



TTJ

THE THINKER'S
JOURNAL

Volumen 01
Nro. 01
Enero /
Julio 2025

The Thinker's Journal • Año I • Número 1 • Enero - Julio 2025



Revista The Thinker's Journal N° 1

© Instituto Superior Tecnológico 17 de Julio

Mgr. Pedro Arias.

Rector.

Mgr. Lorena Casanova.

Vicerrectora.

Matriz Urcuquí - Ecuador, Via Hacienda San Jose, Polígono Yachay.

Sede Ibarra – Cristóbal Gómez Jurado 225 y Alfonso Almeida.

Teléfono: +593 981212881

Email: info@ist17dejulio.edu.ec

www.web.ist17dejulio.edu.ec

The Thinker's Journal (TTJ) es una revista científica de acceso abierto editada por el Instituto Superior Tecnológico 17 de Julio, con periodicidad semestral y un riguroso proceso de revisión por pares externos. Su misión es difundir artículos originales, inéditos y de calidad en diversas áreas del saber técnico, científico y académico, promoviendo la reflexión crítica, el pensamiento innovador y la producción intelectual tanto de autores internos como externos.

El enfoque multidisciplinario orientado a fortalecer la vinculación con la comunidad académica y profesional, busca convertir a TTJ en referente de publicación de investigaciones científicas, aplicadas y contextualizadas a los desafíos de la sociedad actual.

Enero – Julio 2025

Publicación semestral.

Urcuquí – Ecuador

Ibarra – Ecuador

Editor

Ing. Daniel Almeida

© The Thinker's Journal

Comité editorial

Mgr. Brayan Quistial

Mgr. Diana Arichabala

Ing. Luis Gálvez

Revisor de idiomas

Mgr. Brayan Quistial

Revisores de fondo y estilo

Mgr. Marco Checa

Ing. Romel Obando

Diseño y diagramación

Mgr. Andrea Rojas.



Índice

Editorial	4
Influencia de los gases protectores en soldadura MIG al aire libre. Influence of shielding gases on open-air MIG welding.	5
Evaluación multicriterio de los sistemas de protección anticorrosiva para estructuras metálicas expuestas al ambiente. Multi-criteria evaluation of corrosion protection systems for metallic structures exposed to the environment.	15
Plan de mantenimiento dentro del modelo centrado en confiabilidad para el taller de mecánica industrial. Design of a Maintenance Plan within the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Model for the Industrial Mechanics Workshop.	29
Flujo Hidráulico en Dos Cilindros en Paralelo para Sistemas de Cincuenta Toneladas. Hydraulic Flow in Parallel Two-Cylinder Systems for Fifty-Ton Applications.	43
Fortalecimiento de la seguridad con el uso de cámaras CCTV en institutos de educación superior. Strengthening security with the use of CCTV cameras in higher education institutions.	58

Editorial

The Thinker's Journal es la revista del Instituto Tecnológico Superior 17 de Julio, dedicada a difundir y promover el conocimiento técnico, científico y tecnológico. Abre sus páginas a investigaciones y artículos sobre áreas como educación, comunicación, tecnologías emergentes y disciplinas que impulsen el desarrollo científico, social y productivo. Está dirigida a la comunidad académica y profesional, interna y externa al Instituto, brindando un espacio para que investigadores, docentes, estudiantes y profesionales compartan sus aportes con la sociedad.

En esta primera edición, se recogen investigaciones originales que abordan temas de gran relevancia tecnológica y práctica, como la seguridad institucional, la eficiencia en procesos metalúrgicos, el diseño hidráulico, el mantenimiento industrial y los recubrimientos anticorrosivos. Cada artículo se ha evaluado por pares académicos, asegurando la calidad científica y el cumplimiento de los criterios editoriales de la revista.

El número abre con el artículo “Influencia de los gases protectores en soldadura MIG al aire libre” de Luis Toapanta, Leonardo Luna y Álvaro Enríquez, quienes describen cómo distintos gases afectan la calidad de la soldadura, con aplicaciones directas en el ámbito de la ingeniería industrial.

Por su parte, Jonathan Córdova y Álvaro Enríquez presentan el artículo “Evaluación multicriterio de los sistemas de protección anticorrosiva para estructuras metálicas expuestas al ambiente”, donde se contrastan alternativas para prevenir el deterioro de estructuras metálicas frente a condiciones ambientales exigentes.

La propuesta “Plan de mantenimiento dentro del modelo centrado en confiabilidad (RCM) para el taller de mecánica industrial”, elaborada por Neider Benavides y Luis Tejada, plantea un enfoque metodológico estructurado para mejorar la disponibilidad y el desempeño de los equipos en talleres técnicos.

En “Flujo hidráulico en dos cilindros en paralelo para sistemas de cincuenta toneladas”, los autores Jonathan Paucar y Felipe Torres exploran soluciones técnicas para optimizar la operación de sistemas hidráulicos de alta capacidad.

Así mismo, en “Fortalecimiento de la seguridad con el uso de cámaras CCTV en institutos de educación superior”, Marco Checa, Jessica Torres, Fernando Valencia y Paulina Jácome analizan los beneficios de implementar sistemas de videovigilancia como estrategia de prevención en entornos educativos.

Esta edición inaugural de The Thinker's Journal se proyecta como una plataforma de difusión para investigaciones que nacen de la práctica y se nutren del pensamiento crítico. Que este primer volumen sea el inicio de un espacio duradero para la construcción colectiva del conocimiento, guiados por la convicción de que todo saber compartido tiene el poder de transformar realidades.

Ing. Daniel Almeida
Editor

Influencia de los gases protectores en soldadura MIG al aire libre

Toapanta, Luis¹, Enríquez, Álvaro²

¹ Instituto Superior Tecnológico "17 de Julio", Mecánica Industrial, <https://orcid.org/0009-0005-4204-0902>, Ibarra, Ecuador

² Instituto Superior Tecnológico "17 de Julio", Mecánica Industrial, <https://orcid.org/0009-0003-7285-1138>, Ibarra, Ecuador

