus

Edificios	E1A	E1B	E2	E3	E4A	E4B	E5	total
Agentes	120	120	15	40	110	190	150	745
Capacidad de albergue	325	0	0	0	425	0	0	750

Pelechano et al. [25] mencionan que la predicción precisa del movimiento de los peatones se puede utilizar para evaluar los riesgos potenciales para la seguridad y el rendimiento operativo en eventos en los que se reúnen muchas personas. Para los casos en los que se considere la predicción de muchos (>106) individuos durante un tiempo prolongado (por ejemplo, centros de peregrinación o

evacuación durante desastres naturales), se deben usar estructuras de datos y algoritmos escalables óptimos para simular en un tiempo razonable. El objetivo del presente esfuerzo es lograr simulaciones altamente realistas para >106 peatones en tiempo real. Para el caso de estudio, se eligieron los siguientes parámetros estándar para peatones:

Velocidad deseada:  $1,2 \pm 0,1$  m/s

Tiempo de relajación:  $0,50 \pm 0,1$  s

Radio peatonal:  $0,25 \pm 0,02$  m

Elipticidad mín./máx.: 0,00: 0,50

Empuje mínimo/máximo: 0.00: 0.80

Zona de confort:  $0,05 \pm 0,00$  m

Para configurar el escenario de simulación, consideramos el número promedio de personas en cada edificio, durante una jornada normal de trabajo. La Tabla 3 resume el número de personas simuladas, así como la capacidad de alojamiento en cada uno de los lugares. Es importante mencionar que esta distribución de la población fue similar al realizar el ejercicio de evacuación real.

**Table 2.** Formula en hoja de calculo

Celda	Formula en celda	Ecuación	Copiado a
B34	=B11-SUM(B16:B22)	2	B34: H34
B26	=J4*I16-SUM(B16:H16)	3	B26:B32
B37	=SUMPRODUCT(B4:H10,B16:H22)+ SUMPRODUCT(I4:I10,I16:I22)	Función Objetivo	-----

## Punto de refugio óptimo

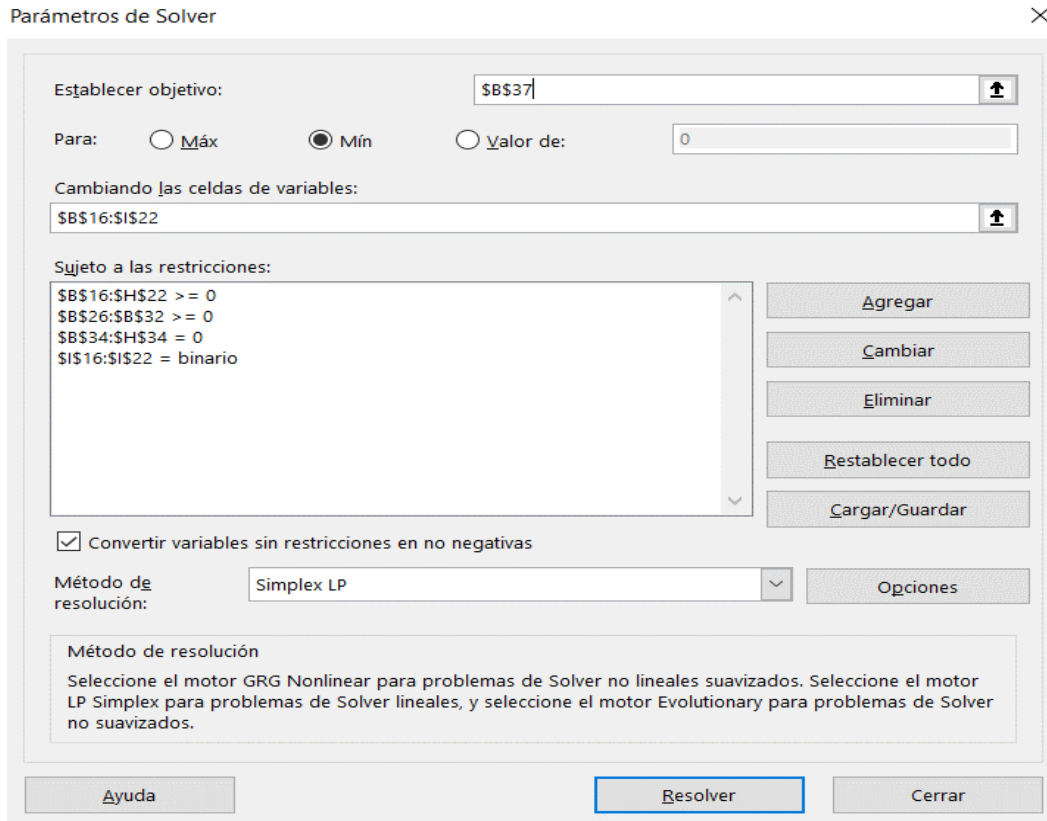
El modelo se resuelve utilizando la herramienta Excel Solver. Dada la información, el siguiente paso en Excel es identificar las celdas correspondientes a cada variable de decisión como se muestra en la figura 7. Las celdas B16: H22 corresponden a las variables de decisión  $X_{ij}$  que determinan la cantidad de punto de refugio y los puntos a evacuar. Las celdas J4: J10 incluyen las variables de decisión  $Y_i$  que corresponden a la capacidad de los puntos de refugio. Inicialmente, todas las variables de decisión se establecen en 0. El siguiente paso es construir las celdas para las restricciones de las ecuaciones 1 y 2 y la función objetivo. Las celdas de restricción y la función objetivo se muestran en la figura 7. Las celdas B26: B32 incluyen las restricciones de capacidad de la ecuación 3 y B34: H34 contienen las restricciones de demanda de la ecuación 2. La función

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Inputs									
2		Instance								
3	Location	E1A	E1B	E2	E3	E4A	E4B	E5	Cost	Capacity
4	E1A	1	5	10	65	45	40	65	1	325
5	E1B	5	1	20	60	40	35	60	1	0
6	E2	10	20	1	35	25	20	50	1	0
7	E3	65	60	35	1	20	15	45	1	0
8	E4A	45	40	25	20	1	5	35	1	425
9	E4B	40	35	20	15	5	1	30	1	0
10	E5	65	60	50	45	35	30	1	1	0
11	Population	120	120	15	40	110	190	150	745	750
12										
13										
14		Instance							Assigned locations	
15	Location	E1A	E1B	E2	E3	E4A	E4B	E5	1=assigned	
16	E1A	120	120	15	0	0	0	65	1	
17	E1B	0	0	0	0	0	0	0	0	
18	E2	0	0	0	0	0	0	0	0	
19	E3	0	0	0	0	0	0	0	0	
20	E4A	0	0	0	40	110	190	85	1	
21	E4B	0	0	0	0	0	0	0	0	
22	E5	0	0	0	0	0	0	0	0	
23										
24	Restricciones									
25	Location	Excess capacity								
26	E1A	5	0	0	0	0	0	0		
27	E1B	0	0	0	0	0	0	0		
28	E2	0	0	0	0	0	0	0		
29	E3	0	0	0	0	0	0	0		
30	E4A	0	0	0	0	0	0	0		
31	E4B	0	0	0	0	0	0	0		
32	E5	0	0	0	0	0	0	0		
33	Population	E1A	E1B	E2	E3	E4A	E4B	E5		
34	not attended	0	0	0	0	0	0	0		
35										
36	Funcion objetivo									
37	costo=									\$ 9,932.00

objetivo se muestra en la celda B37, que mide el total fijo coste más el coste variable de funcionamiento de la red de evacuación.

**Figura 7.** Restricciones y función objetivo.

El siguiente paso es usar Data -> Solver como se muestra en la figura 8. Dentro de Solver, el objetivo es minimizar el costo total en la celda B37. Con las variables de restricción como se muestra en la misma figura.



**Figura 8.** Uso del Solver para establecer la configuración del problema

Los resultados del modelo en la evacuación de edificios deben ser los siguientes, ver tabla 4:

**Tabla 3.** Asignación de puntos de evacuación a puntos de refugio.

	Instancia							Locaciones asignadas
Locación	E1A	E1B	E2	E3	E4A	E4B	E5	1=asignada
<b>E1A</b>	120	120	15	0	0	0	65	1
<b>E1B</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>E2</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>E3</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>E4A</b>	0	0	0	40	110	190	85	1
<b>E4B</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>E5</b>	0	0	0	0	0	0	0	0

- 1) Los agentes de construcción E1A permanecen en sus lugares,
- 2) Los agentes E1B evacuan a E1A,
- 3) Los agentes E2 evacuan a E1A,
- 4) 44% de los agentes E5 evacuan a E1A.
- 5) Los agentes E3 evacuan a E4A
- 6) El total de agentes los E4A permanecen en sus lugares
- 7) Los agentes E4B evacuan a E4A y finalmente
- 8) Los agentes restantes (56%) de E5, evacuan a E4A.

## **6.7 Métricas para Evaluación**

El trabajo de Pelechano et al. [25] utiliza la presencia como métrica para la evaluación de multitudes. El número de colisiones y el esfuerzo se utilizan a menudo como métricas para minimizar al desarrollar algoritmos de dirección [26, 27]. El trabajo en la Referencia 28 utiliza la "tasa de personas que salen de una habitación" para analizar simulaciones de evacuación. Lerner et al. [29] presentan un enfoque basado en datos para evaluar los comportamientos de los individuos dentro de una multitud simulada.

## **7. Aplicaciones y Resultados**

En el ejercicio de salida real contamos con la colaboración de voluntarios que cronometraron su tiempo de caminata hasta llegar a las áreas de meta. De hecho, dado que en tiempo real obtuvimos el momento en que la primera persona sale del entorno, incluimos dichos datos también provenientes de la simulación. Un análisis rápido de los datos extraídos de escenarios reales y de simulación nos permite observar que las diferencias son pequeñas y coherentes. Creemos que la diferencia entre la simulación y el tiempo de ejercicio real se debe a que todos los agentes de



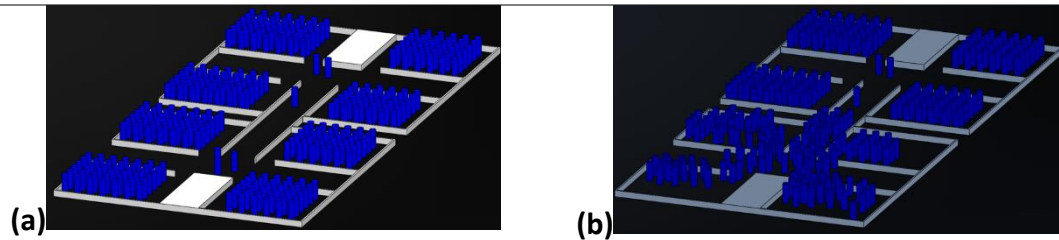
simulación se crearon y comenzaron a moverse al mismo tiempo, de una manera diferente a la vida real, donde las personas tienen un tiempo de respuesta diferente a los eventos. Ver tabla 5.

**Tabla 4.** Datos resumidos de la evacuación del campus: proceso real y simulado

	<b>Proceso Real</b>	<b>Simulación</b>
<b>Lugar</b>	Tiempo hasta la primera persona que abandona el edificio (segundos)	Tiempo hasta la primera persona que abandona el edificio (segundos)
<b>E1A</b>	0	0
<b>E1B</b>	128	320
<b>E2</b>	168	420
<b>E3</b>	152	380
<b>E4A</b>	0	0
<b>E4B</b>	128	320
<b>E5</b>	160	400
<b>Total</b>	736	1840

Evacuación del campus: un escenario de evacuación desafiante coloca a 745 agentes en los pisos superiores de dos edificios en caso de una inundación repentina. La optimización de ORCA para la calidad del tiempo reduce el tiempo medio que se tarda en salir del edificio y localizar un centro de

acogida en casi un 60%. Además, exhibe una mayor densidad de multitudes y un mayor rendimiento de salida, como se ve en la Figura 9.



**Figura 9** Evacuación con ORCA

Evacuación del campus con ORCA. La simulación con parámetros optimizados para la calidad del tiempo (b) tarda la mitad del tiempo en completarse en comparación con los parámetros predeterminados (a).

### **Observaciones finales**

En este capítulo se desarrolló un modelo objetivo que muestra opciones de solución para saber qué hacer ante la ocurrencia de una inundación catalogada como pre-desastre. Cada propuesta planteada fue diseñada para garantizar la asistencia de los agentes afectados, considerando la variedad de posibles calamidades entre otras presentes en este tipo de emergencias. Se desarrolló un modelo matemático, verificado a través de la simulación de multitudes por Menge para la ubicación de centros de refugiados en situación pre-desastre, el cual permitirá identificar las etapas previas a la ocurrencia y respuesta a un desastre que son de gran importancia dentro del proceso de logística humanitaria. , ya que permiten tomar con anticipación las decisiones logísticas, desarrollar programas de prevención y adelantar planes de acción de respuesta, creando así las condiciones para alcanzar los objetivos de eficiencia y eficacia en la respuesta a desastres, contribuyendo a la minimización del sufrimiento de las víctimas. Es importante lograr que el personal que atiende la emergencia oportunamente y llegue en el menor tiempo posible, se puede decir que la propuesta se enfoca en la decisión de ubicar la planificación de distribución de personal y operaciones de respuesta ante desastre en evacuación de una población, considerando las situaciones del sistema logístico compuesto por un modelo microscópico, se pueden considerar las

interacciones entre los evacuados por entidades cuyas interacciones y resultados están fuertemente influenciados por un entorno dinámico. La planificación logística humanitaria es una buena herramienta para la planificación y sobre todo para la educación de la población de un campus universitario sobre cómo actuar ante una situación de desastre.

### Futuras líneas de investigación

En el futuro, nos gustaría investigar la extensión de este modelo a contextos más amplios, como una gran ciudad; Además de vincular el modelo a una aplicación móvil, que permite el análisis del entorno, evaluación, optimización y, por tanto, generar un plan de evacuación (ver figura 10) adecuado al contexto y así poder realizar una adecuada planificación y ejecución. la formación adecuada, para tomar las decisiones oportunas a la hora de evacuar y salvaguardar la vida de los agentes. Hacer que este tipo de aplicación tenga más integración e intercambio de datos, dándole un enfoque ad-hoc [51].



**Figure 1** Trabajos de investigación futuros

## Referencias

Chadee, D. D. (2014). *Flooding and climate impacts and adaptation strategies for the Caribbean region*. New York: Nova Publ change: sectorial.

Tehrany, Mahyat Shafapour, Simon Jones, and Farzin Shabani. "Identifying the Essential Flood Conditioning Factors for Flood Prone Area Mapping Using Machine Learning Techniques." *Catena* 175 (2019): 174–92. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.12.011>.

Roos, Matthijs M.d., Thomas T. Hartmann, Tejo T.j.m. Spit, and Georg G. Johann. "Constructing Risks – Internalisation of Flood Risks in the Flood Risk Management Plan." *Environmental Science & Policy* 74 (2017): 23–29. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.04.007>.

Tofighi, S., S.a. Torabi, and S.a. Mansouri. "Humanitarian Logistics Network Design under Mixed Uncertainty." *European Journal of Operational Research* 250, no. 1 (2016): 239–50. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.08.059>.

Sahay, B. S., Sumeet Gupta, and Vinod Chan Menon. *Managing Humanitarian Logistics*. New Delhi: Springer, 2016.

Tofighi, S., S.a. Torabi, and S.a. Mansouri. "Humanitarian Logistics Network Design under Mixed Uncertainty." *European Journal of Operational Research* 250, no. 1 (2016): 239–50. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.08.059>

Kovács Gyöngyi, Karen Spens, and Mohammad Moshtari. *The Palgrave Handbook of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*. London: Palgrave Macmillan UK, 2018.

Klump, Matthias. *Humanitarian Logistics and Sustainability*. Place of publication not identified: Springer International Pu, 2016.

Zgaya, Hayfa, and Slim Hammadi. "Logistics Engineering." *Logistics Engineering and Health*, 2016, 1–53. <https://doi.org/10.1016/b978-1-78548-044-7.50001-4>

Parajuli, Anubhuti, Onur Kuzgunkaya, and Navneet Vidyarthi. "Responsive Contingency Planning of Capacitated Supply Networks under Disruption Risks." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 102 (2017): 13–37. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.03.010>

Nikbakhsh, Ehsan, and Reza Zanjirani Farahani. "Humanitarian Logistics Planning in Disaster Relief Operations." *Logistics Operations and Management*, 2011, 291–332. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-385202-1.00015-3>

Boonmee, Chawis, Mikiharu Arimura, and Takumi Asada. "Facility Location Optimization Model for Emergency Humanitarian Logistics." *International Journal of Disaster Risk Reduction* 24 (2017): 485–98. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.01.017>

Bretschneider, S., and A. Kimms. "A Basic Mathematical Model for Evacuation Problems in Urban Areas." *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 45, no. 6 (2011): 523–39. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2011.03.008>.

Bretschneider, Sarah. *Mathematical Models for Evacuation Planning in Urban Areas*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.

CROWD DYNAMICS, VOLUME 1: Theory, Models, and Safety Problems. Place of publication not identified: SPRINGER NATURE, 2019.

Sifaleras, Angelo, and Konstantin D. Petridis. *Operational Research in the Digital Era – ICT Challenges 6th International Symposium and 28th National Conference on Operational Research*, Thessaloniki, Greece, June 2017. Cham: Springer Nature, 2019.

Rahman, Noorhazlinda Abd. *Crowd Behavior Simulation of Pedestrians During Evacuation Process DEM-Based Approach*. Puchong, Selangor D.E.: Springer Singapore, 2018.

Curtis, Sean, Andrew Best, and Dinesh Manocha. "Menge: A Modular Framework for Simulating Crowd Movement." *Collective Dynamics* 1 (2016). <https://doi.org/10.17815/cd.2016.1>.

Campos, Vania, Renata Bandeira, and Adriano Bandeira. "A Method for Evacuation Route Planning in Disaster Situations." *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 54 (2012): 503–12. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.768>.

Li, Jing-Jing, and Hong-Ya Zhu. "A Risk-Based Model of Evacuation Route Optimization under Fire." *Procedia Engineering* 211 (2018): 365–71. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.024>

Naser, Arab, and Ali K. Kamrani. "Intelligent Transportation and Evacuation Planning," 2012. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2143-6>

Cuesta, Arturo, Orlando Abreu, and Daniel Alvear. *Evacuation Modeling Trends*. Cham: Springer International Publishing, 2016.

Cepolina, Elvezia M. "A Methodology for Defining Building Evacuation Routes." *Civil Engineering and Environmental Systems* 22, no. 1 (2005): 29–47. <https://doi.org/10.1080/10286600500049946>.

Noreña, Francisco Alberto Sandoval. "Emergency-Route, Evacuation Route Finder For Emergency And Rescue Scenarios." *Ingenius*, no. 14 (April 2016). <https://doi.org/10.17163/ings.n14.2015.02>.

Curtis, Sean, Andrew Best, and Dinesh Manocha. "Menge: A Modular Framework for Simulating Crowd Movement." *Collective Dynamics* 1 (2016). <https://doi.org/10.17815/cd.2016.1>.

Kullu, Kurtulus, Uğur Güdükbay, and Dinesh Manocha. "ACMICS: an Agent Communication Model for Interacting Crowd Simulation." *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 31, no. 6 (December 2017): 1403–23. <https://doi.org/10.1007/s10458-017-9366-8>.

Pelechano, Nuria, Jan M. Allbeck, Mubbasir Kapadia, and Norman I. Badler. *Simulating Heterogeneous Crowds with Interactive Behaviors*. Boca Raton: Taylor & Francis a CRC title, part of the Taylor & Francis imprint, a member of the Taylor & Francis Group, the academic division of T & F Informa, plc, 2017.

S. J. Guy, J. Chhugani, S. Curtis, P. Dubey, M. Lin, and D. Manocha. *Pedestrians: A least-effort approach to crowd simulation*. In *Proceedings of the 2010 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, SCA '10*, pp. 119–128, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 2010. Eurographics Association.

W. Shao and D. Terzopoulos. *Autonomous pedestrians*. *Graph. Models*, 69(5–6):246–279, 2007

D. Helbing, I. Farkas, and T. Vicsek. *Simulating dynamical features of escape panic*. *Nature*, 407:487, 2000.

A. Lerner, Y. Chrysanthou, A. Shamir, and D. Cohen-Or. *Context-dependent crowd evaluation*. *Computer Graphics Forum*, 29(7):2197–2206, 2010.

*How to Plan for Workplace Emergencies and Evacuations*. Washington, D.C.: U.S. Dept. of Labor, Occupational Safety and Health Administration, 2001.

Simonov, Andrey, Aleksandr Lebin, Bogdan Shcherbak, Aleksandr Zagarskikh, and Andrey Karsakov. "Multi-Agent Crowd Simulation on Large Areas with Utility-Based Behavior Models: Sochi Olympic Park Station Use Case." *Procedia Computer Science* 136 (2018): 453–62. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.08.266>.

Amideo, A. Esposito, M.p. Scaparra, and K. Kotiadis. "Optimising Shelter Location and Evacuation Routing Operations: The Critical Issues." *European Journal of Operational Research* 279, no. 2 (2019): 279–95. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.12.009>

Kovacs, Gyöngyi, and Mohammad Moshtari. "A Roadmap for Higher Research Quality in Humanitarian Operations: A Methodological Perspective." *European Journal of Operational Research* 276, no. 2 (2019): 395–408. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.07.052>.

López-Vargas, Juan Camilo, and Diana María Cárdenas-Aguirre. "Gestión De La Logística Humanitaria En Las Etapas Previas Al Desastre: Revisión Sistemática De La Literatura." *Revista De Investigación, Desarrollo E Innovación* 7, no. 2 (2017). <https://doi.org/10.19053/20278306.v7.n2.2017.6094>

Bayram, Vedat. "Optimization Models for Large Scale Network Evacuation Planning and Management: A Literature Review." *Surveys in Operations Research and Management Science* 21, no. 2 (2016): 63–84. <https://doi.org/10.1016/j.sorms.2016.11.001>.

Wolfram, Stephen. *Theory and Applications of Cellular Automata*. Singapore: World Scientific, 1986.

Naser, Arab, and Ali K. Kamrani. "An Integrated Methodology for Dynamic Routing in Evacuation Planning." *International Journal of Collaborative Enterprise* 3, no. 4 (2013): 314. <https://doi.org/10.1504/ijcent.2013.058638>.

Estrategias de mitigación de amenazas en la planificación del desarrollo. Accessed October 29, 2019. <https://www.oas.org>

Reyes, Lorena Silvana. *Localización de Instalaciones y Ruteo De Personal Especializado En Logística Humanitaria Post-Desastre - Caso Inundaciones*. Chía, Colombia: Universidad de La Sabana, 2015.

Guy, Stephen J., Ioannis Karamouzas, Ming C. Lin, and Dinesh Manocha. *Anticipatory Local Navigation*. Boca Raton: Taylor & Francis a CRC title, part of the Taylor & Francis imprint, a member of the Taylor & Francis Group, the academic division of T & F Informa, plc, 2017

Musse, Soraia Raupp, Cláudio Rosito Jung, and Vinicius J. Cassol. *A Quantitative Approach to Comparing Real and Synthetic Crowds*. Boca Raton: Taylor & Francis a CRC title, part of the Taylor & Francis imprint, a member of the Taylor & Francis Group, the academic division of T & F Informa, plc, 2017.

Kapadia, Mubbasir, Glen Berseth, Shawn Singh, Glenn Reinman, and Petros Faloutsos. *Scenario Space: Characterizing Coverage, Quality, and Failure of Steering Algorithms*. Boca Raton: Taylor &

Francis a CRC title, part of the Taylor & Francis imprint, a member of the Taylor & Francis Group, the academic division of T & F Informa, plc, 2017.

Bersth, Glen, Mubbasir Kapadia, Brandon Haworth, and Petros Faloutsos. *SteerFit: Automated Parameter Fitting for Steering Algorithms*. Boca Raton: Taylor & Francis a CRC title, part of the Taylor & Francis imprint, a member of the Taylor & Francis Group, the academic division of T & F Informa, plc, 2017.

Löhne, Rainald, Muhammad Baqui, and Eberhard Haug. *Real-Time Micro-Modeling of Millions of Pedestrians*. Boca Raton: Taylor & Francis a CRC title, part of the Taylor & Francis imprint, a member of the Taylor & Francis Group, the academic division of T & F Informa, plc, 2017.

Salas, Marco Antonio y Martín Jiménez Espinosa. *INUNDACIONES*. México, DF: CENAPRED, 2007.

López, Jesús Ramírez. *Manual de protección civil*. México: Sistema Nacional de Protección Civil CENAPRED, 2014.

Zúñiga, Roberto Ariel Abeldaño, and Ana María González Villoria. “Desastres En México De 1900 a 2016: Patrones De Ocurrencia, Población Afectada y Daños Económicos.” *Revista Panamericana De Salud Pública* 42 (2018). <https://doi.org/10.26633/rpsp.2018.55>

Reis, Chen, and Tania Bernath. “International Humanitarian Aid Today.” *Becoming an International Humanitarian Aid Worker*, 2017, 3–11. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804314-1.00001-4>.

Goldschmidt, Kyle H., and Sameer Kumar. “Humanitarian Operations and Crisis/Disaster Management: A Retrospective Review of the Literature and Framework for Development.” *International Journal of Disaster Risk Reduction* 20 (2016): 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.10.001>

PCAST, *Technology and the future of cities, report to the president*, in: Tech. Rep., Executive Office of the President, United States, 2016, p. 99, URL <https://www.whitehouse.gov/sites/whitehouse.gov/files/images>



# **La neuroergonomía en el factor de descanso operacional: Revisión de Literatura**

*Neuroergonomics in the operational rest factor: Literature Review.*

**Ana Isela García Acosta**

Tecnológico Nacional de México Campus Ciudad Juárez, México

agarcia@itcj.edu.mx

ID ORCID: 0000-0003-4394-3941

**Leonardo Alberto Alanís Castro**

Tecnológico Nacional de México Campus Ciudad Juárez, México

lalanis@itcj.edu.mx / leonardo.ac01@cdjuarez.tecnm.mx

**Jorge De La Riva Rodríguez**

Tecnológico Nacional de México Campus Ciudad Juárez, México

jriva@itcj.edu.mx

ID ORCID: 0000-0001-8402-0065

## **Resumen**

En la actualidad, se han desarrollado múltiples proyectos en el área de la neuroergonomía, en los cuales se requiere profundizar más en diferentes áreas de la Ingeniería Industrial. Dentro del de Estudio del Trabajo se encuentra el tiempo estándar que se establece como el tiempo que una persona calificada necesita para realizar una tarea. El estudio de los tiempos de trabajo está compuesto de diversos factores y hoy en día se observa la necesidad de estudiar el factor de descanso en tareas de equipo de cómputo, ya que sólo está definido para operaciones de manufactura.

En el presente, en las empresas existen diferentes actividades o áreas de trabajo que utilizan continuamente el equipo de cómputo en sus operaciones, como los son los espacios administrativos, el diseño digital o de sistemas para el desarrollo de planos, etc. Es por eso, que se realizó una revisión de literatura en el factor de descanso EEG.

Con este estudio se desarrolló un análisis de literatura, para identificar la factibilidad de crear a futuro un modelo para determinar el factor de descanso en las tareas de equipo de cómputo mediante el análisis de las ondas cerebrales, el cual será utilizado para determinar el tiempo de trabajo.

En este artículo se realizó una revisión de literatura derivada de libros, capítulos de libros, artículos arbitrados e indexados en el contexto internacional. Basándose en la factibilidad del uso de las ondas cerebrales y el comportamiento mental durante una jornada laboral, para reconocer la necesidad de profundizar en los elementos del tiempo de trabajo, como lo es el factor de descanso, así como el detectar la necesidad de actualizar el modelo actual de toma de tiempos, conforme a las nuevas tecnológicas y los cambios en los procesos.

Se obtuvo un 14.43 % de aprovechamiento del material disponible en la actualidad, pero con observación de que el enfoque se relaciona a los tiempos de trabajo totales, con disponibilidad de área de estudio para los complementos adheridos al tiempo de manera individual.

**Palabras Clave:** Neuroergonomía, Estudio del Trabajo, Factor de Descanso, Ondas Cerebrales.

### **Abstract**

Currently, multiple projects have been developed in the area of neuroergonomics, in which it is necessary to go deeper into different areas of Industrial Engineering. Within the Work Study is the standard time that is established as the time that a qualified person needs to perform a task. The study of work times is made up of various factors and today there is a need to study the rest factor in computer tasks, since it is only defined for manufacturing operations.

At present, in companies there are different activities or work areas that continuously use computer equipment in their operations, such as administrative spaces, digital design or systems for the development of plans, etc. For this reason, a literature review was carried out on the EEG rest factor.

With this study, an analysis of the literature was developed to identify the feasibility of creating a model in the future to determine the rest factor in computer tasks through the analysis of brain waves, which will be used to determine the rest time. job.

In this article, a literature review derived from books, book chapters, refereed and indexed articles in the international context was performed. Based on the feasibility of the use of brain waves and mental behavior during a working day, to recognize the need to deepen the elements of working time, such as the rest factor, as well as to detect the need to update the current model of time taking, according to new technologies and changes in processes.

A 14.43 % of utilization of the material currently available was obtained, but with observation that the approach is related to the total working times, with availability of study area for the complements adhered to the time in an individual way.

**Keywords:** Neuroergonomic, Work Study, Resting Factor, Brainwaves.

## **Introducción**

Para la Organización Internacional del Trabajo (1977), la medición de las actividades y sus tiempos es algo de gran necesidad, ya que permite reducir la cantidad de trabajo y eliminar procesos innecesarios, generando una mayor productividad para el empleado hacia con la empresa. De similar manera, se expresa como la medición está relacionada la medición del tiempo estándar, el cual nos representa el total del tiempo trabajado, correspondiente al tiempo de actividad, más el suplemento por descanso, junto al suplemento adicional por trabajo.

Se reconoce al tiempo estándar como la medida de tiempo de trabajo necesaria para completar una labor, así como también su composición por medio de factores que alteran el porcentaje de tiempo, para Mital, A. et al (1991) estos valores son de gran importancia, ya que se basan en la necesidad física y psicológica de los empleados para rendir de manera correcta. El factor de descanso es un componente del tiempo estándar, el cual nos establece el tiempo necesario de recuperación para que el empleado pueda mantener un estándar de trabajo, y que, según este mismo autor, es un valor que es complicado evaluar, ya que tiende a ser valorado de manera subjetiva, lo que complica el considerar la fiabilidad de los modelos utilizados para su evaluación.

La necesidad de descanso, se visualiza como la necesidad de recuperación física y psicológica de un trabajador para tener un rendimiento fiable, con el cual puede cumplir las metas de trabajo, por dicho motivo Das, B. (1990), nos habla del complemento por retraso, que es considerado como el factor de fatiga, en el cual se relaciona una ineficiencia en el ritmo de trabajo por cansancio con la capacidad de recuperación después de realizar un trabajo, el cual es aplicable al esfuerzo y trabajo normal.

El estudio del trabajo y la ergonomía van de la mano, ya que el ritmo de trabajo va aunado a factores que aumentan el tiempo, tal sea el diseño de un área que facilite o dificulte las actividades de un trabajador, por tal motivo El Mouayni, I. et al (2019), nos habla de la relevancia del factor ergonómico en el diseño de las áreas para estandarizar el ritmo de trabajo, en el cual establece que se requieren pausas necesarias para la recuperación de un trabajador, luego de evaluar la repetitividad de una operación y la fiabilidad de un estado inconveniente en relación a un estado de cansancio.

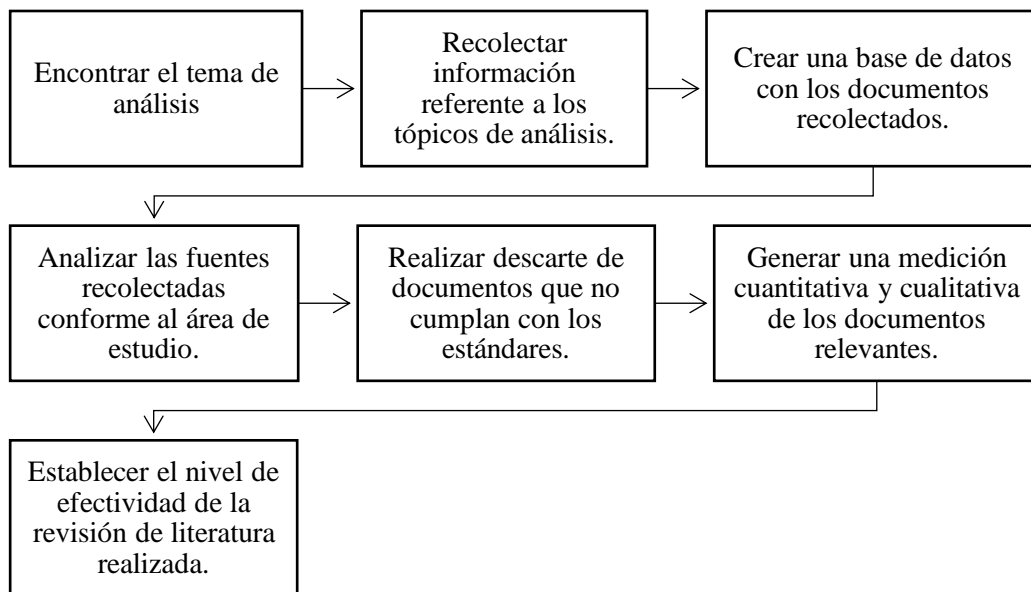
Se incluye el concepto de tiempo estándar, que respecto a la Organización Internacional del Trabajo (1979), es la suma de todos los estándares de tiempo de una actividad, donde toma a cuenta el tiempo operativo, los tiempos de descanso y los complementos, para tener un tiempo total de realización de una operación según las evaluaciones realizadas y que definirán el nivel de productividad según el tiempo dedicado distribuido entre el tiempo total destinado.

La fatiga laboral que se analiza desde el punto ergonómico, tiene relación con los factores psicofisiológicos, los cuales se analizan mediante el comportamiento de la mente humana, tal como hace referencia Bjegejević, B. et al (2021), en donde en su trabajo analiza el cansancio visual, mental y la frecuencia cardiaca para establecer el parametro de desgaste mental de una persona, asociandolo con la reducción de la capacidad física, y en donde establece que el entendimiento de estos factores se asocia con una nueva área de estudio, conocido como la neuroergonomía y en donde se deben analizar más factores de la conciencia humana para profundizar más en la evaluación del trabajo respecto a nuevas herramientas y tecnologías.

## Metodología

La metodología utilizada en el análisis está basada en Galvan, J. y Galvan M. (2017), donde nos presentan que una correcta revisión de literatura consta de diversos pasos de análisis, interpretación y relación de datos, los cuales se toman como referencia el siguiente diagrama de la figura 1:

*Figura 1. Diagrama de Metodología*



Fuente: Elaboración propia.

### 1. Encontrar el tema de análisis

Respecto a esto, los autores comentan que se debe establecer claramente el tema de estudio y los tópicos en los que se desglosa, para aprovechar en mayor manera la revisión de literatura realizada, dentro de la cual, será permitirá ser más selectivo sobre el abanico de información que se puede obtener de diversas fuentes.

2. Recolectar información referente a los tópicos de análisis.

Después de establecer el tema, se deberá recolectar información en las múltiples plataformas disponibles, sean físicas o digitales, permitiendo tener acceso a cualquier tipo de dato relevante para el estudio a realizar.

3. Crear una base de datos con los documentos recolectados.

Al recolectar los datos, los autores Galvan, J. y Galvan M. (2017), recomiendan el diseñar una base de datos digital, donde se dé seguimiento a las referencias de los documentos obtenidos, sean el nombre del libro, publicación, etc., así como autores, editorial, anotaciones del contenido, y cualquier otro dato de relevancia que permita identificar con facilidad la fuente a utilizar.

4. Analizar las fuentes recolectadas conforme al área de estudio.

Al tener un compendio de los datos, será más fácil analizar cada uno de ellos para poder establecer tópicos de referencia de la información y poder segmentar más fácilmente los datos que sean importantes para el estudio y aquellos que no aporten a la investigación realizada.

5. Realizar descarte de documentos que no cumplan con los estándares.

Los datos identificados, con un valor de no aporte deberán ser analizados, para descartar aquellos que sean totalmente inútiles e identificar y apartar aquellos que puedan llegar a ser de utilidad al tener alguna información que se identifique con algún tópico o nos permita hacer alguna referencia de aporte.

6. Generar una medición cuantitativa de los documentos relevantes.

Se deberá realizar una medición del nivel de aporte de los documentos relevantes, para conocer el porcentaje de aporte obtenido de la investigación realizada, refiriendo a cuantos documentos son aprovechables del cien por ciento de documentos recopilados.

7. Establecer el nivel de efectividad de la revisión de literatura realizada.

Conforme al porcentaje obtenidos, se establece el nivel de contenido existente referente al tema en cuestión o los tópicos que le componen, para reconocer el área de oportunidad disponible en la realización de la investigación, y el posible aporte de esta hacia con el área de estudio.

## **Resultados**

Inicialmente se seleccionó el tema de neuroergonomía dentro del estudio de trabajo, refiriendo al tema del factor de descanso operacional específicamente, esto definido a través del estudio que se pretende realizar y que servirá como plataforma teórica para corroborar la investigación futura en el área de operacional.

Siendo fundamentado, a través de investigaciones como la de Çakit, E. y Karwowski, W. (2020), muestra la importancia del estudio de la carga mental en el trabajo, respecto a el método clásico en comparación con las nuevas estrategias neuroergonómicas.

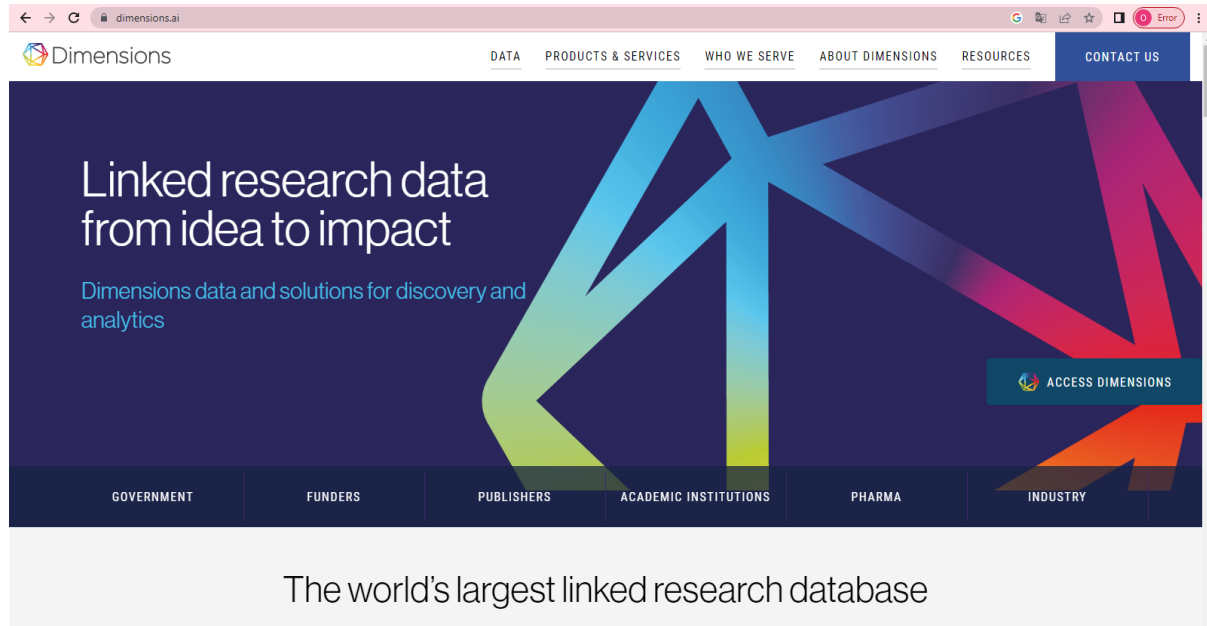
Conforme a esto, se realizó una revisión bibliográfica del tema de estudio, referentes a “neuroergonomía”, “ergonomía”, “estudio el trabajo”, “factores de descanso” y “ondas cerebrales”, buscando reducir el abanico de contribuciones por parte de las diversas fuentes estudiadas y estableciendo tópicos de interés en los estudios.

Que siguiendo la dirección de Çakit, E. y Karwowski, W. (2020), dentro de su modelo de estudio, se basó en el enfoque informático respecto a la neuroergonomía, con una recopilación de información en base a un modelo booleano, con un análisis de información referido a “carga mental”, “algoritmos genéticos”, “fatiga mental” y “red neuronal”, en diversas fuentes, para de esta manera crear un compendio basado en reconocer a la neuroergonomia como parte del nuevo estándar del estudio del trabajo.

Para esto, dentro de la investigación y recopilación de información que realizamos, se generó un estudio a en múltiples plataformas de investigación, sean bases de datos, como Scopus, EBSCOHost, Google Scholar, AHFE Open Access y Dimensions (Figura 2). Y de los cuales se realizó una selección conforme a cuatro factores:

- I) Artículos disponibles en inglés.
- II) Publicaciones realizadas del 2017 a la fecha (2023).
- III) Publicaciones revisadas por expertos.
- IV) Publicaciones que contaran con un registro ISSN/ISBN.

**Figura 2.** Pantalla base de datos Dimensions



Fuente: dimencions.ai (21 de Junio 2023).

En base a las diversas plataformas, se recolecto el contenido referente a los avances neuroergonomicos en las ciencias, como base en los nuevos estándares en los temas basados en los tópicos de estudio.



Tabla 1. Ejemplo de tabla de recolección de fuentes

DOI	Title	Abstract	Publication Date	Volume	Pagination	Open Access	Publication Type	Authors
10.1186/s	Effects of Kinesio taping on forearm supination/pronation performance fatigability	BackgroundRepetitive exertion in supination/pronation could increase the risk of forearm diseases due to fatigue. Kinesio taping (KT) is a physical therapy technique that decreases muscle tone and musculoskeletal disorders (MSDs) risk. Many assumptions about taping have been made and several studies have considered the taping applications; however, the effect of KT on strength and fatigue of the forearm supination/pronation remains unclear. The purpose of this study was to evaluate the effect of KT on forearm performance fatigability.MethodsA screwing test was constructed to measure the forearm force loss and screwing efficiency during repetitive supination/pronation. Data from 18 healthy adults who underwent both KT and no taping (NT) sessions were used to investigate the forearm strength change in terms of grip force (GF), driving torque (DT), and push force (PF). The maximal isometric forces before and after the screwing test and force decreasing rate (efficiency) during screwing were evaluated to assess the performance fatigability in KT and NT conditions.ResultsA statistically significant force loss (FL) in maximal isometric GF ( $p = 0.039$ ) and maximal isometric DT ( $p = 0.044$ ); however, no significant difference was observed in maximal isometric PF ( $p = 0.426$ ) between NT and KT. KT provides greater screwing efficiency than NT.ConclusionsKT could not improve FL in the maximal muscle strength of the forearm in healthy subjects. KT on the forearm was associated with a lesser decline in DT efficiency than NT, implying that KT could decrease the loss rate of muscle strength and delay the development of fatigue; however, the KT did not yield improvements in PF while performing screwing tasks.	2022-02-09	23	131	All OA; Gold	Article	Hsiao, Chih-Kun; Tsai, Yi-Jung; Lu, Chih-Wei; Hsiung, Jen-Chou; Hsiao, Hao-Yuan; Chen, Yung-Chuan; Tu, Yuan-Kun
10.1177/0	Effect of Nature Experience on Fronto-Parietal Correlates of Neurocognitive Processes Involved in Directed Attention: An ERP Study	BACKGROUND: Several studies have demonstrated that brief interactions with natural environments can improve cognitive functioning. However, the neurocognitive processes that are affected by natural surroundings are not yet fully understood. It is argued that the "elements" in natural environment evoke "effortless" involuntary attention and may affect the neural mechanisms underlying inhibition control central to directed attention. METHODS: The present study used electroencephalography (EEG) to investigate the effects of nature experience on neurocognitive processes involved in directed attention. During EEG recordings, participants ( $n = 53$ ) were presented nature audio/video as stimuli to evoke nature experience, and flanker task was administered both before and after nature experience. An open eye rest condition was included randomly in either before or after nature experience cognitive task as a control condition. RESULTS: The event-related potential analysis demonstrated a significant improvement in the response time after the nature experience. The analysis also demonstrated a significant difference for the inhibitory control process in fronto-parietal N2 ( $P < .01$ ) and P3 ( $P < .05$ ) for incongruent trials subsequent to nature experience. The spectral analysis also found an increase in alpha in all five brain regions (all $P$ s $< .01$ ) and fronto-central theta power ( $P < .01$ ). CONCLUSION: The findings suggest that improved inhibitory control processes could be one of the aspects of enhanced directed attention after nature experience. Increased alpha along with theta indicates a relaxed yet alert state of mind after nature experience.	2020-07	27	136-147	All OA; Gold	Article	Sahni, Pooja; Kumar, Jyoti
10.1016/j.	Analysis of factors influencing the productivity of hammer drilling – user forces, human fatigue, drilling direction, and drill bit	In order to be able to develop a hammer drill with which the user can work as ergonomically and productively as possible, the relevant influencing factors must be known. In addition to the unknown influence of the drilling direction, there is a lack of understanding of the relations between user forces, human fatigue, and productivity. To analyze these relations, an experiment was carried out with 15 professional users. First, the influence of feed force, drilling direction, and drill bit on the rate of penetration was examined. Taking into account the rate of penetration and human fatigue, it was then investigated which of the three feed forces produces the highest productivity. Furthermore, the lateral forces applied by the participants during the drilling process were analyzed. Based on the study, it was found that the drilling direction ( $p < .001$ , $r = -0.198$ ) and the drill bit type ( $p < .041$ , $r = -0.16$ ) have a significant influence on the rate of penetration. Moreover, it was found that the rate of penetration tends to increase with higher feed forces, however, the theoretical cumulative drilling meters decrease when taking user fatigue into account. Finally, the experiment showed that the participating professionals applied lateral forces (Mdn = 16.7 N) of 13% to the feed force when working with a hammer drill. On the basis of this knowledge, investigations can be done to analyze the influences of lateral forces on the drilling process. The findings help drill and hammer drill manufacturers in testing and development processes. For craftsmen, on the other hand, the knowledge helps to perform the task as ergonomically and time-efficiently as possible.	2020-12-10	92	103338	Closed	Article	Uhl, Michael; Lindenmann, Andreas; Matthiesen, Sven

Fuente: Elaboración propia.

Haciendo énfasis en la tabla 1, el primer estudio que se presenta es el de Hsiao, C. (2022), el cual se obtuvo de la búsqueda masiva de información en las múltiples plataformas, y que entro en los documentos relacionados al tema de la fatiga, o bien se asoció al factor de fatiga, pero realmente el estudio nos habla de la fatiga muscular de las personas, en relación al desgaste muscular común del crecimiento de una persona.

Otro documento que se encuentra en los estudios realizados, pero no se visualiza en la tabla es el de Noh, Y. et al (2021), el cual presenta una investigación en el área de la neuroergonomía en el transporte, en donde estudian a diversos participantes que realizan labores de transporte de mercancías en el entorno real, con diversos niveles de carga laboral, identificando factores fisiológicos y procedimentales para establecer los cambios en la condición neuronal de la persona, enfocándose en la recolección de datos mediante electroencefalograma (EEG) y electrocardiograma (ECG).

Con información como la anterior, se realizó un descarte de documentos que no cumplen con los tópicos seleccionados, reduciendo la cantidad de información útil para el estudio, así como se ve en la tabla 2.

*Tabla 2. Muestra de tabla de análisis de estudios*

Título	Neuroergonomía	Ergonomía	Estudio del Trabajo	Factor de descanso	Ondas Cerebrales	Equipo de computo
Indoor CO2 concentrations and cognitive function: A critical review						
On-skin paintable biogel for long-term high-fidelity electroencephalogram recording	X					
Influencing factors on thermal comfort and biosignals of occupant-a review	X					
Construction of Smart City Street Landscape Big Data-Driven Intelligent System Based on Industry 4.0						
Perceived air quality and cognitive performance decrease at moderately raised indoor temperatures even when clothed for comfort	X					
EEG Headset Evaluation for Detection of Single-Trial Movement Intention for Brain-Computer Interfaces	X				X	
Brain-Computer Interface: Advancement and Challenges	X		X		X	
The impact of emissions from an essential oil diffuser on cognitive performance						
Wearable Sweat Loss Measuring Devices: From the Role of Sweat Loss to Advanced Mechanisms and Designs		X				
Effect of temperature on attention ability based on electroencephalogram measurements	X	X			X	
Investigating the effect of wearing masks on office work in indoor environments during a pandemic using physiological sensing		X				
Measurement and prediction of work engagement under different indoor lighting conditions using physiological sensing		X			X	X
Neural-signal electroencephalogram (EEG) methods to improve human-building interaction under different indoor air quality	X	X	X			

Fuente: Elaboración propia.

Por ejemplo, el estudio realizado por Du, B. et al (2020), que lleva por nombre “Indoor CO2 concentrations and cognitive function: A critical review”, presenta un estudio relacionado a las funciones cognitivas de la presencia del CO2 en el ambiente laboral, en donde mediante una técnica de observación de los participantes, se visualizaba los efectos de como el nivel de PPM (por sus siglas en inglés, Parts Per Million) de CO2 en un espacio.

Este estudio nos mostraba como se podía inducir sueño en las personas, haciendo referencia a temas de fatiga mental por los daños generados por el CO2 en el cerebro durante cierto tiempo.

El estudio en cuestión de ser asociación a los tópicos del estudio, por lo cual se considera que no cumple con las características necesarias, por ende este documento se descarta del listado de información obtenida.

A diferencia, de estudios como el de Mridha, M. et al (2021), que presenta un estudio sobre la interfaz cerebro-ordenador, que se basa en un estudio recopilatorio de la importancia de área biomédica y neuroergonómica en el estudio del cerebro humano y su funcionalidad en las áreas laborales, donde uno de sus hallazgos es la relación con la seguridad del trabajador respecto al estudio de las actividades y necesidades, así sus aportes al desarrollo de nuevos procesos.

El cual, a diferencia del primero, toca temas de interés que es el reconocer las áreas neuroergonómicas y su funcionalidad, así como el considerar el aporte dentro del análisis del estudio del trabajo, como parte de la necesidad del descanso de una persona para laborar mejor.

Como parte del análisis, se evaluó el número de documentos que cumplieron con los tópicos necesarios, estableciendo el nivel de aprovechamiento del material recabado, en función del tema de estudio, dicha recopilación cuantitativa, se muestra a continuación en la tabla 3:

*Tabla 3. Recopilación de documentos recolectados.*

Tópicos	Recopilados en General	Documento encontrados y analizados	Cumplen con los Tópicos
Neuroergonomía	280	189	32
Ergonomía	116	112	12
Factor de Descanso	25	20	5
Estudio del trabajo	59	55	6
Ondas Cerebrales	38	33	4
<b>Total</b>	<b>518</b>	<b>409</b>	<b>59</b>
<b>%</b>		<b>78.96</b>	<b>14.43</b>

Fuente: Elaboración propia.

Las columnas hacen referencia al manejo de la información, inicialmente los documentos recopilados en general es todo documento que arrojaron las plataformas con su respectiva información.

En los documentos encontrados y analizados, fue una búsqueda minuciosa de manera directa, donde cada documento se buscó en las diversas plataformas colegiadas como archivo PDF o de lectura, esto para analizarlo con mayor profundidad y evaluar si este aporta a los tópicos seleccionados para el análisis.

Y la última columna hace referencia a cuantos, de los documentos recolectados del total, fueron factibles para ser utilizados en el estudio, esto ya que cumplen con varios de los tópicos y aportan al contenido de la investigación.

Siendo esto las observaciones en general de los documentos recopilados, y la forma en que se distribuyó el aprovechamiento de la información, resaltando que el porcentaje del total de los documentos de cada columna, se evalúa en relación al total de los datos “Recopilados en General” respecto a los obtenidos en las otras columnas, en este caso los documentos encontrados y analizados en comparación de los documentos recopilados en general es de un 78.96%, y de los documentos que cumplen con los tópicos del estudio en comparación con lo recopilado es de un 14.43%.

### **Discusión**

Los resultados obtenidos muestran un área de oportunidad en el estudio de la neuroergonomía laboral, debido a que su implementación está desarrollada mayormente en temas generales del estudio del tiempo, con posible implementación a los complementos internos. El 14.43% permite ver un campo de estudio con posibilidades de desarrollo y con miras a una implementación internacional de nuevos medibles.

La dificultad de la implementación neuroergonomica, son las barreras culturales y laborales, debido a que en cada región del mundo varían los estándares laborales, a consideración del desarrollo que tengan, o bien de las necesidades laborales establecidas.

### **Conclusiones**

Se observa, que, dentro del análisis cuantitativo de los documentos recopilados, el porcentaje de datos relacionados a los tópicos seleccionados y que tienen funcionalidad con lo que se pretende analizar es aproximadamente un 15%, lo cual muestra que de los datos obtenidos en el área de estudio es pequeño en comparación con la cantidad total de fuentes obtenidas, esto basado conforme a los criterios establecido para la recolección de los datos, así como se puede ver en la figura 3.

Figura 2. Porcentaje de aprovechamiento de la información.



Fuente:

Elaboración propia.

Este resultado va acompañado con la observación de que hay un avance científico en el estudio de la neuroergonomía en relación a los espacios de trabajo, y que el énfasis futuro de la ergonomía es la aplicación de dichos conocimientos es en el estudio de tiempos, para poder optimizar en mayor manera las actividades operacionales, pero que de momento no se desarrollan en gran manera, ya que hay un amplio margen de actividades que deberán analizarse.

El factor de descanso es una actividad que está incluida dentro del estudio de tiempo, y es un área de amplio desarrollo, ya que de las investigaciones recolectadas representa un pequeño porcentaje de los estudios recolectados, y que aún no se implementa en el área de la neuroergonomía, a pesar de que es un área de estudio en desarrollo.

Como complemento, investigaciones como la de Xu, T. et al (2022), nos habla de la importancia de estudiar la conectividad cerebral en relación a los estados cognitivos, como parte de la eficiencia temporal del reposo en las personas al desarrollar una actividad, así como el superar la disminución de la eficiencia mental ante la percepción del cansancio, tomando a cuenta que esto se relaciona con el factor de fatiga que es el porcentaje de descanso necesario para el trabajador respecto a las actividades realizadas, según el concepto del estudio del trabajo.

## Futuras Líneas de Investigación

Las áreas de investigación a futuro están en el análisis de los componentes del estudio de trabajo, debido a que esta cuenta con los factores de descanso y necesidades personales, así como los complementos por factores ambientales, permitiendo tener un amplio espectro de estudios a realizar enfocándose en los componentes de manera individual.

Esto ayudara al desarrollo de la industria 5.0, enfocada a las tecnologías en las capacidades humanas, tanto físicas como emocionales, para un mejor desempeño laboral y una mayor adaptación a los equipos que se manejen en el entorno laboral.

## BIBLIOGRAFÍA

Bjegojević, B., Chiara Leva, M., Balfe, N., Cromie, S., & Longo, L. (2021). Physiological Measurements for Real-Time Fatigue Monitoring in Train. *31th European Safety and Reliability Conference*, 2744-2751.

Çakıt, E., & Karwowski, W. (2020). A Review on Applications of Soft Computing Techniques in Neuroergonomics During the Last Decade. En H. Ayaz, & U. Asgher, *Advances in Neuroergonomics and Cognitive Engineering* (págs. 37-45). Ankara: Springer.

Das, B. (1 de Mayo de 1990). Personal, Unavoidable Delay, and Fatigue Allowances for Setting Performance Standards. *International Journal of Operations & Production Management*, 10(5), 62-70.

Du, B., Tandoc, M. C., Mack, M. L., & Siegel, J. A. (2020). Indoor CO2 concentrations and cognitive function: A critical review. *International Journal of Indoor Environment and Health*, 1067-1082.

El Mouayni, I., Etienne, A., Lux, A., & Siadat, A. (Enero de 2019). A simulation-based approach for time allowances assessment during production system design with consideration of worker's fatigue, learning and reliability. *Computers & Industrial Engineering*, 139.

Galvan, J., & Galvan, M. (2017). *Writing Literature Reviews*. New York: Taylor & Francis.

Hsiao, C.-K., Tsai, Y.-J., Lu, C.-W., Hsiung, J.-C., Hsiao, H.-Y., Chen, Y.-C., & Tu, Y.-K. (2022). Effects of Kinesio taping on forearm supination/pronation performance fatigability. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 131.

Jahncke, H., Hygge, S., Mathiassen, S. E., Hallman, D., Mixer, S., & Lyskov, E. (2017). Variation at work: alternations between physically and mentally demanding tasks in blue-collar occupations. *Ergonomics*, 1218-1227.

Mital, A., Bishu, R. R., & Manjunath, S. (1991). Review and evaluation of techniques for determining. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 8(2), 165-178.

Mridha, M. F., Das, S. C., Kabir, M. M., Lima, A. A., Islam, R., & Watanobe, Y. (2021). Brain-Computer Interface: Advancement and Challenges. *Sensors (Basel)*, 5746.

Noh, Y., Kim, S., Jang, Y. J., & Yoon, Y. (2021). *Modeling Individual Differences in Driver Workload Inference Using Physiological Data*. Hove, Inllaterra: International Journal of Automotive Technology.

Oficina Internacional del Trabajo. (1977). *Introducción al Estudio del Trabajo*. Ginebra: Organización Intenacional del Trabajo.

Oficina Internacional del Trabajo. (1979). *Introduction to Work Study*. Ginebra: Organización Internacional del Trabajo.

Sahni, P., & Kumar, J. (2020). Effect of Nature Experience on Fronto-Parietal Correlates of Neurocognitive Processes Involved in Directed Attention: An ERP Study. *Annals of Neurosciences.*, 136-147.

Uhl, M., Lindenmann, A., & Matthiesen, S. (2020). Analysis of factors influencing the productivity of hammer drilling – user forces, human fatigue, drilling direction, and drill bit. *Applied Ergonomics*.

Xu, T., Xu, L., Zhang, H., Ji, Z., Li, J., Bezerianos, A., & Wang, H. (2022). Effects of Rest-Break on mental fatigue recovery based on EEG dynamic functional connectivity. *Biomedical Signal Processing and Control* , 103806.



# **Análisis Aerodinámico de Ala Morfológica con Envergadura Variable**

*Aerodynamic Analysis of A Morphological Wing With Variable Span*

**Arturo Paz Perez**

Tecnológico Nacional de México / IT de Ciudad Juárez  
D19112256@itcj.edu.mx  
<https://orcid.org/0000-0002-7805-4477>

**Humberto García Castellanos**

Tecnológico Nacional de México / IT de Ciudad Juárez  
humber.gc@itcj.edu.mx  
<https://orcid.org/0000-0002-4684-4888>

**Jorge de la Riva Rodríguez**

Tecnológico Nacional de México / IT de Ciudad Juárez  
jriva@itcj.edu.mx  
<https://orcid.org/0000-0001-8402-0065>

## **Resumen**

Las alas de cambio de forma han sido objeto de investigación en la industria aeronáutica, debido a su potencial para mejorar la eficiencia del vuelo y reducir el consumo de combustible en aeronaves comerciales. Los objetivos principales de esas investigaciones son determinar si las alas de cambio de envergadura pueden mejorar el rendimiento aerodinámico del avión, reducir los costos de operación y mejorar la comodidad de los pasajeros.

Los resultados obtenidos en estos análisis han demostrado que las alas de cambio de envergadura pueden mejorar significativamente la eficiencia del vuelo, mejor sustentación y reducir el empuje requerido de la aeronave. Por lo tanto, la implementación de estas tecnologías en la industria aeronáutica puede tener un impacto positivo en la sostenibilidad y la rentabilidad de las operaciones de vuelo, lo que hace que la investigación de alas de cambio de envergadura sea un área importante de estudio y desarrollo en la actualidad (Ajaj, R. M., & Jankee, G. K. (2018)).

**Palabras clave:** Alas de cambio de forma, eficiencia, rendimiento de vuelo, aerodinámica, coeficiente de sustentación, coeficiente de arrastre, túneles de viento.

## **Abstract**

Shape-changing wings have been the subject of research in the aerospace industry due to their potential to improve flight efficiency and reduce fuel consumption in commercial aircraft. The main objectives of those research are to determine whether variable wings can improve the aerodynamic performance of the aircraft, reduce operating costs, and enhance passenger comfort.

This research involves the solution of aerodynamic equations and their validation through CFD analysis on scaled models of variable-span wings. The results obtained in these analyses have demonstrated that variable wings can significantly improve flight efficiency, better lift, and reduce the required thrust of the aircraft. Therefore, the implementation of these technologies in the aerospace industry may have a positive impact on the sustainability and profitability of flight operations, making the research of variable wings a critical area of study and development today (Ajaj, R. M., & Jankee, G. K. ,2018).

**Keywords:** Efficiency, Flight Performance, Endurance, Aerodynamics, Lift Coefficient, Drag Coefficient.

## **Introducción**

En los vehículos aéreos no tripulados, los cambios que permiten que un organismo se adapte mejor a su entorno y que tenga mayor eficiencia en vuelo son las alas morfológicas (García, Fernández, & Rodríguez, 2020). Las alas morfológicas permiten optimizar los atributos aerodinámicos y dan a la aeronave una adaptación a una gama mucho mayor en misiones de vuelo, a diferencia de las alas convencionales que proporcionan características aerodinámicas fijas incapaces de replicar los beneficios de las alas morfológicas, las condiciones de vuelo dictan el comportamiento de las alas, por lo que la adaptación al cambio se convierte en algo fundamental para la búsqueda de la eficiencia aerodinámica (Segura, Martínez, & Gómez, 2019).

Pero ¿Qué es un ala morfológica?, podemos encontrar diversas definiciones sobre la morfología del ala, sin embargo, para nuestro enfoque aerodinámico es necesario citar las concepciones, Valasek dice “consideramos la morfología de ala en su sentido amplio como cualquier cambio funcional en la forma del ala durante el curso de vuelo”. (Ninian y Dakka, 2017),( Li et al., 2018).

Las alas adaptables o que cambian de forma están inspiradas en las aves, lo que se busca lograr es que este tipo de ala se adapte a la fase de vuelo en la que se encuentre nuestra aeronave, y con esto aumentar la eficiencia aerodinámica. Al tener alas que cambian de forma, se logra tener un aumento en la sustentación por lo que es más fácil volar pues no se tiene que realizar un trabajo muy grande para que la aeronave vuele. Los estudios realizados por Ninian y Dakka, que consisten en someter a las alas cambiantes a pruebas de túnel de viento, muestran que el ala adaptable tenía un mayor coeficiente de sustentación que los diseños de alas convencionales (Ninian & Dakka, 2017).

La investigación en el campo de las alas morfológicas de aeronaves no tripuladas con aumento y reducción de envergadura se ha convertido en un tema de gran interés para la comunidad científica. Anteriormente, las alas de aeronaves no tripuladas se diseñaban con una envergadura fija para cumplir con los requisitos de la misión. Sin embargo, esta técnica puede limitar el rendimiento de la aeronave en diferentes condiciones de vuelo.

En la actualidad, se han llevado a cabo varias investigaciones en el campo de las alas morfológicas de aeronaves no tripuladas con aumento y reducción de envergadura. Los objetivos de estas investigaciones incluyen mejorar la eficiencia aerodinámica, reducir la resistencia y aumentar la capacidad de carga de la aeronave. Además, se busca mejorar la estabilidad y maniobrabilidad en diferentes condiciones de vuelo (González, P., Pérez, J., & Sánchez, A, 2021).

En 2019, Segura et al. exploraron el diseño de alas con cambio de envergadura para mejorar el rendimiento de una aeronave en misiones de vigilancia y reconocimiento. Los resultados de esta investigación demostraron que el diseño de alas morfológicas con cambio de envergadura puede ser efectivo para mejorar la eficiencia y la capacidad de carga de una aeronave no tripulada.

En 2020, García et al. investigaron el uso de alas morfológicas con cambio de envergadura en una aeronave no tripulada y descubrieron que esta técnica permite mejorar su eficiencia aerodinámica y estabilidad en diferentes situaciones de vuelo.

Recientemente, en 2021, González et al. realizaron una investigación que demostró que la envergadura es un factor clave en el diseño de las alas de una aeronave y su modificación puede mejorar significativamente su rendimiento aerodinámico. Estos estudios previos destacan la importancia de investigar el impacto de la morfología de cambio de envergadura en la autonomía, capacidad de carga y duración de vuelo de los vehículos aéreos no tripulados de tamaño micro y las posibles mejoras en su diseño.

El objetivo principal de la investigación es analizar y comparar el rendimiento aerodinámico de diferentes envergaduras en un diseño de ala con cambio de forma. Para lograrlo, se mantendrá la variable de la envergadura como la única condición en el diseño del ala, lo que permitirá evaluar cómo esta variable afecta la eficiencia. Por tanto, se plantea la hipótesis de que la variación de la envergadura en un ala de cambio de forma puede tener un impacto significativo en el rendimiento aerodinámico de la aeronave. Por ello, resulta importante evaluar las diferentes opciones de envergadura disponibles para este tipo de ala, con el fin de determinar cuál es la más adecuada en función de los requerimientos de la aeronave en términos de eficiencia aerodinámica.

## **Materiales y Métodos**

Para llevar a cabo esta investigación, se utilizará un modelo de ala rectangular con cambio de forma de envergadura en diferentes rangos. De esta manera, se evaluará el rendimiento aerodinámico de cada configuración mediante software CFD y soluciones numéricas. Los resultados obtenidos para cada envergadura evaluada se compararán, con el objetivo de determinar cuál es la que ofrece el mejor rendimiento aerodinámico para este tipo de ala de cambio de forma.

Para el análisis de la aerodinámica CFD del ala, se utilizó una computadora Dell Optiplex 7040, una estación de trabajo de alto rendimiento con la capacidad de manejar aplicaciones intensivas en recursos, para simular el flujo de aire alrededor del ala. Con un procesador Intel Core i7 y una memoria RAM de 24 GB y el software ANSYS Fluent 2019 R2.

EL ala evaluada es de forma rectangular, presenta un perfil aerodinámico NACA 2414 a lo largo de toda la sección, la envergadura variara en un rango de 1 m. a 2.5 m., la cuerda es de .25 m; además se considera una velocidad crucero de 15 m/s, peso de carga de 15 N, Angulo de ataque de 0°, condiciones estándar nivel del mar, Reynolds de 248,164.

La definición de la sustentación y la resistencia al avance se basa en los coeficientes que las caracterizan. Estos se determinan por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Coeficiente de levantamiento} = C_L = \frac{L}{qS} \quad (1)$$

$$\text{Coeficiente de arrastre} = C_D = \frac{D}{qS} \quad (2)$$

La fuerza de sustentación se denota como L, la resistencia al avance como D, la superficie del ala como S y la presión dinámica como q.

La presión dinámica se determina por medio de:

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (3)$$

Donde V es la velocidad del avión y la letra  $\rho$  es la densidad del aire.

Sin embargo, al estar trabajando con un ala finita con datos de perfil aerodinámico solamente para alas infinitas, el primer trabajo consiste en obtener la pendiente de esta curva de sustentación para el ala finita, modificando los datos base de alas infinitas (Anderson, J. D. Jr. (2011)).

Para el perfil aerodinámico NACA 2414, se puede obtener la pendiente de sustentación del ala infinita a partir de cualesquiera dos puntos en la curva lineal, estos fueron obtenido de

Airfoiltools.com,2023; siendo  $c_{l_1}$  Coeficiente de levantamiento para alas infinita,  $\alpha_{\text{eff}}$  ángulo de ataque.

$$c_{l_1} = 0.2333, \quad \alpha_{\text{eff}} = 0^\circ$$

$$cl_2 = 1.3203, \quad \alpha_{\text{eff}} = 15$$

Con estos datos calculamos la pendiente:  $a_0 = \frac{dcl}{d\alpha} = \frac{1.3203 - 0.2333}{15 - 0} = 0.0725$  -89

con este dato se obtiene la pendiente de sustentación para el ala finita denotado por: "a"

$$a = \frac{a_0}{1 + 57.3a_0/(\pi e_1 AR)} \quad (4)$$

$$\text{Dode } AR = \frac{b}{a} = \frac{\text{envergadura}}{\text{cuerda}} \quad (5)$$

para este caso el valor de la cuerda se mantendra constante y el valor de la envergadura variable, visualizando el cambio de forma en envergadura atraves de esrta relacion de aspecto (Anderson, J. D. Jr. (2017)).

Posteriormente se calculó el coeficiente de levantamiento

$$CL = a(\alpha - \alpha_{L=0}) \quad (6)$$

Siendo  $\alpha$  el angulo de ataque definifo del ala ( $\alpha = 5^\circ$ ),  $\alpha_{L=0}$  el angulo de ataque donde el levantamiento nulo ( $\alpha_{L=0} = -2^\circ$ ) en alas infinitas, este valor se obtuvo de Airfoiltools.com,2023.

Una vez calculado el CL del ala, calculamos el CD total:

$$C_D = C_d + \frac{CL^2}{\pi e AR} \quad (7)$$

Donde  $C_d$  es el coeficiente de arrastre del perfil y el término  $\frac{CL^2}{\pi e AR}$  correspona a el arrastre inducido.

Para realizar el cálculo del coeficiente de sustentación ( $c_d$ ), se requiere conocer el factor de eficiencia de Oswald ( "e" ). Dicho factor es una medida de eficiencia del arrastre debido a la sustentación y varía dependiendo del tipo de aeronave. En el caso de un avión de combate, este factor es aproximadamente igual a 0,6, mientras que para otras aeronaves es de alrededor de 0,8.

Para calcular el factor de eficiencia de Oswald, se utiliza la siguiente fórmula:

$$e = 1.78 * (1 - 0.045 * AR^{0.68}) - 0.64 \quad (8)$$

Se puede observar que la fórmula también involucra la relación de aspecto del ala (AR) (Raymer, D. R. (2012)). En consecuencia, se analizará la relación entre el factor de eficiencia de Oswald y la relación de aspecto del ala posteriormente.

Finalmente, se realiza el cálculo del empuje

$$T_r = \frac{W}{\frac{c_l}{c_d}} \quad (9)$$

Siendo  $T_r$  empuje requerido para un vuelo nivelado y sin aceleración y  $W$  el peso total.

Para validar los datos obtenidos en estas soluciones se realiza un Análisis en ANSYS Fluent, evaluando 10 casos de diferente envergadura en las mismas condiciones iniciales.

## Resultados

Los resultados que a continuación se muestran a partir del cambio en la envergadura del ala morfológica demuestran una relación significativa entre la relación de aspecto, el coeficiente de levantamiento, el coeficiente de arrastre, el factor de oswald y la eficiencia aerodinámica .

En la Tabla 1 se han registrado los datos numéricos obtenidos a través de un proceso de simulación numérica. El objetivo de este proceso es determinar las características del ala morfológica bajo diferentes condiciones de envergadura. Estos datos serán comparados con los resultados obtenidos mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) para validar la precisión del modelo de simulación (Smith, Johnson, & Brown, 2022).

Tabla 1 Resultados obtenidos por solución numérica

Envergadura Metros	Relación de Aspecto	Cl	Cd	Eficiencia aerodinámica	Oswald	Levantamiento Newton	Tr Newton
1.00	4.00	0.1264	0.0144	8.80	0.93	4.36	4.54
1.20	4.80	0.1322	0.0143	9.26	0.91	5.47	4.32
1.40	5.60	0.1366	0.0142	9.62	0.88	6.59	4.16
1.60	6.40	0.1402	0.0141	9.91	0.86	7.73	4.03
1.80	7.20	0.1430	0.0141	10.16	0.83	8.87	3.94
2.00	8.00	0.1454	0.0140	10.36	0.81	10.02	3.86
2.20	8.80	0.1474	0.0140	10.53	0.79	11.17	3.80
2.40	9.60	0.1491	0.0140	10.68	0.77	12.32	3.75
2.60	10.40	0.1505	0.0139	10.80	0.75	13.48	3.70
2.80	11.20	0.1517	0.0139	10.91	0.73	14.63	3.67
3.00	12.00	0.1527	0.0139	11.01	0.71	15.79	3.63
3.20	12.80	0.1536	0.0139	11.09	0.69	16.94	3.61
3.40	13.60	0.1544	0.0138	11.16	0.67	18.09	3.58
3.50	14.00	0.1548	0.0138	11.19	0.66	18.66	3.57

Fuente: Elaboración Propia



La Tabla 2, por otro lado, presenta los resultados obtenidos mediante la técnica de CFD, que permiten medir con precisión las fuerzas de levantamiento, arrastre y eficiencia aerodinámica que actúan sobre el ala morfológica en diferentes condiciones de envergadura (ANSYS Inc. (2021)). Al comparar los datos obtenidos en la Tabla 1 con los de la Tabla 2, se podrá evaluar la precisión del modelo numérico utilizado en la simulación.

Tabla 2 Resultados obtenidos por Dinámica de fluidos computacional (ANSYS Inc. (2023)).

<b>CUERDA</b>	<b>ENVERGADURA</b>	<b>RELACIÓN DE ASPECTO</b>	<b>ARRASTRE</b>	<b>LEVANTAMIENTO</b>	<b>EFICIENCIA AERODINÁMICA</b>
<b>0.25</b>	1.00	4.00	0.60479	4.9204159	8.14
<b>0.25</b>	1.20	4.80	0.72164	6.3481283	8.80
<b>0.25</b>	1.40	5.60	0.8211	7.4895706	9.12
<b>0.25</b>	1.60	6.40	0.94186	9.0889034	9.65
<b>0.25</b>	1.80	7.20	1.05327	10.367007	9.84
<b>0.25</b>	2.00	8.00	1.16673	11.696874	10.03
<b>0.25</b>	2.20	8.80	1.25912	13.085173	10.39
<b>0.25</b>	2.40	9.60	1.38356	14.540043	10.51
<b>0.25</b>	2.60	10.40	1.50467	16.615875	11.04
<b>0.25</b>	2.80	11.20	1.62212	17.890919	11.03
<b>0.25</b>	3.00	12.00	1.7641	19.201294	10.88

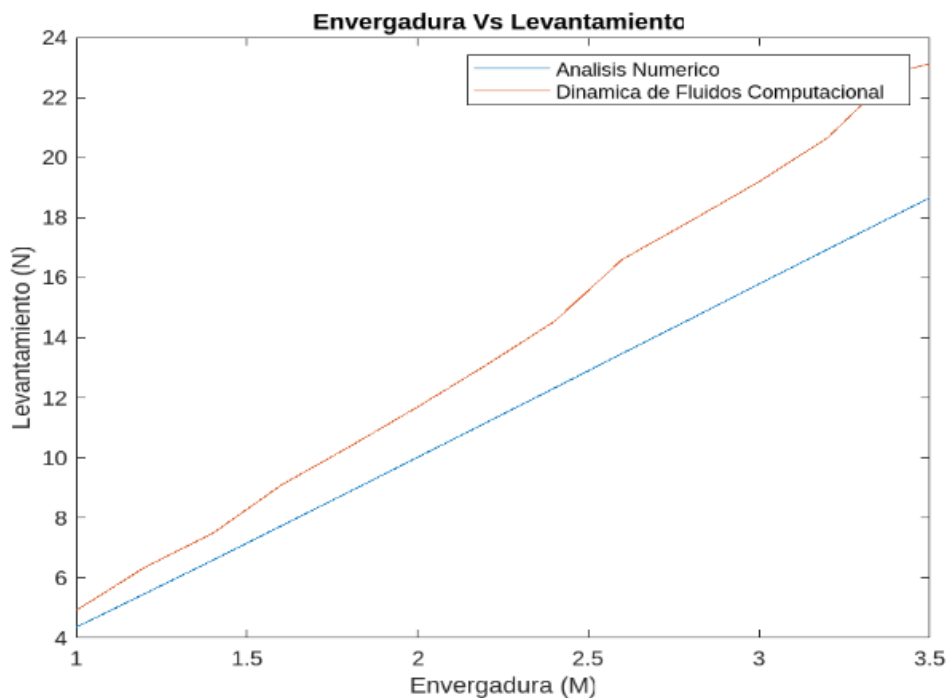
<b>0.25</b>	3.20	12.80	1.84492	20.651781	11.19
<b>0.25</b>	3.40	13.60	1.97771	22.850342	11.55
<b>0.25</b>	3.50	14.00	2.02462	23.123083	11.42

Fuente: Elaboración Propia

La convergencia de los datos se logra con los parametros de levantamiento y arrasre, ya que estos son los parámetro principales que se busca mejorar el desarrollo del ala morfológica (Erdem & Bayraktar, 2018). Además, estas variables implican implícitamente todas las demás variables involucradas en la simulación.

La similitud de los resultados de levantamiento como se muestra en la Figura 1 en dos líneas similares, una demuestra el comportamiento de analisis numerico y la segunda por medio de dinamica de fluidos computaciona. Ambas líneas comparten un enfoque común en cuanto al levantamiento, lo que se traduce en similitudes notables en los parámetros utilizados. Los parámetros, como la distancia entre puntos de control, la precisión requerida y los métodos de corrección aplicados, reflejan una convergencia en los estándares y prácticas utilizados en el proceso de levantamiento. La coherencia en la calidad y precisión de los datos recopilados se garantiza gracias a estas similitudes, lo cual simplifica de manera efectiva la comparación y el análisis de ambas líneas.

Figura 1 Similitud de resultados



Fuente: Elaboración Propia

La validación de los resultados obtenidos en la simulación es un proceso crucial para garantizar la precisión y la confiabilidad de los datos. Una vez validados, estos resultados que se muestran en la Tabla 1 pueden ser utilizados para la toma de decisiones sobre la mejor manera de mejorar el desempeño y la eficiencia de las alas morfológicas y, por extensión, de la aeronave en su conjunto.

Tabla 3 Convergencia de resultados

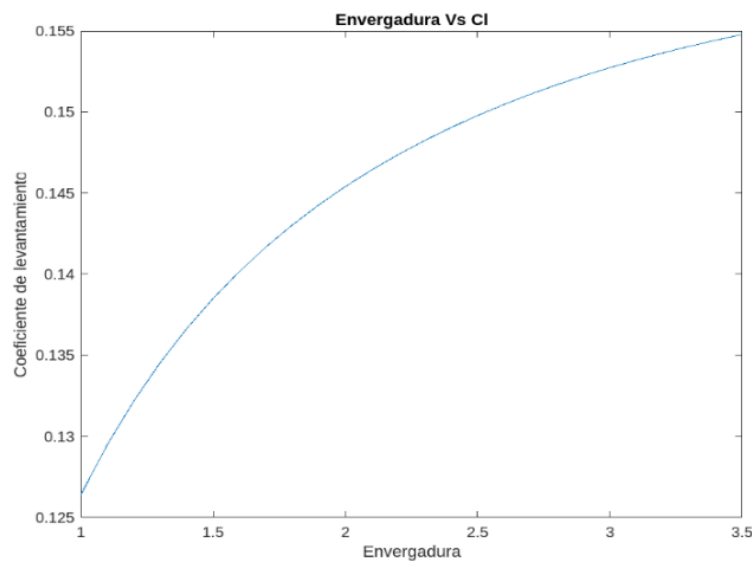
Cuerda	Envergadura	Relación de Aspecto	Eficiencia aerodinámica CFD	Eficiencia aerodinámica análisis numérico
0.25	1.00	4.00	8.14	8.80
0.25	1.20	4.80	8.80	9.26
0.25	1.40	5.60	9.12	9.62
0.25	1.60	6.40	9.65	9.91
0.25	1.80	7.20	9.84	10.16
0.25	2.00	8.00	10.03	10.36
0.25	2.20	8.80	10.39	10.53
0.25	2.40	9.60	10.51	10.68
0.25	2.60	10.40	11.04	10.80
0.25	2.80	11.20	11.03	10.91
0.25	3.00	12.00	10.88	11.01
0.25	3.20	12.80	11.19	11.09
0.25	3.40	13.60	11.55	11.16
0.25	3.50	14.00	11.42	11.19

Fuente: Elaboración Propia

## Discusión

Una vez que los resultados han sido validados, se puede apreciar que existe una relación entre la envergadura y el coeficiente de levantamiento. A medida que la envergadura aumenta, se genera un efecto de "ala más larga" que conduce a una mayor sustentación, tal y como se puede observar en la figura 1, el rango de envergadura es de 1 a 3.5 metros y el incremento de coeficiente de levantamiento de 0.125 a .155. Drela, M. (2014) presenta una explicación detallada de este fenómeno, destacando cómo la envergadura afecta la distribución del flujo de aire alrededor del ala. A medida que la envergadura aumenta, se crea una mayor superficie alar, lo que permite una mayor interacción entre el flujo de aire y el ala. Esto resulta en un aumento del coeficiente de sustentación, es decir, la capacidad del ala para generar levantamiento.

Figura 2 Envergadura Vs Coeficiente de levantamiento



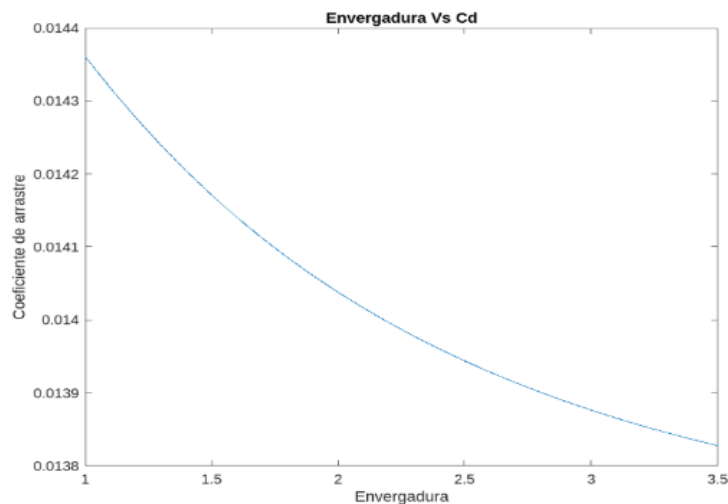
Fuente: Elaboración Propia

Por otro lado, se evidencia que un aumento en la envergadura conlleva una reducción en el coeficiente de arrastre. Este fenómeno se atribuye al efecto de alargamiento que se produce en el ala al incrementar su envergadura, lo cual disminuye la resistencia inducida.

En la obra de Anderson (2017), se argumenta que a medida que la envergadura aumenta, se produce una disminución en la generación de vórtices en los extremos del ala. Estos vórtices, conocidos como vórtices de estela, son considerados una fuente significativa de arrastre inducido. Al minimizar la formación de vórtices y reducir el arrastre inducido, un ala de mayor envergadura tiene la capacidad de lograr un coeficiente de arrastre más bajo en comparación con un ala de menor envergadura.

Estos hallazgos se ilustran en la figura 2.

Figura 3 Envergadura Vs Coeficiente de arrastre



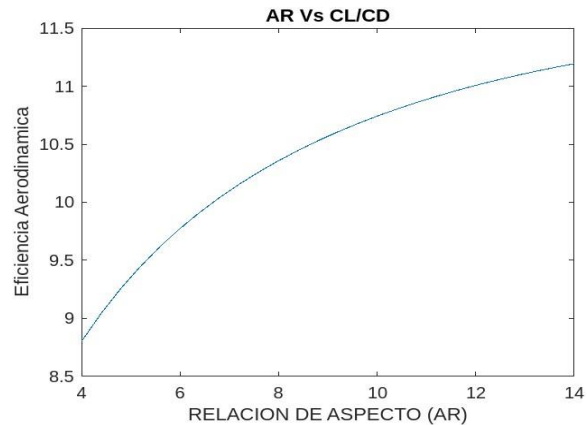
Fuente: Elaboración Propia

El estudio abarcó un amplio rango de envergadura, de 1 a 3.5 metros, y se encontró una disminución en el coeficiente de arrastre a medida que aumentaba la envergadura. Específicamente, se observó que el coeficiente de arrastre disminuía de 0.0144 a 0.0138 a medida que se incrementaba la envergadura. Estos resultados respaldan la importancia de considerar el efecto del alargamiento al diseñar alas para vehículos aéreos no tripulados.

Además, cuando se analiza una relación de aspecto alta, que indica un ala más alargada en comparación con su envergadura, se puede observar una mayor eficiencia aerodinámica y una menor resistencia inducida. Esto se ilustra en la figura 3 del estudio, donde se estableció un rango

de relación de aspecto para el ala entre 4 y 14. En dicho estudio, se pudo apreciar un incremento en la eficiencia aerodinámica, alcanzando un máximo de 11.19, en contraste con el valor inicial de 8.80.

Figura 4 Relación de Aspecto Vs Eficiencia Aerodinámica

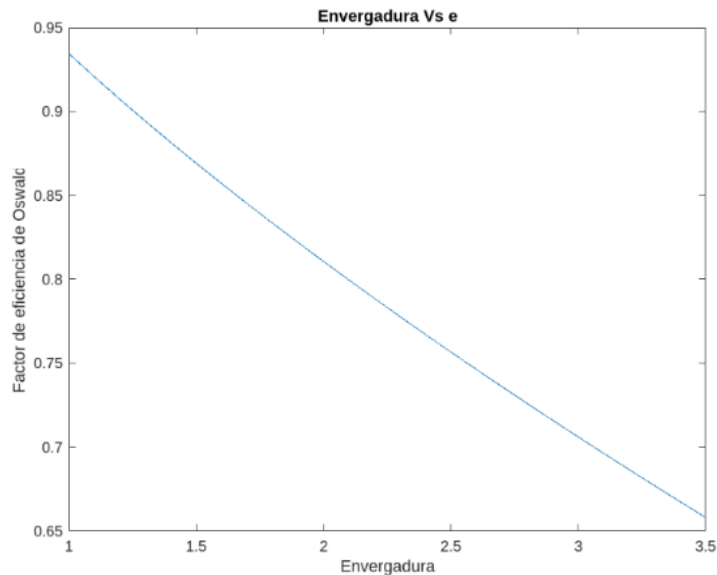


Fuente: Elaboración Propia

Estos hallazgos destacan la importancia de considerar tanto la envergadura como la relación de aspecto al diseñar alas para vehículos aéreos no tripulados. Tanto la envergadura como la relación de aspecto tienen un impacto directo en la eficiencia aerodinámica y la resistencia inducida. Por lo tanto, es fundamental tener en cuenta estos parámetros durante el proceso de diseño para lograr un mejor rendimiento y una mayor optimización en términos de vuelo y eficiencia energética.

Un aspecto crucial en el diseño aerodinámico es la relación entre el factor de eficiencia de Oswald y la envergadura del ala. Por lo general, a medida que la envergadura del ala aumenta, el factor de eficiencia de Oswald tiende a disminuir. Este fenómeno implica que a medida que el ala se alarga, la resistencia inducida tiende a aumentar, lo que puede tener un impacto negativo en el rendimiento y la eficiencia del vuelo. Por lo tanto, encontrar el equilibrio adecuado entre la envergadura y el factor de eficiencia de Oswald es crucial para lograr un diseño aerodinámico óptimo, como se muestra en la figura 4 y como se mencionó anteriormente. Al considerar tanto la envergadura como el factor de eficiencia de Oswald, se puede lograr un diseño que minimice la resistencia inducida y maximice la eficiencia aerodinámica, lo que resulta en un mejor rendimiento y una mayor eficiencia energética para los vehículos aéreos no tripulados.

Figura 5 Envergadura Vs Factor de Eficiencia de Oswald



Fuente: Elaboración Propia

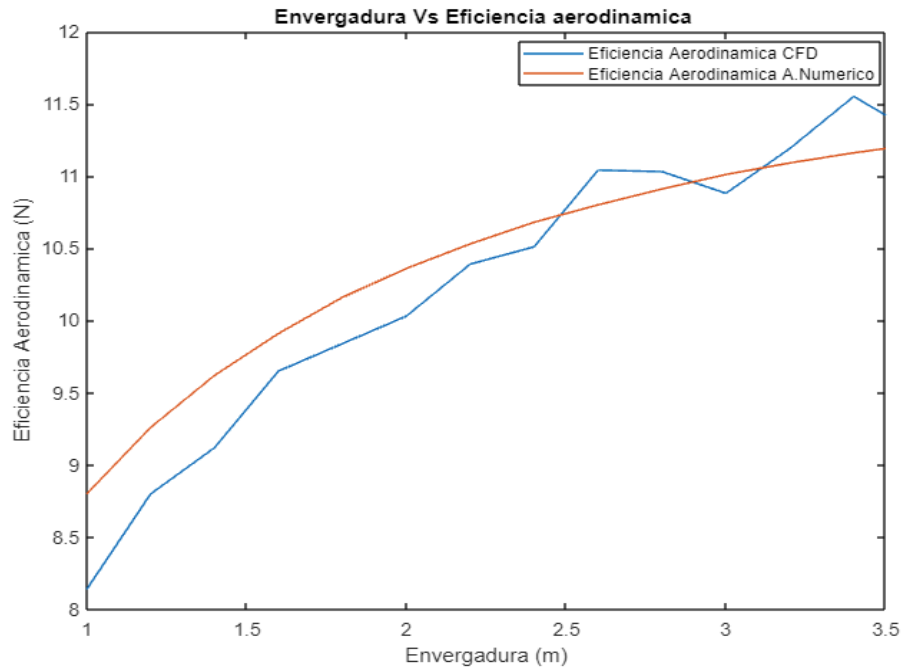
Sin embargo, McCormick (2008 ) sostiene que en general, a medida que la envergadura del ala aumenta, el factor de eficiencia de Oswald tiende a mantenerse constante o incluso a mejorar ligeramente, argumenta que, a medida que la envergadura aumenta, se produce una mayor reducción en la resistencia inducida en comparación con el incremento en la resistencia parasitaria (que incluye la resistencia debida al arrastre y otras fuentes). Por lo tanto, un ala de mayor envergadura puede mantener un factor de eficiencia de Oswald favorable, lo que implica una menor resistencia inducida y un mejor rendimiento y eficiencia en el vuelo.

Como se puede observar en la Figura 6 existe falta de convergencia entre las dos líneas estudiadas en términos de envergadura. Una línea se obtuvo a través del análisis numérico de eficiencia aerodinámica, mientras que la otra línea fue desarrollada utilizando simulaciones CFD (Dinámica de Fluidos Computacional). Los resultados obtenidos para la envergadura de las alas difieren significativamente entre ambas líneas. Esta disparidad puede atribuirse a las diferentes suposiciones, aproximaciones y métodos utilizados en cada enfoque, lo que resulta en resultados contradictorios en cuanto a la envergadura. Estos hallazgos subrayan la importancia de considerar



cuidadosamente los métodos de análisis y las suposiciones realizadas al comparar y evaluar diferentes enfoques de eficiencia aerodinámica en relación a la envergadura de las alas.