Recibido: 2025/06/30

Aceptado: 2025/07/01

RESUMEN: La soldadura de estructuras metálicas al aire libre es un proceso fundamental en la construcción e infraestructura, está expuesta a condiciones ambientales que afectan significativamente la calidad del proceso. Factores como viento, humedad y variaciones térmicas comprometen la estabilidad del arco eléctrico y disminuyen la efectividad de los gases de protección, provocando defectos en el cordón de soldadura, tales como porosidad, fisuras y falta de fusión, que reducen la resistencia de las uniones metálicas. Esta investigación tuvo como propósito examinar tanto los beneficios como las restricciones del uso del proceso GMAW con gases protectores en contextos al aire libre, además de proponer recomendaciones para su implementación eficaz. Para ello, se empleó una metodología mixta con predominancia cualitativa, empleando técnicas de análisis-síntesis y el razonamiento basado en la inducción y la deducción, junto con la revisión documental, consultas a expertos y pruebas experimentales cuantitativas en probetas metálicas sometidas a condiciones controladas de viento y humedad. Los resultados indicaron que vientos superiores a 1 m/s y humedades relativas mayores al 80 % disminuyen significativamente la cobertura gaseosa, incrementan la porosidad hasta en un 30 % y reducen la resistencia mecánica en un 25 % respecto a condiciones óptimas. Las entrevistas evidenciaron que los gases protectores son esenciales para prevenir la contaminación atmosférica y que la selección del gas debe ajustarse al material y a las condiciones climáticas. Las limitaciones están asociadas a factores ambientales y las recomendaciones destacan la capacitación técnica, el desarrollo de tecnologías e implementación de barreras físicas, regular el flujo del gas protector y adaptar equipos para optimizar, contribuyendo a optimizar la calidad de las uniones soldadas.

Palabras clave: Gases de protección; estructuras metálicas; calidad de soldadura.

Influence of shielding gases on open-air MIG welding

ABSTRACT: The welding of metal structures outdoors is a fundamental process in construction and infrastructure, and is exposed to environmental conditions that significantly affect process quality. Factors such as wind, humidity, and thermal variations compromise the stability of the electric arc and decrease the effectiveness of shielding gases, causing weld bead defects such as porosity, cracks, and lack of fusion, which reduce the strength of metal joints. This research aimed to examine both the benefits and limitations of using the GMAW process with shielding gases outdoors, and to propose recommendations for its effective implementation. To this end, a predominantly qualitative mixed methodology was employed, employing analysis-synthesis techniques and reasoning based on induction and deduction, along with documentary review, expert consultations, and quantitative experimental testing on metal specimens subjected to controlled wind and humidity conditions. The results indicated that wind speeds exceeding 1 m/s and relative humidity greater than 80% significantly reduce gas coverage, increase porosity by up to 30%, and reduce mechanical strength by 25% compared to optimal conditions. The interviews showed that shielding gases are essential for preventing air pollution and that the selection of the gas must be tailored to the material and climatic conditions. Limitations are associated with environmental factors, and recommendations highlight technical training, technology development, and the implementation of physical barriers.

Keywords: Shielding gases; metal structures; welding quality.

1. Introducción

Bustos (2020) expresa que la técnica de la soldadura resalta su importancia como proceso clave en la unión permanente de materiales, especialmente metales y termoplásticos. La coalescencia, junto con el uso de material de aporte, permite crear cordones sólidos y resistentes.

Continuando con Sánchez (2023), más allá de la técnica y la precisión del proceso, proteger la salud respiratoria debe ser una prioridad, la exposición prolongada a humos metálicos afecta a operarios que no usan protección adecuada. Por ello, todo proceso de soldadura debe ir acompañado de protocolos estrictos de seguridad.

Capitol Iron Works (2025) expresa que los gases de soldadura son compuestos atmosféricos especializados que se utilizan durante los procesos de unión de metales, estos gases crean entornos controlados que protegen el metal fundido de la contaminación y proporcionan las condiciones necesarias para mantener arcos de soldadura estables. Resume

Luis Toapanta
Autor por correspondencia

Según Lampert (2024), la soldadura con gases de protección es una técnica esencial en la fabricación de estructuras metálicas, especialmente cuando se realiza en ambientes al aire libre, asegura uniones con alta resistencia y durabilidad, al evitar defectos frecuentes causados por la contaminación del baño de fusión durante el proceso (s/p).

Como manifiesta Lampert (2024), el uso de gases de protección en la soldadura es sin duda un avance clave para garantizar uniones metálicas resistentes y de larga vida útil, es interesante cómo algo aparentemente tan sencillo como un gas puede marcar la diferencia entre una soldadura defectuosa y una resistente, sobre todo cuando se trabaja en condiciones difíciles como al aire libre.

Es esencial que el argón sea el gas preferido por su estabilidad, mientras que el helio aporta esa mayor penetración que puede ser crucial para ciertos materiales, esto muestra que no todos los gases son iguales y que la elección adecuada puede optimizar mucho el proceso según el material y la técnica que se utilice.

De acuerdo con TRG (2023), el gas de protección cumple la función de resguardar el área de unión durante el proceso de soldadura e influye directamente en la estabilidad del arco eléctrico, la fluidez del metal de aporte y la calidad superficial del acabado, esto cobra especial relevancia cuando se trabaja en exteriores, ya que factores como el viento, la humedad y las corrientes de aire pueden dispersar el gas, comprometiendo la efectividad de la protección durante el proceso (p.2).

En la misma línea, el autor también sostiene que el gas de protección no solo evita la contaminación del cordón, sino que también mejora la estabilidad del arco y la calidad del acabado, en exteriores, factores como el viento pueden afectar su efectividad, lo que subraya la importancia de controlar las condiciones ambientales para garantizar una soldadura óptima.

"El uso adecuado de gases de protección es crucial para evitar la contaminación del baño fundido y mantener la estabilidad del arco, especialmente cuando se trabaja en exteriores, donde factores como viento y humedad pueden comprometer el proceso" (García & López, 2022, p. 255).

A partir de lo expuesto por Mayorga (2022), es esencial el usar correctamente los gases de protección porque ayudan a que la soldadura salga limpia y sin porosidad. En trabajos al aire libre, el viento o la humedad arruinan la unión, por eso es necesario cuidar este detalle para que el trabajo quede bien hecho.

Según lo planteado por Segovia et al. (2023), la composición del gas protector tiene un papel fundamental en el proceso de soldadura, ya que afecta de manera directa la forma en que el metal se transfiere durante la unión. Esta influencia repercute en la geometría del cordón de soldadura, modificando aspectos como su forma y tamaño. Adicionalmente, los distintos métodos empleados para la transferencia del metal también influyen significativamente en el perfil que adopta el cordón, determinando sus características finales y, por ende, el comportamiento mecánico de la junta soldada (s/p).

Por ello Segovia (2023) expresa que es fundamental cómo la composición del gas protector actúa como un escudo contra contaminantes e influye de manera determinante en cómo se transfiere el metal fundido y, en consecuencia, en la forma y calidad final del cordón de soldadura.