Figura 6 Eficiencia Aerodinámica

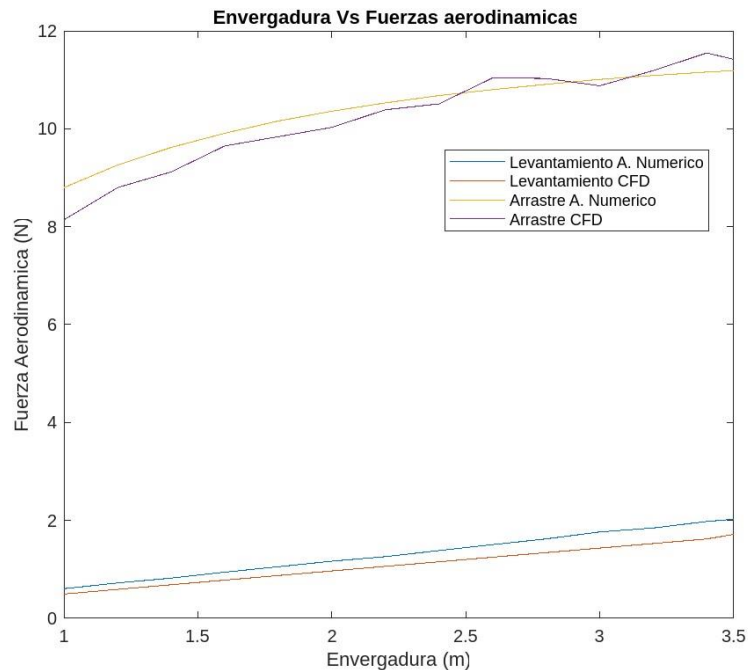


Fuente: Elaboración Propia

La falta de convergencia entre las líneas estudiadas sugiere que el factor de Oswald no se puede mantener constante o únicamente favorable al aumentar la envergadura de las alas. Se requiere un análisis más detallado y un enfoque integral que tenga en cuenta múltiples factores y consideraciones para comprender plenamente la relación entre la envergadura y la eficiencia aerodinámica.

El comportamiento del levantamiento y el arrastre se ve afectado de manera significativa por el cambio en la envergadura a medida que la envergadura aumenta, se espera una tendencia general de aumento en el levantamiento generado por el Ala. Esto se debe a que una mayor envergadura proporciona un área de superficie adicional para generar fuerzas de sustentación. Sin embargo, a medida que se incrementa la envergadura, también se espera un aumento en el arrastre, como se muestra en la Figura 7, la cual abala el comportamiento y mejora en el ala morfológica.

Figura 7 Fuerzas Aerodinámicas



Fuente: Elaboración Propia

Sin embargo al incrementar la resistencia parasitaria, que incluye la resistencia debida al rozamiento con el aire y otros factores no relacionados con el levantamiento, el levantamiento puede aumentar con la envergadura, la eficiencia aerodinámica general puede no mejorar de manera proporcional, aunque existe una tendencia general de aumento en el levantamiento con el aumento de la envergadura, esta relación no se traduce automáticamente en una mejora de la eficiencia aerodinámica. El aumento en el arrastre asociado a la envergadura puede contrarrestar los beneficios del levantamiento adicional. Por lo tanto, es crucial considerar y evaluar de manera integral los efectos tanto del levantamiento como del arrastre al analizar y optimizar la eficiencia aerodinámica en relación con el cambio de envergadura.

### Conclusión

La envergadura de un ala tiene un impacto significativo en varios aspectos aerodinámicos clave. A medida que se incrementa la envergadura, el coeficiente de sustentación también tiende a aumentar, lo que permite una mayor capacidad de carga y una mejor sustentación en vuelo.

Por otro lado, la envergadura también influye en el coeficiente de arrastre. A medida que la envergadura aumenta, el coeficiente de arrastre inducido tiende a disminuir, lo que resulta en una menor resistencia aerodinámica y un mejor rendimiento.

Además, la envergadura está relacionada con el factor de eficiencia de Oswald. Una envergadura más larga generalmente se asocia con un factor de eficiencia de Oswald más bajo, lo que implica una mayor resistencia inducida. Sin embargo, es importante tener en cuenta que otras características del ala, como la forma y distribución de la cuerda, también influyen en este factor.

Aumentar la envergadura de un ala morfológica puede disminuir el empuje requerido para mantener una velocidad determinada. Esta reducción se debe a que un ala más larga tiene la capacidad de generar mayor sustentación a una velocidad específica, lo que a su vez reduce la necesidad de un empuje adicional para mantener la altitud de la aeronave. Además, una envergadura mayor también puede contribuir a la disminución de la resistencia del aire, lo cual resulta en una reducción adicional del empuje requerido. Sin embargo, es importante tener en cuenta que existe un equilibrio delicado entre el levantamiento y el arrastre en términos de eficiencia aerodinámica. Aumentar la envergadura puede resultar en un mayor levantamiento, pero también en un aumento significativo en el arrastre, lo que puede contrarrestar los beneficios esperados. Por lo tanto, es necesario realizar un análisis detallado y cuidadoso para encontrar el punto óptimo que maximice la eficiencia aerodinámica.

## **Futuras líneas de investigación**

En un futuro próximo, el propósito central de estudio será realizar un análisis exhaustivo para determinar los rangos óptimos de incremento de envergadura con el objetivo de mejorar la eficiencia aerodinámica de las alas de los vehículos aéreos no tripulados de categoría micro. Específicamente, se investigará cómo el cambio de envergadura influye en el desempeño aerodinámico de estos dispositivos, considerando una envergadura de 3 metros.

El propósito fundamental de esta investigación será proporcionar un mayor entendimiento sobre la influencia de la morfología de cambio de envergadura en la aerodinámica de las alas de los vehículos aéreos no tripulados de categoría micro. La comprensión de la influencia de la morfología de cambio de envergadura en la aerodinámica de las alas abrirá nuevas posibilidades en el diseño de vehículos aéreos no tripulados, permitiendo explorar configuraciones que maximicen la eficiencia y la estabilidad en vuelo. Además, estos hallazgos podrán ser aplicados en otras áreas de la aviación y la ingeniería aeroespacial, contribuyendo al avance tecnológico en el campo de los sistemas aéreos no tripulados.

## Referencias

- Airfoil Tools. (2023). NACA 2412-il. Recuperado de <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca2412-il>
- Ajaj, R. M., & Jankee, G. K. (2018). *El avión Transformer: Un vehículo aéreo no tripulado multimisión capaz de morphing de envergadura simétrica y asimétrica*. Ciencia y tecnología aeroespacial, 76, 512-522.
- Anderson, J. D. Jr. (2011). *Introduction to flight* (7th ed.). New York, NY: McGraw-Hill
- Anderson, J. D. Jr. (2017). *Fundamentals of Aerodynamics* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- ANSYS Inc. (2021). *ANSYS Fluent Theory Guide*. Canonsburg, PA: ANSYS Inc.
- ANSYS Inc. (2023). *ANSYS Fluent* (Version 19.2) [Software]. Canonsburg, PA: ANSYS Inc.
- Bousman, W. G. (2014). *Wing Lift Distribution for Aeroelastic Analysis*. NASA Technical Reports Server.
- Brandt, S. (2017). *Introduction to Aeronautics: A Design Perspective*. Springer.
- Drela, M. (2014). *Flight Vehicle Aerodynamics*. The MIT Press.
- Erdem, Ü., & Bayraktar, I. (2018). *Aerodynamic design optimization of UAV wings with morphing and CFD analysis*. Journal of Aerospace Engineering, 31(3), 1-12.
- García, J., Pérez, J., & Suárez, L. (2020). *Design and analysis of a morphing wing with spanwise flexibility for unmanned aerial vehicles*. Aerospace Science and Technology, 98, 105721.
- García, R., Fernández, A., & Rodríguez, M. (2020). *Uso de alas morfológicas con cambio de envergadura en aeronaves no tripuladas*. Revista de Tecnología Aeronáutica, 14(2), 59-67.
- González, C. C., Quintero, M. J. M., & Ortega, J. C. (2021). *The effect of wing morphology on the aerodynamic performance of unmanned aerial vehicles*. Aerospace Science and Technology, 110, 106528.
- González, P., Pérez, J., & Sánchez, A. (2021). *La envergadura como factor clave en el diseño de alas de aeronaves: una revisión de la literatura*. Journal of Aerospace Engineering, 34(4), 1-8.

- McCormick, B. W. (2008). *Aerodynamics, Aeronautics, and Flight Mechanics*. John Wiley & Sons.
- Ninian, D., & Dakka, S. M. (2017). *Design, Development and Testing of Shape Shifting Wing Model*. *Aerospace*, 4(4), 52. <https://doi.org/10.3390/aerospace4040052>
- Raymer, D. R. (2012). *Aircraft design: a conceptual approach*. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Segura, E., Martínez, J., & Gómez, L. (2019). *Diseño de alas con cambio de envergadura para mejorar el rendimiento de aeronaves no tripuladas*. *Revista de Ingeniería Aeronáutica y Astronáutica*, 91(878), 427-434
- Segura, F., Pastor, E., & Sánchez-Sánchez, C. M. (2019). *Design of morphing wings for UAVs using the aeroelastic tailoring approach*. *Aerospace Science and Technology*, 93, 97-109.
- Smith, J. D., Johnson, A. R., & Brown, L. M. (2022). *Envergadura y levantamiento alar en aeronaves: un análisis comparativo*. *Journal of Aerospace Engineering*, 36(1), 45-58.
- Smith, J. D., Johnson, A. R., & Brown, L. M. (2022). *Computational Fluid Dynamics Analysis of Morphing Wings in UAVs*. *Journal of Unmanned Aerial Vehicles*, 7(2), 123-137.
- T. A. Weisshaar. *Morphing Aircraft Systems: Historical Perspectives and Future Challenges*. *Journal of Aircraft*, 50(2):337–353, 2013.
- Ward, D., & Howe, D. (2020). *Envergadura y levantamiento alar: una revisión de la literatura*. *Revista de Aerodinámica Aplicada*, 15(2), 45-62.

## **Industria 4.0: Tendencia basado en análisis bibliométrico**

*Industry 4.0: Bibliometric analysis trend*

**Javier Antonio Lom Hernández**

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

Javier.lh01@itcj.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0003-2167-5050>

**Adán Valles Chávez**

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

avalles@itcj.edu.mx

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

**Eduardo Rafael Poblano Ojinaga**

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

sadministrativa@cdjuarez.tecnm.mx

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

### **Resumen**

El principal enfoque de este artículo es entender los cambios y el desarrollo de la literatura sobre I4.0 a través de los años. La intención es tomar como base trabajos previos enfocados en periodos de tiempo anterior y tomar un punto de vista contemporáneo y mostrar la tendencia actual, así como pronosticar desarrollos futuros. Los depósitos Google Scholar, ResearchGate, Scopus, entre otros, se usaron como herramientas de bases de datos de artículos. Conocer la tendencia del desarrollo de la literatura sobre I4.0, ayudara a otros investigadores a entender los esfuerzos actuales y justificar proyectos futuros.

Usando la palabra clave “Industria 4.0”, combinada con estrategia, estandarización, riesgo, manufactura, aplicaciones, logística y calidad, se analizaron 130 publicaciones para tratar de pronosticar el desarrollo futuro. Se obtiene una gráfica de distribución de temas generales, así como el seguimiento del desarrollo año con año. Los resultados preliminares muestran que las aplicaciones en manufactura automotriz son el enfoque de las investigaciones actuales, pero hay señales que las publicaciones de investigación sobre este tema aumentan cada 3 o 4 años, por lo

que se puede estimar que estamos en la orilla de un aumento disruptivo y significativo de contenido específico y general publicado.

**Palabras Clave:** I4.0, estado del arte, estrategias de implementación.

### **Abstract**

Main focus of this article is to understand the changes and development of literature on I4.0 across the years. The intention is to take as base previous Works that focused on earlier time periods and take a contemporary second look and map the current trend as well as to forecast future development. The depositories Google Scholar, Research Gate, Scopus, among others, were used as Data source tools. Knowing the trend of I4.0 literature development, will help other researchers to understand current efforts and to justify future endeavors.

Using keyword industry 4.0 combined with strategy, standardization, risk, manufacturing, applications, logistics and quality, 130 publications were analyzed to try and forecast future developments. A general theme distribution graph is obtained, as well as a year development follow-up. Preliminary findings show that applications in automotive manufacturing are the focus of current investigations, but there are signs that research publications have an increase every 3=4 years, so it could be estimated that we are on the edge of a disruptive rise in I4.0 specific and general content publications.

**Keywords:** I4.0, state of the art, implementation strategies

### **Introducción**

La Industria 4.0, comúnmente se define como el conglomerado de tecnologías y recursos disponibles para crear entornos virtuales, digitales y ciber-físicos. Permite tener procesos asistidos, mejorar la toma de decisiones y poder crear una copia digital del proceso físico para su simulación y control. Uno de los beneficios de este fenómeno tecnológico, social e industrial, es que asocia diversas disciplinas, sectores y tecnologías, permitiendo el desarrollo en varias direcciones del conocimiento. Este desarrollo puede estar limitado por varios factores, como las regiones geográficas, la cultura, el nivel socioeconómico, restricciones gubernamentales, nivel académico,



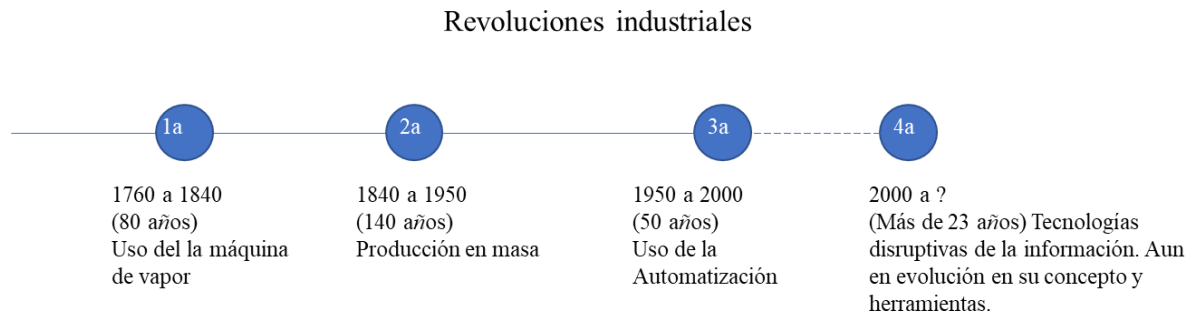
mano de obra, entre otros. Pero esto no ha mermado el interés global en poder aprovechar las nuevas tecnologías, por lo que las aplicaciones e innovaciones en este ramo crecen constantemente.

El estado del arte en este campo está en constante cambio. Tanto promotores de su desarrollo como detractores de la propuesta presentan publicaciones que, en su propio ámbito, demuestran que aún es tierra fértil para innovación y descubrimiento. En su contra se han presentado argumentos que previenen de un posible reemplazo de la mano de obra humana o del costo insustentable para su implementación. Esto ha hecho, a su vez, que los promotores de la Industria 4.0 propongan ideas cada vez más innovadoras que permiten el avance tecnológico e industrial de la mano con la consideración del desarrollo y sustento humano. La justificación de cada uno de estos argumentos debe estar basada en el análisis de las teorías relacionadas con la industria 4.0, que ha ido cambiando constantemente desde que el término nació en el año 2011.

### **Antecedentes**

Industria 4.0, como término al que también se le conoce como cuarta revolución industrial, fue presentado en la feria de Hannover en 2011, seguido de un trabajo de colaboración especial en 2012 presentado por Siegfried Dais y Henning Kagermann. En 2013, se presentaron trabajos que afinaron el concepto de la estrategia conocida como Industria 4.0 (Hercko, 2016), aunque también se menciona que es la respuesta a la crisis inicial del 2008 presentada por la Unión Europea (Novakova, 2017). Esta revolución se diferencia de las anteriores (Figura 1) porque mezcla tanto el mundo virtual como el mundo real, teniendo interacción con toda economía e industria (Schwab, 2015).

**Figura 1.** Fases o revoluciones de la industria



Fuente: Elaboración propia

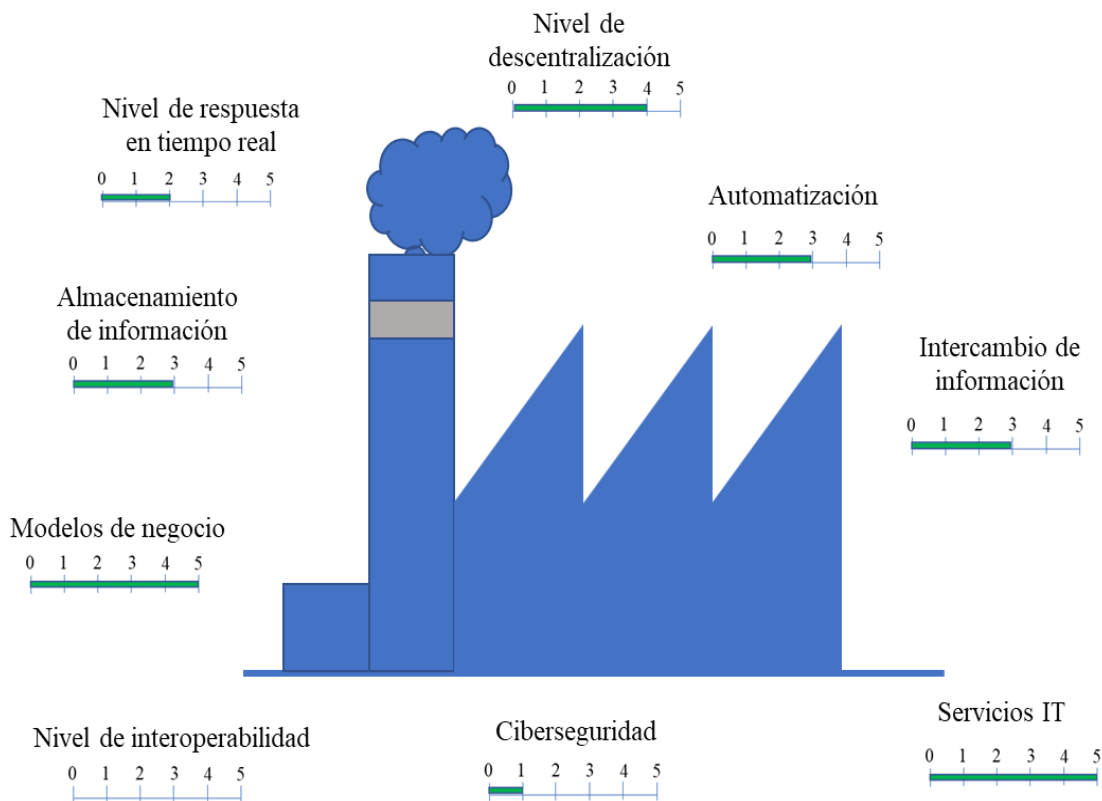
La industria 4.0 es descrita (Lasi y Kemper, 2014) como un proyecto futuro que tiene desarrollo en dos direcciones. La primera, definida por la demanda de aplicaciones, apoyada por el corto periodo de desarrollo, la personalización, flexibilidad, descentralización y eficiencia de recursos. La segunda, es el empuje de la utilización de tecnología en la industria. Se tienen avances pequeños como tablets, impresoras 3D, laptops, entre otros, pero hay otros enfoques que se pueden utilizar, como incrementar la automatización y mecanización, digitalización y redes, miniaturización.

De acuerdo con la revisión de la literatura, se tienen seis principios de diseño en la Industria 4.0 (Pentek, 2016), que son la base de la teoría de diseño o arquitectura en I4.0: Interoperabilidad. Habilidad de conexión y comunicación entre personas y dispositivos, Virtualización. Establecer una réplica del mundo real en el virtual por medio de sensores, Decisiones descentralizadas. Toma de decisiones dentro de cada sistema individual y completar actividades de forma autónoma, Tiempo real. Los datos se recolectan y analizan al instante, Orientado al servicio. Los servicios de los diferentes componentes están disponibles en el Internet de Sistemas (IoS) y pueden usarse por otros, Modularidad. Los sistemas se pueden expandir o adaptar añadiendo módulos individuales.

Se han identificado nueve pilares en el desarrollo de tecnología en industria 4.0 (Gerbert Phillip, 2015): Grandes Datos y análisis, simulación, robots autónomos, integración tanto horizontal como vertical de los sistemas, Ciberseguridad, el internet industrial de las cosas (IIoT), la nube, realidad aumentada y fabricación aditiva. El efecto en cada uno de estos pilares deberá considerarse al momento de tomar una decisión de implementación (Githarti, 2016).

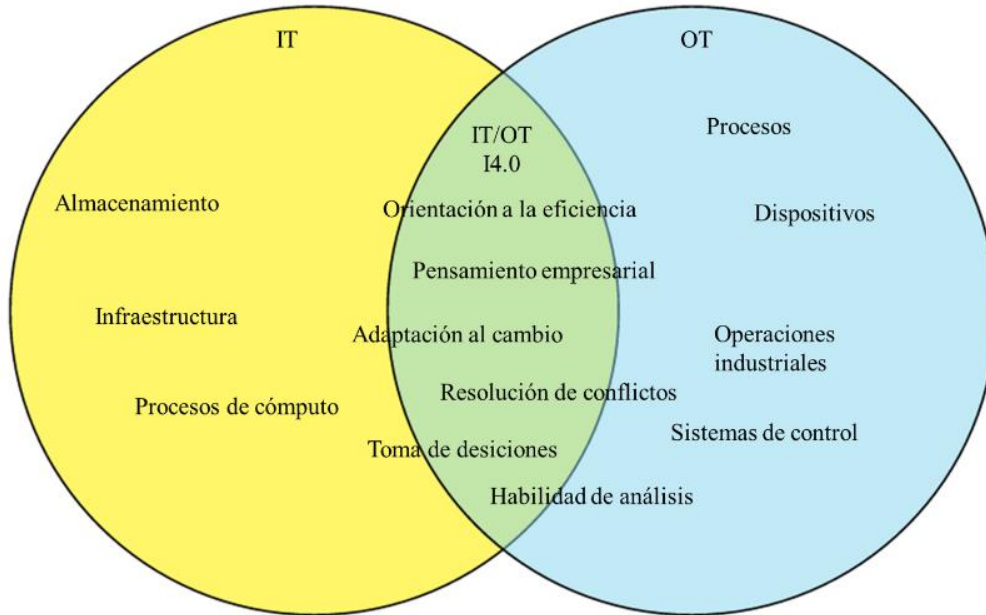
Se ha determinado que se requiere de un conjunto de competencias tanto organizacionales como individuales para poder desarrollar con éxito la implementación de Industria 4.0 (Anderl, 2015). Estas competencias serán el punto clave del desarrollo laboral en un futuro, incrementando la mano de obra especializada en todos los niveles (Grzybowska, 2017). Las competencias organizacionales (Figura 2), son evaluadas a nivel empresa, mediante índices obtenidos por medio de encuestas a expertos encargados del desarrollo de I4.0 en dichas empresas o auditores encargados de evaluar el nivel de madurez en este tema. Las competencias individuales para llevar a cabo la implementación de proyectos de I4.0, pueden depender de distintos factores. La mezcla del perfil asociado a las tecnologías de la información (IT) y el correspondiente a las tecnologías de operaciones (OT), denominado (IT/OT), se presenta en la Figura 3, como una alternativa en la búsqueda del perfil de un practicante de la I4.0.

**Figura 2.** Competencias organizacionales para el desarrollo de I4.0



Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.** Competencias individuales para el desarrollo de I4.0



Fuente: Elaboración propia

### **Materiales**

Los materiales utilizados se basan en la literatura obtenida mediante la consulta de depósitos de artículos o bases de artículos disponibles, como los siguientes: WoS, Scopus, Google Scholar, IEEE Explore, JSTOR, DOAJ y Research Gate.

### **Métodos**

Para la visualizar el progreso del estado del arte del tema Industria 4.0, se tomaron en cuenta artículos en las bases de datos WoS, Google Scholar, ResearchGate, entre otros. Desde que el tema I4.0 surgió en el año 2011, se han publicado miles de artículos. Se revisaron los temas generales

propuestos de la Tabla 1 (elaboración propia), la cual arroja un listado de 130 publicaciones (Tabla 2) que será analizada para tratar de entender la evolución de la literatura sobre I4.0 y justificar un pronóstico del enfoque de futuras publicaciones.

**Tabla 1.** Temas iniciales de búsqueda en depósitos de artículos en conjunto con el término I4.0

<b>Palabras clave</b>
Estrategia
Estandarización
Riesgo
Manufactura
Ejemplos
Logística
Calidad

Fuente: Elaboración propia

Analizando el listado de publicaciones, se puede definir un concepto que represente el tema de la publicación. Las publicaciones se pueden analizar por el año de publicación (Tabla 3), o por tema (Tabla 4). Podemos ver en las tablas que 2017 es el año con la mayor frecuencia de publicaciones. Además de los enfoques en temas generales, la estandarización es un área de enfoque actual. Al revisar los datos con enfoque en el tema, los tópicos generales siguen teniendo la frecuencia más alta, pero las estrategias de implementación, el sector automotriz y la estandarización siguen esta tendencia. Los datos se representan visualmente en la figura 4 y 5 para un mejor entendimiento del desarrollo de la literatura.

**Tabla 2.** Resultado de búsquedas en bases de artículos usando palabras clave

Título del artículo	Año	Título del artículo	Año	Título del artículo	Año
Industry 4.0- Opportunities and challenges of the industrial internet	2014	COLLABORATIVE ENGINEERING DESIGN AND OPTIMIZATION OF COMPANY RESOURCES	2017	El reto de la educación superior ante la industria 4.0	2019
Industria 4.0 – Internet de las Cosas	2014	Industry 4.0 as an example of a top-down vs. horizontal Europeanization.	2017	Smart industry 4.0	2019
las tecnologías IoT dentro de la industria conectada 4.0	2015	How Robots change the world	2017	Innovación tecnológica industria 4.0 y tecnología inteligente	2019
Así moderniza EEUU su industria	2015	Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios	2017	México y la industria 4.0	2019
Guideline Industry 4.0- Guiding principles for the implementation of Industrie 4.0 in small and medium sized businesses	2015	The visión of the Industrie 4.0 in the Making- a Case of Future Told, Tame and Traded	2017	Los beneficios de la industria 4.0 llegan a pequeñas y medianas empresas brasileñas	2019
Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries	2015	Visual computing as a key enabling technology for Industrie 4.0 and Industrial Internet.	2017	La cuarta revolución industrial está sobre nosotros	2019

Germany's Industry 4.0 strategy	2016	Industry 4.0 and Object-Oriented Development: Incremental and Architectural Change	2017	Cuando el destino nos alcance... con la industria 4.0	2019
THE ADVENT OF INDUSTRY 4.0 IN MANUFACTURING INDUSTRY: LITERATURE REVIEW AND GROWTH OPPORTUNITIES	2016	Industry 4.0 Implies Lean Manufacturing: Research Activities in Industry 4.0 Function as Enablers for Lean Manufacturing	2017	Cómo está enfocando Europa la Industria 4.0	2019
Estandarización para la Industria 4.0	2016	The challenges of Industry 4.0 for Small and Medium-sized Enterprises	2017	Está realmente preparado para la Industria 4.0?	2019
Industria 4.0, el detonante del cambio en el sector automotriz	2016	A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises	2017	La estrategia de Europa ante la Industria 4.0	2019
¿Qué país está a la cabeza en la carrera por la industria 4.0?	2016	The Fourth Industrial Revolution	2017	Europa está venciendo a Estados Unidos en Industria 4.0	2019
Moving Towards Industry 4.0: A systematic review	2017	Industrie 4.0 implementations in the automotive industry	2017	"Industrie 4.0" and Smart Manufacturing – A Review of Research Issues and Application Examples	2020
La Digitalización y la Industria 4.0	2017	Industry 4.0	2017	4ta REVOLUCIÓN INDUSTRIAL: INDUSTRIA 4.0	2020
LA INDUSTRIA 4.0: EL ESTADO DE LA CUESTIÓN	2017	Industrial Revolution-Industry 4.0: Are German manufacturing SMEs the First Victims of this Revolution?	2017	INDUSTRIA 4.0: ¿INTENSIFICACIÓN DEL PARADIGMA TIC O NUEVO PARADIGMA	2020

				TECNOORGANIZACION AL?	
La Cuarta Revolución Industrial o Industria 4.0 y su Impacto en la Educación Superior en Ingeniería en Latinoamérica y el Caribe	2017	Towards Industry 4.0: Gap Analysis between Current Automotive MES and Industry Standards using Model-Based Requirement Engineering	2017	Ideas y conceptos básicos para la comprensión de las industrias 4.0.	2020
Innovaciones tecnológicas en la educación en la cuarta revolución industrial	2017	Decoding the DNA of the Toyota Production System.	2017	Desarrollo, tendencias, aplicaciones y herramientas de la industria 4.0 en el sector textil	2020
El Entorno de la Industria 4.0: Implicaciones y Perspectivas Futuras	2017	Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0	2017	Uso de herramientas de la industria 4.0 en instituciones educativas rurales de Yopal como estrategia para la identificación de competencias personales y técnicas	2020
Industria 4.0. Qué es, ventajas e inconvenientes	2017	Industry 4.0 as SMART enabler for innovative business models	2017	La toma de decisiones éticas en la industria 4.0	2020
la industria 4.0 revoluciona el sector automotor	2017	Production scheduling in Complex Job Shops from an Industrie 4.0 Perspective: A Review and Challenges in the Semiconductor Industry	2017	Business intelligence aplicado al control de la producción	2020
Industria 4.0, la cuarta revolución industrial y la inteligencia operacional	2017	Industry 4.0 – job-producer or employment-destroyer?	2017	Caso de estudio: BI aplicada a la optimización de recursos y tiempos de producción	2020



Diez empresas que lideran la Industria 4.0	2017	A Systematic Mapping Study on Modeling for Industrie 4.0	2017	¿Qué es la industria 4.0 y qué aporta a mi empresa?	2020
Industry 4.0: Cyber-Physical Systems and their impact on Business Models	2017	Factores de mayor Influencia en la efectividad de técnicas de la manufactura esbelta	2017	Entra en la Industria 4.0 con doeet	2020
<i>Architecture for Industry 4.0-based Manufacturing Systems</i>	2017	<i>Industry 4.0 and the digital society: concepts, dimensions and envisioned benefits</i>	2018	<i>¿Cómo ayuda la industria 4.0 a la industria automotriz?</i>	2020
The Industrie 4.0 transition quantified	2017	The impact of the fourth industrial revolution: a cross-country/region comparison	2018	La industria 4.0, el futuro de la manufactura automotriz en México	2020
<i>7th International Conference on Information Society and Technology, ICIST</i>	2017	<i>INDUSTRIA 4.0 Fabricando el Futuro</i>	2018	<i>La industria 4.0 se implementa en el sector automotriz a velocidad crucero</i>	2020
Industry 4.0 with a Lean Perspective	2017	tecnologías 4.0 para la industria automotriz	2018	El sector automotriz en línea con la Industria 4.0	2020
Industrie 4.0-Hit or Hype?	2017	tecnología 4.0 para el sector automotor en México, promovida en salones experimentales	2018	Transformación digital, vital ante los retos del 2021	2020
A framework for implementing Industrie 4.0 in learning factories	2017	Industria 4.0, una revolución que se retrasa en México	2018	La digitalización y la industria 4.0 en el sector automotriz	2020

Standardization connecting the initiative Industry 4.0 and Service Life Cycle	2017	México establece estrategia para la industria 4.0	2018	Industrial Transformation MEXICO —Un evento de Hannover Messe—	2020
Industry 4.0: The industrial internet of things	2017	Europa encabeza el desarrollo de la industria 4.0	2018	Industria 4.0, herramienta clave para mantener la productividad en las empresas	2020
Creating Value with Industry 4.0	2017	Desentramando la Industria 4.0, una oportunidad para México	2018	La transformación de la industria automotriz mexicana	2020
Key competencies for Industry 4.0	2017	Industry 4.0- Competencies for a modern production system	2018	México se encamina a ser líder de la Industria 4.0 en América Latina	2020
Moving the Industry 4.0	2017	La estrategia alemana Industria 4.0: el capitalismo en la era de la digitalización	2019	La Industria 4.0 en México	2020
Industry 4.0- New Era of Manufacturing	2017	INDUSTRY 4.0: STATE OF THE ART AND RESEARCH IMPLICATIONS	2019	Industry 4.0, Quality 4.0 & New Product Development	2020
Towards In-Transit Analytics for Industry 4.0	2017	LA INDUSTRIA 4.0 Tecnologías habilitadoras	2019	las 10 tecnologías clave en la cadena de suministro	2021
SAIN4:State of the art report on industry 4.0	2017	ESTRATEGIA INDUSTRIA 4.0: DISEÑANDO EL CHILE FUTURO	2019	Qué es la industria 4.0 y qué beneficios tiene	2021
Science, Application and Methods in Industry 4.0	2017	LA TRANSFORMACIÓN DIGITAL DE LA INDUSTRIA ESPAÑOLA	2019	La 4ª Revolución Industrial en el sector de la automoción	2021

Why Industry 4.0 needs workplace innovation: A critical look at the German debate on advanced manufacturing	2017	Consecuencias económicas y sociales de la cuarta revolución industrial y estrategias pensadas para la adaptación de la actividad económica	2019	9 Tendencias que transformarán el Sector Industrial en 2021	2021
Industry 4.0	2017	Visión de las competencias de ingeniería industrial en industria 4.0	2019	De la industria 4.0 y cómo dar el siguiente paso	2021
A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems	2017	La industria 4.0. Análisis y estudio desde el Derecho en la 4ta Revolución Industrial	2019	Industrie 4.0 y la fábrica del futuro alemana.	2021
The flipside of Industrial 4.0 –Cyber Security Risk	2017	Aspectos Básicos de la industria 4.0	2019		
The Fourth Industrial Revolution and Ten Theses on Digitalization	2017	Era de la Cuarta Revolución Industrial	2019		
Business Models for Industry 4.0. Developing a Framework to Determine and Assess Impacts on Business Models in the Dutch Oil and Gas Industry	2017	Los retos de la implementación de la Industria 4.0	2019		
The Smart Production Laboratory: A Learning Factory for Industry 4.0 Concepts	2017	LA INDUSTRIA 4.0. El nuevo paradigma productivo del siglo XXI	2019		
The Industry 4.0 Journey: Start the Learning Journey with	2017	Desarrollo industrial 2050 Hacia una industria del futuro	2019		

the Architecture Industry 4.0	Reference Model						
-------------------------------------	--------------------	--	--	--	--	--	--

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 2 fue ordenada por año de publicación para un fácil acceso al investigador que desee entender los temas en ese periodo de tiempo. A continuación, procedemos con la tabla 3 para entender la frecuencia de cada subtema en cada periodo de tiempo. Se puede observar que hay temas en los que la frecuencia de publicación aumenta a medida que avanzan los años.

**Tabla 3.** Listado de publicaciones sobre I4.0 agrupado por subtema y año

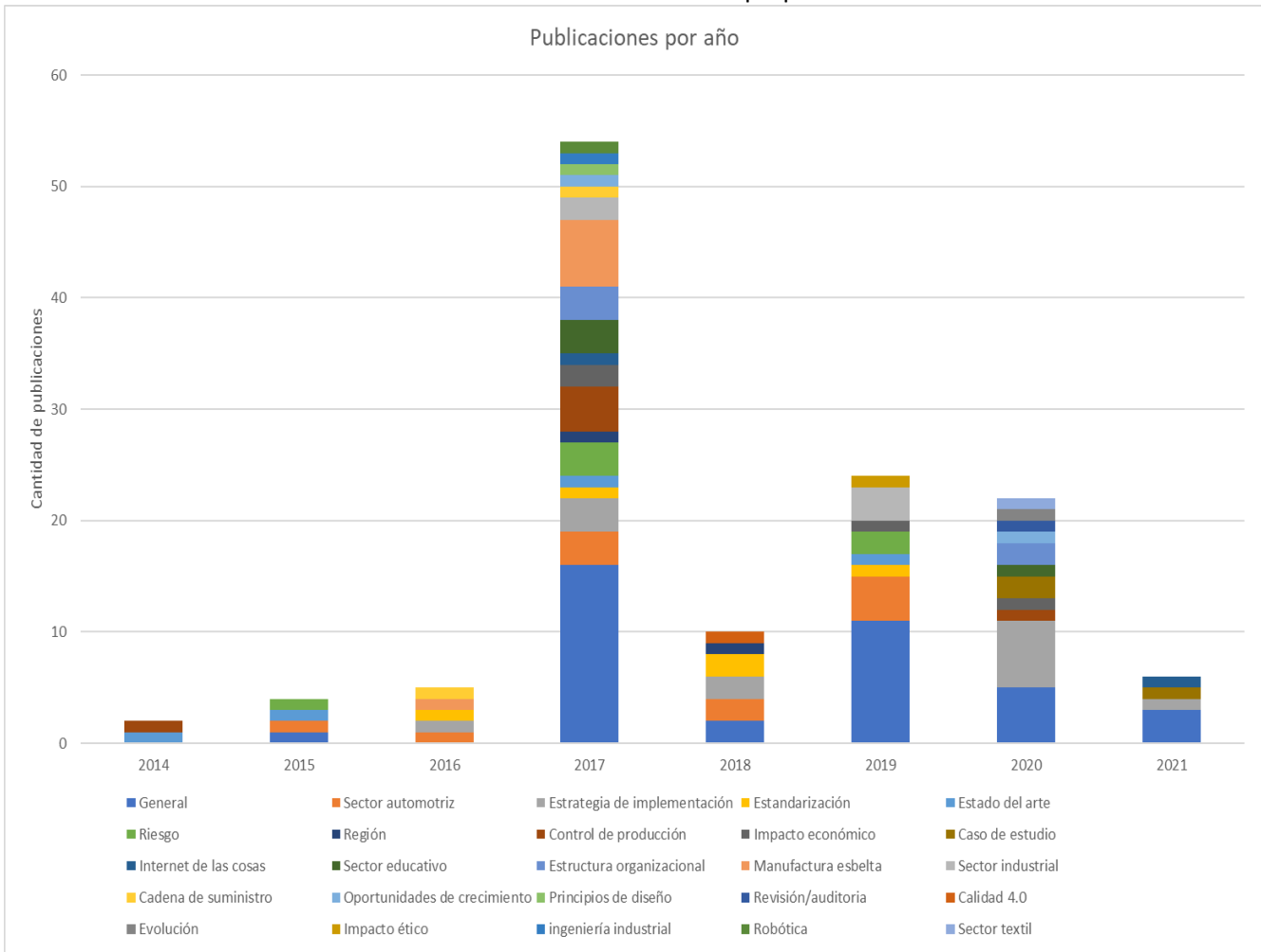
Tema	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
General	0	1	0	16	2	11	5	3
Sector automotriz	0	1	1	3	2	4	0	0
Estrategia de implementación	0	0	1	3	2	0	6	1
Estandarización	0	0	1	1	2	1	0	0
Estado del arte	1	1	0	1	0	1	0	0
Riesgo	0	1	0	3	0	2	0	0
Región	0	0	0	1	1	0	0	0
Control de producción	1	0	0	4	0	0	1	0
Impacto económico	0	0	0	2	0	1	1	0
Caso de estudio	0	0	0	0	0	0	2	1
Internet de las cosas	0	0	0	1	0	0	0	1

Sector educativo	0	0	0	3	0	0	1	0
Estructura organizacional	0	0	0	3	0	0	2	0
Manufactura esbelta	0	0	1	6	0	0	0	0
Sector industrial	0	0	0	2	0	3	0	0
Cadena de suministro	0	0	1	1	0	0	0	0
Oportunidades de crecimiento	0	0	0	1	0	0	1	0
Principios de diseño	0	0	0	1	0	0	0	0
Revisión/auditoría	0	0	0	0	0	0	1	0
Calidad 4.0	0	0	0	0	1	0	0	0
Evolución	0	0	0	0	0	0	1	0
Impacto ético	0	0	0	0	0	1	0	0
ingeniería industrial	0	0	0	1	0	0	0	0
Robótica	0	0	0	1	0	0	0	0
Sector textil	0	0	0	0	0	0	1	0
Total	2	4	5	54	10	24	22	6

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4.** Gráfica de publicaciones sobre I4.0 por año

Fuente: Elaboración propia.



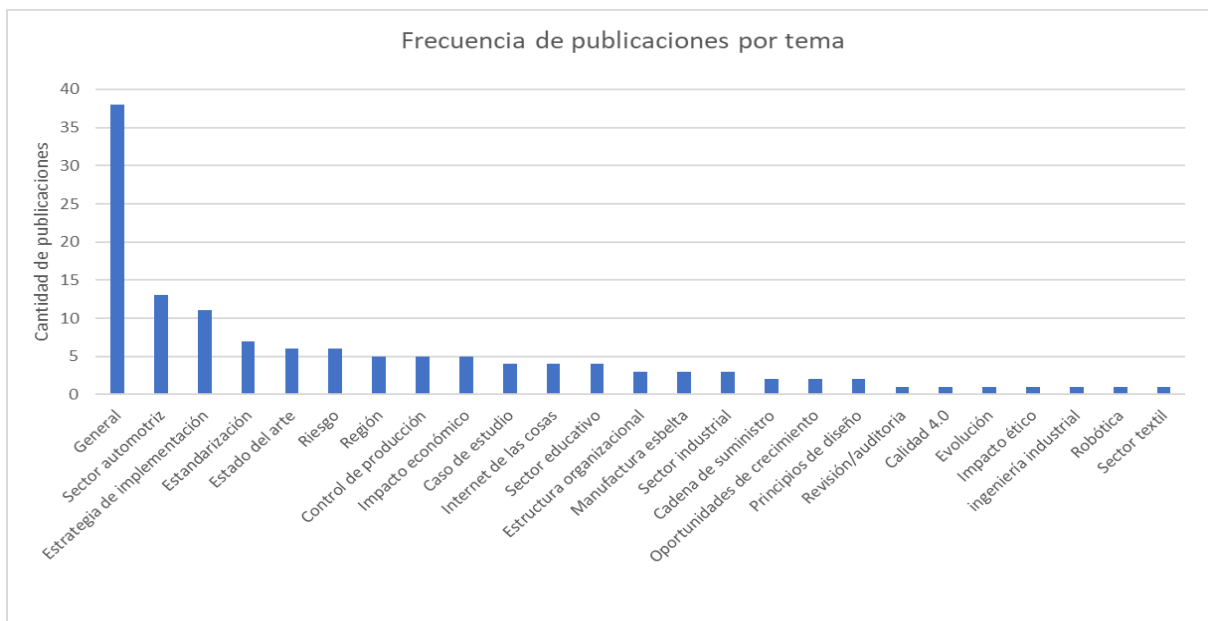
**Tabla 4.** Listado de publicaciones sobre I4.0 agrupados por tema y frecuencia

<b>Tema</b>	<b>Frecuencia</b>
General	38
Sector automotriz	13
Estrategia de implementación	11
Estandarización	7
Estado del arte	6
Riesgo	6
Región	5
Control de producción	5
Impacto económico	5
Caso de estudio	4
Internet de las cosas	4
Sector educativo	4
Estructura organizacional	3
Manufactura esbelta	3
Sector industrial	3
Cadena de suministro	2
Oportunidades de crecimiento	2

Principios de diseño	2
Revisión/auditoria	1
Calidad 4.0	1
Evolución	1
Impacto ético	1
ingeniería industrial	1
Robótica	1
Sector textil	1

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.** Gráfica de publicaciones sobre I4.0 por tema



Fuente: Elaboración propia.



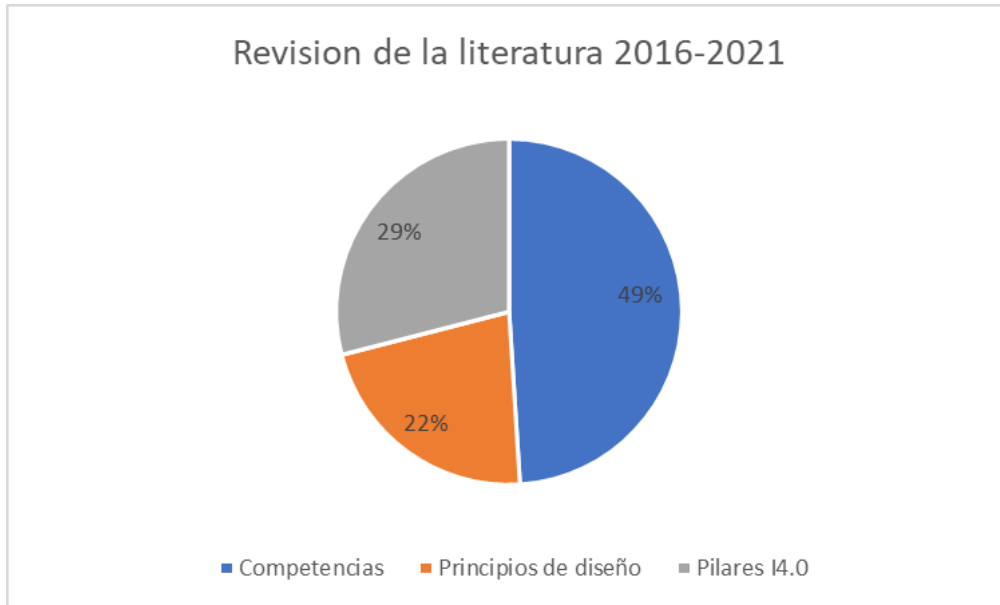
Una revisión específica de la literatura es propuesta para tratar de entender el desarrollo de tres factores en específico: Pilares de la industria 4.0, principios de diseño de la I4.0 y competencias internas/externas para el desarrollo de I4.0, ya que forman parte de una investigación paralela sobre su impacto en el valor agregado. El motor de búsqueda utilizado fue Google scholar, con 240 artículos utilizando las palabras clave mencionadas. Una vez filtrados, se obtuvieron 31 artículos relevantes relacionados a competencias, 28 para principios de diseño y 36 para pilares de I4.0, mostrados en la tabla 5.

**Tabla 5.** Cantidad de publicaciones sobre los subfactores de la I4.0 específicos propuestos durante el periodo (2016-2021)

<b>I4.0 Factors</b>	<b>Qty</b>
Competencias	31
Design principles	14
I4.0 Pillars	18
Total	63

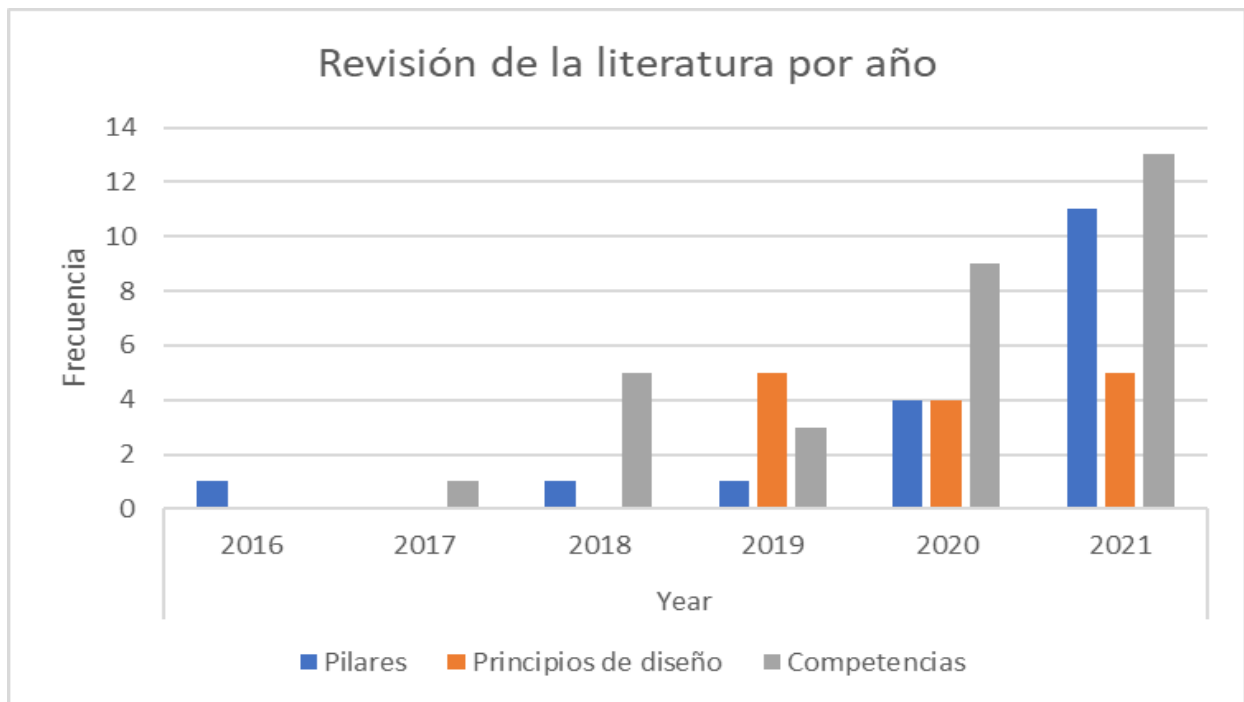
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 6.** Porcentaje de publicaciones de los subfactores propuestos



Fuente: Elaboración propia

**Figura 7.** Publicaciones por año de subfactores propuestos



Fuente: Elaboración propia.

## **Resultados**

Los datos preliminares sugieren que hay un pico periódico en la publicación de tópicos específicos, mientras que los temas generales se mantienen estables durante todos los periodos. Una explicación propuesta para esto es el alto costo de implementación de soluciones I4.0, con un largo retorno de la inversión. Esto sugiere que una vez que se selecciona una estrategia de implementación, se puede desarrollar un tópico en específico y, una vez implementado, los resultados se pueden analizar y generar publicaciones subsiguientes, lo que explica el retraso de 3 a 5 años en las publicaciones.

En referencia a los subcomponentes propuestos en la tabla 2, observamos que temas administrativos como las competencias adquieren mayor relevancia, basándonos en el incremento de publicaciones, mientras que temas conceptuales como los principios de diseño mantienen un bajo volumen de publicación debido tal vez a su naturaleza taxonómica.

## **Conclusiones**

Esta investigación muestra que el análisis bibliométrico puede ayudar a comprender tanto el enfoque de la investigación actual como el desarrollo de las estrategias de implementación, así como de preparación tanto a nivel individual como empresarial.

Los datos acerca de los subfactores propuestos (Pilares, principios de diseño y competencias), nos muestran que vale la pena explorar la interacción de los mismos, ya que las publicaciones de estos temas están en aumento. En el aspecto humano, las competencias interpersonales serán de vital importancia tanto para la implementación como para la sustentabilidad de los proyectos I4.0.

## **Futuras Investigaciones**

Se recomienda, como futura investigación, explorar más sobre los efectos de los factores más frecuentes en la revisión de la literatura del tema I4.0 sobre el valor agregado.

## **Agradecimientos**

Un agradecimiento sincero al Dr. Adan Valles Chavez y al Dr. Eduardo Rafael Poblano Ojinaga por su gran soporte en la elaboración y revisión de este artículo.

## Referencias

- Anderl, R., Picard, A., Wang Y., Fleischer, J., Dosch, S., Klee, B., Bauer, J., Frankfurt(2015). "Guideline Industry 4.0- Guiding principles for the implementation of Industrie 4.0 in small and medium sized businesses". <https://industrie40.vdma.org/documents/4214230/0/0/Guideline%20Industrie%204.0.pdf/70abd403-cb04-418a-b20f-76d6d3490c05>
- Arvind, A. (2016). "Architecture for Industry 4.0-based Manufacturing Systems". Universidad Carnegie Mellon. [https://www.ri.cmu.edu/pub\\_files/2016/8/thesis1-Arvind.pdf](https://www.ri.cmu.edu/pub_files/2016/8/thesis1-Arvind.pdf)
- Dassisti, M., Panetto, H., Lezoche, M., Merla, P., Semeraro, C., Giovannini, A., Chimienti, M. (2017). 7th International Conference on Information Society and Technology. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01526397/27>
- De Vasconcelos, A., & Linard, A.(2017). "Industry 4.0 with a Lean Perspective". Universidad UPPSALA. <https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1118830/FULLTEXT01.pdf>
- Drath, R., Horch, A (2014). "Industrie 4.0-Hit or Hype?". IEEE Industrial Electronics Magazine 01/2014; 8(2):56-58, 2014. [https://www.researchgate.net/publication/263285662\\_Industrie\\_40\\_Hit\\_or\\_Hype\\_Industry\\_Forum](https://www.researchgate.net/publication/263285662_Industrie_40_Hit_or_Hype_Industry_Forum)
- Du Plessis, C. (2017). "A framework for implementing Industrie 4.0 in learning factories" Universidad de Stellenbosch. [https://www.google.com/url?q=https://scholar.sun.ac.za/bitstream/handle/10019.1/101189/duplessis\\_framework\\_2017.pdf%3Fsequence%3D1%26isAllowed%3Dy&sa=U&ved=0ahUKEwjHkd-loNPXAhUV3YMKHBJABw84MhAWCBMwBw&client=internal-uds-cse&cx=017986067167581999535:rnewgrysmpe&usq=AOvVaw154iMF3U7gWqDVbXJKKfcr](https://www.google.com/url?q=https://scholar.sun.ac.za/bitstream/handle/10019.1/101189/duplessis_framework_2017.pdf%3Fsequence%3D1%26isAllowed%3Dy&sa=U&ved=0ahUKEwjHkd-loNPXAhUV3YMKHBJABw84MhAWCBMwBw&client=internal-uds-cse&cx=017986067167581999535:rnewgrysmpe&usq=AOvVaw154iMF3U7gWqDVbXJKKfcr)
- Enke, J., Glass, R., Kress, A., Hambach, J., Tisch, M., Metternich, J. (2018). "Industry 4.0 - Competencies for a modern production system". <https://www.Sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918305006>
- Githarti, M, (2016). "Creating Value with Industry 4.0". <http://hdl.handle.net/1721.1/107606>
- Grzybowska, K., Lupicka, A., (2017). "Key competencies for Industry 4.0". [https://www.Researchgate.net/publication/322981337\\_Key\\_competencies\\_for\\_Industry\\_40](https://www.Researchgate.net/publication/322981337_Key_competencies_for_Industry_40)
- Gunther, F., Heinz, M., Fessl, A. (2017). "Moving the Industry 4.0" <https://zenodo.org/record/456320#.WhyLQjypvMs>
- Hercko, J., Slamkova, E. (2106). "Industry 4.0- New Era of Manufacturing". [https://www.researchgate.net/publication/285597327\\_INDUSTRY\\_40\\_-\\_NEW\\_ERA\\_OF\\_MANUFACTURING](https://www.researchgate.net/publication/285597327_INDUSTRY_40_-_NEW_ERA_OF_MANUFACTURING)

- Hill, R., Devitt, J., Anjum, A. Ali, M., (2017). "Towards In-Transit Analytics for Industry 4.0". Cornell University. <https://arxiv.org/abs/1710.04121>
- ITI (2016). "SAIN4:State of the art report on industry 4.0". <https://zenodo.org/record/274043#.WhYE0zypvMs>
- Kopp, R., Howaldt, J., Schultze, J. (2016). "Why Industry 4.0 needs workplace innovation: A critical look at the German debate on advanced manufacturing". European Journal of Workplace Innovation. V2(1) <http://journal.uia.no/index.php/EJWI/article/view/373>
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). "Industry 4.0". <https://rd.springer.com/article/10.1007%2Fs12599-014-0334-4>
- Nardello, M., Moller, C. & Gotze, J. (2016). "The Industry 4.0 Journey: Start the Learning Journey with the Reference Architecture Model Industry 4.0". <http://ceur-ws.org/Vol-1898/paper13.pdf>
- Neculai, C. (2015). "COLLABORATIVE ENGINEERING DESIGN AND OPTIMIZATION OF COMPANY RESOURCES". Universidad de Sibiu, Rumania. [http://doctorate.ulbsibiu.ro/obj/documents/abstract\\_DobrinCarmen.pdf](http://doctorate.ulbsibiu.ro/obj/documents/abstract_DobrinCarmen.pdf)
- Roblek, V., Meško, M., & Krapež, A. Slovenia (2016). "A Complex View of Industry 4.0". En SAGE Journals. <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/2158244016653987>
- Pentek, H., (2016). "Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios". <http://ieeexplore.ieee.org/document/7427673/?reload=true&arnumber=7427673&newsearch=true&queryText=industrie%204.0%20design%20principles>
- Salimbeni, Sergio (2020). "Industry 4.0, Quality 4.0 & New Product Development". [https://www.researchgate.net/publication/338459549\\_Industry\\_40\\_Quality\\_40\\_New\\_Product\\_Development](https://www.researchgate.net/publication/338459549_Industry_40_Quality_40_New_Product_Development)
- Sanders, A., Elangeswaran, C., & Wulfsberg, J., USA(2016), "Industry 4.0 Implies Lean Manufacturing: Research Activities in Industry 4.0 Function as Enablers for Lean Manufacturing", JIEM, 2016 – 9(3): 811-833. <http://dx.doi.org/10.3926/jiem.1940>
- Sateesh V. Shet a\*, Vijay Pereira. (2021) " Proposed managerial competencies for Industry 4.0 – Implications for social sustainability". Technological Forecasting & Social Change 173 (2021) 121080. [https://www.researchgate.net/profile/Sateesh-Shet/publication/353846472\\_Proposed\\_managerial\\_competencies\\_for\\_Industry\\_40\\_-\\_Implications\\_for\\_social\\_sustainability/links/61151ed7169a1a0103f89cf0/Proposed-managerial-competencies-for-Industry-40-Implications-for-social-sustainability.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Sateesh-Shet/publication/353846472_Proposed_managerial_competencies_for_Industry_40_-_Implications_for_social_sustainability/links/61151ed7169a1a0103f89cf0/Proposed-managerial-competencies-for-Industry-40-Implications-for-social-sustainability.pdf)
- Schumacher, A., Erol, S., & Sihn, W. (2016). "A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises". [https://publik.tuwien.ac.at/files/publik\\_255446.pdf](https://publik.tuwien.ac.at/files/publik_255446.pdf)

Schwab, K. (2015). "The Fourth Industrial Revolution". <https://www.foreignaffairs.com/articles/2015-12-12/fourth-industrial-revolution>

Segura-Velandia, D., (2016). "Industrie 4.0 implementations in the automotive industry". [https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/bitstream/2134/23402/3/Industrie%204.0%20Implementations%20in%20the%20automotive%20industry\\_%20ICMR%202016\\_vfinal\\_corrections.pdf](https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/bitstream/2134/23402/3/Industrie%204.0%20Implementations%20in%20the%20automotive%20industry_%20ICMR%202016_vfinal_corrections.pdf)

SMIT, J., Krautzer, S., Moeller, C., & Carlberg, M. (2016). "Industry 4.0". [http://www.Europa.eu/regData/etudes/STUD/2016/570007/IPOL\\_STU\(2016\)570007\\_EN.pdf](http://www.Europa.eu/regData/etudes/STUD/2016/570007/IPOL_STU(2016)570007_EN.pdf)

Soundarapandian, M., Suri, K., Cadavid, J., Barosan, I., Van Den Brand, M., Alferez, M., & Gerard, S. (2017). "Towards Industry 4.0: Gap Analysis between Current Automotive MES and Industry Standards using Model-Based Requirement Engineering". Cornell University Library. <https://arxiv.org/abs/1704.02824>

Stock, T., Seliger, G. (2016). "Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0" <https://core.ac.uk/download/pdf/82023214.pdf>

Wortmann, A., Combemale, B., Barais, O. (2017). "A Systematic Mapping Study on Modeling for Industrie 4.0". <https://hal.inria.fr/hal-01514421>

## **Validación de identidad en línea de bajo costo y requisitos mínimos de hardware para ingreso a Instituciones de Educación Superior del Tecnológico Nacional de México.**

*Low-cost online identity validation and minimum hardware requirements for admission to Higher Education Institutions of the Tecnológico Nacional de México.*

### **Rigoberto Reyes Valenzuela**

Tecnológico Nacional de México,  
Instituto Tecnológico de Mexicali, México.  
rigobertoreyes@mexicali.tecnm.mx  
<https://orcid.org/0000-0002-8570-8563>

### **Manuel de Jesús López Pérez**

Tecnológico Nacional de México,  
Instituto Tecnológico de Tijuana, México.  
manuel.d.lp@tijuana.tecnm.mx  
<https://orcid.org/0000-0001-6565-6404>

### **Rubén Juárez Rodríguez**

Tecnológico Nacional de México,  
Instituto Tecnológico de Orizaba, México.  
ruben.jr@orizaba.tecnm.mx  
<https://orcid.org/0000-0003-0002-1787>

## **Resumen**

Derivado de la pandemia por Covid-19, las evaluaciones en línea se incrementaron de manera exponencial, y en la mayoría de las ocasiones no existe un sistema de validación de identidad que asegure que el examen sea resuelto por una persona distinta a la que debería hacerlo. Esto es consecuencia de dos problemas principales: primero, la limitación de recursos computacionales de quien presenta el examen en línea, porque los sistemas que sí tienen posibilidad de validar identidad de un examen en línea son muy demandantes en cuanto al hardware necesario y, segundo, estas aplicaciones son bastante costosas en el aspecto económico. Entonces, debido a la gran demanda de eficiencia y comodidad en los procesos de inscripción y admisión, esto ha impulsado la necesidad de implementar soluciones que minimicen los requisitos de hardware y que sean de bajo costo.



En este contexto, este trabajo, presenta una revisión de literatura, para analizar investigaciones previas, artículos científicos, informes y documentos relevantes relacionados con la validación de identidad en línea y requisitos de hardware asociados. El objetivo es identificar las mejores prácticas, tecnologías y enfoques existentes que puedan ser implementados de manera efectiva y aplicable en Instituciones de Educación Superior del Tecnológico Nacional de México.

Para la validación de identidad en línea se recomienda incluir: identidad digital, autenticación, biometría, seguridad de información y tecnologías de validación de identidad. Los resultados proporcionarán recomendaciones claras y prácticas para implementar sistemas de validación de identidad en línea de bajo costo y con requisitos mínimos de hardware, que beneficiará a instituciones educativas y estudiantes.

**Palabras clave:** Validación, Bajo-costos, Identidad-en-línea, Hardware, Educación-Superior.

### **Abstract**

Derived from the Covid-19 pandemic, online evaluations have experienced a significant increase. However, in many cases, there is a lack of identity validation systems to ensure that the exam is being completed by the intended individual. This issue stems from two primary challenges. Firstly, there is a limitation in computer resources for those taking online exams, as the existing identity validation systems often require high-end hardware. Secondly, these applications are often expensive, creating an economic barrier. Consequently, the demand for efficient and convenient registration and admission processes has led to the necessity of implementing solutions that minimize hardware requirements and are cost-effective.

This paper presents a literature review analyzing previous research, scientific articles, reports, and relevant documents pertaining to online identity validation and associated hardware requirements. The objective is to identify the best practices, technologies, and approaches that can be effectively implemented and applied in Higher Education Institutions of the Tecnológico Nacional de México.

For online identity validation, it is recommended to incorporate digital identity, authentication, biometrics, information security, and identity validation technologies. The results will offer clear and practical recommendations for implementing low-cost online identity validation systems with minimal hardware requirements, benefiting educational institutions and students.

**Keywords:** Validation, Low-cost, Online Identity, Hardware, Admission, Higher Education.

## **Introducción**

En la actualidad, el acceso a la educación superior se ha vuelto cada vez más importante para el desarrollo personal y profesional de las personas. Sin embargo, una de las barreras más comunes a las que se enfrentan los estudiantes es la validación de su identidad en línea, así como los requisitos de hardware necesarios para ingresar a las instituciones de educación superior del Tecnológico Nacional de México. Estos requisitos pueden ser costosos y excluyentes para aquellos estudiantes que no tienen acceso a recursos económicos suficientes.

En este proyecto, se aborda el desafío de desarrollar una solución de validación de identidad en línea de bajo costo y la identificación de los requisitos mínimos de hardware para el ingreso a las instituciones de educación superior del Tecnológico Nacional de México. Para ello, se realizará una revisión exhaustiva de la literatura existente en este campo.

La validación de identidad en línea puede realizarse mediante uso de contraseñas o de huella digital, pero ambas opciones son poco confiables; mientras que la validación basada en el patrón del iris de los ojos requiere una cámara de alta resolución, la cual es una limitante para muchas personas que tienen la necesidad de realizar exámenes en línea. Adicionalmente, la validación de identidad por reconocimiento de voz requiere altas prestaciones del sistema de sonido de la computadora y, la validación de identidad por reconocimiento de identificadores faciales requiere altas prestaciones de la cámara instalada en la computadora.

Por lo tanto, un sistema de reconocimiento facial es un software dirigido por una computadora para identificar de forma automática a una persona en una imagen digital mediante la comparación de

determinadas características faciales (Jain, Flynn y Ross, 2008, como se citó en Agapito, 2016, pag.31).

Además, se identificarán las ventajas y desventajas de las soluciones actuales de validación de identidad en línea y se evaluará la viabilidad de implementar sistemas de bajo costo que permitan un acceso equitativo a la educación superior. También se examinará la relación entre los requisitos de hardware y el acceso de los estudiantes a dichos recursos.

Con los resultados obtenidos de esta revisión de literatura, se pretende contribuir al desarrollo de soluciones más accesibles y económicas para la validación de identidad en línea, así como establecer recomendaciones para los requisitos mínimos de hardware que permitan a los estudiantes acceder a las instituciones de educación superior de manera equitativa.

En resumen, este proyecto se centra en la revisión de la literatura existente sobre la validación de identidad en línea de bajo costo y los requisitos mínimos de hardware para el ingreso a las instituciones de educación superior del Tecnológico Nacional de México. A través de esta revisión, se busca generar conocimiento y recomendaciones que fomenten un acceso inclusivo y equitativo a la educación superior.

Por lo anterior, en este trabajo el objetivo principal de esta revisión de literatura fue explorar y analizar las diferentes metodologías, técnicas y tecnologías utilizadas para la validación de identidad en línea, así como los requisitos de hardware que se han establecido en las Instituciones de Educación Superior donde el Tecnológico Nacional de México tiene claro la aplicación de las mismas. Se examinaron estudios e investigaciones previas, artículos científicos, informes técnicos y otras fuentes relevantes para recopilar y analizar la información necesaria.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### Sistemas de expertos

Gladilina et. al. (2020) menciona que la validación de identidad en línea puede realizarse mediante uso de contraseñas o de huella digital, pero ambas opciones son poco confiables; mientras que la validación basada en el patrón del iris de los ojos requiere una cámara de alta resolución, la cual es una limitante para muchas personas que tienen la necesidad de realizar exámenes en línea.

El reconocimiento facial (RF) se ha convertido en un área importante para la investigación desde la década de los setenta del siglo XX, puesto que varios científicos e ingenieros alrededor del mundo se han enfocado para establecer algoritmos y métodos cada vez más robustos y precisos para este tipo de sistemas y su aplicación en la vida cotidiana. El reconocimiento facial puede realizarse en dos dimensiones (2D) o en tres dimensiones (3D). Los métodos basados en imágenes 2D, en general, son sensibles los cambios en la iluminación y la postura, pero, bajo condiciones controladas, la mayoría de los métodos basados en imágenes 2D alcanzan una precisión superior al 90% pero su precisión decae en condiciones reales (Taigman et. al., 2014) (Philips et. al. 2011) (Abate, 2007) (Bowyer et. al., 2006). Por su parte, los métodos 3D pueden llegar a ser invariantes para los cambios en la pose y la iluminación, pero en condiciones reales, la mayoría de estos sistemas tienen baja precisión, a pesar de que su exigencia de requisitos de hardware es bastante elevada. (Olivares-Mercado et. al., 2016) (Romero et. al., 2016) (Khalid & Lili, 2009) (Kakadiaris et. al. 2006) (Akarun, 2005). Para mejorar la precisión de los métodos de reconocimiento facial, en la literatura se han encontrado publicaciones del uso de inteligencia artificial o redes neuronales artificiales aplicada al reconocimiento facial (Virdee-Chapman, 2017) (Methi et. al., 2017) (Redmon & Angelova, 2015) (Shyam & Singh, 2014).

En este sentido, la validación de identidad por reconocimiento de voz requiere altas prestaciones del sistema de sonido del equipo con el que se desea llevar a cabo dicha validación (Hernández & Herrera, 2015) (Kurian, 2014) (Vrinda, 2013).

(Molano, 2021) afirma que la identidad digital es también un instrumento de validación que se centra básicamente en los rasgos de un individuo, pero desde una perspectiva de un usuario de Internet que se encuentran digitalizados y a disposición de los demás, como es por medio de cuentas de correo electrónico, redes sociales, etc., en este caso la validación en línea va más allá que un reconocimiento solo digital, porque se centra en los rasgos del individuo y lo que en este trabajo se pretende es validar la identidad en línea de un aspirante que presenta un examen de ingreso a una institución de educación superior, que brinde seguridad y que sea de bajo costo.

Por lo anterior, esta investigación aborda la problemática del desarrollo de un sistema neuro difuso basado en reconocimiento facial y reconocimiento de voz para validación de identidad, que minimice la demanda de requisitos de hardware para su operación y sus costos asociados, en el acceso a las Instituciones de Educación Superior del Tecnológico Nacional de México.

Algunas razones importantes en la validación en línea es la “seguridad mejorada”, donde el reconocimiento facial y de voz son características biométricas únicas de cada individuo, lo que hace que el sistema sea altamente seguro y difícil de falsificar o manipular. Al utilizar estas tecnologías, se puede garantizar que la persona que intenta acceder a los recursos o servicios de una Institución de Educación Superior sea realmente quien dice ser. La “eficiencia y comodidad” en la validación en línea a través del reconocimiento facial y de voz es rápida y no requiere la intervención manual de personal adicional. Los usuarios pueden completar el proceso de verificación de identidad de manera rápida y conveniente, lo que mejora la experiencia de usuario y reduce la necesidad de esperar en filas o presentar documentos físicos. Otra razón importante y fundamental es la “reducción de costos asociados” que al implementar un sistema neuro difuso basado en reconocimiento facial y reconocimiento de voz, puede minimizar la demanda de requisitos de hardware costosos. A diferencia de otros métodos de validación de identidad, como tarjetas inteligentes o escáneres de huellas dactilares, por lo que el reconocimiento facial y de voz puede realizarse utilizando dispositivos comunes, como cámaras web y micrófonos integrados en computadoras o dispositivos móviles. Finalmente, la escalabilidad y accesibilidad en un sistema en línea de validación de identidad basado en reconocimiento facial y de voz es altamente escalable y puede adaptarse fácilmente a un gran número de usuarios. Además, no requiere que los usuarios

posean dispositivos especializados, lo que hace accesible para una amplia gama de personas, incluidos aquellos con recursos limitados, por lo tanto, es importante debido a su seguridad mejorada, eficiencia, reducción de costos asociados y mayor accesibilidad para los usuarios ya que al minimizar los requisitos de hardware y los costos asociados, se puede facilitar el acceso y promover la inclusión en la educación superior.

De acuerdo con (Mikaela Bauzá), el estudio de validación a través de medios automáticos que se basan en uno o más rasgos físicos regularmente es conocido como biometría y actualmente existen diversas formas de validar la identidad de las personas, como son a través de patrón de iris, características muy específicas y particulares de las huellas digitales, reconocimientos de la frecuencia de voz, comparación de algunas características del rostro, entre otros. Ya son más de veinte años los que se han invertido para autenticar por medio del rostro desarrollando algoritmos y técnicas en este sentido. Uno de los mecanismos que más se han utilizado son las redes neuronales (RN) para obtener un conjunto de características específicas del rostro donde se usa una red neuronal con arquitectura paramétrica para el reconocimiento de personas. (Mikaela Bauzá).

La verificación de identidad en línea de un aspirante que desea ingresar a una Institución de Educación superior es un factor importante, por eso “la autenticación correcta de un estudiante es un requisito fundamental en un learning management system (LMS), pues si algún tercero intenta ingresar usurpando la identidad de un alumno autorizado, puede comprometer la seguridad de todo el sistema”, (Henríquez, 2014, como se citó en Agapito, 2016, pag.30). En este sentido, existen una infinidad de uso de tecnologías para la verificación de identidad de usuarios, sin embargo, uno de los métodos biométricos que ha tenido un gran peso en los últimos años es la autenticación facial, (Subban y Mankame, 2014, como se citó en Agapito, 2016, pag.30).

## **Materiales y métodos**

La validación de identidad en línea es fundamental para asegurar que los exámenes y procesos de admisión sean llevados a cabo por las personas correspondientes, evitando suplantaciones y salvaguardando la integridad académica. No obstante, la falta de sistemas de validación de identidad efectivos ha generado preocupaciones en las Instituciones de Educación Superior, quienes se

enfrentan a la necesidad de implementar soluciones que sean tanto eficientes como accesibles en términos económicos.

De acuerdo con (Gómez, 2020), los procesos de verificación de identidad se enfrentan a tres grandes desafíos, que es la seguridad, agilidad y escalabilidad. Si hablamos de seguridad el fraude por suplantación de identidad es el gran problema a atacar, por eso como se menciona en la fuente, al ser la suplantación la apropiación de la identidad de una persona para hacerse pasar por ella y asumir su identidad frente a terceros con la finalidad de obtener recursos o beneficios a su nombre, representa un gran problema en las instituciones de educación a la hora de presentar un examen en línea para ingresar a la universidad. Estos desafíos pueden dificultar la implementación efectiva de los sistemas de verificación de identidad y afectar su rendimiento.

Por otro lado, los requisitos mínimos de hardware para el ingreso a las Instituciones de Educación Superior también plantean un desafío adicional. Muchos estudiantes pueden no tener acceso a dispositivos o equipos que cumplan con los estándares requeridos, lo que limita su participación en las evaluaciones en línea y puede crear barreras para su admisión en estas instituciones.

Ante este panorama, es crucial explorar soluciones que permitan la validación de identidad en línea de manera efectiva y factible, así como establecer requisitos mínimos de hardware que sean realistas y accesibles para todos los estudiantes. En este sentido, el presente estudio se enfoca en analizar y revisar la literatura existente, investigaciones previas y mejores prácticas relacionadas con la validación de identidad en línea y los requisitos mínimos de hardware en el contexto de las Instituciones de Educación Superior. Ante este panorama, es crucial explorar soluciones que permitan la validación de identidad en línea de manera efectiva y factible, así como establecer requisitos mínimos de hardware que sean realistas y accesibles para todos los estudiantes.

Por esta razón, este trabajo presenta un análisis que permite desarrollar una solución de validación de identidad en línea que sea de bajo costo, utilizando requerimientos mínimos de hardware para el acceso a Instituciones de Educación Superior del Tecnológico Nacional de México.

Se consideró el método cualitativo, ya que el trabajo se centra en la recopilación, el análisis y la síntesis de información proveniente de fuentes secundarias, como artículos científicos, libros, informes técnicos y otros documentos académicos relevantes, para obtener una visión panorámica de los avances, las tendencias, y las prácticas recomendadas en el campo, incluyendo adicionalmente las herramientas de búsqueda bibliográfica, de análisis de contenidos, síntesis y redacción, que contribuyó a comprender y analizar la información cualitativa proveniente de las fuentes mencionadas. Este proceso de revisión literaria nos permitió obtener una visión integral de los avances, las mejores prácticas y las investigaciones previas en el campo de la validación de identidad en línea y los requisitos mínimos de hardware en el contexto de educación superior. Esto proporcionó una base sólida para el análisis y las conclusiones del estudio, así como para identificar áreas de investigación futura, considerando que la línea principal de búsqueda tuvo como eje rector los conocimientos sobre la validación de identidad en línea, y requisitos mínimos de hardware en el proceso de acceso a las Instituciones de Educación Superior del Tecnológico Nacional de México.

Para seleccionar las fuentes adecuadas, se implementó un proceso riguroso de búsqueda en bases de datos académicas y científicas, así como en repositorios digitales y bibliotecas especializadas. Se utilizaron palabras clave y términos de búsqueda relacionados con la validación, bajo costo, identidad en línea, hardware y educación superior. Una vez recopilados los documentos seleccionados, se procedió a realizar una lectura crítica y análisis sistemático. Se extrajeron datos clave, como hallazgos, conclusiones, metodologías utilizadas y recomendaciones propuestas por los autores. Estos datos se organizaron temáticamente y se compararon entre los diferentes estudios para identificar patrones, tendencias y brechas en la literatura existente.

El material utilizado en esta investigación consistió en una computadora con acceso a internet, libros, revistas y artículos que se revisaron más de cincuenta y se seleccionaron veintiséis encontrados en la literatura científica, relacionados con la validación de identidad en imágenes en dos dimensiones, en tres dimensiones y utilizando inteligencia artificial o redes neuronales artificiales, así como también, artículos relacionados con la validación de identidad por reconocimiento de voz. Es importante destacar que, la revisión bibliográfica es amplia, sin embargo, se ha limitado al objetivo específico de este tema para efectuar un estudio amplio del estado del



arte relativo a validación de identidad basada en reconocimiento facial, reconocimiento de voz, inteligencia artificial y lógica difusa.

Para la validación de identidad en este trabajo se revisaron conceptos que incluye: Identidad digital, que se refiere a la información personal y digital y se utiliza para identificar a un individuo en línea, como por ejemplo un correo electrónico, un número de teléfono o un usuario y contraseña.

Autenticación, que es el proceso mediante el cual se verifica la identidad de un usuario, generalmente mediante la utilización de un conjunto de credenciales, como una contraseña o un token.

Biometría, que se refiere a la utilización de características físicas o de comportamiento únicas de un individuo para su identificación, como la huella dactilar, la voz o el patrón de escritura. Como bien lo respaldan los autores “biometría es definida como la ciencia que estudia las características físicas, químicas y conductuales de un individuo, para que este pueda ser identificado, y donde el reconocimiento es totalmente personal e intransferible”. (Sayed y Jradi, 2014 como se citó en Agapito, 2016, pag.31).

Seguridad de la información, que se refiere a la protección de la información de un sistema contra amenazas internas o externas, como ataques informáticos o robos de información y finalmente

Tecnologías de validación de identidad, que incluyen técnicas de autenticación, biometría o una combinación de ambas para verificar la identidad de un usuario en línea.

Estos son algunos conceptos que son incluidos en el marco conceptual de este trabajo de investigación para la validación de identidad en línea.

## **Resultados**

Después de una revisión de literatura sobre la validación de identidad en línea de bajo costo y requisitos mínimos de hardware para el ingreso a Instituciones de Educación Superior del Tecnológico Nacional de México, presentamos en esta sección la discusión de los resultados

obtenidos, donde el número de documentos seleccionados fue de 26 fuentes bibliográficas por lo que podemos comentar que lo siguiente:

Primero: En referencia a los avances en tecnologías de reconocimiento facial y de voz se ha observado un progreso significativo en las tecnologías de reconocimiento facial y de voz, lo que ha permitido su aplicación en la validación de identidad en línea. Estas tecnologías han mejorado en términos de precisión y velocidad, lo que las hace adecuadas para su implementación en entornos educativos y de acuerdo con (Mikaela Bauzá) donde cita y destaca el desarrollo de la empresa F7 Corporation (Instituto Biométrico de Reconocimiento Facial) en la construcción de un software de biometría donde el sistema está planteado básicamente para entidades financieras garantizando la seguridad de los clientes, ya que se identifica automáticamente a cada uno de ellos a través de una imagen digital de su cara en movimiento mediante una cámara web, y de igual manera la empresa Google desarrolló un producto llamado Picasa que es una herramienta de búsqueda de reconocimiento de rostros donde el software cuenta con una interface que permite subir álbumes de fotos en Internet para incorporarla a un banco de imágenes. La herramienta busca e identifica automáticamente el rostro de cualquier persona que se le indique, y muestra todas las imágenes donde crea que ésta se encuentre.

Segundo: Se observa una implementación exitosa de sistemas de validación en línea: donde se han desarrollado e implementado con éxito sistemas de validación en línea basados en reconocimiento facial y de voz en varias instituciones educativas. Estos sistemas han demostrado ser efectivos en la verificación de la identidad de los usuarios, proporcionando una capa adicional de seguridad en el acceso a los recursos y servicios que ofrece el sistema, como es el caso de (Yacolca Murga, 2022) donde comprueba exitosamente que el proceso de validación de Identificación biométrica contribuyó a mejorar los servicios en materia de seguridad validando la identidad y logrando reducir el número de detractores de la compañía y la mejora en sus servicios.

Tercero: Existen ventajas de los sistemas de bajo costo y requisitos mínimos de hardware en los sistemas de validación de identidad basados en reconocimiento facial y de voz de bajo costo ya que han demostrado ser altamente efectivos. Al utilizar dispositivos de hardware comunes, como

cámaras web y micrófonos integrados, se reducen los costos asociados con la implementación y se facilita el acceso para los usuarios, ya que no requieren la adquisición de equipos especializados.

Cuarto: Se observa mejora en la experiencia del usuario ya que la implementación de sistemas de validación en línea basados en reconocimiento facial y de voz ha mejorado la experiencia del usuario al agilizar el proceso de autenticación. Los usuarios pueden acceder de manera rápida y conveniente a los servicios y recursos educativos sin la necesidad de presentar documentos físicos o interactuar con personal adicional.

Quinto: En cuanto a consideraciones de privacidad y seguridad, es importante abordar las consideraciones de privacidad y seguridad al implementar sistemas de validación en línea. Se deben establecer políticas claras para el almacenamiento y el uso de los datos biométricos de los usuarios, así como garantizar la protección adecuada contra posibles riesgos de seguridad.

En general, estos resultados resaltan el potencial y la efectividad de los sistemas de validación de identidad en línea de bajo costo y requisitos mínimos de hardware en el acceso a las Instituciones de Educación Superior del Tecnológico Nacional de México. Estos sistemas brindan una solución segura, eficiente y conveniente, mejorando la experiencia del usuario y reduciendo los costos asociados con la implementación.

## **Discusión**

En este apartado se presenta la discusión de los resultados que se obtuvieron de la revisión literaria, donde fueron 26 documentos revisados y seleccionados que respaldan el objetivo de este trabajo.

A partir de la revisión de literatura nos damos cuenta que el reconocimiento facial se ha venido utilizando en varios países del mundo para brindar y promover la seguridad pública en sus procesos que brindan servicios a la comunidad, tal es el caso de Estados Unidos donde ha venido utilizando el reconocimiento facial desde el año 2001, incrementando su uso ya que para 2016 una cuarta parte de las casi dieciocho mil agencias de seguridad pública en todo el país tuvieron acceso a un sistema de reconocimiento facial, buscando mejorar los servicios. (Galarza, 2021).

De igual manera en Rusia el reconocimiento facial ha sido usado en las calles de Moscú para controlar el confinamiento, y también individuos calificados como peligrosos. (Galarza, 2021). En

China, desde 2018 el sistema Dragon Flycom para imágenes en vivo de los usuarios del metro con los archivos policiales, propiciándose procesos de detención cuando el algoritmo identifica un positivo en el sistema, lo que demuestra la efectividad de la validación de reconocimiento facial en pruebas de seguridad. (Aldama Z como se citó en Galarza, 2021, pag.502).

En este sentido, como experiencia demostrada, la aplicación del reconocimiento facial también se ha sugerido en España, para vigilar exámenes online, y para el control de instalaciones por la seguridad privada. (Galarza, 2021).

Por lo tanto, el uso del reconocimiento facial en la autenticación de estudiantes durante los exámenes en línea ha seguido siendo objeto de investigación y desarrollo por lo que es muy probable que seguirá habiendo avances en esta área, ya que la tecnología continúa evolucionando. A medida que el reconocimiento facial se ha vuelto más accesible y preciso, se han llevado a cabo más estudios para evaluar su eficacia en la prevención del fraude académico durante los exámenes en línea. Estos estudios han explorado diferentes enfoques, como la monitorización continua del rostro del estudiante durante el examen para verificar su identidad y detectar posibles intentos de suplantación.

Otro de los enfoques investigados también es la monitorización continua del rostro del estudiante durante el examen para verificar su identidad y detectar posibles intentos de suplantación. Esta monitorización en tiempo real permite asegurar que el estudiante que inició el examen sea el mismo que lo finaliza, evitando así la posibilidad de que alguien más realice el examen en su lugar, proporcionando una mayor seguridad a las instituciones de los aspirantes que acepta y el nivel académico demostrado desde la preparatoria.

Definitivamente la validación de identidad en línea, respaldada por tecnologías como el reconocimiento facial, se ha convertido en un tema de discusión relevante en el ámbito educativo, por lo que la seguridad en los procesos de autenticación es fundamental para garantizar la integridad académica y la confiabilidad de los resultados obtenidos en los exámenes en línea.

Es importante destacar entonces, que la investigación y desarrollo en este campo continúa, y es probable que se sigan realizando avances en los métodos de validación de identidad en línea, para futuros trabajos de investigación. Estos avances tienen como objetivo mejorar la precisión, la

eficacia y la usabilidad de los sistemas de autenticación facial, brindando mayor seguridad y confianza en los procesos educativos a distancia, lo que proporciona al Tecnológico Nacional de México y sus Instituciones de Educación Superior una mayor responsabilidad en la captación de sus nuevos estudiantes.

## **Conclusiones**

El objetivo de este trabajo fue realizar una revisión de literatura para conocer más ampliamente la información que existe sobre la validación de identidad en línea de bajo costo y los requisitos mínimos de hardware para el ingreso a las Instituciones de Educación Superior del Tecnológico Nacional de México, basado en un sistema neuro difuso de reconocimiento facial y reconocimiento de voz para la validación de identidad en línea, con objeto de minimizar los requisitos de hardware y los costos asociados.

Entonces, la implementación de un sistema neuro difuso basado en reconocimiento facial y reconocimiento de voz para la validación de identidad en línea ofrece una solución segura y eficiente para el acceso a las Instituciones de Educación Superior del Tecnológico Nacional de México. Este enfoque biométrico aprovecha las características únicas del rostro y la voz de cada individuo, lo que garantiza un alto nivel de autenticidad y reduce la posibilidad de suplantación de identidad.

El sistema neuro difuso demuestra una precisión satisfactoria en la identificación de usuarios, con tasas de éxito significativas y una baja tasa de falsos positivos o negativos. Esto respalda la confiabilidad del sistema y su capacidad para distinguir de manera precisa entre usuarios autorizados y no autorizados.

Un aspecto destacado de este enfoque es la minimización de los requisitos de hardware y los costos asociados. Al utilizar dispositivos de hardware estándar, como cámaras web y micrófonos integrados en computadoras o dispositivos móviles, se reduce la necesidad de adquirir equipos especializados, lo que representa un ahorro significativo para las Instituciones de Educación Superior.

La eficiencia del sistema en términos de tiempo de respuesta y experiencia del usuario es notable. Los usuarios pueden completar rápidamente el proceso de validación en línea sin la necesidad de

intervención manual, lo que mejora la comodidad y reduce las posibles demoras en el acceso a los recursos y servicios educativos.

En tanto depende mucho que la implementación exitosa de este sistema requiere consideraciones adicionales, como la integración con la infraestructura existente de las Instituciones de Educación Superior, el cumplimiento de regulaciones de privacidad y seguridad, y la capacitación del personal encargado de administrar y operar el sistema.

De igual manera los beneficios de los sistemas de validación de identidad de bajo costo en los sistemas de validación de identidad en línea basados en reconocimiento facial y de voz de bajo costo ofrecen ventajas significativas, de tal manera que, al utilizar hardware comúnmente disponible, como cámaras web y micrófonos integrados en dispositivos electrónicos, móviles de gama baja, esto reduce la necesidad de adquirir equipos especializados, lo que disminuye los costos asociados.

En conclusión, la validación de identidad en línea a través de un sistema neuro difuso basado en reconocimiento facial y reconocimiento de voz presenta ventajas significativas en términos de seguridad, eficiencia y reducción de costos. Su implementación puede mejorar el acceso a las Instituciones de Educación Superior del Tecnológico Nacional de México al tiempo que garantiza un nivel adecuado de autenticación de los usuarios. Estos hallazgos resultados de la revisión de literatura presentada en este trabajo, respaldan la viabilidad y la relevancia de adoptar esta tecnología en el ámbito educativo y ofrecen una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en este campo.

### **Futuras investigaciones y desarrollos**

Aunque se han logrado avances significativos en la validación de identidad en línea, sigue siendo un campo en constante evolución. Se recomienda continuar investigando y desarrollando soluciones que mejoren la precisión y la robustez de los sistemas de validación, al tiempo que reduzcan aún más los requisitos de hardware y los costos asociados.

Las futuras investigaciones podrían centrarse en mejorar la precisión y robustez del reconocimiento facial, explorar la integración de múltiples modalidades biométricas, mejorar la experiencia del usuario, abordar consideraciones éticas y legales, y evaluar la efectividad y eficiencia de los sistemas

de validación de identidad en línea en contextos educativos. Estas investigaciones pueden contribuir al desarrollo de soluciones más avanzadas y efectivas para garantizar la seguridad y la autenticidad en los entornos de educación en línea.

En resumen, la validación de identidad en línea es una necesidad creciente en las Instituciones de Educación Superior del Tecnológico Nacional de México, y los sistemas de bajo costo basados en reconocimiento facial y de voz ya que ofrecen una solución efectiva. Sin embargo, es importante tener en cuenta las consideraciones de privacidad y seguridad, y seguir investigando para mejorar y optimizar estos sistemas en el futuro.

## BIBLIOGRAFÍA

Bjegojević, B., Chiara Leva, M., Balfe, N., Cromie, S., & Longo, L. (2021). Physiological Measurements for Real-Time Fatigue Monitoring in Train. *31th European Safety and Reliability Conference*, 2744-2751.

Çakit, E., & Karwowski, W. (2020). A Review on Applications of Soft Computing Techniques in Neuroergonomics During the Last Decade. En H. Ayaz, & U. Asgher, *Advances in Neuroergonomics and Cognitive Engineering* (págs. 37-45). Ankara: Springer.

Das, B. (1 de Mayo de 1990). Personal, Unavoidable Delay, and Fatigue Allowances for Setting Performance Standards. *International Journal of Operations & Production Management*, 10(5), 62-70.

Du, B., Tandoc, M. C., Mack, M. L., & Siegel, J. A. (2020). Indoor CO2 concentrations and cognitive function: A critical review. *International Journal of Indoor Environment and Health*, 1067-1082.

El Mouayni, I., Etienne, A., Lux, A., & Siadat, A. (Enero de 2019). A simulation-based approach for time allowances assessment during production system design with consideration of worker's fatigue, learning and reliability. *Computers & Industrial Engineering*, 139.

Galvan, J., & Galvan, M. (2017). *Writing Literature Reviews*. New York: Taylor & Francis.

Hsiao, C.-K., Tsai, Y.-J., Lu, C.-W., Hsiung, J.-C., Hsiao, H.-Y., Chen, Y.-C., & Tu, Y.-K. (2022). Effects of Kinesio taping on forearm supination/pronation performance fatigability. *BMC Musculoskeletal Disord*, 131.

Jahncke, H., Hygge, S., Mathiassen, S. E., Hallman, D., Mixter, S., & Lyskov, E. (2017). Variation at work: alternations between physically and mentally demanding tasks in blue-collar occupations. *Ergonomics*, 1218-1227.

- Mital, A., Bishu, R. R., & Manjunath, S. (1991). Review and evaluation of techniques for determining. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 8(2), 165-178.
- Mridha, M. F., Das, S. C., Kabir, M. M., Lima, A. A., Islam, R., & Watanobe, Y. (2021). Brain-Computer Interface: Advancement and Challenges. *Sensors (Basel)*, 5746.
- Noh, Y., Kim, S., Jang, Y. J., & Yoon, Y. (2021). *Modeling Individual Differences in Driver Workload Inference Using Physiological Data*. Hove, Inlgaterra: International Journal of Automotive Technology.
- Oficina Internacional del Trabajo. (1977). *Introducción al Estudio del Trabajo*. Ginebra: Organización Intenacional del Trabajo.
- Oficina Internacional del Trabajo. (1979). *Introduction to Work Study*. Ginebra: Organización Internacional del Trabajo.
- Sahni, P., & Kumar, J. (2020). Effect of Nature Experience on Fronto-Parietal Correlates of Neurocognitive Processes Involved in Directed Attention: An ERP Study. *Annals of Neurosciences.*, 136-147.
- Uhl, M., Lindenmann, A., & Matthiesen, S. (2020). Analysis of factors influencing the productivity of hammer drilling – user forces, human fatigue, drilling direction, and drill bit. *Applied Ergonomics*.
- Xu, T., Xu, L., Zhang, H., Ji, Z., Li, J., Bezerianos, A., & Wang, H. (2022). Effects of Rest-Break on mental fatigue recovery based on EEG dynamic functional connectivity. *Biomedical Signal Processing and Control*, 103806.