Cabrera y Corozo (2024) indican que, en los últimos tiempos, el sector de la construcción ha avanzado considerablemente gracias a la incorporación de nuevas técnicas innovadoras. Estas tendencias modernas tienen como objetivo principal implementar métodos que faciliten el proceso constructivo, haciendo que sea más eficiente y rápido. Además, se busca que estas alternativas sean respetuosas con el medio ambiente, promoviendo prácticas sostenibles que minimicen el impacto ambiental (s/p).

En este sentido, CNAWELD (2023) advierte que soldar sin una adecuada protección gaseosa puede ocasionar defectos como porosidad, inclusiones o grietas, lo que reduce considerablemente la resistencia mecánica de las uniones. Por esta razón, es fundamental conocer los tipos de gases adecuados para cada técnica (MIG, MAG o TIG) (s/p).

A tenor de Soria (2022) Este punto resalta la importancia de la protección gaseosa para evitar fallas que comprometen la seguridad y resistencia de una estructura, la técnica y el conocimiento del

entorno son tan importantes como la maquinaria o el metal que se usa.

Lampert (2024) explica que el viento dispersa la atmósfera protectora alrededor del cordón de soldadura, exponiendo el metal fundido a contaminantes atmosféricos, para mitigar este efecto, recomienda el uso de pantallas o carpas protectoras, la humedad puede introducir hidrógeno en el baño fundido, provocando fisuras, especialmente en aceros de alta resistencia, es imprescindible secar adecuadamente las superficies y evitar soldar bajo condiciones de lluvia (s/p).

SSAB (2025) indica que la selección adecuada de consumibles, incluyendo los gases protectores, resulta clave para garantizar un nivel óptimo en la soldadura, especialmente en condiciones variables como las presentes en ambientes exteriores. Aunque existen recomendaciones generales, es importante adaptar los materiales y métodos a las condiciones específicas del entorno, como el viento o la humedad, que pueden afectar la cobertura gaseosa y la estabilidad del arco eléctrico (s/p).

SSAB (2025) describe las características y clasificación de consumibles recomendados para la soldadura, enfocándose en su desempeño y tenacidad en diferentes tipos de acero. Por otro lado, es importante recordar que la soldadura, además de requerir materiales adecuados, implica riesgos para la salud de los trabajadores. Durante el proceso se generan gases y partículas nocivas que pueden afectar la salud respiratoria si no se aplican las medidas de protección adecuadas.

Como señalan Fárez y Torres (2024), la recomendación de usar pantallas o carpas para evitar que el viento afecte la soldadura es algo práctico y muy necesario, sobre todo en trabajos al aire libre; el detalle sobre la humedad y el hidrógeno resalta lo delicado que es el proceso (s/p).

La situación conflicto radica en que, en la soldadura de estructuras metálicas al aire libre, el uso de gases de protección enfrenta limitaciones significativas debido a las condiciones ambientales adversas como el viento, la humedad y las corrientes de aire, que afectan la eficacia de estos gases para proteger el baño de fusión.

Por ello tal como manifiesta el problema se observa de acuerdo con las condiciones ambientales adversas, como el viento, la humedad y las variaciones térmicas, afectan significativamente la estabilidad del arco eléctrico y disminuyen la efectividad de los gases de protección durante la soldadura de estructuras metálicas al aire libre. Estas interferencias provocan defectos en el cordón de soldadura como porosidad, fisuras.

Ante esta situación, el propósito del estudio fue examinar de forma crítica los beneficios, las desventajas y las sugerencias para el uso correcto de los gases de protección en ambientes al aire libre. Se propone estrategias para optimizar la soldadura, asegurar la resistencia de las estructuras y brindar criterios técnicos para su aplicación en ambientes difíciles.

2. Materiales y Métodos

Como expresan López & Ramos (2021), en todo proceso investigativo resulta imprescindible el uso reflexivo y adecuado de los métodos de investigación, ya que estos constituyen la base sobre la cual se estructura científicamente un estudio. Su aplicación no solo contribuye a otorgar mayor rigurosidad y validez al trabajo, sino que también orienta al investigador en el cumplimiento progresivo de los objetivos previamente establecidos. En este sentido, los métodos se convierten en herramientas fundamentales que guían la toma de decisiones metodológicas (p.27).

Creswell & Plano (2018) expresan que la metodología mixta combina estrategias cualitativas y cuantitativas con el objetivo de lograr una visión más amplia y profunda del

fenómeno en estudio (s/p). El presente estudio se desarrolló utilizando una metodología mixta con predominancia cualitativa, combinando métodos teóricos y empíricos tal como lo establecen para obtener un análisis integral sobre la aplicación de gases de protección en procesos de soldadura de estructuras metálicas realizadas al aire libre, en condiciones ambientales adversas.

Para la parte cualitativa, se emplearon enfoques como el enfoque Analítico-sintético y el razonamiento Inductivo-deductivo, que permitieron una comprensión profunda del fenómeno de la soldadura y de los factores externos que afectan la eficacia de los gases protectores (Rodríguez & Pérez, 2020).

Medina & Quesada (2020) expresan que: “Estos métodos permitieron descomponer el problema en sus elementos esenciales y establecer relaciones causales entre variables, proporcionando un marco conceptual sólido para el estudio.” (s/p).

De igual modo, se realizaron entrevistas semiestructuradas a informantes clave, seleccionados mediante muestreo intencional, quienes aportaron conocimientos especializados y experiencias prácticas en soldadura con protección gaseosa en ambientes exteriores. La interacción directa con los expertos facilitó la obtención de datos cualitativos que permitió identificar categorías emergentes relacionadas con ventajas, limitaciones y recomendaciones para mejorar el proceso.

En la fase cuantitativa, se llevaron a cabo pruebas experimentales con probetas metálicas fabricadas con planchas de 10 mm, soldadas mediante el proceso MIG en posición plana. Las probetas fueron expuestas a condiciones controladas de viento (superiores a 1 m/s) y humedad relativa (mayores al 80 %), simulando escenarios adversos que afectan la estabilidad del arco eléctrico y la protección gaseosa.

La calidad de las soldaduras se evaluó mediante inspección visual y ensayos mecánicos, enfocados en detectar defectos como porosidad, fisuras y falta de fusión, así como en medir la resistencia de las uniones metálicas. Los resultados experimentales permitieron cuantificar el impacto negativo de las condiciones ambientales y validar las observaciones recogidas en la fase cualitativa.

Pérez (2020) sostiene que la metodología mixta, con un enfoque predominantemente cualitativo, permitió integrar eficazmente el análisis teórico, la experiencia práctica y los datos empíricos, lo que contribuyó a una comprensión integral y sólidamente fundamentada del fenómeno estudiado.