## **Redes Bayesianas y sus Aplicaciones Contemporáneas**

*Bayesian Networks and their Contemporary Applications*

**Luz Angélica Aguilar Chávez**

Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez/TECNM

Laach19@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0000-5700-6399>

**Manuel Arnoldo Rodríguez Medina**

Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez/TECNM

Manuel\_rodriguez\_itcj@yahoo.com

<https://orcid.org/0000-0003-1676-0664>

**Lizette Alvarado Tarango**

Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez/TECNM

Lalvarado@itcj.edu.mx

<https://orcid.org/0009-0005-3778-2282>

### **Resumen**

Las redes bayesianas se han desarrollado en la época contemporánea por su versatilidad en el modelado de situaciones en una diversidad de áreas como lo son las médicas, sociales, políticas, escolares, de ingeniería, entre otras. El modelado de las redes bayesianas ha promovido la importancia de la inteligencia artificial, utilizando herramientas estadísticas, así como el análisis de áreas de confiabilidad para el uso de la incertidumbre, aspecto inherente de procesos tanto sociales como industriales, la minería de datos con técnicas estadísticas, como el teorema de Bayes y el cálculo de probabilidades. El modelado de problemas por medio de redes bayesianas tiene como finalidad la mejora de los riesgos operacionales de procesos, trabajando, así como auxiliares en la toma de decisiones y formulando estrategias de mejora en situaciones de importancia. Más allá de las redes bayesianas, la integración de los árboles de falla como instrumentos de complemento a los modelos bayesianos funcionan para encontrar las causas y efectos de los componentes de un sistema, el cual puede ser problemas de índole escolar, social, industrial y más, permitiendo establecer estas relaciones causa-efecto para poder establecer las relaciones y fuerzas de dependencia existente entre las mismas.

## **Palabras clave**

Redes Bayesianas, Estadística, Árboles de falla, Teorema de Bayes, Probabilidad

## **Abstract**

Bayesian networks have been developed in contemporary times due to their versatility in modeling situations in a variety of areas such as medical, social, political, school, engineering, among others. Bayesian network modeling has promoted the importance of artificial intelligence, using statistical tools as well as the analysis of reliability areas for the use of uncertainty, an inherent aspect of both social and industrial processes, data mining with statistical techniques, such as Bayes' theorem and the calculus of probabilities. The modeling of problems by means of Bayesian networks has the purpose of improving the operational risks of processes, thus working as auxiliaries in decision making and formulating improvement strategies in important situations. Beyond Bayesian networks, the integration of fault trees as complementary instruments to Bayesian models work to find the causes and effects of the components of a system, which can be problems of a school, social, industrial and more nature. , allowing to establish these cause-effect relationships in order to establish the relationships and forces of dependency between them.

## **Key Words**

Bayesian Networks, Statistics, Fault Tree, Baye's Theorem, Probability

## **Introducción**

Las aplicaciones de las redes bayesianas son abundantes dentro de las distintas áreas de conocimiento, en las ciencias duras, como la estadística para el análisis de datos, aplicaciones de la ingeniería, confiabilidad para la integración de la incertidumbre, pero también en áreas sociales, como la educación, psicología o también en áreas de la salud, como la medicina, entre muchas otras. Por ejemplo, en un trabajo desarrollado por Molina (2008) en los sistemas portuarios de España, las redes bayesianas se aplicaron como un método de caracterización de los parámetros físicos de las terminales de contenedores, buscando determinar escenarios en donde la eficiencia de las mismas

fueran componentes de métodos probabilísticos como las redes bayesianas. Una aplicación más es en la ingeniería civil, en donde su aplicación se desarrolla en la predicción riesgos en proyectos de software para minimizar los fracasos que ocurren debido a que el desarrollo de estos sistemas es costoso. De este modo, la aplicación de las redes bayesianas es conveniente para modelar el conocimiento con el que cuentan los expertos y la inclusión de la incertidumbre de ciertos eventos.

La ingeniería en hardware es otro sector que se ha beneficiado del uso de las redes bayesianas para el diagnóstico de fallas en procesadores, como también se ha hecho en la medicina para el análisis de supervivencia de individuos en ciertas enfermedades o en patología diagnosticando enfermedades, tratamiento trastornos del sueño, traumatología y desorden de la conducta. También en la inteligencia artificial desarrollando el reconocimiento de gesticulaciones para adiestrar las acciones de robots.

Las aplicaciones de las redes bayesianas tienen como objetivo la mejora de la prevención de un riesgo operacional, fungiendo como auxiliar para la toma de decisiones en situaciones emergentes y formulando mejoras en las estrategias operacionales. Los modelos probabilísticos que constituyen las redes Bayesianas son herramientas eficientes que caracterizan de manera eficiente y analizan adecuadamente la incertidumbre de los procesos, la cual se puede encontrar en situaciones como el análisis de riesgo, ingeniería de seguridad, diagnóstico de fallas y más.

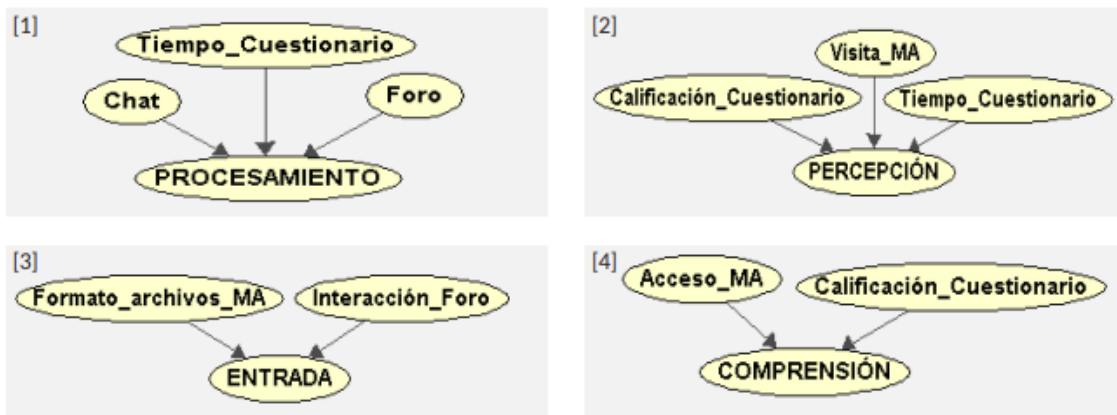
Un modelo diseñado para analizar la eficiencia de los parámetros de los promedios acumulados de estudiantes de ingeniería en la India fue realizado por Ranjan (2016), con la finalidad de mejorar el rendimiento de los alumnos de la facultado. Dicho modelado utilizando redes bayesianas dio como resultado conocer que las características educativas del estudiante se perfilaron como el parámetro más importante para el buen rendimiento de los mismos, al igual que el contexto económico de la familia, la motivación para realizar una carrera profesional, antecedentes educativos de la familia, entre otros.

Un modelo que permitía anticipar la manera en la que se secuenciaban los cursos para alumnos de pregrado en la especialidad de informática o ingeniera fue realizado por Pumpauang, et al. (2008) para diseñar un programa de apoyo para los estudiantes en la planificación de la toma de cursos cada semestre, ayudando así, a mejorar el desarrollo curricular de los estudiantes y de la

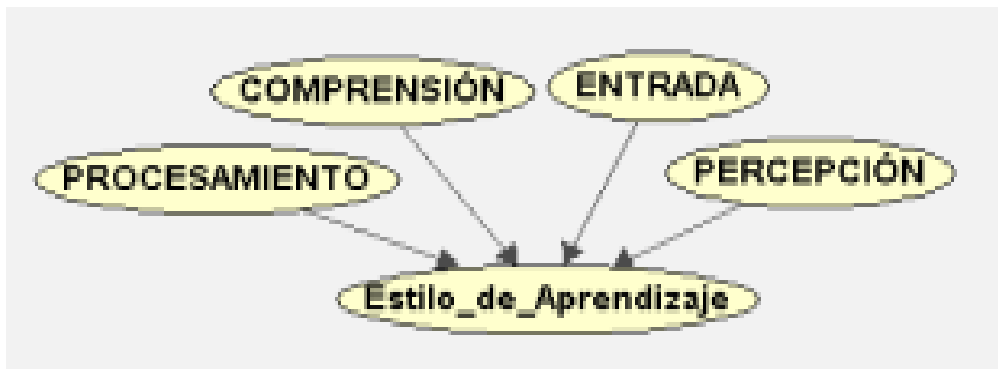
universidad. Una manera de identificar si los estudiantes pudieran obtener notas finales de curso y que tuvieran la necesidad de ayuda de las autoridades educativas es con la predicción de calificaciones parciales de los estudiantes. De esta manera, Sharabiani (2014) elaboro un modelo con el objetivo específico de predecir las calificaciones de los estudiantes y encontrar una manera confiable de identificar el rendimiento que tendrían los estudiantes y pronosticar sus calificaciones en cada clase, brindando una expectativa de logro en el estudiante.

También, en un estudio realizado por Wang, et al. (2010), los resultados permitieron establecer una relación entre la calidad de aprendizaje y la competitividad de los alumnos en su futura vida social. Al igual que Lopes-faicán y Chamba-eras en 2014 modelaron la forma en la que los estudiantes aprenden en el aula, obteniendo un diagnóstico y teniendo la posibilidad de predecir los estilos de aprendizaje a partir de los tipos de procesamiento, percepción, interacción del alumno en los grupos de apoyo y la comprensión de los materiales. A continuación, se muestra el diseño de las redes que se utilizaron en dicho modelo.

Figura 1. Red Bayesiana propuesta por Lopes-faicán y Chamba-eras en 2014.



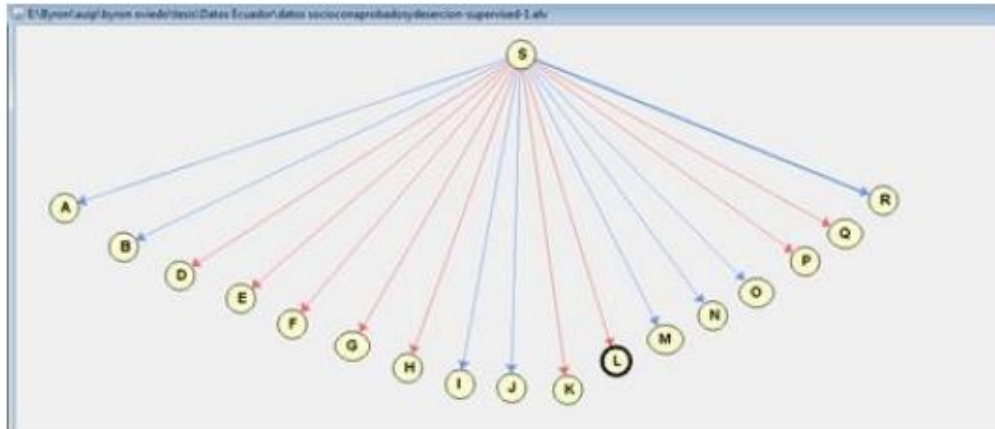
Figuras 1-4. [1] Dimensión procesamiento. [2] Dimensión percepción. [3] Dimensión entrada. [4] Dimensión comprensión. Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Lopez-faican, L. G. y Chamba-eras, L. A. (2014). Redes bayesianas para predecir el estilo de aprendizaje de estudiantes en entornos 3(2):107–115.

Una investigación que se utilizó para realizar diagnósticos de problemas de deserción estudiantil en la Universidad de Quevedo, en la facultad de ciencias de la ingeniería fue realizada por Oviedo, et al. (2016), donde se utilizaron modelos probabilísticos para poder realizar sus conclusiones. Esta investigación se basó en el uso de las redes bayesianas, contando con una base de datos referentes a 773 alumnos de la institución, obteniendo como resultado que el factor de perfil socioeconómico de los individuos, que en ocasiones los obliga a trabajar, repercute directamente en que los alumnos reprobren sus cargas académicas. La siguiente figura muestra el modelo bayesiano utilizado en esta investigación.

Figura 2. Modelo bayesiano para analizar los posibles factores que causan reprobación de materias presentado



Fuente: Oviedo, B., Puris, A., Villacis, A., Delgado, D., Moreno, A. (2016). Análisis de datos educativos utilizando Redes Bayesianas. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/282349418>

Así, es demostrable la utilidad y trascendencia de la herramienta de las redes bayesianas como técnica de modelado de situaciones para determinar dependencias y analizarlas para la toma de decisiones.

## **Materiales y métodos**

### ***Árboles de falla***

Los árboles de falla se pueden considerar también en el modelado de situaciones por medio de redes Bayesianas, puesto que estos buscan encontrar las posibles causas de la falla de un proceso, el cual en ingeniería podrían ser situaciones como la falla de una impresora 3D, la falla de una bomba de combustible, pero también se pueden utilizar para modelar situaciones de índole social como las causas de la deserción escolar, entre muchas otras.

Las estructuras gráficas de los árboles de falla utilizan razonamientos de lógica booleana, en donde causas de falla de un proceso o producto, incluyendo las externas o condicionantes se representan

mediante símbolos y son unidos mediante conectores lógicos (“y” , “o”) que permiten establecer relaciones entre ellos. Esta es la lista de algunos símbolos utilizados en este tipo de análisis:

Tabla 1. Simbología básica utilizada en árboles de falla.

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
	Evento principal: se utiliza para representar un acontecimiento indeseable, a donde todas las causas de falla se conducen.
	Puerta “OR” o conector lógico “o”: se utiliza para especificar si la salida si existe la posibilidad de cualquier entrada, estas últimas deben de ser necesarias y suficientes para provocar el evento de salida.
	Puerta “AND” o conector lógico “y”: se utiliza para representar la salida cuando todas las entradas se presentan. Es decir, todas las entradas en conjunto sin necesarias y suficientes para provocar el evento de salida.
	Evento básico: es aquel con el que inicia la falla.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos mediante un árbol de fallas (FTA) pueden ser de índole cualitativo o cuantitativo con respecto a las fallas de los sistemas. Las primeras indicando las causas de la falla,

las rutas de comportamiento o incluso las áreas de conflicto del sistema, ayudando así a comprender las relaciones de función del sistema, así como las fallas potenciales, fungiendo entonces como un medio de evaluación del diseño y confiabilidad de los procesos. Por otro lado, el análisis cuantitativo proveerá de una estimación probabilística del evento principal y entonces permitiendo evaluar la seguridad y confiabilidad.

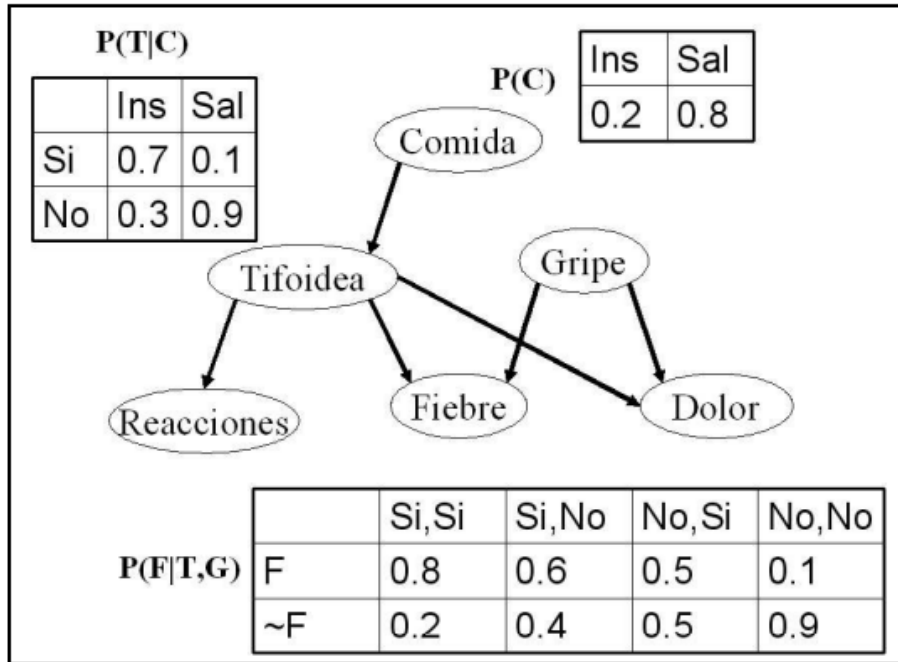
Los árboles de falla analizan las situaciones mediante la descomposición del evento en sus integrantes, para determinar la probabilidad de que el evento principal o de interés, denominado evento cima falle a raíz de alguno de sus componentes primarios. De forma contraria, la estructura de la red Bayesiana coloca en la parte alta las causas iniciales que no tienen ninguna otra que las provoquen y van desencadenando una serie de conexiones hasta llegar a las más cercanas a causar un problema principal.

### ***Redes Bayesianas***

Una red Bayesiana se puede definir como un arreglo de variables, llamadas nodos conectadas entre sí mediante arcos que representan relaciones entre ellas, formando así una representación visual llamado grafo acíclico dirigido (DAG), por sus siglas en inglés, es decir, las variables de la red se conectan entre sí, representando un orden o dirección establecida, evitando ciclos entre ellas. Por otra parte, el componente cuantitativo es una parametrización de las relaciones establecidas entre las variables que serán representadas como un conjunto de probabilidades, ya sean condicionales o simples y representarán entre todas las existentes una distribución de probabilidad conjunta que caracterizara el problema que se esté abordando.



Figura 3: Red Bayesiana; DAG y parametrización.



Fuente: <https://ccc.inaoep.mx/~esucar/Clases-mgp/caprb.pdf>

Estando determinada la forma en la que las variables a considerar en la red se relacionan y las conexiones existentes entre las mismas los procesos de inferencia se pueden comenzar a aplicar, permitiendo así la actualización en el conocimiento a priori que se tiene sobre una situación a una parametrización nueva que sea más confiable. La distribución de probabilidad conjunta se representa de la siguiente manera:

$$P(x) = \prod_{v \in V} P(X_v | X_{pa(v)}) \quad (1)$$

siendo esta el producto de todas las distribuciones de probabilidad de cada nodo de la red teniendo en cuenta las relaciones existentes con sus antecesores o parientes.

Los modelos de redes Bayesianas son modelos estadísticos en los que los análisis de datos se realizan mediante tres principales pasos:

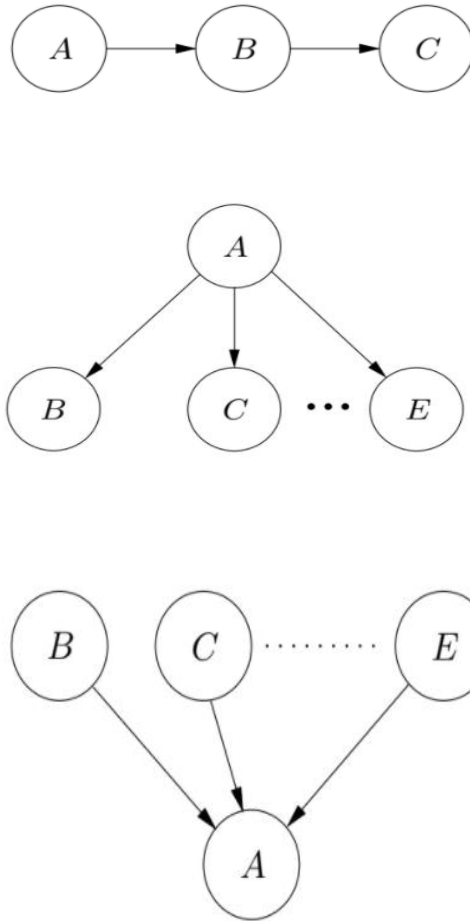
1. En primer lugar, se debe de asignar una distribución de probabilidad que se ajuste al comportamiento de los datos para poder entonces, establecer un modelo de probabilidad

basado que obtenga una distribución de probabilidad conjunta para los parámetros de interés cuantificables del problema.

2. La recolección de datos nuevos sobre la marcha del trabajo del modelo, se consideran evidencia y su introducción al modelo se traduce en el cálculo de una distribución posterior, la cual será visualizada como una probabilidad condicional de los parámetros involucrados en el modelo.
3. Dada la construcción del modelo, la recolección de evidencia o datos nuevos y la introducción de los mismos al modelo, generando una propagación y actualización del conocimiento se realiza, el siguiente paso importante es la evaluación del modelo, pues se debe de verificar que su construcción y manejo sea lo mayormente apegado y útil para el problema junto con las implicaciones de la distribución obtenida.

El modelado y manejo de las redes bayesianas en ocasiones es una tarea difícil de manejar, puesto que los procesos de actualización y agregación de evidencia, igual que los cambios en las creencias sobre la distribución de probabilidad de un conjunto de variables depende tanto de las observaciones realizadas como del conocimiento previo existente, de esta manera en ocasiones no solo se trabaja con datos obtenidos, sino que es importante y en ocasiones necesario el contar con expertos en el tema que puedan aportar su conocimiento y así construir redes bayesianas confiables.

Figura 4. Ejemplos de tipos de redes bayesianas.



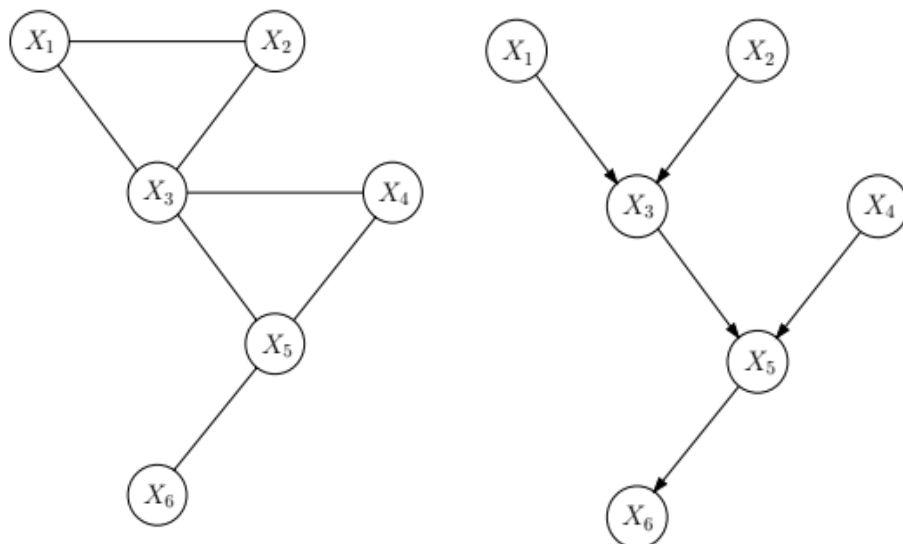
Fuente: Nielsen, T. Jensen, F. (2008). [Imagen] Bayesian Networks and Decision Graphs.

La figura anterior describe los tipos de redes bayesianas existentes. En primer lugar, se puede identificar la red bayesiana conectada en serie, donde la transmisión de información se realiza de forma directa entre un antecesor y sucesor en la estructura. Existe también la estructura divergente, caracterizada por contar con más de un nodo singular como hijo de un nodo. En este tipo de red, la transmisión de la información se realiza de padre a varios hijos. Una red convergente es aquella en donde distinta información proveniente de varios padres llega a un mismo nodo hijo, es decir, varios nodos tienen en común el mismo nodo descendiente, así, la información de un nodo que no se tiene conocimiento puede ser obtenida a partir del conocimiento de la información de sus nodos antecesores.

Una red causal es una forma general de conocer las estructuras de las que se desprenden las redes bayesianas y están definidas por un conjunto de variables y un conjunto de enlaces dirigidos entre variables, así estas estructuras se denominan gráfico dirigido. Sus relaciones se pueden comprender como sigue: si hay un vínculo de A a B, decimos que B es un hijo de A, y A es un padre de B. Es decir, los parientes de una variable V en un grafo dirigido F son el conjunto de variables N con un borde entre N y V. Se entiende como descendiente de una variable V en un grafo dirigido G a el conjunto de variables N tal que existe un recorrido desde V a N y los NO descendientes de una variable V son todas aquellas distintas a V, así como sus parientes y descendientes.

Tomando como referencia lo anterior, una red bayesiana está compuesta por un gráfico, formado por un conjunto de variables representadas como nodos  $V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ , además de un conjunto de recorridos entre ellas, denominados arcos A que están identificados por un par de nodos de V, es decir,  $a_{ij} = (v_i, v_j)$ . Existen grafos adirigidos y dirigidos, los primeros son aquellos en los que no existe una dirección entre los arcos existentes entre las variables  $a_{ij}$ . Por otro lado, los grafos dirigidos son aquellos en donde los arcos tienen una dirección que vendrá a identificar la relación de padre e hijo entre las variables, es decir,  $a_{ij}$  es un par ordenado y el arco tiene una dirección específica. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de grafos dirigidos y adirigidos.

Figura 5. Tipos de gráficos. Izquierda: grafo adirigido. Derecha: grafo dirigido.



Fuente: Riggelsen, C. (2008). [Imagen] Approximation Methods for Efficient Learning of Bayesian Networks.

Así, una red bayesiana debe de cumplir con las siguientes características:

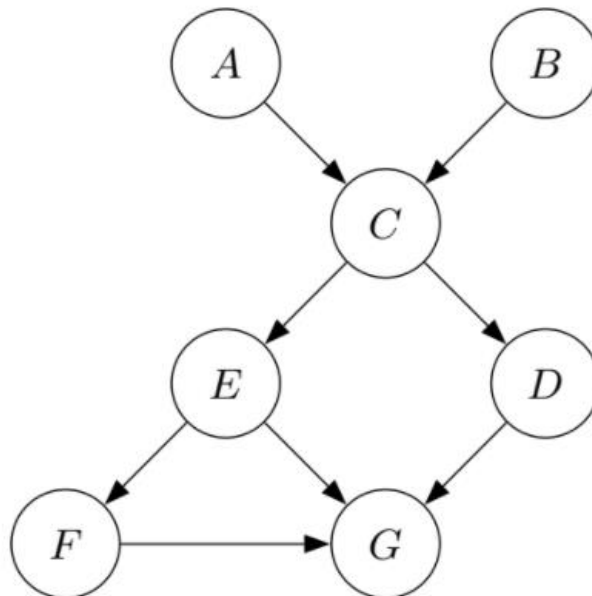
- Contar con un grafo acíclico dirigido  $G = (V, A)$  donde para cada variable aleatoria  $X_j$  representada por un nodo  $v_i$  en  $V$  exista una relación de independencia condicional y todas las relaciones existentes entre las variables, es decir,  $a_{ij}$  sea un par ordenado, exista un arco con una dirección específica.
- Tener una distribución de probabilidad global  $X$  con parámetros  $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_p)$ , donde  $\theta_i$  consiste de las probabilidades locales  $(\theta_{x_i}|X_{pa(i)})$

$$P(x) = \prod_{v \in V} P(X_v | X_{pa(v)}) \quad (2)$$

$$P_r(X|m, \theta) = \prod_{i=1}^P P_r(X_i|m, X_{pa(i)}, \theta_i) = \prod_{i=1}^P \theta(x_i | X_{pa(i)}) \quad (3)$$

A continuación, se presenta un ejemplo de red Bayesiana:

Figura 6. Ejemplo de Red Bayesiana.



Fuente: Nielsen, T. Jensen, F. (2008). [Imagen] Bayesian Networks and Decision Graphs.

Los elementos listados anteriormente definen los requerimientos estadísticos necesarios en el modelado y construcción de una red Bayesiana. Sin embargo, más allá de lo anterior, una red bayesiana se diseña comenzando con la decisión de qué variables son relevantes para el análisis de una situación y cuáles son sus posibles estados o valores. Por ejemplo, si existieran variables como el sexo, sus estados serían hombre y mujer; una variable denominada estado civil se puede categorizar con valores tales como soltero, casado, divorciado o viudo. Seguido de lo anterior, la construcción de la red bayesiana se realiza estipulando las conexiones existentes entre las variables elegidas anteriormente. La parametrización del modelo es aquella construida en base a las tablas de probabilidades de cada variable, las cuales tienen su estructura definida en virtud de las relaciones existentes entre los antecesores y sucesores, es decir, las tablas de probabilidad pueden ser de probabilidad simple o condicional.

### **Aplicación redes bayesianas a problemas de transporte urbano**

Un análisis realizado para el modelo del uso del transporte público en Ciudad Juárez fue realizado por Aguilar, et al. (2021), en dicho documento se analiza la trascendencia del uso de las Redes Bayesianas, incluyendo variables en el modelo como: edad, sexo, nivel escolar, entre otras, referentes a las características personales y contextuales de las personas que utilizan los transportes públicos de la ciudad. Fue tomada en cuenta una muestra de los usuarios del sistema de transporte utilizada en el suroriente de Ciudad Juárez y tomando como base las variables mencionadas anteriormente fue modelada y construida una red Bayesiana, con la cual fue posible realizar una serie de relaciones y procesos operacionales que permitieron realizar inferencias y probabilidades estadísticas.

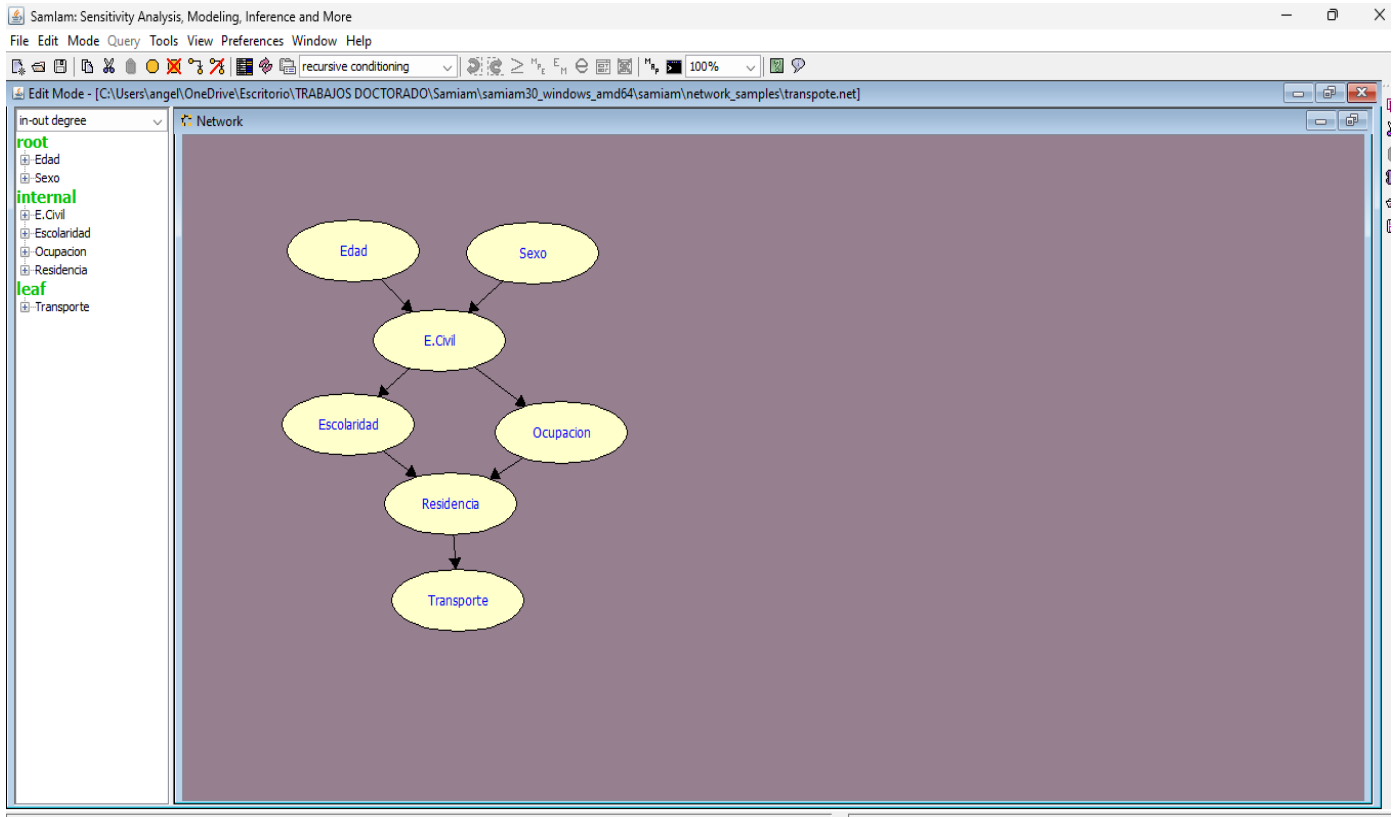
La situación del sistema de transporte público en la ciudad fue analizada debido a que las rutas troncales de transporte de uso público estaban en su proceso de aprobación para ser implementadas en otras de las avenidas principales de la ciudad, siendo de relevancia entonces, su análisis para poder analizar la toma de decisiones con respecto a la inversión de fondos económicos en la ciudad.

Toda ciudad busca tener un desarrollo industrial exitoso, buscando desarrollar e implementar las tendencias mundiales de urbanización. En este sentido, la búsqueda de las implementaciones de los sistemas de transporte urbanos de primera calidad como lo son los “Bus Rapid Transit” (BRT) por sus siglas en inglés son un punto que se ha buscado expandir en la ciudad para conectar las avenidas y puntos de interés en la ciudad.

Como lo menciona Alcántara (2010), los sistemas de transporte de las ciudades son pilares de la economía en las urbes, ya que un gran porcentaje de los habitantes de las localidades son usuarios de estos sistemas para realizar actividades esenciales de la vida diaria. Se ha considerado que factores que intervienen los sistemas utilizados para la movilidad de las personas son aquellos como: el género, la edad, ocupación y escolaridad. Pero también aquellos que forman parte del contexto social de los usuarios deben de tomarse en cuenta como lo son el tamaño de la familia, ingreso económico, lugar de residencia y método de transporte.

La construcción de la red de este trabajo se hizo definiendo las variables de interés y la forma en la que interactúan las mismas. Para este problema, la red bayesiana consta de dos variables padres, las cuales son: EDAD y SEXO, seguido de ESTADO CIVIL, la cual tiene como antecesoras las variables EDUCACION y OCUPACION, los cuales a su vez tienen como sucesor la variable RESIDENCIA, que se relaciona como padre de TRANSPORTE, siendo esta la variable de interés de analizar. A continuación, se presenta la red Bayesiana utilizada en este modelo.

Figura 7. Red Bayesiana utilizada en Aguilar, et al. (2021).



Fuente: Aguilar, L., et al. (2021). Redes Bayesianas Aplicadas a Sistemas de Transporte Urbano: Un Caso Semihipotético.



Como se menciona en Aguilar, et al. (2021), la base de datos formada se hizo en base a la recolección de información respecto a las variables de interés por medio de la aplicación de cuestionarios a los usuarios del transporte público. Estos datos permiten obtener información en forma de probabilidades que se introducen como forma de una parametrización a cada variable involucrada en el tomando en cuenta las conexiones entre las variables proposicionales, y su relación causa-efecto. Un paso anterior al cálculo de las tablas de probabilidad condicional y de hacer la recolección de los datos es la estructuración de las opciones de respuesta a cada una de las interrogantes que se comportan como variables en la red Bayesiana. Para este modelo, los estados posibles de cada variable se explican de la forma siguiente:

Tabla 2. Estados posibles de las variables incluidas en el modelo.

Variable	Estados
EDAD	joven, adulto, amayor (adulto mayor)
SEXO	hombre, mujer
ESTADO CIVIL	solt (soltero), cas (casado), viud (viudo), div (divorciado)
OCUPACIÓN	estudiante, empa (empleo alto), empb (empleo bajo)
EDUCACIÓN	prim (primaria), sec (secundaria), prep (preparatoria), prof (profesional)
RESIDENCIA	sur, suro (sur-oriente), poniente
TRANSPORTE	camión, troncal, carro

Fuente: Elaboración propia.

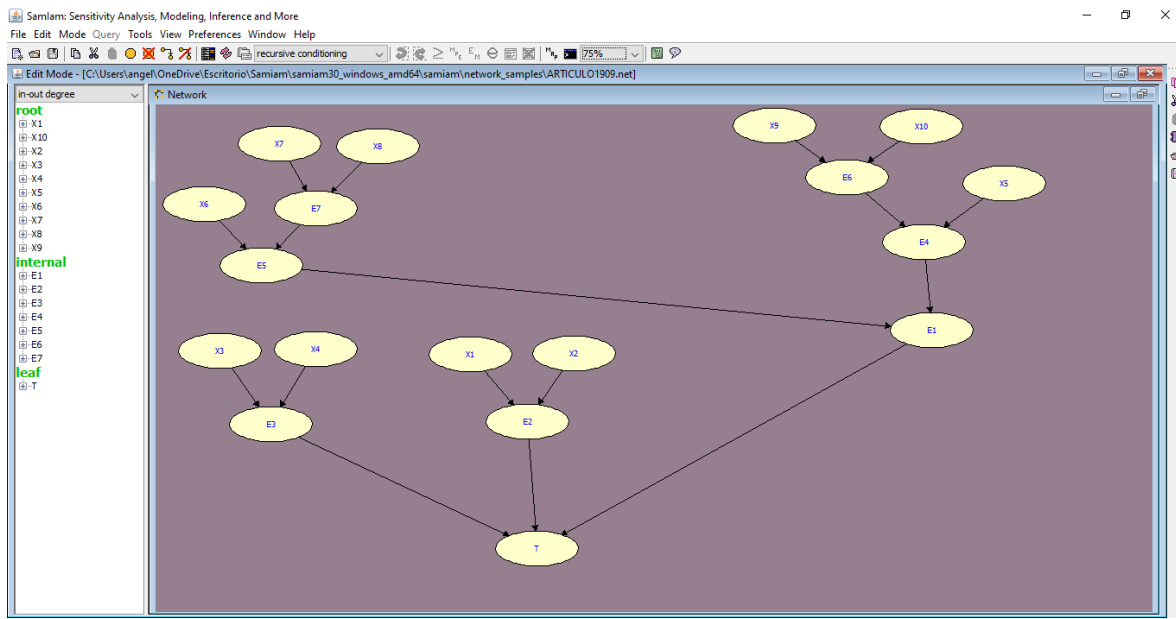
En esta investigación participaron 40 usuarios de la ruta troncal suroriente de la ciudad, para los cuales las opciones de residencia fueron diseñadas. Una vez construida la base de datos, se procedió a calcular las tablas de probabilidad condicional para obtener la parametrización de la red, de manera que los procesos estadísticos se puedan obtener mediante la aplicación de inferencias con base a la introducción de evidencia a la red, resultando así en la generación de conclusiones y obtención de efectos de cada variable en sus conexiones o dependencias con alguna otra.

## Aplicación de redes bayesianas a una impresora

Los dispositivos elaborados en la industria deben de someterse a procesos y verificaciones de diseño y calidad puesto que una vez colocados en el mercado deben de cumplir con un tiempo de vida útil, el cual es estudiado en base a la confiabilidad de los procesos y diseños del producto.

Para diseñar redes Bayesianas se debe de contar con información respecto al producto que se desea analizar, como aquellas causas de una probable falla en uno o varios de los componentes, las cuales se obtienen de acuerdo a los datos históricos del funcionamiento de los componentes. Así, se involucra el concepto de confiabilidad, el cual se comprende como la probabilidad de que un sistema o componente realice la tarea que le compete sin ninguna falla durante un tiempo establecido. El siguiente ejemplo se elaboró basado en el análisis de las causas de falla de una impresora, para la cual se han especificado 17 componentes del producto que pueden tener relación entre sí y que la falla de uno o varios de ellos resultan en la falla final de la impresora, identificada como T. El diseño del modelo se presenta a continuación:

Figura 8. Diseño de la red Bayesiana para una impresora.



Fuente: elaboración propia

Para este trabajo se tomaron en cuenta 20 simulaciones, donde escenarios de falla y correcto funcionamiento de los componentes de una impresora, categorizándolas en dos opciones: falla (0)

o no falla (1). La siguiente figura muestra el resultado de la base de datos en donde cada renglón representa una simulación de situaciones de falla o funcionamiento de los componentes de las impresoras y por ende del producto en general (T).

Figura 9. Base de datos para escenarios de fallas y no fallas de distintos elementos de una impresora 3D

	T	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1
2	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1
3	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1
4	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0
5	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0
6	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1
7	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0
8	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0
9	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1
10	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1
11	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0
12	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0
13	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0
14	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1
15	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0
16	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0
17	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1
18	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1
19	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0
20	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0

Fuente: Elaboración propia.

### Aplicación de redes bayesianas combinadas con árboles de falla a una bomba de combustible

La herramienta de árboles de falla permite analizar las posibles causas que llevan a un evento de falla. Sin embargo, esta herramienta utiliza para obtener dicha información el FMEA, es decir, el análisis del modo de falla y efecto, por sus siglas en inglés, la cual se identifica como una metodología donde se analizan riesgos, identificando y analizando todos los modos de falla de un sistema, tanto

en etapas de diseño como de proceso, hasta los momentos de verificación y validación del producto de la fabricación. Como lo menciona Yang (2006), el FMEA se debe de considerar en dos partes, uno para analizar las fallas y efectos en el proceso de diseño (DFMEA) y otro en el proceso (PFMEA). Las industrias tienen la tarea importante de identificar en las etapas de diseño y proceso indicadores de falla o indicadores de desempeño que logren caracterizar la operación del sistema, formando hipótesis de qué tipo de fallas y como influyen estas en el proceso o producto. La finalidad de estos análisis es detectar oportunamente estas áreas de oportunidad para poder realizar acciones correctivas, evitando así los altos costos de scrap o de producción unitaria.

Las maneras de analizar las operaciones de un sistema son: analizar las distintas formas en las que un proceso o sistema opera de forma correcta y exitosa, es decir, bajo los estándares establecidos de operación y tiempo de vida definidos en los procesos de diseño y producción, o bien, listando las formas de que el sistema falle, es decir, no siga las pautas de funcionamiento para las que fue diseñado. Así, el objetivo básico del análisis de un sistema es obtención de información con relación al funcionamiento y no la obtención de un modelo del sistema.

Tomando en cuenta que los árboles de falla son herramientas útiles que permiten analizar las causas de falla de un sistema y sus efectos, Givehci, et al., (2018) establece una metodología de 8 pasos para aplicar esta técnica:

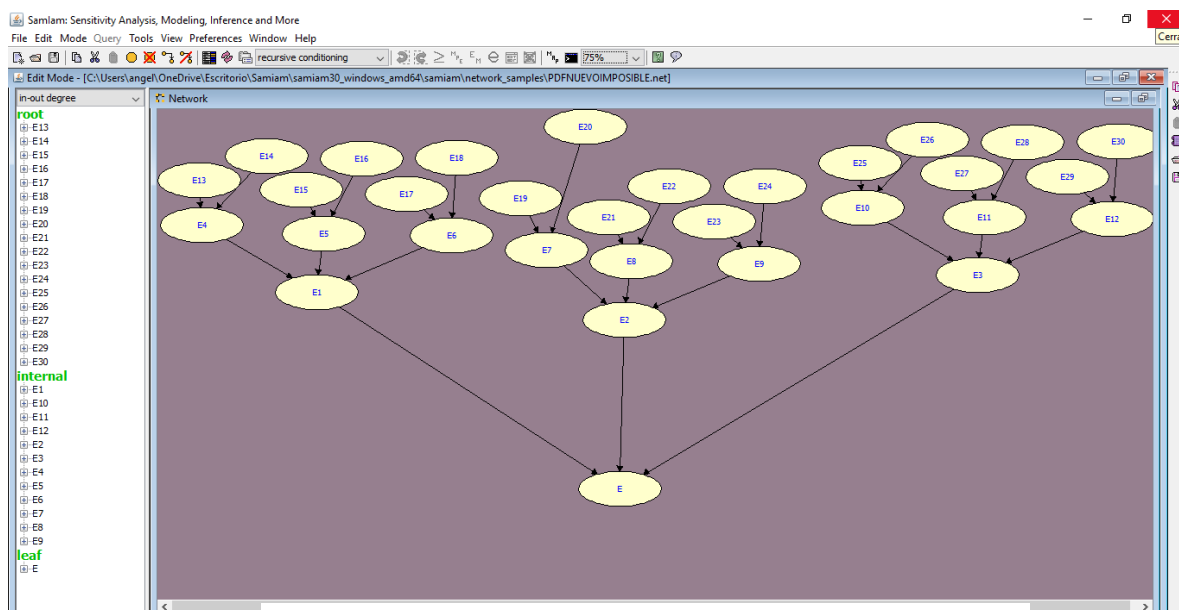
1. Establecer cuál es el objetivo para el que se construye el FTA.
2. Definir el suceso de interés del árbol de falla.
3. Definir el alcance del FTA.
4. Definir la resolución del análisis del árbol de falla.
5. Definir las reglas necesarias para el FTA.
6. Elaborar la construcción grafica del árbol de falla.
7. Evaluar el árbol de falla basado en la información con la que se cuenta.
8. Interpretar y presentar los resultados.

En el siguiente ejemplo se trabaja con los datos referentes a una bomba de combustible, la cual se analizará bajo las herramientas de árboles de falla y redes bayesianas. Para comenzar, se debe de contar con del FMEA de diseño, considerando los componentes principales de la bomba y sus modos de falla más recurrentes, a dichas fallas se les asigna una probabilidad de riesgo y se les asigna un riesgo prioritario que puede ser High (H), Medium (M) o Low (L).