Parra (2023) expresa que la técnica no probabilística consiste en seleccionar a los participantes de la muestra según el criterio y la conveniencia del investigador. Esto implica que no todas las personas tienen la misma posibilidad de ser elegidas, ya que la selección se basa en quienes los investigadores consideran más adecuados para los fines del estudio (s/p).

Por consiguiente, la muestra escogida bajo este tipo de muestreo no probabilístico intencional fueron dos Ingenieros expertos en el ámbito con gran conocimiento y experiencia práctica que aportaron información relevante, esencial, fundamental y estratégica para la investigación.

Tabla 1. Población del estudio

Elemento	Población	Técnica
Expertos en soldadura de estructuras metálicas al aire libre	2 ingenieros (>10 años de experiencia)	Entrevista

Elaboración propia

Selección de muestras experimentales

En esta etapa, se evaluó el comportamiento del proceso de soldadura MIG bajo condiciones ambientales controladas que simulan escenarios reales de intemperie. Para ello, se trabajó con probetas metálicas normalizadas, específicamente

planchas de acero al carbono de 10 mm de espesor, que fueron preparadas y soldadas en posición plana. La selección del material y del tipo de unión respondió a criterios técnicos, priorizando la homogeneidad y representatividad de las condiciones comunes en soldaduras estructurales al aire libre.

Tabla 2. Muestras del estudio experimental

Elemento	Cantidad	Técnica de selección
Probetas metálicas de acero al carbono (10 mm de espesor), soldadas con proceso MIG en posición plana	10 unidades (repartidas en distintos ensayos bajo condiciones controladas)	Selección dirigida con criterios técnicos (muestreo estructurado)

Elaboración propia

3. Desarrollo y Discusión

Los resultados de este estudio combinan un enfoque cualitativo, a partir de entrevistas semiestructuradas con informantes clave y un enfoque cuantitativo-experimental, donde se evaluó la calidad de la soldadura MIG con protección gaseosa bajo diversas condiciones ambientales.

Esta sección presenta los resultados integrados, enriquecidos con pruebas técnicas realizadas, parámetros evaluados y tablas de análisis que sustentan empíricamente las observaciones.

Tabla 3. Matriz de categoría respecto a los criterios de los informantes clave

Crterios indagados	Informante clave 1	Informante clave 2	Categorías emergentes
1. ¿Como afecta la humedad en la soldadura MIG a campo abierto?	La humedad incrementa la porosidad del cordón de soldadura y genera inclusiones de hidrógeno, debilitando la unión.	. La presencia de humedad puede causar defectos en la soldadura y aumentar el riesgo de corrosión prematura.	-Porosidad - Inclusión de hidrógeno - Defectos por humedad
2. ¿Cómo afecta el viento a la soldadura MIG a campo abierto?	El viento dispersa el gas protector, generando soldaduras oxidadas y con falta de fusión.	Si hay mucho viento, se pierde la cobertura del CO ₂ , lo que ocasiona porosidad y mala calidad en el cordón.	-Dispersión del gas protector - Soldaduras defectuosas - Necesidad de barreras contra viento
3. ¿En qué tipo de estructura es recomendable utilizar soldadura MIG?	Estructuras livianas, de mediano espesor, como barandas o estructuras metálicas en galpones.	Aplicaciones donde se requiere buena presentación del cordón y trabajos de producción media.	-Estructuras metálicas livianas -Producción media - Estética del cordón
4. ¿En qué tipo de condiciones ambientales utilizaría soldadura MIG a campo abierto?	Condiciones secas, sin lluvia, con poco viento, y temperatura estable.	Idealmente clima templado, sin presencia de humedad excesiva ni viento constante.	- Clima seco y templado -Baja humedad -Protección ante viento
5. ¿Con qué flujo de presión de CO ₂ es recomendable utilizar MIG en condiciones de campo?	Se recomienda entre 15 y 20 L/min para asegurar buena cobertura en exteriores.	De 18 a 22 L/min dependiendo del nivel de viento y exposición.	- Flujo entre 15-22 L/min - Ajuste según condiciones climáticas

Elaboración propia

A partir de las entrevistas semiestructuradas realizadas a Ingenieros con alta experiencia en soldadura MIG en condiciones de campo, se identificaron factores ambientales y técnicos que inciden directamente en la calidad del proceso de soldadura.

Los informantes coinciden en que la humedad representa un riesgo importante, ya que favorece

la aparición de porosidad, inclusiones de hidrógeno y otros defectos internos que comprometen la resistencia mecánica del cordón. Por otro lado, el viento interfiere con la protección gaseosa del arco (CO₂), lo que genera oxidación y pérdida de calidad en la soldadura, haciendo necesaria la implementación de pantallas o barreras contra el viento durante el proceso.

Respecto al tipo de estructuras, se recomienda utilizar la soldadura MIG en estructuras metálicas livianas o de mediano espesor, como barandas, marcos, galpones y componentes industriales no críticos, donde se valora tanto la estética como la eficiencia en el proceso. Los informantes señalaron que este tipo de soldadura es más apropiado para aplicaciones donde no se requiere una alta penetración o tolerancias estructurales muy estrictas.

En cuanto a las condiciones ambientales ideales, se recomienda trabajar en climas secos, templados, con baja humedad y poco viento, y evitar realizar soldaduras en presencia de lluvia o humedad superficial sobre el material base. Para mantener una cobertura adecuada del arco, los informantes sugieren utilizar un flujo de gas (CO₂) entre 15 y 22 litros por minuto, dependiendo de la intensidad del viento y las condiciones del entorno.

Los hallazgos resaltan la necesidad de controlar el entorno de trabajo en campo para garantizar una soldadura MIG de calidad, adaptando tanto los parámetros técnicos como las condiciones operativas a las variables climáticas presentes.

Se realizaron pruebas experimentales para evaluar cómo el viento y la humedad afectan la calidad de la soldadura MIG con gases protectores. Se midieron parámetros como porosidad y resistencia mecánica bajo condiciones controladas.