Para este sistema, se definieron las clasificaciones de componentes de la bomba de combustible, seguido de los subcomponentes de cada uno de ellos, especificando las relaciones existentes entre ellas y su influencia en la posible falla del sistema. Los árboles de falla tienen una estructura en donde el evento de interés se encuentra lo más alto de la estructura y por debajo de ella se van desencadenando los componentes y sus relaciones para desencadenar la falla de la misma, como se muestra en la figura 10.

Las redes Bayesianas pueden ser construidas a partir de los árboles de falla, invirtiendo el orden de los componentes y sustituyendo los conectores lógicos existentes en sus estructuras por arcos dirigidos que vendrán a representar las formas en las que se relacionan e interactúan las variables, en este caso componentes y subcomponentes de la bomba de combustible.

Figura 10. Diseño de la red Bayesiana en software Samlam.



Fuente: elaboración propia.

Como se muestra en la imagen anterior, el evento de interés se coloca en la parte más baja de la red, dejando ver en lo superior todas las variables que influyen en el evento que se está analizando. Para este trabajo se realizó una recopilación de datos referentes a 40 escenarios distintos, con opciones de falla (1) o no falla (0) de los componentes y subcomponentes de la bomba de combustible. A partir de ello, se pueden utilizar las fórmulas comunes de cálculo de probabilidades para conocer la parametrización que se le asignará a la red Bayesiana, constituido de las probabilidades simples de los padres de la red, las probabilidades condicionales de las variables sucesoras en la red, hasta llegar al nodo principal que representa el evento de interés que es la falla de la bomba de combustible.

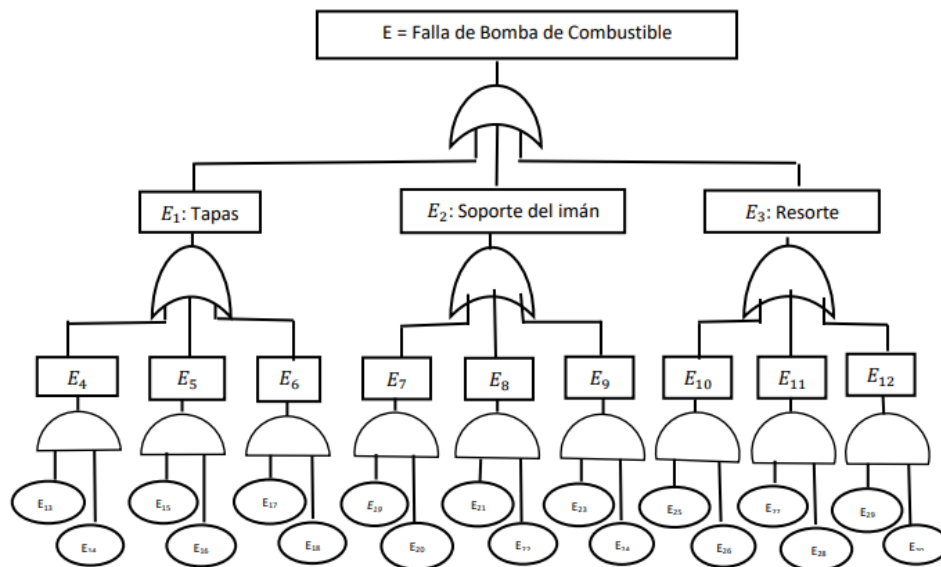


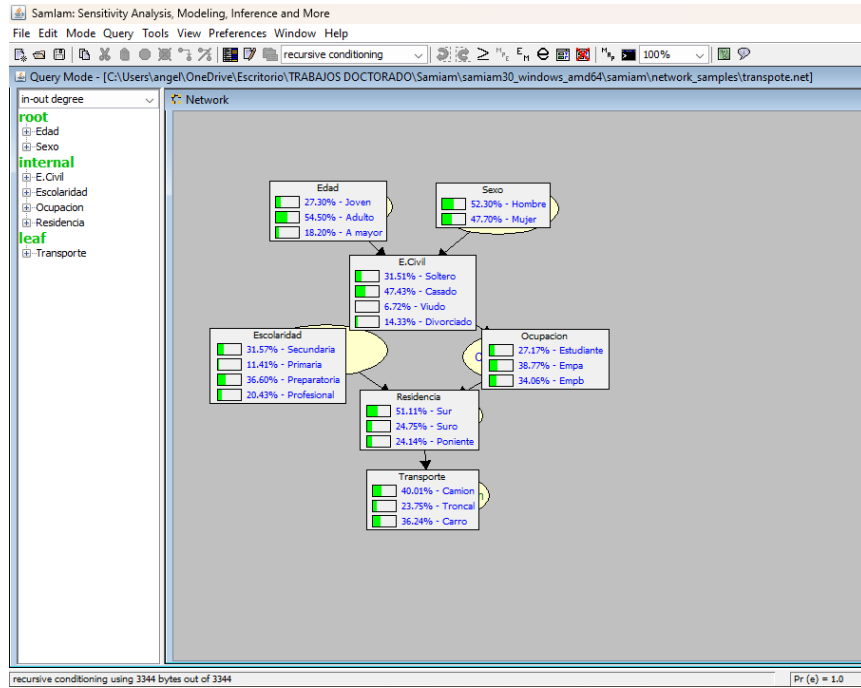
Figura 12. Árbol de falla para una bomba de combustible.

Fuente: Elaboración propia

## Resultados

Para el problema de transporte se muestran las pantallas resultantes de la parametrización de la red y los efectos de las relaciones establecidas.

Figura 11. Distribución de probabilidad conjunta.

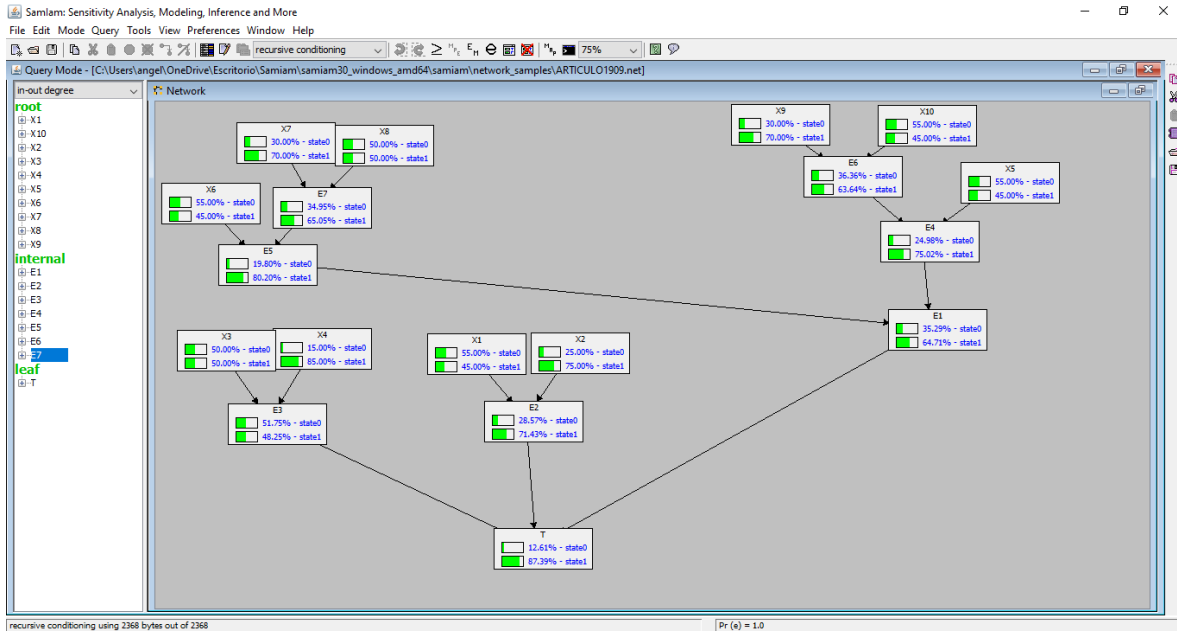


Fuente: Aguilar, L., et al. (2021). Redes Bayesianas Aplicadas a Sistemas de Transporte Urbano: Un Caso Semihipotético.

Como se logra ver en los monitores de la figura anterior, el uso de las redes Bayesianas permite establecer conclusiones acerca de ciertas situaciones. En este caso, la forma en la que se relacionan las variables del modelo y los datos que se permitió recolectar, dan lugar a establecer que los habitantes de Ciudad Juárez que tienen ciertos niveles económicos, ocupaciones de empleos promedio y lugares de residencia poco accesibles tienden a utilizar el transporte público de rutas troncales.

Por otro lado, en el caso del funcionamiento de la impresora 3D, la codificación y el acceso a las bases de datos concernientes al problema permitieron realizar los cálculos necesarios para obtener las CPT (tablas de probabilidad condicional) de cada nodo con respecto a sus conexiones con los padres o antecesores de los mismos y entonces generar una propagación del conocimiento y generar deducciones y conclusiones de la situación analizada.

Figura 12. Probabilidad conjunta de cada nodo de la red.



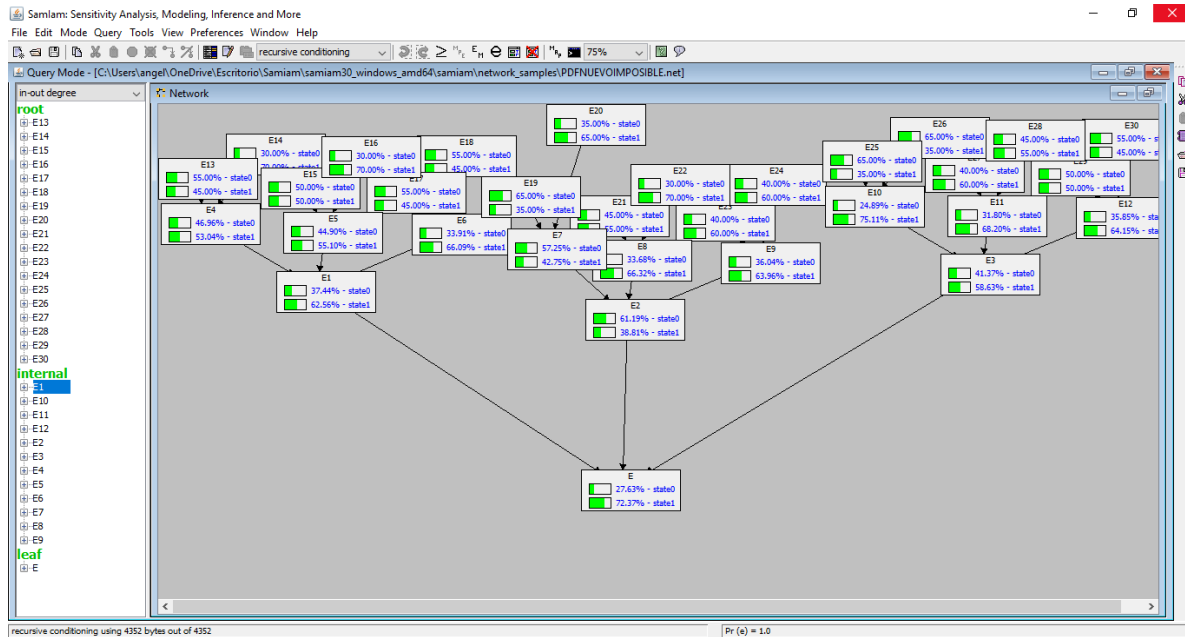
Fuente: Elaboración propia.

En este ejemplo, la simulación del comportamiento de los componentes de la impresora permitió conocer la probabilidad de falla de la misma, dependiendo de las probabilidades de falla de cada uno de los componentes o las combinaciones de falla de varios componentes de ella. El conocer este tipo de información permite reestructurar las pruebas de diseño y calidad con la finalidad de poder promover rediseños a los productos con la finalidad de aumentar su confiabilidad y vida útil en el mercado.

Por otro lado, para el caso de la bomba de combustible y el análisis de sus componentes, se puede obtener la siguiente información:



Figura 13. Probabilidad conjunta de cada nodo de la red.



Fuente: elaboración propia.

Con base a la información recopilada y generando las parametrizaciones de la red en conjunto con los procesos de inferencia estadística es posible visualizar cuáles serían las probabilidades de falla de los componentes establecidos como principales en la bomba de combustible, así como también el comportamiento de las combinaciones de distintas situaciones de falla y no falla de uno o varios componentes y subcomponentes del sistema, pero sobre todo permite visualizar la probabilidad de que la bomba de combustible falla en su totalidad dado las condiciones de sus componentes. En base al contexto de estudio de este sistema, se muestra que la probabilidad de “state1”, es decir de que la bomba falle es de 72.37%. El conocer cómo combinar las herramientas de árboles de falla, redes bayesianas y procesos estadísticos da lugar a que los diseños, procesos de producción y verificaciones de calidad sean mayormente minuciosos brindando áreas de oportunidad para disminuir las fallas de los productos antes de que lleguen al mercado, o bien, una vez en las manos del cliente, su vida útil sea la mayormente posible en las mejores condiciones.

## **Discusión**

Con toda la información establecida anteriormente se puede evidenciar la importancia de las herramientas estadísticas para la evaluación, modelo y resolución de problemáticas de diversas. En particular, las redes Bayesianas son una herramienta estadística por demás versátil para la solución y comprensión de una diversidad de problemas de interés, siendo flexible en la representación gráfica y clara en la interpretación de los datos y resultados.

## **Conclusión**

Las redes Bayesianas en la actualidad tienen una tendencia creciente en su aplicación, debido a que la sencillez con la que permiten construir modelos causales para un sinnúmero de situaciones en distintas áreas tanto sociales, industriales, educativas, por mencionar solo algunos. En este trabajo se logró demostrar lo anterior, realizando una representación de este método de resolución de problemas de ingeniería, pero también de áreas sociales como las educativas.

En el presente documento también se manejó la herramienta de árboles de falla como complemento a las redes Bayesianas, mostrando la manera de trasladar un árbol de falla a una red bayesiana, así como los métodos probabilísticos para agregar el cálculo de probabilidades a los modelos y obtener resultados para la interpretación de situaciones.

## **Futuras líneas de investigación**

El presente trabajo se enfocó en mostrar los alcances de las redes Bayesianas en una diversidad de áreas, como la educativa, social, industrial. Sin embargo, sería interesante en un trabajo a futuro realizar las validaciones de los modelos para verificar si los propuestos en cada situación son los óptimos o si se debieran realizar cambios en los mismos ya que las redes Bayesianas pueden ser sometidas a un proceso de validación para establecer si la optimización del modelo es la adecuada, siempre y cuando la estructura del modelo, las relaciones y la evidencia del mismo no se vean afectadas ni interfieran en las relaciones causales que se establecen de principio.

## Agradecimientos

La construcción de este capítulo debe de ser dedicada a las personas que apoyan diariamente el que hacer de cada uno de los autores que participamos en este proyecto. Queremos agradecer a nuestras familias que nos han permitido desarrollarnos en nuestras profesiones y en ocasiones perdernos momentos importantes para poder seguir creciendo en nuestros entornos. Sin duda queremos también agradecer a la institución que nos permite desarrollar estos trabajos, el Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez/TECNM y a cada uno de los jefes de departamento y coordinadores del Departamento de Posgrado e Investigación que apoya estos trabajos y su difusión.

## Referencias

Aguilar, L., Rodríguez, M., García, J., Poblano, E., Diaz, R. (2021). Redes Bayesianas Aplicadas a Sistemas de Transporte Urbano: Un Caso Semihipotético.

Alcántara, E. (2010). Análisis de la movilidad urbana, Espacio, medio ambiente y equidad. CAF. Bogotá, Colombia. ISBN # 978-980-6810-60-0.

Givehchi, S., Heidari, A. (2018). Bayes Networks and Fault Tree Analysis application in Reliability Estimation (Case Study: Automatic Water Sprinkler System). Environmental Energy and Economic Research. Recuperado de: [10.22097/eeer.2019.160566.1057](https://doi.org/10.22097/eeer.2019.160566.1057).

<https://ccc.inaoep.mx/~esucar/Clases-mgp/caprb.pdf>

Molina, B. (2018). Redes Bayesianas para la sostenibilidad marítimo portuaria. [Tesis de doctorado, Universidad politécnica Madrid]. Recuperada de Estudio de accidentalidad ([upm.es](http://upm.es))

Nielsen, T. Jensen, F. (2008). Bayesian Networks and Decision Graphs. Springer. ISBN# 978-0-387-68281-5. New York, NY.

Oviedo, B., Puris, A., Villacis, A., Delgado, D., Moreno, A. (2016). Análisis de datos educativos utilizando Redes Bayesianas. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/282349418>

Pumpuang, P., Srivihok, A., Praneetpolgrang, P., y Numprasertchai, S. (2008). Using Bayesian Network for planning course registration model for undergraduate students. 2008 2nd IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies, IEEE-DEST 2008, pp. 492–496.

R. Ranjan, J. R. y Kunwar, F. B. (2016). The Research of Emotional Cognition Model which Based On Bayesian Network within Intelligent Tutoring System. pp. 3153–3156.

Riggelsen, C. (2008). Approximation Methods for Efficient Learning of Bayesian Networks. IOS Press. ISBN# 9781586038212. Amsterdam, Países Bajos.

Sharabiani, A., Karim, F., Sharabiani, A., Atanasov, M., y Darabi, H. (2014). An enhanced bayesian network model for prediction of students' academic performance in engineering programs. IEEE Global Engineering Education Conference, EDUCON, (April):832–837.

Wang, N. y Wang, P. (2010). Quality of learning analysis based on bayesian network. 2010 International Conference on Computer Design and Applications, ICCDA 2010, 5(Iccda):382– 384.

Yang, Guangbin. (2006). LIFE CYCLE RELIABILITY ENGINEERING, JOHN WILEY & SONS, page 212- 229.

# **Introducción a la Optimización Robusta e Ingeniería Predictiva: Una Revisión de Literatura**

Introduction to Robust Optimization and Predictive Engineering: A Literature Review

**Gabriel Gómez Martínez**

Tecnológico Nacional de México  
Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez Ciudad Juárez, Mexico  
gabriel.gomez.sigma@gmail.com  
<https://orcid.org/0009-0005-2201-5873>

**Manuel. A. Rodríguez-Medina**

Tecnológico Nacional de México  
Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez Ciudad Juárez, Mexico  
manuel\_rodriguez\_itcj@yahoo.com  
<https://orcid.org/0000-0002-8922-4718>

**Eduardo Rafael Poblano Ojinaga**

Tecnológico Nacional de México  
Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez Ciudad Juárez, Mexico  
eduardo.po@cjuarez.tecnm.mx  
<https://orcid.org/0000-0003-3482-7252>

## **Resumen**

La Optimización Robusta es una herramienta estadística matemática que ha procurado fortalecer las características críticas de un producto y/o sistema cuando estos operen bajo condiciones adversas que podrían afectar su desempeño y/o rendimiento. Se ha llevado a cabo estudiando la variación presente en las variables (factores, por ejemplo: Temperatura, Humedad, Voltaje, Polvo, etc....) de mayor incidencia y como estas impactan en el resultado, para posteriormente identificar los mejores niveles de operación con la mínima variación presente en las condiciones de ambiente adverso (estrés). Además, la Ingeniería Predictiva es una herramienta probabilística matemática que se ha utilizado para modelar el comportamiento de cierta característica de un producto y/o sistema utilizando una función de probabilidad y predecir una ocurrencia o porcentaje de desempeño frente a ciertas condiciones operantes en el sistema. Este tipo de herramientas son utilizadas por Ingenieros, Científicos e Investigadores para proponer soluciones de peso a

problemas relacionados mayormente al diseño y manufactura de productos, aunque no se descarta su uso para el diseño de sistemas tales como Software, Redes, Logística u otros además de servicios. Sin lugar a duda, los profesionales en el campo de la ingeniería deberán estar familiarizados con las técnicas de optimización y predicción como estas, por lo que se requiere que sean examinadas en detalle. El objetivo de este trabajo es observar las generalidades de ambas herramientas: Optimización Robusta e Ingeniería Predictiva además de un breve caso de aplicación.

**Palabras Claves:** Robusto, Superficie de Respuesta, Respuesta Dual, Modelo Probabilístico, Índice de Capacidad (Cpk), Rendimiento.

### **Abstract**

Robust Optimization is a mathematical statistical tool that has sought to strengthen the critical characteristics of a product and/or system when they operate under adverse conditions that could affect their performance and/or performance. It has been carried out by studying the variation present in the variables (factors, for example: Temperature, Humidity, Voltage, Dust, etc...) of greater incidence and how they impact the result, to later identify the best levels of operation with the minimum variation present in adverse environmental conditions (stress). In addition, Predictive Engineering is a mathematical probabilistic tool that has been used to model the behavior of a certain characteristic of a product and/or system using a probability function and predict an occurrence or percentage of performance against certain operating conditions in the system. These types of tools are used by Engineers, Scientists and Researchers to propose weighty solutions to problems related mainly to the design and manufacture of products, although their use for the design of systems such as Software, Networks, Logistics, or others is not ruled out. services. Undoubtedly, professionals in the field of engineering will need to be familiar with optimization and prediction techniques such as these, so they need to be examined in detail. The objective of this work is to observe the generalities of both tools: Robust Optimization and Predictive Engineering, as well as a brief application case.

### **Keywords:**

Robust, Response Surface, Dual Response, Probabilistic Model, Capacity Index (Cpk), Performance.

## Introducción

Genichi Taguchi (1986), definió Robustez como: La estabilidad funcional de los productos o procesos frente a la variación omnipresente en las condiciones de uso (factores de ruido), además de eso (Bergman, Mare, Loren y Stevenson ,2009) lo definen como la habilidad de un producto y/o sistema para proveer la función específica deseada para los clientes o usuarios, también (A. Khuri y J.A Cornell 1996) se ha definido como la condición de mejor desempeño frente a la variabilidad observada. Otros autores (Montgomery, Myers y Anderson Cook 2016) argumentan que esa variación puede ser controlada hasta cierto punto dando como resultado el ambiente más ideal para su desempeño, llamándolo punto óptimo. Esa es la razón por lo que se le ha llamado Optimización Robusta (Chatterjee y Chowdhury, 2018) pues nos ayuda a comprender la mejor combinación de condiciones ideales que minimizan o controlan la variación presente (Jones y Box 1992) para el óptimo desempeño del producto, sistema o servicio. Las figuras 1 & 2 muestran un esquemático de diagrama P y una representación de la Optimización Robusta.

Figura 1. Diagrama P. (Phadke, 1989.)

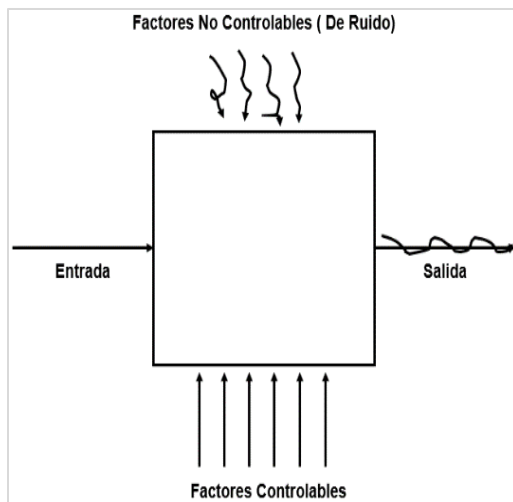
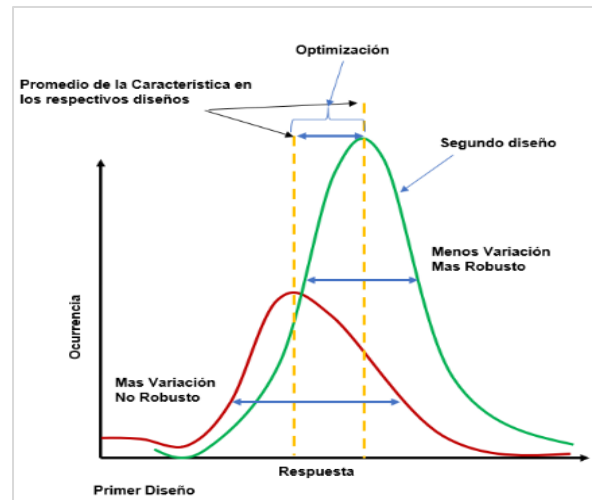


Figura 2. Optimización Robusta (Propio de Autores)



Mientras tanto la Ingeniería Predictiva se ha definido como la capacidad de modelar mediante el desarrollo de una ecuación matemática, modelo predictivo o experimentación el comportamiento de cierto parámetro crítico para su mejor comprensión (Mass y McNair 2009), regularmente utilizando modelos de funciones matemáticas de probabilidad. Estas permiten a los investigadores

predecir la probabilidad de ocurrencia de un evento o característica bajo ciertas condiciones (Kuhn y Johnson 2021) que en este caso provienen del estudio de Optimización Robusta en cuestión. En una extensa mayoría de casos esta Ingeniería Predictiva se desarrolla utilizando metamodelos (Fang, Li y Sudjianto 2006) que se plantean en computadoras y con la ayuda de algún software, debido a su complejidad en varios casos y al alto rigor matemático; allí las ecuaciones matemáticas llamadas funciones de transferencia son modeladas desde el punto de vista de una función de probabilidad acompañadas de diagramas o dibujos detallados técnicamente que reciben el nombre de análisis finito (G. Ramamurty 2013). La figura 3 muestra un esquemático de la ingeniería Predictiva en combinación con el diseño Robusto.

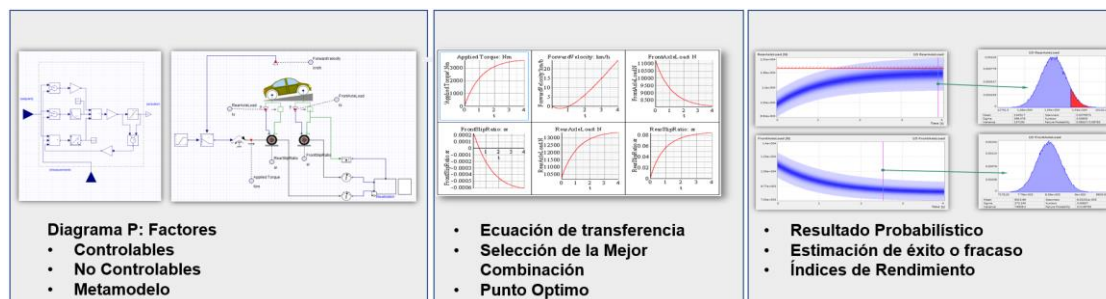


Figura 3: Esquemático de la Ingeniería Predictiva. (S K Dash\* and Swarup K. S\* 2014)

Existen en la actualidad varias técnicas de Optimización Robusta e Ingeniería Predictiva tales como:

- **Optimización Robusta**
- Diseño Robusto-Genichi Taguchi (1952)
- Superficie de Respuesta -G. Box y K.B Wilson (1952)
- Respuesta Dual – R. Myers y W. Carter (1973)
- Algoritmos Genéticos – J.H Holland (1970)
- Programación no Lineal- D.P Bertsekas (1990)
- **Ingeniería Predictiva**
- Simulación Montecarlo- S.Ulam y J. Neumann (1946)
- Yield Surface Modeling© – D. Feldbaumer y E. Maass (1995)
- Simulación 3D



- Machine Learning
- IoT
- Co-Simulation

Por mencionar algunas de ellas.

Debido que tener productos y sistemas robustos son clave en el mundo actual, para mejorar la calidad de vida de las personas. Pensemos en un producto llamado “catéter”, el cual es utilizado vía intravenosa y que permite el drenado, acceso o flujo de líquidos y zonas internas del organismo. Y que este no opere en las condiciones ideales estando dentro de un paciente debido a las condiciones adversas que se le presenten, sin duda sería un escenario complicado para el paciente/cliente como tanto para la empresa fabricante. Esta pequeña ilustración nos muestra la importancia de la Ingeniería Robusta en funcionamiento de un producto. Ahora supongamos que ese producto es fabricado en entornos de circunstancias de alta variación, ¿Cuáles serían los parámetros operativos para considerar? Y ¿Cuál sería el rendimiento esperado al utilizar estos parámetros?

Este tipo de preguntas pueden ser respondidos utilizando la Ingeniería Predictiva o Probabilística.

## Metodología

La metodología para la revisión de literatura de acuerdo con Hernandez (2010) implica detectar, consultar y obtener referencias bibliográficas que son utilizadas como la fuente primaria de información sobre el tópico en estudio, para lo cual la búsqueda fue llevada a cabo entre Septiembre 2022 y Febrero 2023 consultado cerca de 500 publicaciones en revistas y bases de datos, además de aproximadamente 50 libros publicados de diversos autores sobre el tema en conjunto con más de 25 casos de aplicación de la industria local. Algunas de las bases de datos consultadas fueron las siguientes: Elsevier, EBSCO, Taylor and Francis, ieeexplore, ETESCO, ResearchGate, International Journal Management, HotWire, Quality Engineer, entre otras.

Las palabras claves de búsqueda fueron: **Diseño Robusto, Superficie de Respuesta, Respuesta Dual (POE), Modelación Probabilística, Índice de Capacidad, Optimización Matemática.** Las cuales son

clave para el propósito de nuestro estudio; se seleccionaron los artículos más relevantes con respecto a los tópicos de interés. El objetivo de la revisión de toda esta literatura radica en conocer, comprender y ver la aplicación que los autores le dan a cada uno de los tópicos de interés, además de la metodología utilizada por cada uno de ellos para resolver problemas del mundo real utilizando estas técnicas. Figura 4 muestra el resumen PRISMA.

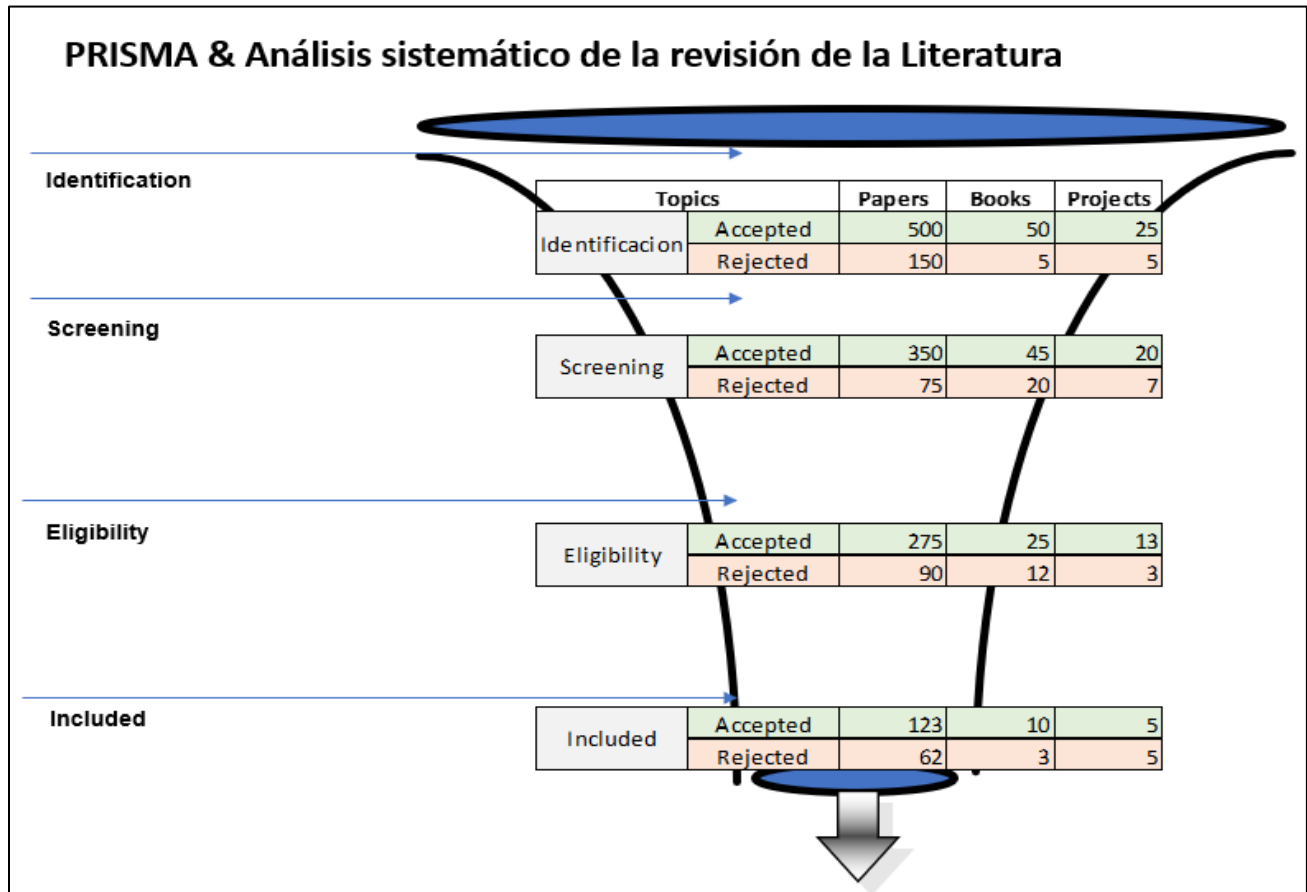


Figura 4: Diagrama de Flujo de PRISMA

Para las fases mostradas en la figura 4, se ha desarrollado un análisis discriminante usando el método de Cluster (Gower J.C 1963) que determino la agrupación de los artículos seleccionados por similitud y tópicos. Tal como se se observa en la figura 5.

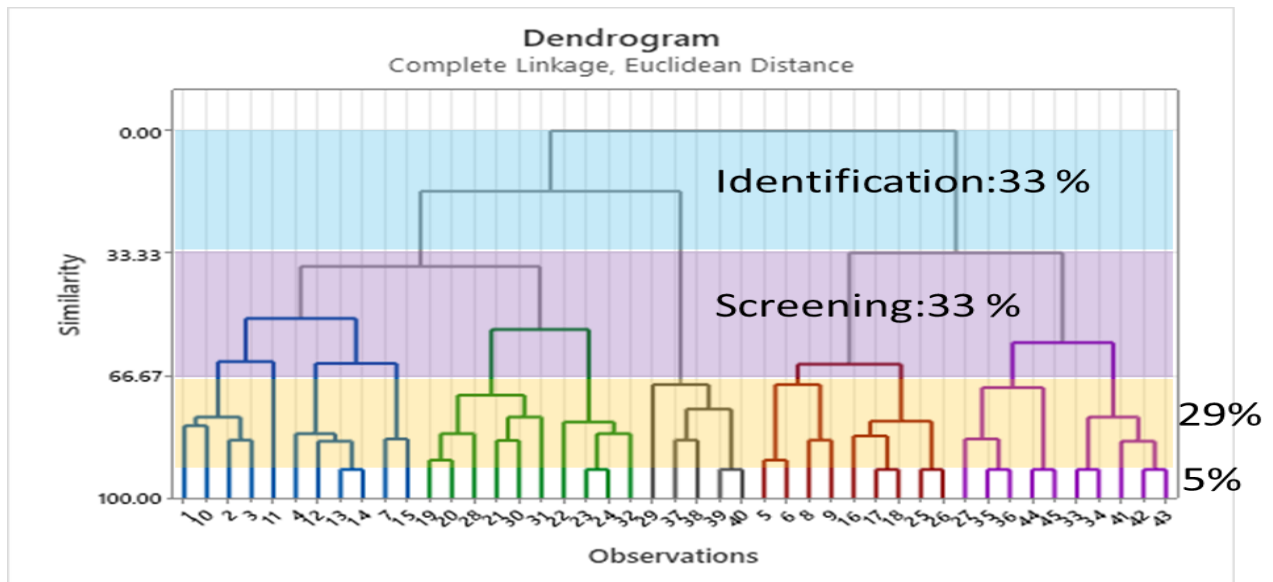


Figura 5: Dendrograma con Análisis de Cluster

Las fuentes de donde provino la información seleccionada se resumen en la figura 6, donde se identifican los artículos revisados, así como los tópicos de investigación que sustentan este trabajo.

Database	Selected	%	Review	%	Taguchi	Response Surface	Dual Response	Probabilistic Model	Yield Surface <sup>®</sup>
Taylor & Francis	32	19.3%	357	9.37%	8	6	8	8	2
Reliability HotWire	28	16.9%	177	4.65%	5	10	9	4	0
EBSCO	26	15.7%	544	14.28%	7	5	7	6	1
Elsevier	22	13.3%	434	11.39%	4	5	3	9	1
Quality Engineer	16	9.6%	669	17.56%	2	5	5	4	0
IJM	14	8.4%	198	5.20%	1	7	5	1	0
ETESCO	13	7.8%	468	12.29%	7	3	2	1	0
ieeexplore	9	5.4%	388	10.19%	4	2	2	1	0
ResearchGate	6	3.6%	574	15.07%	2	2	1	1	0
<b>Total</b>	<b>166</b>		<b>3809</b>		<b>40</b>	<b>45</b>	<b>42</b>	<b>35</b>	<b>4</b>
					<b>24.1%</b>	<b>27.1%</b>	<b>25.3%</b>	<b>21.1%</b>	<b>2.4%</b>

Figura 6: Fuentes de Literatura con Tópicos Revisados

### Arreglos Ortogonales (Diseño Robusto)

Taguchi (1988) definió diseño robusto como: "La estabilidad funcional de los productos o procesos frente a la variación omnipresente en las condiciones de uso (factores de ruido)". La importancia de

reducir la variación en las características del producto se discutió temprano en Japón. Las ideas del ingeniero japonés Genichi Taguchi ya eran conocidas en su propio país en la década de 1940 (Gunter, 1987), aunque no recibieron atención internacional hasta la década de 1980 cuando se publicaron en inglés. En 1979 las ideas de Taguchi fueron traducidas en Taguchi y Wu (1979), publicación a la que siguieron muchas otras sobre el tema, véase, p. Taguchi (1986), Phadke (1989), Taguchi et al. (2000). Taguchi (1986) propone una estrategia de tres pasos para el desarrollo de productos. Los pasos son: diseño del sistema, diseño de parámetros y diseño de tolerancias, con énfasis en el uso de métodos experimentales en los dos últimos pasos.

Los artículos de Hunter (1985) y Kackar (1985) explicaron la esencia de las ideas de Taguchi en una forma comprensible y completa. A fines de la década de 1980 y principios de la de 1990 hubo una discusión sobre la idoneidad de los métodos estadísticos propuestos por Taguchi. Publicaciones contribuyendo a esta discusión fueron León et al. (1987), Caja et al. (1988), Shainin y Shainin (1988), Welch et al. (1990), Zapatero et al. (1991), Box y Jones (1992), Nair (1992) Lucas (1994) y Grize (1995). Hay menos publicaciones que se centren en temas no estadísticos. tales como principios, procedimientos y objetivos.

El caso aquí expuesto es el punto dos de la metodología de Taguchi: Diseño de Parámetros, como muestra la figura 7:

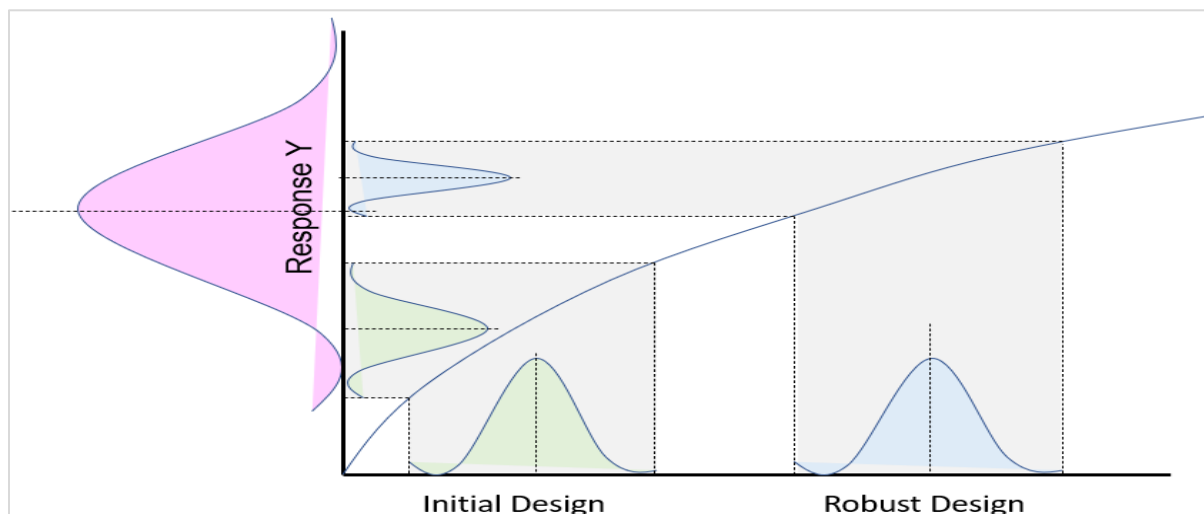


Figura 7: Modelo Robusto de reducción de variabilidad

En el diseño de parámetros el método de Taguchi propone reducir la variación en la variable de respuesta modificando los factores sobre los que, si se tiene control, para monitorearlos y garantizar que permanecerán en ese estado, y que tendrá como resultado una variación mínima en la característica observada, para ello propone un arreglo de diseños entre los factores controlables y los no controlables, a los que denomina “Arreglo Interno” (Factores Controlables) y “ Arreglo Externo” (Factores No Controlables) (Montgomery and Myers 2018), a los que ha llamado Diseños Ortogonales. La siguiente tabla 1 muestra un ejemplo de un arreglo ortogonal utilizando una combinación de Diseños  $2^3$  y  $2^2$ :

			Noise Factors				
			A	1	-1	1	-1
Controls Factors			B	1	-1	-1	1
			25.681	17.768	35.751	9.328	
A	B	C	21.219	19.074	36.212	10.059	
1	1	1	24.169	5.407	22.112	11.775	
1	-1	-1	22.842	20.924	23.366	10.257	
1	-1	1	26.510	11.907	13.390	10.256	
-1	1	1	23.499	8.262	25.554	11.472	
-1	1	-1	25.223	15.849	31.871	8.211	
1	1	-1	25.907	18.223	22.722	10.864	
-1	-1	1	24.361	3.077	27.812	8.814	
-1	-1	-1	26.602	4.710	12.687	8.506	

Tabla 1: Diseño de Arreglos Cruzados para 5 Factores

De acuerdo con el número de factores de control y de ruido que se están considerando en el estudio, Taguchi (1988) ha propuesto los siguientes arreglos cruzados: La tabla 2 muestra los arreglos propuestos por Taguchi.

Orthogonal Arrays (OA)	Number of Factors	Level of Factors	Number of Experiment for OA
L4	3	2	4
L8	7	2	8
L9	4	3	9
L12	11	2	12
L16	15	2	16
L16	5	4	16
L18	1	2	18

Tabla 2: Arreglos Ortogonales propuestos por Taguchi.

De acuerdo con la naturaleza de la experimentación que se requiera, el experimentador puede seleccionar el que mejor se ajuste a sus requerimientos.

El resultado del experimento Taguchi (1988) ha propuesto tres categorías para analizar la variabilidad: a la que ha llamado “Relación Señal Ruido” lo que puede resumirse como: La potencia del ruido se refiere a la cantidad de variación que se presenta en la señal (respuesta), que no proviene de la señal en sí misma, sino de fuentes externas (variables de ruido) que pueden interferir con la medición. El ruido puede ser aleatorio o determinístico, y puede ser causado por diversas fuentes, como interferencias electromagnéticas, variaciones en las condiciones ambientales o problemas en los componentes de medición.

Una SNR (por sus siglas en inglés) alta indica que la señal es más fuerte en comparación con el ruido, lo que significa que la medición es más precisa y confiable. Por el contrario, una SNR baja indica que la señal es más débil en comparación con el ruido, lo que hace que la medición sea menos precisa y confiable. Las categorías con su respectiva fórmula, así como su particular caso, son:

- **Mas pequeño mejor:** El Experimentador Desea Minimizar la Respuesta

$$SNR_{SMALL} = -10 \log \sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \quad \text{Ec. 1}$$

- **Mas grande mejor:** El Experimentador Desea Maximizar la Respuesta

$$SNR_{LARGER} = -10 \log \sum_{i=1}^n \frac{\frac{1}{y_i^2}}{n} \quad \text{Ec. 2}$$

- **Objetivo es lo mejor:** El Experimentador Desea lograr un objetivo particular

$$SNR_{TARGET} = -10 \log \frac{\bar{y}^2}{s^2} \quad \text{Ec. 3}$$

### Superficie de Respuesta

La metodología de superficie de respuesta (RSM) es una colección de técnicas estadísticas y matemáticas útiles para desarrollar, mejorar y optimizar procesos. Y que tiene aplicaciones importantes en el diseño, desarrollo y formulación de nuevos productos, así como en la mejora de los diseños de productos existentes. (R H. Myers, DC. Montgomery, C M. Anderson-Cook 2016). En las décadas de 1950 y 1960, Box y sus colaboradores desarrollaron una colección de diseño analítico y herramientas experimentales para las cuales el término metodología de superficie de respuesta (RSM) fue acuñado (ver Box y Wilson 1951). RSM disfrutó de una aplicación considerable durante ese período de tiempo, particularmente en el procesamiento químico, alimentos y área textil. Tres libros de texto, Box and Draper (1987), Khuri y Cornell (1987), y Myers (1976), se dedican al tópico en cuestión. Un artículo de revisión de Myers, Khuri y Carter (1989) reveló que aún queda considerable interés y uso por parte de los profesionales, en el tópico. Con la llegada del movimiento Seis Sigma y Diseño para Seis Sigma el interés en RSM ganó popularidad considerablemente en el ambiente de la manufactura, además de que pasó a formar parte del currículo del programa de entrenamiento para estas metodologías (Bass Issa 2007) y que tiene como fin, entrenar a los participantes en optimización de procesos para el mejoramiento operativo.

El objetivo de la RSM es encontrar el punto en el que la variable de respuesta llega a su máximo o mínimo desempeño en función de los factores considerados en el estudio. Para llegar a los puntos mencionados anteriormente (Oliveira & Paiva 2019) mencionan que 3 ejes son los que se emplean:

- Diseño y Análisis de Experimentos
- Técnicas de Modelación Matemática
- Métodos de Optimización para encontrar el punto más elevado o bajo.

Además de eso (P. Whitecomb, Easystat® 2020) desarrollaron una serie de pasos para llevar a cabo un estudio y análisis de RSM considerando los tres puntos antes mencionados, los cuales se muestran en el diagrama de la figura 8, además de una breve explicación para cada paso.

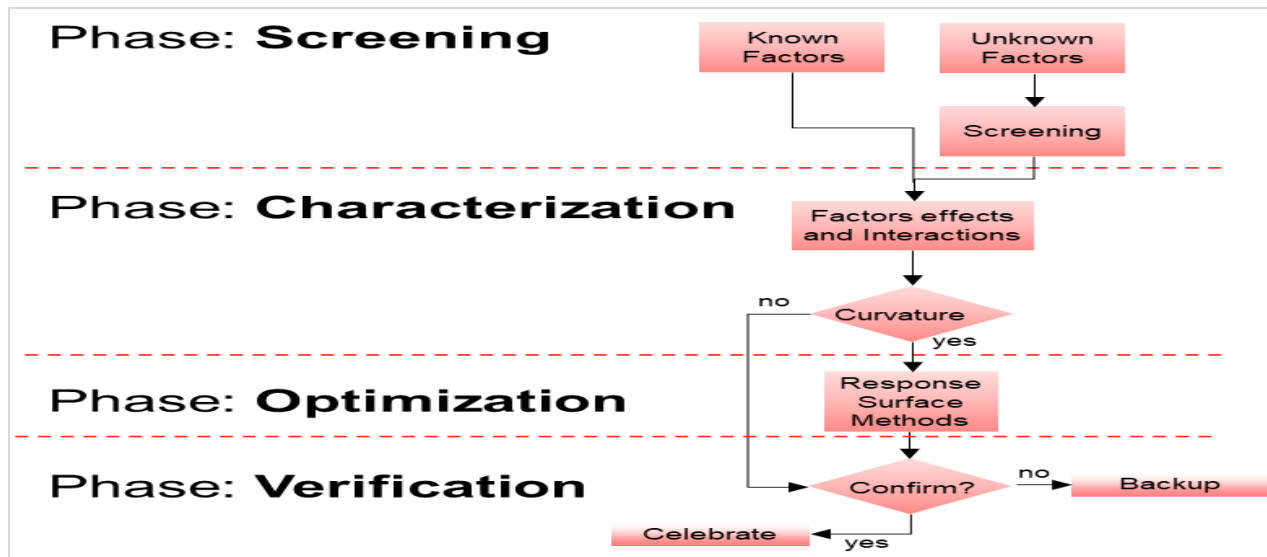


Figura 8: Pasos para la aplicación de RSM (P. Whitecomb, Easystat® 2020)

- Cribado del Experimento:** En esta fase se seleccionan los factores de los que se cree (hipótesis) influyen en la respuesta o respuestas. En el caso particular de la metodología seis sigmas, se asume que se tienen los factores más importantes y que los demás, han sido descartados utilizando inferencia estadística básica. (Montgomery, D. C. 1999.) La figura 9 muestra un ejemplo de Cribado de Experimentación.



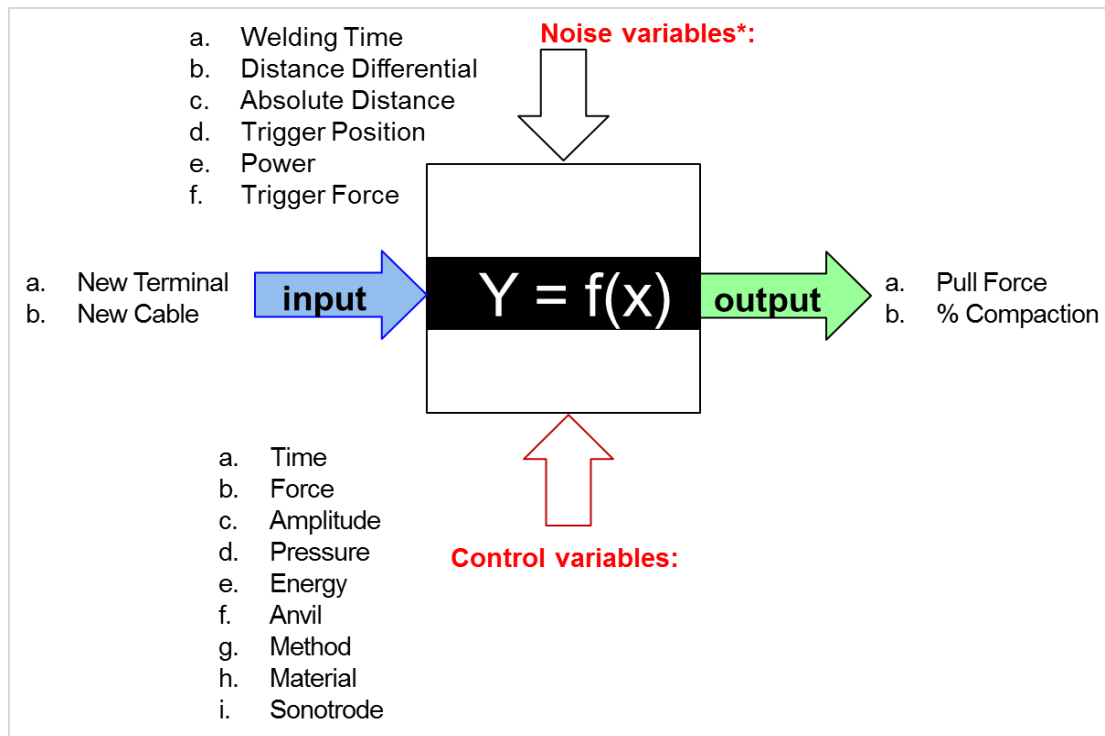


Figura 9: Ejemplo de Cribado de Experimento (Montgomery, D. C. 1999.)

- **Caracterización del Experimento:** Después de cribar el experimento, se estudia el cambio de las variables  $x$ 's sobre la respuesta además de considerar si el efecto o cambio sigue un comportamiento lineal o de curva como se muestra en la figura 10. (Ding, R., D. K. Lin, and D. Wei. 2004). Figura 10 muestra la diferencia entre un modelo de primer orden vs segundo orden.
  - Si es Lineal, se ajusta a un modelo de Primer Orden
  - Si se observa curvatura, se ajusta a un modelo de Segundo Orden

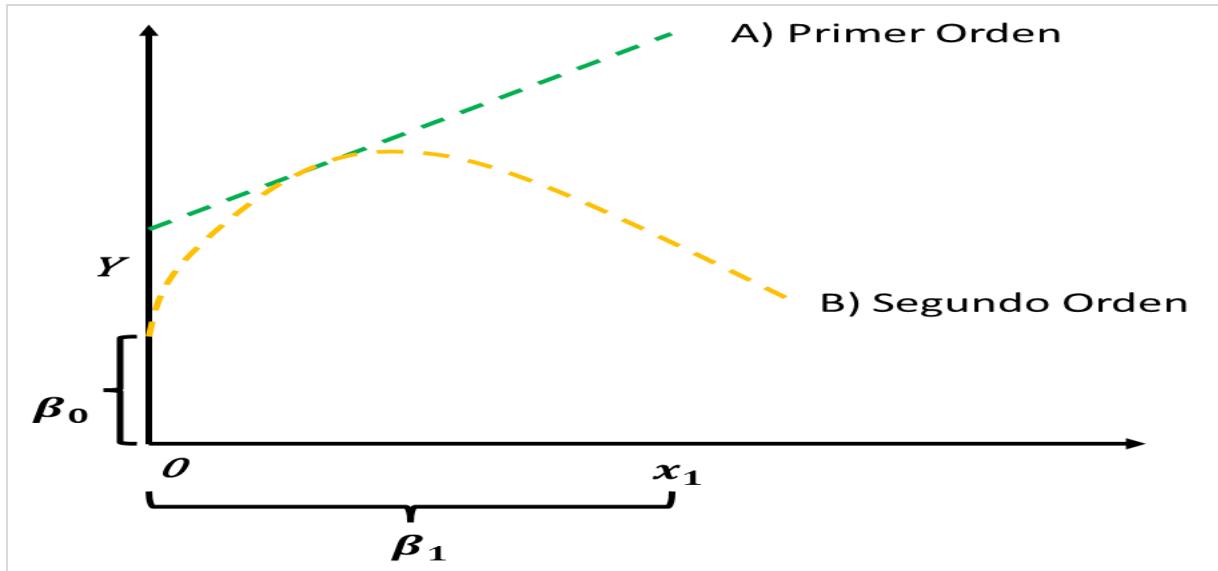


Figura 10: Modelos Polinomiales de primer y segundo orden (A.I Khuri 1995)

- Optimización del Experimento:** Con la información obtenida por la fase de caracterización se estima cual es el máximo o mínimo punto alcanzable de acuerdo con el interés del experimentador. (Box , G.E.P. and K.B. Wilson ( 1951 ). La Figura 11 muestra un ejemplo de punto de optimización.

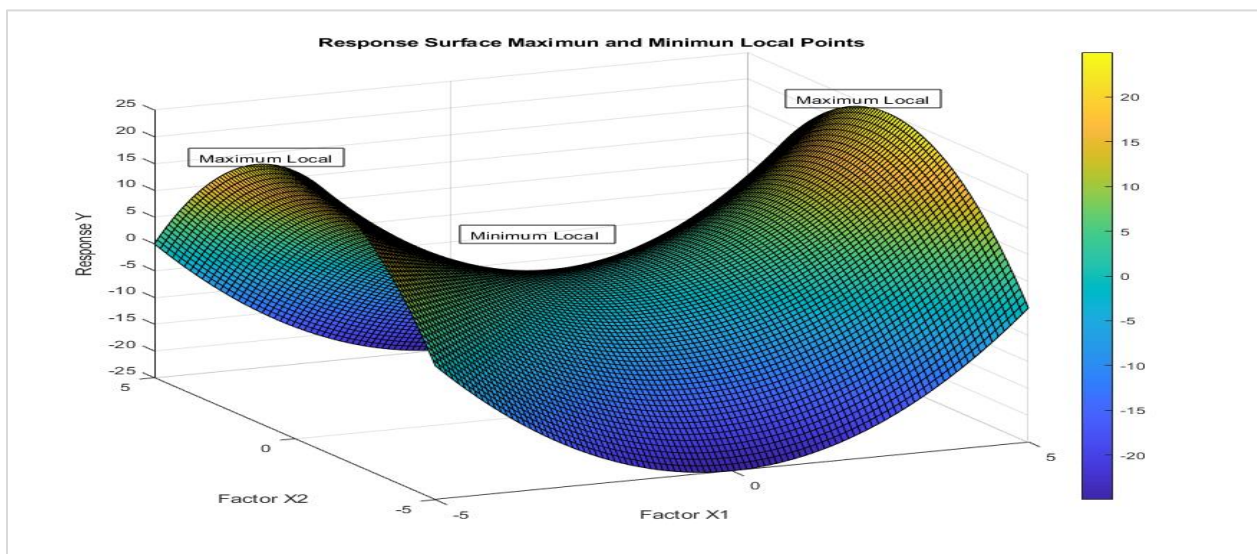


Figura 11: Local Mínimo y Máximo para la superficie (Matlab® 2021)

- Verificación del Experimento:** En esta última fase, el experimentador corrobora que el mínimo o máximo local seleccionado cumpla con los requerimientos establecidos por el proceso. De esta manera se establecerán controles para garantizar que esos niveles se mantengan la mayor parte del tiempo y el proceso este bajo control. (Borrór , C.M. , D.C. Montgomery , and R.H. Myers ( 2002 ). La figura 12 muestra una gráfica de contornos donde se estima un punto óptimo de operación en función de los factores.

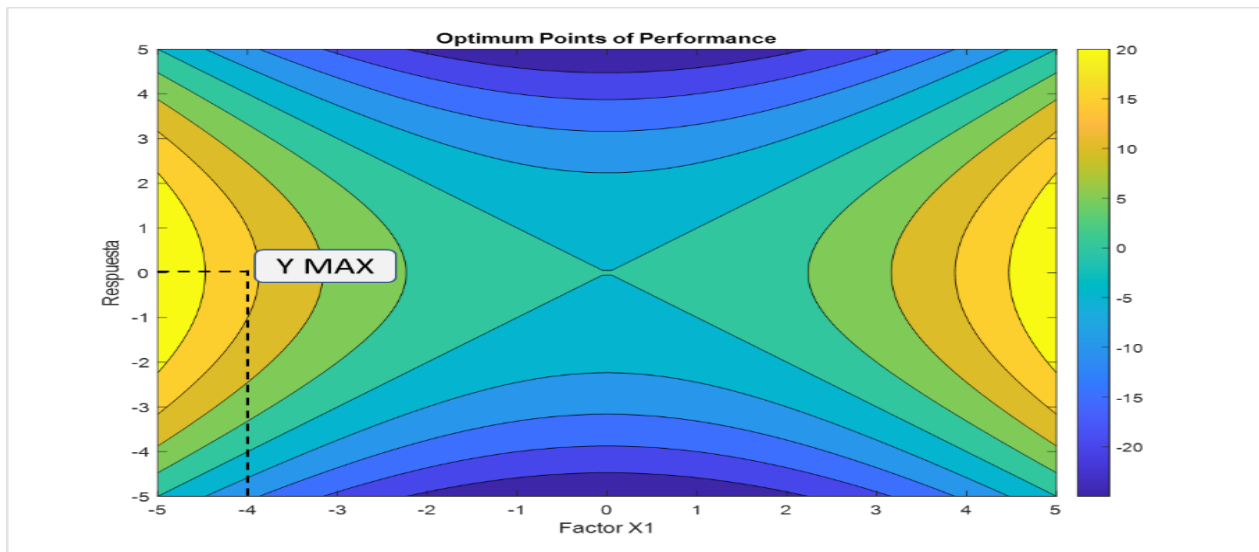


Figura 12: Verificación de las condiciones de Operación para el Factor X (Matlab® 2021)

De acuerdo con (A. Khuri y S. Mukhopadhyay 2010) una superficie de respuesta puede representarse como una relación entre una o más salidas  $y$  con sus respectivas entradas o factores  $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ . Según los autores esta relación puede ser modelada por el polinomio de la Ec 4.

$$y = f'(x)\beta + \varepsilon \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

- $x = x_1, x_2, x_3 \dots x_n$  representa los factores involucrados en el estudio
- $f'(x)$  El conjunto del vector función para cada una las combinaciones experimentales
- $\beta$  Coeficientes de la función matemática que describen el cambio en las entradas
- $\varepsilon$  error experimental para estimar una media de cero.

Esta relación es representada mediante la expansión de Taylor, con el propósito de estimar un valor esperado con respecto a la función matemática, también llamado media o primer momento: y se ha determinado por lo menos en dos categorías diferentes de acuerdo con la naturaleza del problema en cuestión.

- Modelos de Primer orden: Es decir donde cada una de las variables pueden ser modeladas de una forma lineal: como muestra la ecuación 5.

$$y = \beta_0 + \beta x_1 + \beta x_2 + \dots \beta_k x_k + \varepsilon \quad \text{Ec. 5}$$

- Modelos de Segundo Orden: Donde cada una de las variables son modeladas de una forma cuadrática, en otras palabras, es que tienen un comportamiento de curva, por lo que cada factor o al menos uno se modela con exponente 2. Como se muestra en la ecuación 6.

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_i \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad \text{Ec. 6}$$

### Respuesta Dual

Myers, Khuri & Vining (1992), citan a Myers & Carter (1973) en relación con su técnica desarrollada, en la cual, consideran un vector  $x$  de  $k \times 1$  que representa las variables independientes controlables. El objetivo experimental es optimizar dos respuestas para  $x$  en la región de interés R. Las respuestas podrán escribirse como sigue: en las Ec. 7 & 8.

$$y_p = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_{i \neq j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon_p \quad \text{Respuesta primaria} \quad (\text{Ec. 7})$$

$$y_s = \gamma_0 + \sum_{i=1}^k \gamma_i x_i + \sum_{i=1}^k \gamma_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_{i \neq j}^k \gamma_{ij} x_i x_j + \epsilon_s \quad \text{Respuesta secundaria} \quad (\text{Ec. 8})$$

De nuevo, considerando a Myers, Khuri & Vining (1992), ellos mencionan que el problema de respuesta dual se encarga de la determinación del conjunto de variables  $\mathbf{X} \in R$  que optimizan  $\hat{\eta}_p$ , la respuesta primaria, restringida a  $\hat{\eta}_s = \theta$ , un valor considerado aceptable para la respuesta secundaria.

Consideremos ahora que la respuesta primaria en el problema dual es la media aritmética poblacional  $\mu$  y sea la varianza la respuesta secundaria, donde la respuesta primaria está restringida por la varianza o respuesta secundaria. Si ahora, retomamos la clasificación de Taguchi de las variables de respuesta continuas:

- Para lo nominal es lo mejor. Mantener la media  $\mu$  en el valor deseado y minimizar la varianza
- Para lo más grande es lo mejor. Lograr el mayor valor posible de  $\mu$  y mantener controlada a la varianza.
- Para lo más pequeño es lo mejor. Hacer la media lo más pequeña posible y controlando la varianza.

El problema de respuesta dual es especialmente aplicable al problema de “Lo Nominal es lo Mejor”. Para implementarlo, hacemos que la media aritmética sea la respuesta secundaria y establecemos el objetivo de minimizar la varianza restringida su función a  $\mu = \mu_0$ .

Myers, Khuri & Vining (1992) establecen que si  $\boldsymbol{\eta}_p$  y  $\boldsymbol{\eta}_\sigma$  representan los vectores de las medias y las varianzas muestrales, respectivamente.

Para incorporar la heterogeneidad de las varianzas de los valores promedio muestrales se recomienda la utilización de los mínimos cuadrados ponderados en la estimación de los valores  $\beta$ . De acuerdo con la Ec. 9, entonces:

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{X}'\mathbf{V}^{-1}\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}'\mathbf{V}^{-1}\mathbf{X} \quad (\text{Ec. 9})$$

donde V representa la matriz de varianzas y covarianzas de las respuestas del diseño, la cual puede estimarse de dos formas diferentes. La primera es suponiendo que los errores son independientes entre los datos de diseño, haciendo que V sea una matriz diagonal. La segunda estimación de V se obtiene de  $\hat{\eta}_s$ .

Leon et al. (1987) consideran que el objetivo de un problema del diseño del parámetro es ajustar los parámetros de diseño que minimicen la pérdida esperada. Lo anterior, mencionan, se puede lograr con los pasos siguientes:

1. Escriba todos los supuestos que pueda considerar para el modelo y su función de pérdida.
2. Analice hasta donde puede cumplir con la minimización de pérdida esperada.
3. La función de pérdida deberá ser considerada de acuerdo con el objetivo establecido.

Kackar (1985) establece que para la identificación de los ajustes del valor óptimo del parámetro es necesario especificar los criterios establecidos para optimizar, es decir, optimizar el valor deseado de la media aritmética, o dado un valor adecuado de la media, reducir el valor de la varianza alrededor de este valor. El criterio más común es el valor esperado, el cual, regularmente se menciona como pérdida monetaria del usuario debido a la variación funcional del producto durante su vida útil. Así, resalta Kackar (1985), una medida de la variación del desempeño del producto es el valor esperado.

Otra de las medidas de desempeño mencionadas por Kackar (1985) es el grado de variación del desempeño, la cual refleja la desviación del desempeño del producto durante su ciclo de vida, esto, bajo diferentes condiciones de operación y medido a través de diferentes unidades de producto. Kackar (1985) menciona que el grado de satisfacción de los usuarios de un producto está inversamente relacionado al grado de desempeño de la variación. El grado de variación del desempeño está directamente relacionado con el diseño del producto (diseño de las características funcionales) y el diseño del proceso (calidad de diseño de las operaciones del proceso).

León et al. (1989) afirman que el objetivo del diseño del parámetro es determinar adecuadamente los parámetros de diseño  $\theta$ , los cuales minimicen la pérdida promedio causada por la desviación de las características funcionales de las salidas del valor objetivo.

(M. Bendersky, N. Barak & Y. Parmet 2021) Consideran el modelo de primer orden involucrando únicamente los factores controlables y los factores de ruido, las interacciones entre los factores controlables, las interacciones entre los factores controlables y los factores de ruido. El modelo es conocido como un modelo de respuesta. (Myers, R.H. , D.C. Montgomery , and C.M. Anderson - Cook ( 2009 ). Hagamos notar que, al menos uno de los coeficientes de las interacciones entre los factores

controlables y los factores de ruido sea diferente de cero no habrá un problema de diseño robusto. Consideremos enseguida el modelo de primer orden, el cual contiene las variables controlables, sus efectos y sus interacciones, los efectos principales de los factores no controlables o de ruido y sus interacciones, así como las interacciones entre los factores controlables y los factores de ruido llamado Arreglo combinado o Respuesta Dual (Box, G., and S. Jones. 1992.) El modelo propuesto, se puede modelar utilizando la Ec.10, donde Z representa cada uno de los factores de Ruido así como sus interacciones.

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 + \gamma_1 Z_1 + \gamma_2 Z_2 + \delta_{11} X_1 Z_1 + \delta_{12} X_1 Z_2 + \delta_{21} X_2 Z_1 + \delta_{22} X_2 Z_2 + \delta_{31} X_3 Z_1 + \delta_{32} X_3 Z_2 + \varepsilon \quad (\text{Ec. 10})$$

Al considerar las variables controlables en un diseño experimental se supone que son variables que serán siempre controladas en el producto y su proceso de elaboración, mientras que las variables de ruido serán únicamente controladas en la etapa de la corrida del diseño. En el arreglo de diseño combinado se asume que las variables de ruido son expresadas en unidades codificadas con valor esperado cero y varianza  $\sigma_z^2$  y, además, si existen varias variables de ruido, sus covarianzas serán iguales a cero (Box, G. E., and N. R. Draper. 1987).

Es importante mencionar que el subíndice z en el operador de valor esperado es solo una manera de recordar para considerar el valor esperado con respecto a ambas variables aleatorias, z y  $\varepsilon$ . Enseguida usamos el enfoque de transmisión de error para construir un modelo para la varianza del vector de respuestas y, esto mediante la expansión de la serie de Taylor alrededor del modelo de Primer o Segundo Orden según sea el caso correspondiente (Myers, R.H. , A.I. Khuri , and G.G. Vining ( 1992 ).

## Modelo Probabilístico

Los Modelos Probabilísticos son ampliamente utilizados en el desarrollo de nuevos productos y procesos. Varias compañías como: (Apple, GM, GE, Samsung, Toyota, Ford, entre otras) han desarrollado grandes avances en el desarrollo y efectividad del desarrollo de productos y procesos. Los modelos Probabilísticos tienen su origen en la teoría de la distribución normal, y al igual que en dicha teoría, lo que pretenden es estimar la ocurrencia de un evento dado bajo ciertas circunstancias (E. Mass 1995).

En este método las funciones de densidad de probabilidad son utilizadas para describir comportamientos y eventos futuros que pudieran ocurrir en el transcurso del tiempo, especialmente para las variables continuas tenemos 3 propiedades: (L. Tvedt, 2006). Donde la Ec. 11 representa una función matemática con igualdad mayor o igual a cero, dicha función esta delimitada por una región de acuerdo con Ec. 12 y además se puede encontrar un valor de probabilidad dentro de la región delimitada de la función o área bajo la curva como lo modela la Ec. 13.

1.  $f(x) \geq 0$  (Ec. 11)

2.  $\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1$  (Ec. 12)

3.  $P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x)dx = \text{Area bajo } f(x) \text{ desde } a \text{ hasta } b$  (Ec. 13)

La Figura 13 nos muestra el concepto de probabilidad sobre una función matemática en la que el área sombreada es la de interés, pues expresa la probabilidad de ocurrencia de un evento bajo determinadas circunstancias. El área sombreada es la suma de la ocurrencia de eventos cada uno con su respectiva probabilidad de evento.

De la función anterior puede estimarse una función de densidad de probabilidad, conocida como función.



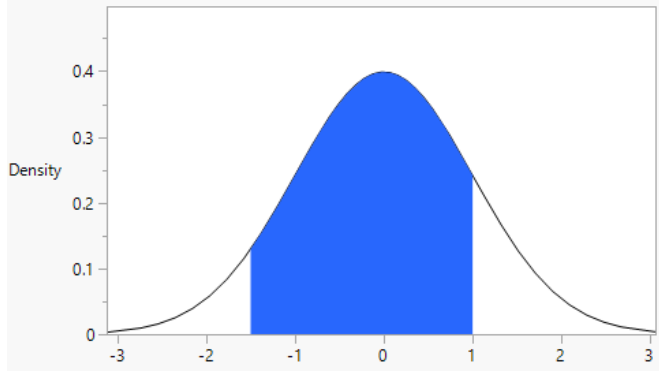


Figura 13: Probabilidad Acumulada de ocurrencia (Propio de Autores)

Distribucion Normal Estandar, de la cual se estima una funcion de Densidad de Probabilidad como lo muestra la Ec. 14 y una Funcion de Distribucion Acumulada Ec. 15.

$$\vartheta_Z = (z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} \quad (\text{Ec. 14})$$

$$\Phi_Z = (z) = P(Z \leq z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{y^2}{2}} dy \quad (\text{Ec. 15})$$

Así mediante 13 y 14 es posible determinar un valor esperado Ec. 16 o primer momento para la función matemática y sustituyendo en z se estima el valor espera en la región delimitada Ec.15.

$$E[P(z)] = \int_{-\infty}^z P(z) f(x) dx \quad (\text{Ec. 16})$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} [x - E(z)]^k f(x) dx \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde:

K= Es el Origen o Momento cero

El cual es conocido como la Media o Promedio de la función, el valor esperado de máxima Ocurrencia. De la misma manera puede estimarse el segundo momento de la función que nos describe la amplitud o dispersión, comúnmente conocido como varianza descrita en la Ec. 17 (Chan, H. A., & Englert, P. J. (Eds.). (2001).

$$Var(x) = [x - \mu'_1]^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu'_1)^2 f(x) dx \quad (\text{Ec. 17})$$

Teniendo estos estimadores o momentos  $m$  y  $s$  es posible determinar la probabilidad de ocurrencia de determinados eventos bajo ciertas circunstancias además de predecir ciertos indicadores de calidad como lo son: Rendimiento (%), Índice de Capacidad (Cpk), Nivel de Sigma del Proceso ( $s$ ) y PPM (\$). (Hammett, P. C., Hancock, W. M., & Baron, J. S. (1995).

Para utilizar los índices antes mencionados es importante mencionar que el indicador que unifica los métodos mencionados es el índice de capacidad Cpk, debido a que incorpora, no solo la media y varianza de la variable de respuesta obtenidas a partir de los métodos de RSM y Respuesta Dual respectivamente, sino también los límites de especificación de la característica de interés.

Partamos del hecho de que  $Y$  es una variable de respuesta con media y Varianza denotadas por  $\mu_Y$  y  $\sigma_Y^2$ . Además de eso consideremos el hecho de que existe límites de especificación para la variable en cuestión LSL para el inferior y USL para el Superior. Por lo que de acuerdo con (I. Bass 2007) Cpk Ec. 18 está dado por:

$$Cpk = \min \left\{ \frac{\mu_Y - LSL}{3\sigma_Y}, \frac{USL - \mu_Y}{3\sigma_Y} \right\} \quad (\text{Ec. 18})$$

De acuerdo con Kane (1986); Boyles (1991). Este índice mide la habilidad del proceso para producir una salida dentro de los límites de especificación establecidos

Por lo que teniendo Cpk, podemos estimar un valor de Desviaciones estándar para el proceso Ec. 19:

$$z_{Bench} = Cpk \times 3 \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde: 3 es el número de desviaciones estándar que el índice de capacidad puede absorber dentro de los límites de especificación. (T. Pyzdek 2006)

Estimando  $Z_{Bench}$  es posible determinar Rendimiento del Proceso (%), a partir de una función de distribución acumulada utilizando (A. Sleeper 2008) Ec 20:

$$\Phi_Z = (z) = P(Z \leq z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{3 \times Cpk} e^{-\frac{y^2}{2}} dy \quad (\text{Ec. 20})$$

Por lo tanto Estimando Rendimiento (%) es posible estimar PPM como la Probabilidad Inversa de Rendimiento Ec. 21 (R.L. Vijaya kumar and M.R. Bhat.2015).

$$\text{PPM} = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{3 \times Cpk} e^{-\frac{y^2}{2}} dy \times 10^6 \quad (\text{Ec.21})$$

También es posible estimar un nivel de sigma a partir de  $Z_{Bench}$  como se muestra en Ec. 22 (M. Harry 2001) como:

$$\text{Sigma Level} = z_{Bench} + 1.5\sigma \quad (\text{Ec.22})$$

Donde: 1.5 es el número de desviación estándar que la variable de respuesta sufre a través del tiempo.

Así que teniendo los valores de media y varianza es posible tener procesos y diseños robustos que maximicen el rendimiento de la calidad y al mismo tiempo presenten una disminución en las partes defectuosas

## Conclusión

El avance de la tecnología y la necesidad de desarrollar productos y equipos más sofisticados ha obligado a las empresas manufactureras a cumplir no solo con alta calidad en sus sistemas de producción, sino también en la búsqueda de ser más competitivos y mantenerse en los mercados, deben velar por la confiabilidad. y seguridad de sus productos. Durante años se han ido perfeccionando los métodos de obtención de información, pudiendo experimentar con mayor rapidez las variables que provocan el fallo, y disminuyendo la variación de acuerdo con indicadores de robustez como los aquí descritos. Las pruebas diseñadas, al ser experimentos que se realizan

bajo condiciones similares a las del campo, permiten obtener datos para modelar la distribución probabilística del producto mediante los modelos antes mencionados, lo que a su vez permite establecer los límites de garantía del diseño del producto, evaluando los índices de capacidad de los productos, además de predecir un rendimiento de calidad que permite tomar decisiones de una forma preventiva. Estas pruebas son una herramienta útil para determinar aplicaciones potenciales con los datos de falla obtenidos a través de la experimentación. El diseño robusto es así una excelente herramienta para evaluar y mejorar la calidad y maximizar la garantía de productos o sistemas, con el fin de satisfacer las demandas actuales de los clientes y usuarios.

Tal como lo muestra la tabla 3 en la que se resumen los diferentes metamodelos, que son de utilidad para el análisis robusto.

Tópico	Metamodelo	Principales Autores	Año de Publicación
Taguchi Robust Design	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>SN/R_{SMALL} = -10 \log \sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n}</math></li> <li><math>SN/R_{LARGER} = -10 \log \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}</math></li> <li><math>SN/R_{TARGET} = -10 \log \frac{y^2}{s^2}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Genichi Taguchi</li> <li>Shin Taguchi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1950</li> <li>1988</li> <li>1990</li> </ul>
Response Surface	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>y = \beta_0 + \beta x_1 + \beta x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon</math></li> <li><math>y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i &lt; j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>George P. Box</li> <li>Raymond H. Myers</li> <li>André I. Khuri</li> <li>William G. Hunter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1951</li> <li>1990</li> <li>2005</li> <li>2015</li> </ul>
Dual Response	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>V_z(y) = \sum_{i=1}^k \left( \frac{\partial y}{\partial z_i} \right)^2 + \sigma_z + 2 \sum_{i &lt; j} \left( \frac{\partial y}{\partial z_i} \frac{\partial y}{\partial z_j} \right) \sigma_z + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \left( \frac{\partial^2 y}{\partial z_i^2} \right)^2 \sigma_z + \sum_{i &lt; j} \left( \frac{\partial^2 y}{\partial z_i \partial z_j} \right)^2 \sigma_i \sigma_j</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>G. Geoffrey Vining</li> <li>Raymond H. Myers</li> <li>James M. Lucas</li> <li>Enrique Del Castillo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1990</li> <li>2004</li> <li>2012</li> <li>2022</li> </ul>
Probabilistic Model	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>\Phi_z = (z) = P(Z \leq z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{y^2}{2}} dy</math></li> <li><math>Cpk = \min \left\{ \frac{\mu_V - LSL}{3\sigma_V}, \frac{USL - \mu_V}{3\sigma_V} \right\}</math></li> <li><math>z_{bench} = Cpk \times 3</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Andrew Sleeper</li> <li>Joel Nachlas</li> <li>Andre Kleyner</li> <li>Wayne B. Nelson</li> <li>Patrick C. Hammett</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1982</li> <li>2011</li> <li>2018</li> <li>2020</li> <li>2022</li> </ul>
Yield Surface <sup>®</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>\Phi_z = (z) = P(Z \leq z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{3 \times Cpk} e^{-\frac{y^2}{2}} dy</math></li> <li><math>PPM = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{3 \times Cpk} e^{-\frac{y^2}{2}} dy \times 10^6</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eric Mass</li> <li>David W. Feldbaumer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1995</li> <li>2014</li> </ul>

Tabla 3: Metamodelos más utilizados en el diseño Robusto (Propia de autores)

## **Futuras Líneas de Investigación**

Como se ha planteado en este trabajo, la Ingeniería Robusta en combinación con los modelos probabilísticos, están tomando un importante auge a medida que pasan los años en el diseño de productos y servicios.

Uno de los retos más importantes para los investigadores e ingenieros en este tópico es: tratar con la No Normalidad de los datos; ¿Se puede obtener un diseño robusto a partir de datos no normales? ¿Es posible estimar un modelo probabilístico para la calidad con respuestas no normales?, estas y otras preguntas son las líneas futuras de investigación. Especialmente cuando se trabaja con Modelos Lineales Generales (McCullagh and Nelder (1989)) particularmente los modelos ya establecidos como: Poisson Modelo, Binomial Modelo, Exponencial Modelo y Gamma Modelo.

Estos modelos deben de ser utilizados cuando se trata de estimaciones probabilísticas para la calidad. Además de los no existentes como: Weibull, Log-normal y Triangular, por estas distribuciones de variables aleatorias de uso común en comportamientos de procesos tales como: Desgastes, Temperaturas, Presión, etc. Y en el diseño de partes donde ciertas características de los materiales no presentan comportamientos normales y lo que se requiere es estimar una vida útil bajo ciertos rendimientos de calidad establecidos que minimicen los costos de garantía.

## Referencias

Box GEP, Draper NR (1959) A basis for the selection of a response surface design. *J Am Stat Assoc* 54(287):622–654

Box GEP, Draper NR (2007) *Response surfaces, mixtures, and ridge analyses*, 2nd edn. Wiley, Hoboken

VINING, G. G. and BOHN, L. (1998). "Response Surfaces for the Mean and the Variance Using a Nonparametric Approach". *Journal of Quality Technology* 30, pp. 282-291.

VINING, G. G. and MYERS, R. H. (1990). "Combining Taguchi and Response Surface Philosophies: A Dual Response Approach". *Journal of Quality Technology* 22, pp. 38-45.

VINING, G. G. and SCHAUB, D. (1996). "Experimental Designs for Estimating Both Mean and Variance Functions". *Journal of Quality Technology* 28, pp. 135-147.

Goh, T. N. Taguchi methods: Some technical, cultural and pedagogical perspectives. *Quality and Reliability Engineering International*, 9: 185–202, 1993.

Goh, T. N. The role of statistical design of experiments in six sigma: Perspectives of a practitioner. *Quality Engineering*, 4: 659–671, 2002.

Hunter, J. S. Statistical design applied to product design. *Journal of Quality Technology*, 17: 210–221, 1985.

Jeang, A. and Chang, C. Combined robust parameter and tolerance design using orthogonal arrays.

Lucas, J. M. Achieving a robust process using response surface methodology. In *Proceedings of the American Statistical Association Conference*, Washington, DC, pp. 579–593, 1989.

Lucas, J. M. How to achieve a robust process using response surface methodology. *Journal of Quality Technology*, 26: 248–260, 1994.

Myers, R. H. and Montgomery, D. C. *Response Surface Methodology – Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. John Wiley & Sons Ltd, New York, 2018.

Myers, R. H., Khuri, A. I. and Vining, G. G. Response surface alternatives to the Taguchi robust parameter design approach. *The American Statistician*, 46: 131–139, 1992.

Myers, R. H., Montgomery, D. C., Vining, G. G., Borror, C. M. and Kowalski, S. M. Response surface methodology: A retrospective and literature survey. *Journal of Quality Technology*, 36: 53–77, 2004.

Myers, R. M., Brenneman, W. A. and Myers, R. H. A dual-response approach to robust parameter design for a generalized linear model. *Journal of Quality Technology*, 37: 130–138, 2005.

Nair, V. N. Taguchi's parameter design: A panel discussion. *Technometrics*, 34: 127–161, 1992.

Taguchi, G. Quality engineering in Japan. *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering*, 19: 237–242, 1985a.

Taguchi, G. Quality engineering in Japan. *Communications in Statistics – Theory and Methods*, 14: 2785–2801, 1985b.

Taguchi, G. *Introduction to Quality Engineering – Designing Quality into Products and Processes*. Asian Productivity Organization, Tokyo, 1986.

Taguchi, G. *Taguchi on Robust Technology Development – Bringing Quality Engineering Upstream*. ASME Press, New York, 1993.

# **Detección de Anomalías en una Impresora 3D Bajo el Paradigma de la Industria 4.0 Usando Unidades de Medición Inercial y Aprendizaje Profundo**

*Anomaly Detection in a 3D Printer Under the Industry 4.0 Paradigm Using Inertial Measurement Units and Deep Learning*

**Carlos Alberto Ronquillo Salas**

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez, México  
carlos.rs@cdjuarez.tecnm.mx  
<https://orcid.org/0009-0000-4671-5966>

**Ulises Martínez Contreras**

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez, México  
ulises.mc@cdjuarez.tecnm.mx  
<https://orcid.org/0000-0002-1631-4448>

**Adán Valles Chávez**

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez, México  
adan.vc@cdjuarez.tecnm.mx  
<https://orcid.org/0000-0002-6559-0123>

## **Resumen**

La Industria 4.0 comprende la integración de diversas tecnologías con el propósito de mejorar la eficiencia de los sistemas productivos y donde un elemento clave es el desarrollo de sistemas inteligentes capaces de transformar en conocimiento la gran cantidad de datos generados por controladores de máquinas y sistemas de fabricación. Una tecnología asociada con la Industria 4.0 es la manufactura aditiva o impresión 3D, la cual tiene aplicaciones prácticamente ya en todas las ramas de la industria. No obstante, las impresoras 3D sufren de limitaciones de confiabilidad ya que actualmente la mayoría de estas máquinas no poseen sistemas de monitoreo de su estado de operación y no pueden detectarse desviaciones del proceso que afectan la calidad de las piezas impresas y causan pérdida de recursos. Para abordar este problema, la recopilación de datos mediante redes de sensores y su análisis con algoritmos de aprendizaje profundo pueden ayudar a identificar problemas durante el proceso de impresión. Sin embargo, dada la gran cantidad de datos



que generan las redes de sensores y la falta de una metodología estándar para analizar los datos limita su implementación. En este trabajo se propone una metodología para identificar estados de operación anormales de una impresora 3D mediante la detección de anomalías vibratorias usando unidades de medición inercial y entrenando un autocodificador mediante aprendizaje semi-supervisado. Se usa la sensibilidad como métrica para evaluar el desempeño del autocodificador en la clasificación de anomalías vibratorias. La sensibilidad obtenida fue de 94%.

**Palabras clave:** impresión 3D, monitoreo de condiciones, anomalías vibratorias, aprendizaje profundo, autocodificadores, industria 4.0.

### **Abstract**

Industry 4.0 encompasses the integration of various technologies with the purpose of improving the efficiency of production systems and where a key element is the development of intelligent systems capable of transforming the large amount of data generated by machine controllers and manufacturing systems into knowledge. One of the technologies associated with Industry 4.0 is additive manufacturing or 3D printing, which has applications in practically all branches of industry. However, 3D printers suffer from reliability limitations since currently most of these machines are not equipped with operating status monitoring systems and process deviations cannot be detected, which affects the quality of the printed parts and cause loss of resources. To tackle this problem, data collection through sensor networks and their analysis using deep learning algorithms can help identify problems during the printing process. However, given the large amount of data that sensor systems can generate and the lack of a standard methodology to analyze the data, it limits the implementation of monitoring systems that allow identifying the operating status of the machine. This work proposes a methodology that allows us to identify abnormal operating states of a FDM cartesian 3D printer by detecting vibrational anomalies. Inertial measurement units were used for the measurement of linear acceleration and angular velocity. An autoencoder was trained through semi-supervised learning. Sensitivity was used as the metric to evaluate the performance of the autoencoder for vibration anomaly classification. The sensitivity obtained was 94%.

**Keywords:** 3D printing, condition monitoring, vibration anomalies, deep learning, autoencoders, industry 4.0.

## Introducción

La manufactura aditiva (MA) o impresión 3D—una de las tecnologías clave de la Industria 4.0 (I4.0)—consiste en producir un objeto tridimensional por adición de capas de material adjuntas una sección transversal a la vez a partir de un modelo digital. Los procesos de MA actuales pueden utilizar una de varias tecnologías siendo una de las más populares la de fabricación de filamento fundido (FFF). La tecnología FFF hace uso de una diversidad de materiales; incluidos metales, termoplásticos, cerámica y vidrio (A. M. Crowell et al., 2018). En la actualidad la MA tiene aplicaciones prácticamente en todas las ramas de la industria—automotriz, aeroespacial, salud, etc.

Por otra parte, la literatura reporta que los procesos de MA están limitados por la falta de garantía de calidad e inconsistencias entre impresiones debido a limitaciones de confiabilidad durante el proceso de impresión (Wu et al., 2016), ya que éste puede sufrir desviaciones durante la fabricación de la pieza (Huang et al., 2015). Para ayudar a corregir estos problemas, A. Crowell et al. (2018) sugiere que la recopilación de datos con redes de sensores durante el proceso de impresión y su análisis puede proporcionar información de cómo controlar el proceso. Sin embargo, las impresoras 3D actuales poseen sistemas de monitoreo y control poco sofisticados que no permiten monitorear adecuadamente su condición de operación para garantizar su desempeño, lo que ocasiona pérdida de recursos (mala calidad, material, tiempo, energía, etc). Adicionalmente, la gran cantidad de datos que pueden generar las redes de sensores que pudieran implementarse y la falta de una metodología estándar para analizar dichos datos limita la implementación de sistemas de monitoreo y control más sofisticados en los sistemas de MA.

El objetivo de este trabajo de investigación es, por tanto, mediante el uso de algoritmos de aprendizaje profundo encontrar las correlaciones e interacciones entre las diversas variables de los datos de adquiridos con las unidades de medición inercial (IMU) para identificar patrones en dichos datos de alta dimensionalidad que permitan determinar la condición de operación de la impresora.

## Antecedentes

De acuerdo con Ahuett-Garza y Kurfess (2018), el concepto de la I4.0—conocida también como manufactura inteligente—abarca la integración de varias tecnologías con el propósito de mejorar la eficiencia y la capacidad de respuesta de un sistema productivo y donde un elemento clave es la acrecentada capacidad de obtener datos de los procesos de fabricación, y lo que es más importante, analizar las tendencias y comportamientos que estos datos representan. La manufactura aditiva (MA) o impresión 3D, el internet de las cosas (IoT), el big data, los sistemas ciberfísicos y el aprendizaje automático, son tecnologías asociadas con la I4.0 entre varias otras.

La MA ofrece la transición prácticamente directa de un modelo digital a la fabricación de la pieza física sin necesidad de herramientas especiales, lo que representa una gran ventaja respecto a la manufactura convencional. El IoT podría considerarse una de las principales tecnologías de la I4.0 gracias a la convergencia de nuevas tecnologías de sensores a precios asequibles, junto con la capacidad cada vez mayor de los sistemas de información para almacenar y analizar grandes cantidades de datos (Big Data). El concepto sistemas ciberfísicos se refiere a la unión entre el mundo físico y digital con los sistemas de analítica de datos con el fin de mejorar la eficiencia de los sistemas industriales. El aprendizaje automático de acuerdo con Raschka (2016), es una rama de la inteligencia artificial (IA) que se define como la aplicación y ciencia de algoritmos que permiten extraer información de los datos.

Larrañaga et al. (2018), resalta que en la industria la cantidad de datos generados por controladores de máquinas, sensores, sistemas de fabricación, etc. está creciendo exponencialmente, lo que hace necesario crear sistemas inteligentes—más que modelos matemáticos y estadísticos—capaces de transformar esta gran cantidad de datos en conocimiento. El aprendizaje automático es la herramienta que permite construir dichos modelos que proporcionen información valiosa para la toma de decisiones en diferentes sectores industriales tales como diagnosticar de fallas, monitorear las condiciones de los equipos, gestionar la salud de activos, etc. LeCun et al. (2015) señala que el aprendizaje profundo—en inglés, *deep learning* (DL)—se ha convertido en un avance del aprendizaje automático para resolver problemas que requieren descubrir una estructura intrincada en datos de alta dimensionalidad. Alom et al. (2019) y Ma et al. (2018), subrayan que una diferencia

clave entre el aprendizaje automático tradicional y el aprendizaje profundo es la forma en cómo se extraen las características de los datos. Esto es, los enfoques tradicionales de aprendizaje automático utilizan características de ingeniería desarrolladas por un humano mediante la aplicación de varios algoritmos de extracción de características y luego aplican los algoritmos de aprendizaje. En contraste, las redes neuronales profundas son capaces de extraer automáticamente las características relevantes de las señales sin procesar a través del procedimiento de aprendizaje por capas.