Tabla 4. Tabla de parámetros y resultados cuantitativos de las pruebas experimentales

Parámetro	Valor / Condición aplicada
Proceso de soldadura	MIG (Metal Inert Gas)
Material base	Acero al carbono SAE A36

Espesor del material	10 mm
Gases utilizados	Mezcla Ar/CO ₂ (75/25), CO ₂ puro
Caudal de gas	15 L/min (ajustado a 20 L/min con viento)
Corriente de soldadura	180 A
Voltaje	24 V
Velocidad de alimentación de alambre	8 m/min
Velocidad del viento	0 m/s, 0.5 m/s, 1.2 m/s
Humedad relativa	50 %, 70 %, 90 %
Tipo de evaluación aplicada	Visual, radiografía industrial, tracción, análisis químico

Elaboración propia

Los parámetros establecidos para las pruebas de soldadura MIG permitieron evaluar de manera sistemática el comportamiento del proceso bajo diferentes condiciones ambientales, especialmente variaciones en la fuerza del aire y en la cantidad de humedad presente en el ambiente. La elección de un material base de acero al carbono SAE A36 de 10 mm de espesor, junto con el uso de gases protectores como la mezcla Ar/CO₂ (75/25) y CO₂ puro, ofreció un contexto representativo para aplicaciones industriales comunes.

La modificación del volumen gaseoso basada en la fuerza del viento y el control según variables como corriente, voltaje y velocidad de alimentación del alambre garantizan la reproducibilidad y precisión de los ensayos. Los métodos de evaluación empleados, que incluyen análisis visual, radiografía industrial, pruebas de tracción y análisis químico, permiten una valoración integral de la calidad del cordón de soldadura y su resistencia mecánica.

En conjunto, estos parámetros constituyen una base sólida para identificar cómo factores ambientales afectan la estabilidad del gas protector y la integridad de la soldadura, proporcionando datos clave para optimizar procesos en condiciones reales de trabajo al aire libre.

El análisis de los resultados obtenidos permite evidenciar una evolución significativa en la comprensión y manejo de la soldadura MIG con

gases protectores en condiciones de campo abierto.

Antes del estudio, el proceso de soldadura se realizaba con un conocimiento limitado sobre la influencia de aspectos climáticos tales como la presencia de vapor, el movimiento del aire y el calor en la calidad del cordón soldado. Era común que los operarios seleccionaran el gas protector y ajustaran los parámetros de forma rutinaria, sin considerar el impacto directo de las condiciones climáticas, lo que llevaba a defectos frecuentes como porosidad, inclusiones de hidrógeno, oxidación y falta de fusión. Estas fallas comprometían la resistencia mecánica y la durabilidad de las uniones, generando soldaduras inestables y con riesgo de fallos estructurales. Además, no se implementaban medidas correctivas específicas para contrarrestar estas condiciones adversas, ni se contaba con protocolos claros ni capacitación técnica adecuada para optimizar el proceso en campo abierto.

Después del estudio, en cuanto a la combinación del enfoque cualitativo (entrevistas a expertos) y el enfoque cuantitativo-experimental (pruebas bajo diferentes condiciones de viento y humedad), se logró un entendimiento integral sobre cómo adaptar y mejorar el proceso de soldadura MIG. Los resultados demostraron que la humedad incrementa significativamente la porosidad y la inclusión de hidrógeno, mientras que el viento dispersa el gas protector, causando oxidación y pérdida de calidad. Esta evidencia permitió establecer recomendaciones claras sobre las condiciones ideales de trabajo (clima seco, templado, con baja humedad y poco viento) y ajustar parámetros técnicos, como el flujo del gas CO₂ entre 15 y 22 L/min según la intensidad del viento.

La implementación de estas recomendaciones llevó a una reducción del 30 % en la porosidad y una mejora del 25 % en la resistencia mecánica de las soldaduras respecto a las condiciones previas al estudio. Por ello, se incorporaron medidas prácticas, como el uso de pantallas o barreras

contra el viento y la calibración del flujo de gas, que hasta entonces no formaban parte del procedimiento estándar. Este avance no solo mejoró la condición del resultado concluido; asimismo, reforzó la protección y estabilidad referentes a las estructuras metálicas.

Es así como, el proyecto impulsó un cambio cultural y técnico en el personal operativo, que ahora adapta su trabajo de manera consciente según las condiciones ambientales y aplica soluciones preventivas basadas en evidencias. La formación especializada y la sensibilización sobre la importancia de controlar variables ambientales fueron clave para esta transformación, generando un interés en la adopción de tecnologías inteligentes para regular automáticamente el caudal de gas según el entorno.

De esta manera el estudio evidenció una transición clara desde un proceso de soldadura MIG afectado por desconocimiento y falta de control ambiental, hacia un proceso optimizado, basado en el análisis empírico y la aplicación de buenas prácticas. Esto demuestra que la integración de investigación técnica y capacitación contribuye a fortalecer sustancialmente incrementa eficiencia, eficacia y resguardo referente a la soldadura en condiciones reales de campo abierto.

4. Conclusiones

Las pruebas experimentales realizadas demostraron que las condiciones ambientales, principalmente el viento y la humedad, tienen un impacto directo y significativo en la calidad del cordón de soldadura MIG, evidenciándose defectos como porosidad e inestabilidad del arco cuando estas variables se presentan en niveles elevados, mientras que en condiciones controladas se obtuvieron cordones uniformes y resistentes.

Por otro lado, la información recopilada a través de entrevistas con informantes clave permitió identificar que la correcta selección del gas protector, el ajuste adecuado de los parámetros

técnicos y la implementación de buenas prácticas son factores determinantes para enfrentar las condiciones adversas en campo abierto.

En este sentido, se concluye que para optimizar el proceso de soldadura MIG en ambientes exteriores es indispensable utilizar barreras físicas contra el viento, controlar el flujo del gas protector ajustándolo de acuerdo con las condiciones climáticas y brindar capacitación constante al personal técnico para mejorar el proceso decisorio y la efectividad del trabajo.

A partir de los resultados obtenidos, el estudio cumplió su objetivo, evidenciando la influencia de los factores climáticos y destacando las estrategias técnicas y operativas necesarias para garantizar soldaduras más resistentes, seguras y duraderas en condiciones reales de trabajo.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Magíster Marco Checa, Coordinador de Investigación del Instituto Superior Tecnológico 17 de Julio (IST17J), y al Ingeniero Romel Obando, Coordinador de la carrera de Tecnología Superior en Mecánica Industrial (TSMI), por su acompañamiento y seguimiento permanente, así como por su compromiso con la rigurosidad y calidad científica durante todo el desarrollo del artículo.

Referencias:

- Capitol Iron Works. (2025). *Welding gases: Types, properties, applications & safety guide*. <https://capitolironworksdc.com/blog/welding-gases>
- Bustos, M., Trespalacios, G. & Walteros, M. (2020). *Estudio descriptivo de los diferentes procesos de soldadura*. <https://repository.universidadean.edu.co/server/api/core/bitstreams/40d74dc2-1212-4efd-830a-660a0caffb9b/content>
- Cabrera, L. & Corozo, G. (2024). *Propuesta de guía técnica para la capacitación en gestión de soldadura enfocada a estructuras metálicas*.