Wu et al. (2017) refiere que aunque el monitoreo de condiciones del estado de una máquina es considerado como una importante estrategia de diagnóstico y mantenimiento para asegurar la calidad del producto, actualmente la mayoría de las máquinas de MA no están equipadas con sistemas de monitoreo y control de lazo cerrado, y sin la detección en tiempo real, los fallos del proceso o averías de la máquina se producen sin previo aviso durante el proceso de fabricación y la calidad y la repetitividad de los productos finales no se puede garantizar. De manera reciente se han desarrollado varios métodos para el monitoreo de los procesos de impresión 3D usando diversos tipos de sensores. Los objetivos del monitoreo y diagnóstico se pueden dividir en dos grupos principalmente: 1) monitorear los estados de operación de la máquina, y 2) garantizar la calidad de las piezas impresas (Li et al., 2019). Existen varios trabajos enfocados en el monitoreo de condiciones de operación y detección de anomalías en impresoras 3D de fusión de filamento usando diversos tipos de sensores y herramientas para el análisis de los datos. En impresoras 3D tipo cartesiano, Yoon y He (2014) usaron sensores de emisión acústica y sensores piezoeléctricos analizando los datos con herramientas estadísticas convencionales. Wu et al. (2017) utilizó sensores de emisión acústica y modelos de Markov, Becker et al. (2020) uso sensores acústicos y redes neuronales de memoria a largo corto-plazo (LSTM). En impresoras 3D tipo delta, S. Zhang (2019), Long et al. (2020) y Yang et al. (2021) usaron sistemas de referencia de actitud y rumbo y variantes de autocodificadores. Li et al. (2021) utilizó acelerómetros y codificadores adversarios generativos convolucionales.

De acuerdo con Flovik (2018), la detección de anomalías—o detección de valores atípicos—es la identificación de eventos u observaciones que difieren significativamente de la mayoría de los datos.

Estos datos anómalos están generalmente relacionados con algún tipo de problema, por ejemplo, defectos estructurales, mal funcionamiento del equipo, etc. En el campo de la detección de anomalías vibratorias en particular, la mayoría de los trabajos se han concentrado en el análisis de máquinas rotativas (turbinas, engranajes, etc.), especialmente en aeronáutica, donde Vos et al. (2022) usaron datos sin procesar en el dominio temporal y redes neuronales de memoria a largo corto-plazo (LSTM) para predecir las condiciones de operación de rodamientos en aeronaves.

## **Materiales y métodos**

Algunos problemas durante el proceso de impresión de la pieza tales como pandeo, defectos en las capas iniciales y defectos en las capas finales entre otros, producen interferencias entre (la boquilla forma parte del sistema extrusor) y la pieza asentada en la cama de impresión. Esto genera que el sistema extrusor y la cama de impresión presenten vibraciones anormales, inclusive la interferencia puede ser tal que cause la pérdida de referencia del sistema extrusor. Asimismo, la vibración anormal debida a desgaste mecánico, falta de lubricación, etc. puede reflejarse en desplazamientos erráticos del sistema extrusor y de la cama de impresión. Adicionalmente de acuerdo con D. Zhang et al. (2019), bajo ciertas condiciones durante el proceso de impresión, si la frecuencia de vibración de la boquilla/extrusor está cerca de la frecuencia natural de la impresora, se puede producir resonancia en la impresora, lo que afectará seriamente la precisión de la impresión e incluso provocará defectos en la pieza impresa.

Para abordar estos problemas se propone un método de detección de anomalías vibratorias bajo el enfoque del aprendizaje automático semi-supervisado. Este enfoque combina el aprendizaje supervisado y el aprendizaje no supervisado y el cual es menos dependiente de datos etiquetados. La idea es utilizar un autocodificador (Goodfellow et al., 2016) para aprender el comportamiento normal de la impresora y luego usarlo para detectar anomalías.

## **Detección de anomalías usando autocodificadores**

De acuerdo con López Pinaya et al. (2020), los autocodificadores obtienen una representación compacta de los datos de entrada, lo que se le conoce como el espacio latente. El espacio latente

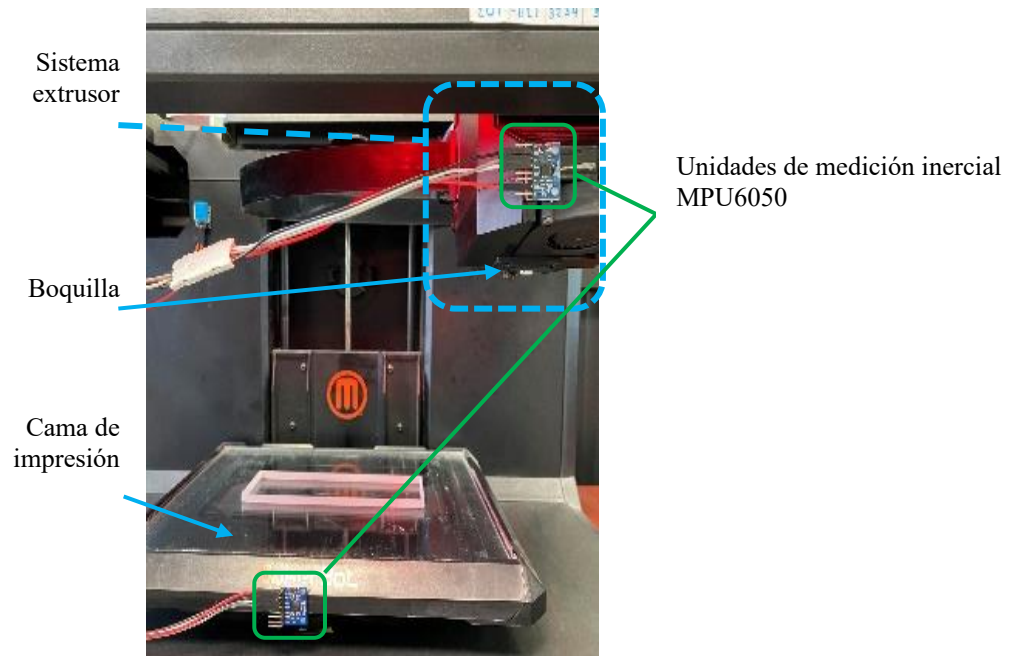
es usado luego para generar una salida lo más parecida a la entrada, esto es, la red trata de reconstruir el dato de entrada a la salida con el mínimo error posible.

Según Borghesi et al. (2019), en fechas recientes los autocodificadores han sido aplicados bajo el paradigma del aprendizaje semi-supervisado, especialmente para la detección de anomalías en diversas áreas tales como supercomputadoras, equipos de manufactura y plantas industriales. La idea central es entrenar el autocodificador para que aprenda el comportamiento normal de los equipos con datos etiquetados y, después del entrenamiento, usarlo para identificar condiciones anormales en base a la magnitud del error de reconstrucción. La premisa es que si el autocodificador aprende las correlaciones entre el conjunto de mediciones (características) que describen el estado normal del equipo bajo análisis, entonces puede notar cambios en estas correlaciones que indiquen un estado anormal. En condiciones normales de funcionamiento, estas características están vinculadas por relaciones específicas (es decir, variables físicas y químicas). La hipótesis es que estas correlaciones se verán perturbadas si el sistema entra en un estado anómalo.

### **Colecta de los datos**

En la Figura 3 se muestra una imagen de la impresora 3D Makerbot Replicator 5ª generación la cual se instrumentó con dos unidades de medición inercial MPU6050, una en el sistema extrusor y otra en la cama de impresión. Las unidades de medición inercial pueden medir tres aceleraciones lineales y tres velocidades angulares.

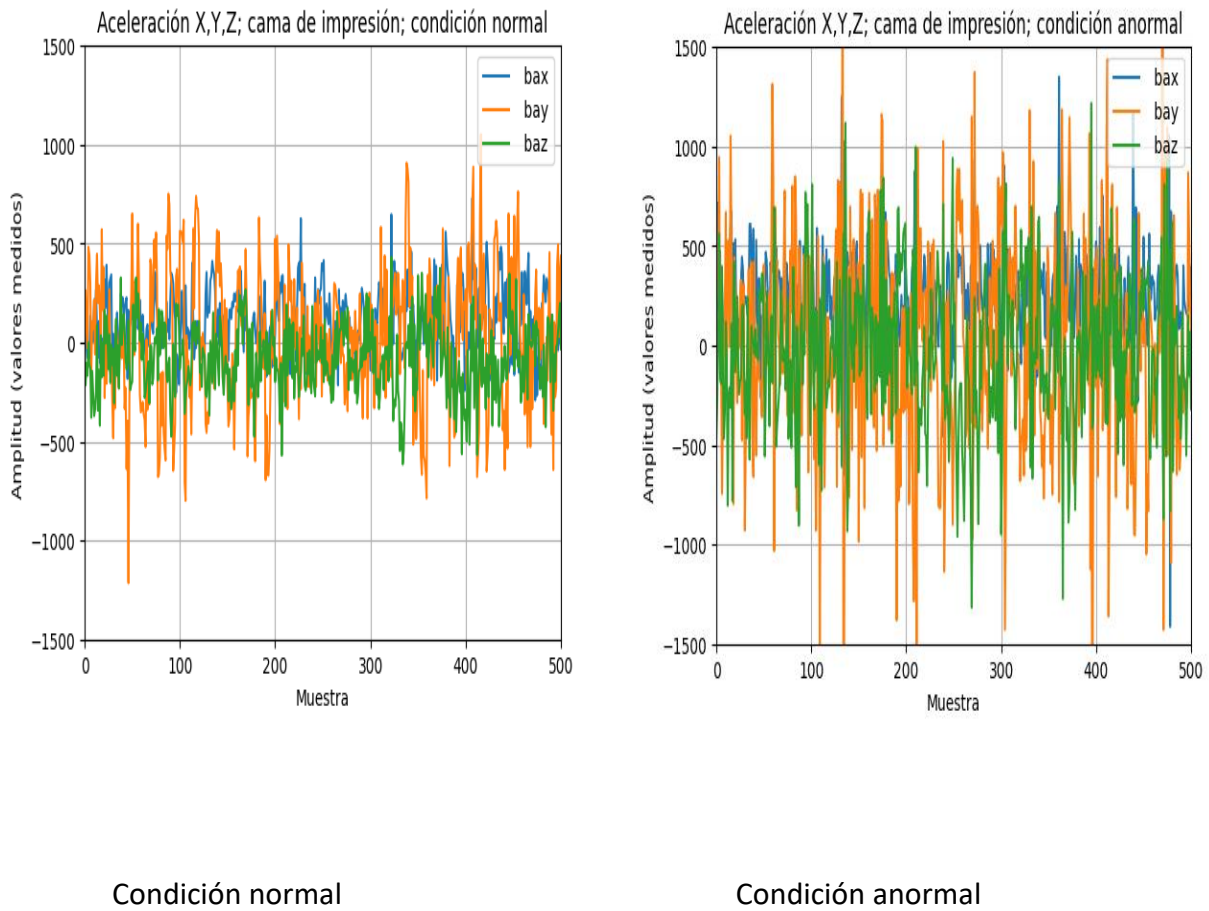
**Figura 3.** Montaje de las IMU en cama y extrusor.



Fuente: Elaboración propia

Se recolectaron datos de 12 variables, esto es, tres aceleraciones lineales (X, Y, Z) y tres velocidades angulares (@X, @Y, @Z) del sistema extrusor y de la plataforma durante los trabajos de impresión de diversas piezas. La lectura de las 12 variables se realizó a una frecuencia de 20 Hz. La velocidad de avance del extrusor se definió en 4 mm/s con lo que las lecturas se obtuvieron cada 0.2 mm de recorrido del extrusor. En la Figura 4 se muestra un extracto de las aceleraciones de la cama de impresión en el dominio temporal en condición normal y anormal (vibración anómala) de operación, y donde puede apreciarse una diferencia en la amplitud de las señales.

**Figura 4.** Aceleraciones de la cama de impresión.



Fuente: Elaboración propia

### Preprocesamiento de los datos

Los datos de las lecturas en el dominio temporal se preprocesaron calculando el valor promedio absoluto VAP:

$$VAP(x_{input}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i|, \text{ donde } n \text{ es el tamaño de la ventana.}$$



Se utilizó un tamaño de ventana  $n=5$ . Esto es, por cada 5 datos de cada una de las 12 señales medidas se generó un nuevo dato (valor absoluto promedio) para crear el conjunto de datos de condición normal  $X^N$ . Los datos se normalizaron entre 0 y 1.

El autocodificador se entrenó de forma semi-supervisada, esto es, se entrenó exclusivamente con datos de operación normal de la impresora los cuales se dividieron 80% para el conjunto de entrenamiento  $X_{Train}^N$  y 20% para el conjunto de prueba durante el entrenamiento  $X_{Test}^N$ . Se usó tamaño de lote 32, 200 épocas, optimizador ADAM y como función de pérdida el error cuadrático medio (ECM).

La topología del autocodificador se describe en la Tabla 4. Los 12 nodos de entrada del autocodificador corresponden con las 12 variables medidas (6 aceleraciones y 6 velocidades angulares).

**Tabla 4.** Topología del autocodificador.

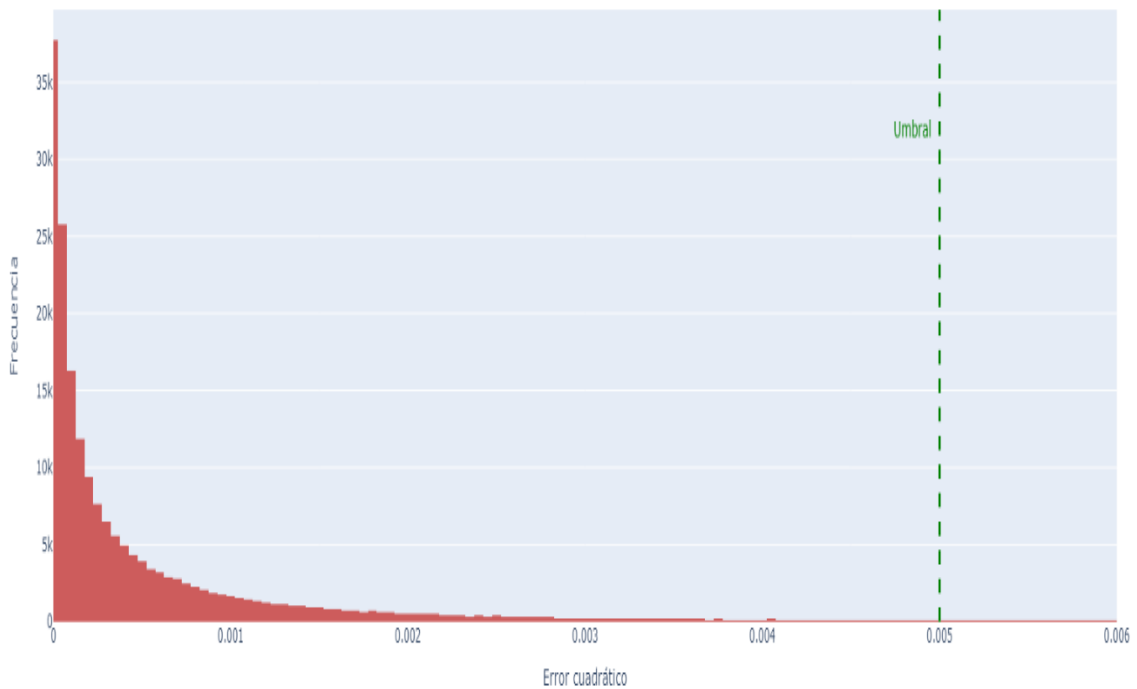
Layer (type)	Output Shape	Param #
input_1 (InputLayer)	[(None, 12)]	0
dense (Dense)	(None, 10)	130
dense_1 (Dense)	(None, 6)	66
dense_2 (Dense)	(None, 4)	28
dense_3 (Dense)	(None, 6)	30
dense_4 (Dense)	(None, 10)	70
dense_5 (Dense)	(None, 12)	132
=====		
Total params: 456		
Trainable params: 456		
Non-trainable params: 0		

Fuente: Elaboración propia

## Entrenamiento del autocodificador

Como se mencionó anteriormente, la idea central es que al entrenar el autocodificador, el error de reconstrucción—la diferencia entre el dato de entrada y el dato reconstruido—se minimice. Si el autocodificador se entrena únicamente con datos de condición normal  $X_{Train}^N$ , éste aprenderá las relaciones de ese conjunto de entrada y minimizará el error en base a esos datos. Una vez entrenado el autocodificador, si se le presentan datos de condición anormal  $X_{Test}^A$ , el error de reconstrucción deberá ser sustancialmente mayor. La Figura 5 muestra la distribución del error cuadrático de las predicciones sobre el conjunto de entrenamiento de condición normal  $X_{Train}^N$ .

**Figura 5.** Distribución del error cuadrático de las predicciones sobre  $X_{Train}^N$ .



Fuente: Elaboración propia

Para comparar el error de los diferentes conjuntos, se normalizó la raíz del error cuadrático medio (RECM) de cada conjunto dividiendo por la RECM de  $X_{Train}^N$ . De esta manera, la RECM normalizada de  $X_{Train}^N = 1$  es la referencia para una reconstrucción ideal. Por lo tanto, cuanto mayor sea la RECM normalizada de un conjunto dado, esto indicará un mayor error de reconstrucción de ese conjunto.

Como se aprecia en la Tabla 5, la RECM normalizada de los datos de prueba de condición anormal  $X_{Test}^A$  es 5.13 veces mayor que la RECM normalizada de los datos del conjunto  $X_{Train}^N$  y del conjunto  $X_{Test}^N$ . Esto valida la hipótesis de que si el autocodificador aprende adecuadamente las relaciones entre los datos de condición normal ( $X_{Train}^N$ ), y si después del entrenamiento se le presentan datos pertenecientes a una condición similar ( $X_{Test}^N$ ), el autocodificador puede reconstruir el dato con el mínimo error. Por el contrario, si los datos provienen de una condición anormal ( $X_{Test}^A$ ), el error de reconstrucción es mayor.

**Tabla 5.** RECM de los diferentes conjuntos.

	$X_{Train}^N$	$X_{Test}^N$	$X_{Test}^A$
RECM	0.029	0.029	0.149
RECM normalizada	1	1	5.13

Fuente: Elaboración propia

## RESULTADOS

### Clasificación de anomalías vibratorias

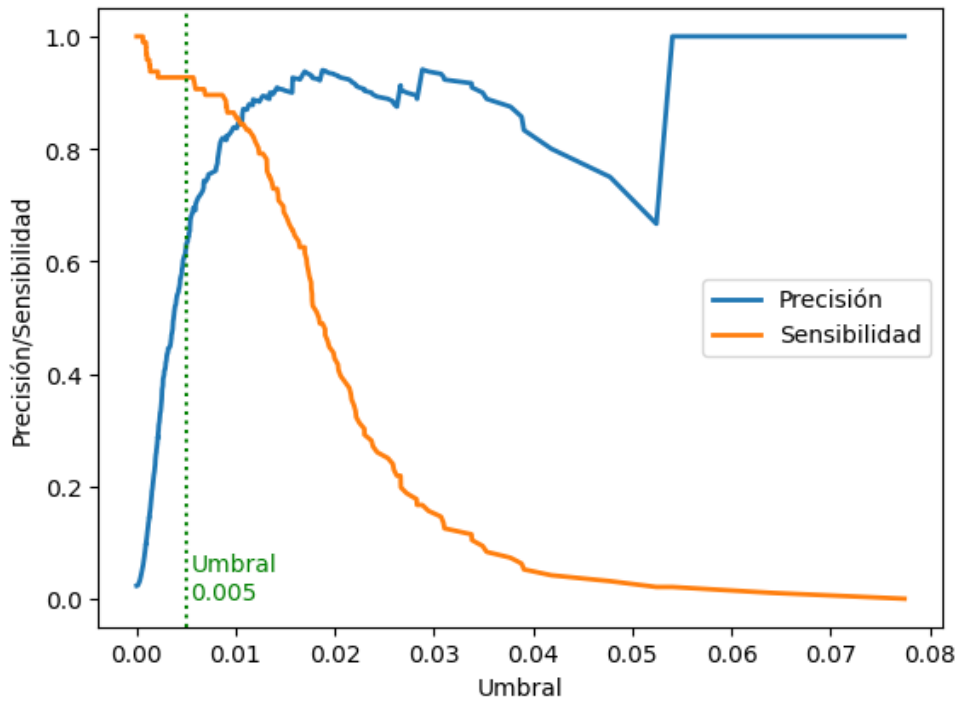
Para la clasificación de anomalías se utilizó el ECM que se define como:

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2, \text{ donde } x_i \text{ es el dato original y } \hat{x}_i \text{ es el dato reconstruido.}$$

Si el ECM de la predicción  $\hat{x}$  supera un umbral definido, entonces ese dato se clasifica como anomalía. Se optó por definir el umbral de una manera simple a partir de la distribución del error de los datos de entrenamiento de condición normal  $X_{Train}^N$ . En la Figura 5 podemos observar que el error de reconstrucción está concentrado por debajo de 0.005, por lo que se usó ese valor como umbral para las predicciones sobre nuevos datos.

Asimismo, en la Figura 6 se muestran las curvas de precisión y sensibilidad. Observamos que dependiendo del umbral que seleccionemos, obtendremos un valor de sensibilidad y precisión en las predicciones. En nuestro caso nos interesa lograr una sensibilidad—dato anormal clasificado correctamente—lo más cercana a 1 pero sin penalizar demasiado la precisión—dato normal clasificado correctamente. Ver la matriz de confusión de la Figura 7.

**Figura 6.** Precisión y sensibilidad para diferentes umbrales.



Fuente: Elaboración propia

Para evaluar cuantitativamente el desempeño del método propuesto se usó el conjunto de prueba  $X_{Test}$  que contenía las 2 clases de datos, esto es, registros de condición normal y registros de condición anormal. Denotamos muestras normales y muestras anormales como negativas y positivas respectivamente. La Figura 7 muestra la matriz de confusión.

**Figura 7.** Matriz de confusión.

		Predicción	
		Normal	Anormal
Real	Normal	Verdadero negativo (VN): normal clasificado como normal	Falso positivo (FP) o error tipo1: normal clasificado como anormal
	Anormal	Falso negativo (FN) o error tipo 2: anormal clasificado como normal	Verdadero positivo (VP): anormal clasificado como anormal

Fuente: Elaboración propia

Es preciso recalcar que el interés en este trabajo es lograr que las anomalías sean clasificadas correctamente, por lo que se dio prioridad al parámetro de sensibilidad. La sensibilidad nos indica la tasa de verdaderos positivos (VP) clasificados correctamente por el algoritmo y se define como:

$$Sensibilidad = \frac{VP}{VP + FN}$$

Hay que recordar que en este caso se definió como VP a las “anomalías clasificadas como anomalías” (Figura 7). Cuanto más cercana la sensibilidad a uno, esto indica que las anomalías son en su mayoría clasificadas correctamente.

La sensibilidad obtenida fue de 0.927, lo que representa que cerca del 93% del total de las anomalías son clasificados correctamente.

## Discusión

Los autocodificadores ofrecen ventajas para la detección de anomalías usando datos de vibración con respecto a otros algoritmos de aprendizaje automático. Una de las principales ventajas es que puede entrenarse de forma semi-supervisada, esto es, con datos de condición de operación normal exclusivamente. Esto facilita su implementación, ya que en las aplicaciones industriales generalmente se dispone de datos de condición normal de operación de los equipos.

Con el uso de autocodificadores de arquitectura profunda es innecesario un preprocesamiento extensivo de los datos ya sea para remover ruido, extraer componentes principales (Wu et al., 2017) o transformar los datos al dominio frecuencial (Long et al., 2020), (D. Zhang et al., 2019). En este trabajo se demostró que se pueden usar los datos en el dominio temporal con un preprocesamiento relativamente sencillo y aun así obtener buenos resultados en las predicciones.

Los sensores y procesadores de bajo costo cumplen satisfactoriamente para la adquisición de señales vibratorias, lo que representa una alternativa al uso de equipos costosos (Wu et al., 2017) y muy sofisticados que eventualmente pueden resultar más caros que la propia impresora 3D.

El uso de software libre para la adquisición de los datos y el análisis de estos evitó depender de programas propietarios costosos. Adicionalmente, se aprovechó el entorno de desarrollo en la nube (Google Colab), siendo innecesario utilizar equipo de cómputo de alta gama para el entrenamiento del autocodificador.

Dado que se prioriza la detección de la condición anormal operación de la impresora, el porcentaje de falsos positivos o error tipo 1—condición normal clasificada como anormal—puede ser alto.

El conjunto de datos de estado anormal de operación  $X_{Test}^A$  para probar el desempeño del autocodificador es relativamente pequeño. Esto debido a la dificultad para reproducir fallas en la impresora 3D. Sin embargo, la base de datos de anomalías se irá incrementando. Adicionalmente, el autocodificador permitirá identificar otras anomalías difíciles de detectar por el usuario.

## **Conclusiones**

En este trabajo se presentó una metodología para predecir anomalías vibratorias en una impresora 3D de fusión de filamento y de esa manera determinar si dicho equipo opera en condición normal o anormal. Se analizaron datos de vibración usando un autocodificador de arquitectura profunda y utilizando los datos en el dominio temporal.

Con el método propuesto en este trabajo es posible lograr un porcentaje de clasificación de anomalías vibratorias cercano al 93%, lo que es bastante aceptable teniendo en cuenta su relativa simplicidad de implementación en comparación con otros trabajos donde se requiere una ingeniería extensiva para el preprocesamiento de los datos.

## **Futuras líneas de investigación**

Como trabajo futuro se recomienda el despliegue del sistema de monitoreo con cómputo de borde para la predicción de fallas en tiempo real, así como la optimización de los hiperparámetros del autocodificador para un mejor desempeño de las predicciones.

## **Agradecimientos**

A la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Tecnológico Nacional de México campus Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (Conahcyt) de México.



## Referencias

- Ahuett-Garza, H. y Kurfess, T. (2018). A brief discussion on the trends of habilitating technologies for Industry 4.0 and Smart manufacturing. *Manufacturing Letters*, 15, 60–63. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.02.011>
- Alom, M. Z., Taha, T. M., Yakopcic, C., Westberg, S., Sidike, P., Nasrin, M. S., Hasan, M., van Essen, B. C., Awwal, A. A. S. y Asari, V. K. (2019). A State-of-the-Art Survey on Deep Learning Theory and Architectures. *Electronics*, 8(3), 292. <https://doi.org/10.3390/electronics8030292>
- Becker, P., Roth, C., Roennau, A. y Dillmann, R. (2020). Acoustic Anomaly Detection in Additive Manufacturing with Long Short-Term Memory Neural Networks, 921–926.
- Borghesi, A., Bartolini, A., Lombardi, M., Milano, M. y Benini, L. (2019). Anomaly Detection Using Autoencoders in High Performance Computing Systems. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 33(01), 9428–9433. <https://doi.org/10.1609/aaai.v33i01.33019428>
- Crowell, A. M., Cramer, S. A., Lopez, J. P., Rashka, E. K., Reuss, R. C., Wordsworth, V. K. y & Lewin, G. C. (2018). Development of a Quality Assurance Tool for Additive Manufacturing: University of Virginia, Charlottesville, Virginia, USA, 27 April 2018. *Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS)*. <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=8370613>
- Crowell, A., Cramer, S. y Lopez, J. (2018). 2018 Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS): University of Virginia, Charlottesville, Virginia, USA, 27 April 2018. <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=8370613>
- Flovik, V. (2018). *How to use machine learning for anomaly detection and condition monitoring* [Online]. Available: <http://towardsdatascience.com>
- Goodfellow, I., Bengio, Y. y Courville, A. (2016). *Deep learning*. MIT press.
- Huang, T., Wang, S. y He, K. (2015). Quality Control for Fused Deposition Modeling Based Additive Manufacturing: Current Research and Future Trends, *The First International Conference on Reliability Systems Engineering*.

Larrañaga, P., Atienza, D., Diaz-Rozo, J., Ogbechie, A., Puerto-Santana, C. E. y Bielza, C. (2018). *Industrial Applications of Machine Learning. Chapman and Hall/CRC Data Mining and Knowledge Discovery Ser.* Chapman and Hall/CRC. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=5613453>

LeCun, Y., Bengio, Y. y Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436–444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>

Li, Cabrera, D., Fernando, S., René-Vinicio, S., Cerrada, M., Long, J. y Valente de Oliveira, J. (2021). Fusing convolutional generative adversarial encoders for 3D printer fault detection with only normal condition signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 147, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107108>

Li, Y., Zhao, W., Li, Q., Wang, T. y Wang, G. (2019). In-Situ Monitoring and Diagnosing for Fused Filament Fabrication Process Based on Vibration Sensors. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 19(11). <https://doi.org/10.3390/s19112589>

Long, J., Sun, Z., Li, C., Hong, Y., Bai, Y. y Zhang, S. (2020). A Novel Sparse Echo Autoencoder Network for Data-Driven Fault Diagnosis of Delta 3-D Printers. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(3), 683–692. <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2905752>

López Pinaya, W., Vieira, S., Garcia-Dias, R. y Mechelli, A. (2020). *Machine learning: Chapter 11. Autoencoders.* Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815739-8.00011-0>

Ma, M., Sun, C. y Chen, X. (2018). Deep Coupling Autoencoder for Fault Diagnosis with Multimodal Sensory Data. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, PP.

Raschka, S. (2016). *Python machine learning: Unlock deeper insights into machine learning with this vital guide to cutting-edge predictive analytics. Community experience distilled.* Packt Publishing open source.

Vos, K., Peng, Z., Jenkins, C., Shahriar, M. R., Borghesani, P. y Wang, W. (2022). Vibration-based anomaly detection using LSTM/SVM approaches. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 169, 108752. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108752>

Wu, H., Yu, Z. y Wang, Y. (2016). A New Approach for Online Monitoring of Additive Manufacturing Based on Acoustic Emission. En *Volume 3: Joint MSEC-NAMRC Symposia.* American Society of Mechanical Engineers. <https://doi.org/10.1115/MSEC2016-8551>

Wu, H., Yu, Z. y Wang, Y. (2017). Real-time FDM machine condition monitoring and diagnosis based on acoustic emission and hidden semi-Markov model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(5-8), 2027–2036. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9548-6>

Yang, Z., Gjorgjevikj, D., Long, J., Zi, Y., Zhang, S. y Li, C. (2021). Sparse Autoencoder-based Multi-head Deep Neural Networks for Machinery Fault Diagnostics with Detection of Novelty. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 34(1). <https://doi.org/10.1186/s10033-021-00569-0>

Yoon, Y. y He, D. (2014). A PHM Approach to Additive Manufacturing Equipment Health Monitoring, Fault Diagnosis, and Quality Control, *Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*.

Zhang, D., Li, Z., Qin, S. y Han, S. (2019). Optimization of Vibration Characteristics of Fused Deposition Modeling Color 3D Printer Based on Modal and Power Spectrum Method. *Applied Sciences*, 9(19), 4154. <https://doi.org/10.3390/app9194154>

Zhang, S. (2019). Dynamic condition monitoring for 3D printers by using error fusion of multiple sparse auto-encoders. *Computers in Industry*, 105, 164–176. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.12.004>

## **Curriculum Vitae**

### **Jorge de la Riva Rodríguez**

Realizo su Doctorado en Ciencias en de Ingeniería Industrial (2000) en el Tecnológico Nacional de México (TecNM) / Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez (Primer Doctor egresado del ITCJ) y Maestría en Administración en la Universidad Autónoma de Nuevo León (1982) y Licenciatura en Ingeniería Industrial con opción Química en el Instituto Tecnológico de La Laguna (1975). Ha ocupado la jefatura de la División de Estudios de Posgrado e Investigación (DEPI) en varias ocasiones y jefe del Departamento de Ingeniería Industrial, del Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez (ITCJ), Profesor Investigador de la División de Estudios de Posgrado e Investigación por 40 años del mismo instituto, jubilado en octubre del 2023. Experiencia laboral por más de 40 años en compañías mexicanas y maquiladoras a nivel gerencial en el área de Ingeniería Industrial y administración. Miembro del SNI Nivel I con vigencia hasta el 2027. Miembro del Claustro Doctoral del Doctorado en Ciencias en Ingeniería y del Consejo de la Maestría en Ingeniería Industrial del TecNM / ITCJ, ambos programas en el PNPC de Conacyt.

### **Ana Isela García Acosta**

Realizó su Doctorado en Ciencias de la Ingeniería (2021) y la Maestría en Ingeniería Industrial (2009) en el Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez, la Licenciatura en Ingeniería Industrial en el TecNM/Instituto Tecnológico de Delicias. Cuenta con 10 años de experiencia laboral en la Industria maquiladora. Ha desempeñado el puesto de Coordinadora de la Maestría en Ingeniería Administrativa e Industrial en la División de Estudios de Posgrado del TecNM/ITCJ. Actualmente trabaja como Profesor Investigador en la División de Estudios de Posgrado TecNM/ITCJ. Perfil Prodep, Miembro del Claustro Doctoral del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería y Consejo de la Maestría en Ingeniería Industrial. Línea de Investigación Neuroergonomía; con publicaciones como Neuroergonomic Stress Assessment with Two Different Methodologies in a Manual Repetitive Task Product Assembly (JCR 2021), Metaanálisis: Detección del estrés en los conductores (Ingeniantes 2021), Brainwaves Behavior During the Learning Curve Associated with the Manufacturing of a Product with Legos (Springer 2021), Analysis of Brainwaves Behavior, Employing Different Standard Times During the Assembly of a Product with Legos for Manufacturing Applications (Springer, 2020), Efecto de la Música Clásica y Merengue en el Comportamiento de las Ondas Cerebrales Durante el Ensamble de un Producto a Base de Legos (2019).

### **Leonardo Alberto Alanís Castro**

Realizo su Maestría en Ingeniería Industrial (2022) y Licenciatura en Ingeniería en Logística (2017) en el Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez. Cuenta con 3 años de experiencia profesional en la industria maquiladora, actualmente desempeña como docente y coordinador de orientación educativa en el Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez. Con línea de investigación en el área de la neuroergonomía, mediante publicaciones como Meta-análisis: Detección del estrés en los conductores, en la edición especial de la Revista Ingeniantes

“Congreso Internacional de Ingenierías, 2021: Economía creativa para el desarrollo sostenible” edición diciembre de 2021 (ISSN 2395-9452), y con participación en el Congreso Internacional De Ingenierías 2021, con la ponencia “Técnicas Para Detectar El Estrés En Los Conductores: Meta-Análisis”.

### **Humberto García Castellanos**

Nació en Villa Ignacio Allende, Durango, México en 1960. Actualmente vive en El Paso, Texas. ESTADOS UNIDOS. Recibió la licenciatura en el Instituto Tecnológico de Durango en Durango, México. Los títulos de Maestría y Doctorado en Ingeniería Industrial del Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez México. Desde 1991 a la fecha, ha sido profesor en el Tecnológico Nacional de México / ITCJ. Tiene varias publicaciones en los Estados Unidos de América, Inglaterra, México, Egipto, Marruecos, Suiza e India. Ha tenido experiencia profesional en varios fabricantes de automóviles internacionales como General Motors, Nissan, Ford y Chrysler durante catorce años. Desarrolló múltiples funciones en diferentes niveles organizacionales, supervisor de producción, ingeniero industrial, ingeniero de producto, ingeniero de calidad, gerente de producción, ingeniero ambiental como auditor de industrias. Participó como investigador para la localización de planta de aguas residuales urbanas en Ciudad Juárez, México. Además, sus publicaciones tratan sobre el éxito de la gestión de proyectos industriales, inteligencia artificial y en la logística de las cadenas de suministro, y otras publicaciones sobre temas automotrices. Actualmente es supervisor de la revista Dyna en Europa.

### **Adrián Francisco Loera Castro**

Es un profesional altamente capacitado con una amplia trayectoria en campo de trabajo de los sistemas de cómputo y la cadena de suministro en especial en temas de logística. Graduado del Tecnológico Nacional de México (TecNM) campus Cd. Juárez con un título de Doctor en Ciencias de la Ingeniería, ha demostrado excelencia en su carrera tanto en el ámbito profesional como académico. En su carrera profesional, ha desempeñado cargos como jefe de investigación, coordinador de programas de doctorado y cargos académicos en el área de ingeniería industrial y logística. Además de su carrera profesional, ha tenido una destacada trayectoria académica. Ha publicado artículos en revistas especializadas, ha participado en congresos nacionales e internacionales y ha sido invitado a dictar conferencias en prestigiosas universidades. Se ha destacado también en el ámbito de la investigación, participando en proyectos de investigación en colaboración con el Instituto Mexicano del Transporte (IMIT) y la Universidad Autónoma de Cd. Juárez (UACJ) y ha contribuido significativamente al desarrollo y aplicación de nuevos conocimientos en su campo de trabajo.

### **Cyntia Márquez Márquez**

Egresada del instituto tecnológico de Ciudad Juárez en la carrera de sistemas computacionales, ella tiene una maestría en ingeniería administrativa, ha sido instructora de diversos cursos de administración en la plataforma Moodle y herramientas tecnológicas para el soporte de la enseñanza. Tiene publicaciones a nivel nacional e internacional. Tiene diversos conocimientos en

diversos lenguajes como visual basic, java, Python, etc. Actualmente se desempeña como profesora del instituto tecnológico desempeñando cargos administrativos como la coordinación de educación a distancia además impartiendo con asignatura las relacionadas a sistemas computacionales desde 2016 a la fecha y de forma paralela trabaja para una institución bancaria como programadora y generadora de códigos

### **Rigoberto Reyes Valenzuela**

Originario de Huatabampo, Sonora, México, estudió la carrera de Licenciatura en Sistemas Computacionales en la Universidad de Occidente, en Los Mochis, Sinaloa, obtuvo el grado de Maestro en Administración por la Universidad de Sonora, actualmente estudia el doctorado en Tecnología Educativa, en la Universidad Davinci. Cuenta con una experiencia profesional de 30 años en el sector educativo nacional del área tecnológica, en provincia se desempeñó como Director del Instituto Tecnológico de Orizaba y como Subdirector en los Institutos Tecnológicos de: Huatabampo, Ciudad Jiménez, y Valle del Yaqui.

### **Manuel de Jesús López Pérez**

Originario de Culiacán, Sinaloa, México, estudió la Carrera de Ingeniería Industrial y de Sistemas en el Instituto Tecnológico de Culiacán, obtuvo el grado de Maestro en Ciencias Económicas por la Escuela Superior de Economía del Instituto Politécnico Nacional, y el grado de Doctor en Educación por el Centro de Estudios Avanzados de las Américas; cuenta con una experiencia profesional de 30 años en el sector educativo nacional del área tecnológica en la que ha colaborado a nivel central del Tecnológico Nacional de México (DGEST, DGIT) como Secretario de Administración, Director de Recursos Humanos, y Coordinador de Carrera, en provincia se desempeñó como Director de los Institutos Tecnológicos de: Los Mochis, Hermosillo y Huatabampo, asimismo ocupó el puesto de Subdirector, tanto en el Tecnológico de Zacatecas como Huatabampo, aunado a ello, fue Director de Casa-Telmex Culiacán, además laboró como Verificador - Clarificador en el Centro Regional de Cómputo del IFE en la Cd. de Culiacán.

### **Rubén Juárez Rodríguez**

Originario de Tehuacán, Puebla, México, estudió la carrera de Licenciado en Informática, en el Instituto Tecnológico de Orizaba, obtuvo el grado de Maestro en Dirección y Administración de Empresas en la Universidad Internacional de la Rioja (UNIR); cuenta con una experiencia profesional de 25 años en el sector educativo nacional del área tecnológica en la que ha colaborado a nivel central del Tecnológico Nacional de México (DGEST, DGIT) como Jefe de Trámite y Gestión en la Dirección de Personal, Coordinador Administrativo en la Dirección de Institutos Tecnológicos Descentralizados y Jefe de Asistencia a los responsables de Recursos Humanos de los Institutos Tecnológicos Federales, en provincia se desempeñó como Subdirector de Servicios Administrativos en el Instituto Tecnológico de Orizaba, y Jefe de Recursos Humanos y Jefe de la carrera en Ingeniería en Sistemas Computacionales en el Instituto Tecnológico de Tehuacán.

### **Arturo Paz Pérez**

El Mtro. Arturo Paz Pérez es Ingeniero en Aeronáutica con una maestría en ciencias de la ingeniería aeronáutica. Ha desarrollado diversas investigaciones sobre vehículos aéreos no tripulados, un logro importante en la carrera del docente fue la obtención de una patente el 27 de mayo de 2021, con el folio de IMPI: MX/a/2015/003936, patente en examen de fondo, con fecha del 14 de junio de 2020, y el folio de IMPI: MX/a/2017/007070. modelo de utilidad que se encuentra en examen de fondo con fecha del 8 de enero de 2021, y el folio de IMPI: MX/u/2018/000263. Este logro demuestra su capacidad para generar innovaciones prácticas y aplicables en su área de conocimiento. Cuanta con amplia trayectoria en la industria aeronáutica como lo son: Aeroméxico, Oaxaca Aerospace, GE Aviation. Además de ser afiliado a: The American Institute of Aeronautics and Astronautics.

### **Lizette Alvarado Tarango**

Tecnológico Nacional de México / IT de Ciudad Juárez, México Docente del departamento de la Division de Estudios de Posgrado e Investigación, actualmente en la coordinacion de vinculación y educación continua. Aportación en artículos sobre responsabilidad social en temas de desnutrición y apoyo a comunidades marginadas y el impacto de su programa de RSE: caso de una empresa del norte de México

### **Manuel Arnoldo Rodríguez Medina**

Profesor Decano en el Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez / Division de Posgrado e Investigación. Obtuvo su PhD. en Ingeniería Industrial en el Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez en 1998. Sus intereses de investigación incluyen diseño experimental, métodos de superficie de respuesta e Ingeniería de Confiabilidad. Es autor de más de 100 artículos de revistas en estas áreas. Doctor Rodríguez es miembro de la Asociación Americana de la Calidad, así como Miembro Senior del Instituto de Ingenieros Industriales.

### **Luz Angélica Aguilar Chávez**

Egresada de la licenciatura en Matemáticas por la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez y cursó una Maestría en Ingeniería Industrial por el Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez/TECNM con honores, obteniendo los promedios más altos de su programa y del departamento de posgrado e investigación. Se ha desarrollado en áreas estadísticas como el modelado por redes Bayesianas, el uso de softwares estadísticos para el modelado de problemas que involucran incertidumbre, así como la construcción de modelos de situaciones de índole sociales.

### **Carlos Alberto Ronquillo Salas**

Ingeniero Electromecánico egresado del Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez (1992). Realizó estudios de maestría en ciencias en Comercialización de Ciencia y Tecnología en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados unidad Monterrey (2009) y de maestría en ciencias en Automatización y Robótica en la Universidad de Dortmund, Alemania (2015). Actualmente estudia el doctorado en Ciencias de la Ingeniería en el Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez en el área de aprendizaje profundo aplicado a manufactura aditiva. Su experiencia profesional abarca 29 años, habiendo trabajado para empresas como Philips, Festo, Siemens y Bosch en áreas de ingeniería, mejora de procesos, e implementación de nuevos procesos y tecnologías. En los últimos 16 años se ha desempeñado como contratista y consultor en la integración de equipos de fabricación automatizada y en particular sistemas de magnetizado para la industria manufacturera. Su experiencia académica abarca 16 años y actualmente es profesor de tiempo completo del Tecnológico Nacional de México campus Ciudad Juárez (Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez) en el departamento de Metalmeccánica.

### **Ulises Martínez Contreras**

Doctorado en Ciencias de la Ingeniería Industrial e Investigación de Operaciones. Egresado de la Universidad Estatal de Colorado, Fort Collins, Colorado. U.S.A. Cuenta con más de 20 años de experiencia docente en prestigias universidades como lo son: Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez en Cd. Juárez Chihuahua México, Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey campus Ciudad Juárez, Universidad Estatal de Colorado en Fort Collins Co. USA, Instituto Tecnológico de Tláhuac II en CDMX. Cuenta con experiencia profesional tanto en el sector público como el privado.

### **Javier Antonio Lom Hernandez**

Obtuvo su maestría en Ciencias de la ingeniería Administrativa por el Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez. Desde 2002, se encuentra activo en el sector automotriz, con experiencia en mejora continua, industrial y seis sigma, en procesos de manufactura electrónica e interiores, con estancias como gerente de ingeniería en plantas en Europa, Asia, África y América, liderando implementaciones de proyectos de mejora continua, arranque de instalaciones y transferencias de productos. Fue docente del Tecnológico Nacional de México campus de Ciudad Juárez, en el área de investigación, administración de proyectos y Manufactura en Industria 4.0.

### **Adán Valles Chávez**

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 mas 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.

### **Gabriel Gómez Martínez**

Cuenta con una maestría en Ingeniería Industrial por el Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez 2016 y se ha desarrollado en el campo de Excelencia Operacional (Lean Six Sigma) por más de 15 años en empresas del giro automotriz y telecomunicaciones como: Delphi inc., Lear corp. Y TE Connectivity. Actualmente es Director de Operational Excellence para ThyssenKrupp, es responsable de las oficinas de: ingeniería, operaciones y mejoramiento continuo. Este certificado como Master Black Belt por la Sociedad Americana para la Calidad y como Profesional de Administración de Proyectos por el PMI. Actualmente cursa estudios de Doctorado en el Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez.

### **Eduardo Rafael Poblano Ojinaga**

Jefe del Departamento Académico en el Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez. Obtuvo su PhD. en Tecnología en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez en 2019. 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 se desempeña como subdirector administrativo del Tecnológico Nacional de México, Campus Ciudad 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.

## **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.

Se termino en julio 2023 en los talleres de Editorial Centro de Estudios e  
Investigaciones para el Desarrollo Docente. CENID A.C.  
Pompeya 2705, Col. Providencia, C.P. 55670, Guadalajara, Jal. México.  
Teléfono: 01 (33) 1061 8187



ISBN 978-607-8830-23-7