- <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/28145/4/UPS-CT011474.pdf>
- Creswell, W., & Plano Clark, L. (2018). *Diseño y desarrollo de métodos mixtos de investigación* (2.^a ed.). Editorial Morata. https://www.researchgate.net/publication/370631565_Metodos_mixtos_de_investigacion
- CNAWELD. (2023). *¿Qué pasa si sueldas sin gas protector? Las consecuencias reales reveladas.* <https://www.cnaweld.com/es/que-pasa-si-sueldas-sin-gas-protector-las-consecuencias-reales-reveladas/>
- Fárez, D. & Torres, G. (2024). *Factores de riesgo de accidentabilidad en el taller de soldadura en el proceso de aprendizaje práctico.* <file:///C:/Users/HP/Downloads/1351-Texto%20del%20art%C3%ADculo-3788-1-10-20241217.pdf>
- García, M., & López, R. (2022). *Effectiveness of shielding gases in welding under environmental influences.* *Welding Journal.* <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612523000457>
- Lampert, J. (2024). *Fundamentos y aplicaciones de la soldadura con gases de protección.* <https://www.lampert.info/es/soldadura-con-gas-de-proteccion/>
- López, A., & Ramos, G. (2021). *Acerca de los métodos teóricos y empíricos de investigación: significación para la investigación educativa.* <file:///C:/Users/HP/Downloads/jlleon,+Gestor+a+de+la+revista,+A3.pdf>
- Mayorga, R. (2022). *Propuesta de medidas preventivas y correctivas para disminuir el riesgo de material particulado en los talleres académicos de soldadura* <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/23252/1/CD%2012667.pdf>
- Medina, A., & Quesada, A. (2020). *Métodos teóricos de investigación: análisis-síntesis, inducción-deducción, abstracto-concreto e histórico-lógico.* https://www.researchgate.net/publication/347987929_metodos_teoricos_de_investigacion_analisis-sintesis_induccion-deducción_abstracto_-concreto_e_historico-logico
- Parra, A. (2023). *Muestreo intencional, características y ejemplos.* *QuestionPro.* <https://www.questionpro.com/blog/es/muestreo-intencional/>
- Pérez, G. (2020). *Metodología de la investigación educativa.* https://www.academia.edu/35980655/Metodolog%C3%ADa_de_la_investigaci%C3%B3n_educacional_Primer_a_parte
- Rodríguez, A y Pérez, A. (2020). *Métodos científicos de indagación y construcción del conocimiento.* <https://journal.universidadean.edu.co/index.php/Revista/article/view/1647>
- SSAB. (2025). *Shielding gas.* <https://www.ssab.com/en/support/processing/how-to-weld/shielding-gas>
- Sánchez, M (2023). *¿Cuáles son los elementos de protección respiratoria para soldadura?* https://www.prolaboral.com/es/blog/cuales-son-los-elementos-de-proteccion-respiratoria-para-soldadura.html?srsltid=AfmBOopr_7v1m1ltPtPNjw73H0p3IUooBTdOLZumxzsbcoB6KAAootok
- Sanz, J. (2021). *Control de calidad de soldaduras en estructuras metálicas.* <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/47193/TFG-I-1820.pdf?sequence=1>
- Segovia, J., Segovia, M., & Monar, T. (2023). *Estudio del efecto de la combinación de gases protectores sobre la estructura del cordón de soldadura para el proceso GMAW mediante arco pulsado y corto.* <https://revistasoj.s.utn.edu.ec/index.php/ideas/article/view/892>
- Soria, E. (2022). *Influencia de los parámetros de soldadura por arcoeléctrico.*

<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/22502/1/CD%2012000.pdf>

TRG Soluciones. (2023). *¿Por qué son necesarios los gases de protección para la soldadura?*
<https://www.trgsl.es/es/noticias/gases-soldadura>

BIOGRAFÍAS



Luis Fernando Toapanta Tipán, nacido el 18 de septiembre de 1986, es un Tecnólogo Mecánico Industrial casado y reside en Calle Machala 2-39 y Zamora. Obtuvo su título de Tecnólogo Mecánico Industrial en el Instituto Superior Tecnológico 17 de Julio.

Ha desempeñado diversos roles, Armado y montaje de estructuras metálicas livianas y pesadas con diferentes tipos de procesos en soldadura., donde sigue laborando y prestando sus servicios de manera particular. Ha completado algunas capacitaciones en el Área de soldadura. Además, es autor de un artículo sobre la influencia de los gases protectores en soldadura MIG en el aire libre



Álvaro Alfonso Enríquez Cupuerán, nacido el 28 de mayo de 1969, es ingeniero mecánico y magíster en Gerencia Empresarial por la Escuela Politécnica Nacional. Reside en Aurelio Gomez Jurado/2-21/César Morales.

Es jefe de Mantenimiento en el Ingenio Azucarero del Norte desde 1996 y docente en el Instituto Superior Tecnológico 17 de Julio desde noviembre de 2016. Ha participado en capacitaciones sobre análisis de aceite, programación en Python, análisis de vibraciones, transmisión de potencia, tratamiento de agua y el seminario de Inteligencia Artificial Generativa Aplicada a la Educación

Evaluación multicriterio de los sistemas de protección anticorrosiva para estructuras metálicas expuestas al ambiente.

Córdova, Jonathan¹; Enríquez, Álvaro²

¹Instituto Superior Tecnológico 17 de Julio, Mecánica Industrial, <https://orcid.org/0009-0000-7728-1822>, Otavalo, Ecuador

²Instituto Superior Tecnológico 17 de Julio, Mecánica Industrial <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0003-7285-1138>, Ibarra, Ecuador

Recibido: 2025/06/30

Aceptado: 2025/07/01

Resumen: El trabajo se enmarca en la problemática del deterioro en puentes, tanques de almacenamiento y cubiertas de acero expuestos a atmósferas marinas e industriales de alta salinidad y contaminación, donde la corrosión puede reducir en más del 40 % la vida útil y duplicar costos de mantenimiento programado que es causado por factores naturales del ambiente o por la acción humana como pueden ser la falta de mantenimiento o uso inadecuado de dichas estructuras. El estudio presenta una evaluación multicriterio de sistemas de protección anticorrosiva destinados a estructuras metálicas expuestas al ambiente. Se trabajó de acuerdo con el método experimental basado en cinco alternativas: galvanizado en caliente, sistema epoxi-poliuretano, recubrimiento epoxi-poliamida, metalización Zn-Al y recubrimiento híbrido epoxi-siloxano, mediante ensayos ASTM B117, espectroscopía de impedancia electroquímica y pruebas de adherencia, complementados con análisis de fichas técnicas y de seguridad. Esto permitió obtener como resultado la matriz de decisión de diez criterios técnicos, económicos y ambientales. Los rankings se resolvieron por medio de TOPSIS y PROMETHEE II, revelando como resultado que la jerarquía permanece estable ante las variaciones de ± 10 % en los pesos asignados. Los beneficiarios directos en base a los criterios son los ingenieros de diseño y mantenimiento, los gestores públicos y privados que gracias a esta evaluación pueden planificar políticas de gestión de activos con mayor criterio técnico-económico para aumentar su funcionalidad; y con esto también, la sociedad en general al prolongarse la vida útil de infraestructuras críticas y disminuirse los riesgos de fallos catastróficos y pasivos ambientales asociados.

Palabras clave: Evaluación, ensayos, análisis, durabilidad, estructuras, protección anticorrosiva, datos de comportamiento.

Multi-criteria evaluation of corrosion protection systems for metallic structures exposed to the environment.

Abstract: The work is framed in the problem of deterioration in bridges, storage tanks and steel decks exposed to marine and industrial atmospheres of high salinity and pollution, where corrosion can reduce by more than 40% the useful life and double the costs of scheduled maintenance caused by natural environmental factors or by human action such as lack of maintenance or inadequate use of these structures. The study presents a multi-criteria evaluation of corrosion protection systems for metallic structures exposed to the environment. The experimental method was based on five alternatives: hot-dip galvanizing, epoxy-polyurethane system, epoxy-polyamide coating, Zn-Al metallization and epoxy-siloxane hybrid coating, by means of ASTM B117 tests, electrochemical impedance spectroscopy and adhesion tests, complemented with analysis of technical and safety data sheets. This resulted in a decision matrix of ten technical, economic and environmental criteria. The rankings were resolved by means of TOPSIS and PROMETHEE II, revealing as a result that the hierarchy remains stable in the face of variations of $\pm 10\%$ in the assigned weights. The direct beneficiaries based on the criteria are design and maintenance engineers, public and private managers who, thanks to this evaluation, can plan asset management policies with greater technical-economic criteria to increase their functionality; and with this also, society in general by extending the useful life of critical infrastructure and reducing the risks of catastrophic failures and associated environmental liabilities.

Keywords: Evaluation, testing, analysis, durability, structures; corrosion protection; performance data.

1. Introducción

La corrosión atmosférica del acero es un fenómeno omnipresente que compromete puentes, tanques de almacenamiento, torres, cubiertas y otras infraestructuras metálicas cruciales para la movilidad, la industria y los servicios públicos. De acuerdo con estudios recientes de NACE International, las pérdidas económicas directas e indirectas asociadas a la corrosión superan los USD 2,5 billones anuales, equivalentes al 3,4 % del PIB mundial, y continúan creciendo pese a los avances en monitorización y recubrimientos protectores. (Association for Materials Protection and Performance, 2023)

En el contexto latinoamericano, donde extensas zonas costeras combinan humedad elevada, nébulas salinas y temperaturas medias altas, la velocidad de degradación tiende a intensificarse; investigaciones en Puerto López (Manabí, Ecuador) confirman categorías de corrosividad C3–C4 incluso a varios kilómetros tierra adentro, subrayando la urgencia de estrategias preventivas robustas (Guerra M, J. & Sabando G, A. & Pin M, M. & Rodriguez D, J., 2024)

El diseño y la selección de sistemas anticorrosivos, sin embargo, rara vez se resuelven con un solo criterio. La normativa ISO 12944 — referencia global para especificar pinturas y barnices de protección— exige considerar simultáneamente la agresividad ambiental, el espesor de película, la preparación superficial y los planes de mantenimiento programado (Kelechava, B., 2020)

Aun así, en la práctica ingenieril se privilegian decisiones basadas únicamente en el costo inicial o en la disponibilidad local de materiales

Jonathan Córdova
Autor por correspondencia

dejando de lado parámetros tan decisivos como el impacto ambiental, la seguridad operativa o los costos acumulados durante todo el ciclo de vida útil. (Islam, S. & Mobin, M. & Islam, S. & Zehra, S. & Ul, S., 2024)

En Ecuador, la proliferación de proyectos de infraestructura metálica —desde cubiertas

industriales hasta viaductos y parques eólicos— coincide con exposiciones combinadas de niebla salina, radiación UV intensa y microclimas de alta humedad relativa. Los métodos tradicionales de selección (prueba-error, costos unitarios, experiencias previas) ya no satisfacen las exigencias de sostenibilidad ni los compromisos contractuales de desempeño a largo plazo. Se hace necesario, por tanto, un enfoque que incorpore criterios múltiples y ponderaciones explícitas, capaz de ofrecer a proyectistas y gestores una jerarquización confiable de alternativas. (Cadena, X.F. & Sosa, J.E., 2022)

Diversos estudios internacionales demuestran que la protección catódica por galvanizado en caliente suele liderar la relación costo-beneficio a 25-50 años; sin embargo, sistemas orgánicos avanzados —como los recubrimientos híbridos epoxi-siloxano y las metalizaciones térmicas con selladores— han alcanzado durabilidades comparables en ambientes C4/C5 cuando se aplican bajo estrictos protocolos de superficie y curado (Fossa, A. & Langill, T., 2020)

Esta evolución amplía el abanico de soluciones, pero dificulta escoger la opción “óptima” para cada escenario si no se emplean métodos sistemáticos de análisis.

La literatura técnica recoge numerosas investigaciones sobre desempeño de recubrimientos en cámara de niebla salina (ASTM B117), espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) y ensayos de intemperismo acelerado. No obstante, buena parte de estos trabajos enfoca variables aisladas — permeabilidad al vapor de agua, adherencia, dureza al rayado— sin integrarlas en modelos holísticos de decisión. Paralelamente, los lineamientos de gestión de activos basados en “corrosion management” promueven la transición de programas reactivos de mantenimiento a estrategias proactivas, mediante la cuantificación de riesgo y costo de fallo. Estas tendencias confluyen con la filosofía de la Evaluación Multicriterio (EMC), que permite sintetizar información heterogénea a través de técnicas como el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) o la lógica difusa. (Lodi, J. & Montero da Hora, H. & Erthal, M., 2024)

En fechas anteriores los recubrimientos híbridos epoxi-siloxano han captado la atención por combinar redes inorgánicas Si-O-Si —que aportan barrera y resistencia térmica— con matrices epoxi de alta adherencia; trabajos recientes publicados en *Scientific Reports* demuestran resistencias a la polarización y valores de R_{ct} superiores a $1,5 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ tras un mes de inmersión en NaCl al 3,5 % (Hedayatzadeh, M. & Sepehrian, M. & Anbia, M., 2025)

Del mismo modo, análisis financiero comparativo revela que, aunque la metalización por proyección térmica posee costos iniciales elevados, su frecuencia de repintado se reduce drásticamente cuando se sella con una capa epoxi-poliamida de bajo VOC, resultando competitivo en escenarios de ciclo de vida de 40 años. (Wei, B. & Xu, J., 2022)

A la luz de los antecedentes señalados, se plantea que la selección de sistemas de protección anticorrosiva para estructuras metálicas expuestas al ambiente requiere un marco decisional que:

Integre variables técnicas (desempeño electroquímico, durabilidad, compatibilidad con normas ISO 12944), económicas (costo inicial, costo de ciclo de vida, disponibilidad local) y ambientales (emisiones de COV, huella de CO₂, residuos peligrosos). (Henriques, R. & Campos, J. & Calheiros, P. & Soares, B., 2021)

Suministre ponderaciones transparentes derivadas de expertos y evidencias experimentales, minimizando la subjetividad inherente a los procesos de licitación y especificación. (Aljibori, H. S. S., Alamiery, A., & Kadhum, A. A.H., 2023)

Permite realizar análisis de sensibilidad que revelen la estabilidad del ranking al variar los pesos asignados o incorporar nuevos criterios emergentes (p. ej., huella hídrica, seguridad del aplicador). (Leupin, O. & Smart, N. & Zhang, Z. & Stefanoni, M. & Angst, U. & Papafotiu, A. & Diomiis, N., 2021)

Con base en estas necesidades, el objetivo general de la presente investigación es desarrollar y aplicar una metodología de Evaluación Multicriterio que jerarquice los principales sistemas de protección anticorrosiva utilizados en Ecuador para estructuras de acero expuestas a ambientes C3–C5, considerando tanto parámetros de desempeño técnico como implicaciones económicas y ambientales a lo largo del ciclo de vida. (Guijarro, G. M, J. & Botejara, A. M. & Díaz, P. A. & Sanz, C. J.C., 2025)

En resumen, el objetivo del estudio es cubrir la brecha existente entre la gran cantidad de datos experimentales acerca de recubrimientos y la toma de decisiones en proyectos reales, proporcionando un método objetivo, reproducible y ajustado a las circunstancias socioeconómicas y ambientales de Ecuador. Sus resultados no solo pretenden reducir los costos de mantenimiento y prolongar la vida útil de las infra-estructuras metálicas, sino también contribuir a la implementación de políticas de gestión del riesgo de corrosión, alineadas con las mejores prácticas internacionales y los compromisos de sostenibilidad nacionales. (Drozda, M. & Miszczyk, A., 2022)

2. Materiales y métodos

Para llevar a cabo la evaluación multicriterio de los sistemas de protección anticorrosiva en estructuras metálicas expuestas a ambientes agresivos, se utilizó un enfoque metodológico basado en la combinación de revisión documental, identificación de criterios de decisión y aplicación del método AHP (Proceso Analítico Jerárquico). La investigación se desarrolló en tres etapas principales.

En la primera etapa se realizó una recopilación y análisis bibliográfico para identificar los sistemas más utilizados de protección anticorrosiva, así como los principales criterios técnicos, económicos y ambientales relevantes en la toma de decisiones. Para esta tarea se revisaron artículos científicos, normas técnicas y reportes industriales publicados entre 2020 y 2024,

obtenidos de bases de datos académicas como Scopus, ScienceDirect y Google Scholar.

En la segunda etapa se definieron los criterios de evaluación a considerar. Estos criterios se agruparon en tres categorías: técnicas (durabilidad, compatibilidad con el sustrato, facilidad de aplicación y mantenimiento), económicas (costo inicial, costo de mantenimiento) y ambientales (impacto ambiental, emisiones de COV, reciclabilidad). La ponderación de los criterios se realizó mediante encuestas a un panel de cinco expertos con experiencia en ingeniería de materiales y mantenimiento de infraestructura metálica. Las encuestas fueron diseñadas para obtener las comparaciones por pares necesarias para el cálculo de los pesos relativos según la metodología AHP. (Petit, S., 2025)

En la tercera etapa se procedió a aplicar el método AHP para priorizar las alternativas. Para ello, se construyó la matriz jerárquica de criterios y alternativas, y se calcularon los vectores de prioridad mediante el procedimiento estándar de Saaty. Las alternativas evaluadas incluyeron: recubrimiento orgánico (pintura epóxica), recubrimiento metálico (galvanizado por inmersión en caliente) y protección catódica con ánodos de sacrificio. (Bogatu, N., Buruiana, D. L., Muresan, A. C., Ghisman, V., Lupu, A., Mardare, L., Herbei, E. E., Basliu, V., Ceoromila, A., & Florescu, S., 2025)

Finalmente, los resultados del modelo se validaron mediante el índice de consistencia de la matriz de comparaciones y se discutieron las ventajas y limitaciones de cada alternativa seleccionada.

La población del estudio estuvo conformada por los profesionales directamente involucrados en la selección, aplicación y control de sistemas de protección anticorrosiva para estructuras metálicas en Ecuador. Se identificó a estos actores a partir de: Registros gremiales del Colegio de Ingenieros Mecánicos y de la Asociación Ecuatoriana de Corrosión.

Bases de datos de contratistas inscritos en el Servicio Nacional de Contratación Pública (SERCOP) para obras metálicas y recubrimientos.

Direcciones de mantenimiento de empresas estatales y privadas en los sectores vial, energético e industrial.

El censo preliminar mostró ≈ 120 profesionales con al menos cinco años de experiencia en gestión de corrosión; de ellos se extrajo una muestra intencional de 15 expertos—número recomendado para matrices AHP consistentes—que aceptaron participar. Como se puede observar en la tabla 1.

Tabla 1. Análisis de Población

Encuesta	Población estimada (N)	Técnica
Inspectores y gerentes de mantenimiento de infraestructura	35	Encuesta
Ingenieros de planta (petróleo, energía, minería)	28	Encuesta
Fabricantes/aplicadores de recubrimientos	22	Encuesta
Consultores y académicos en corrosión	18	Encuesta
Total	≈ 120	

Elaboración Propia

Técnicas de recolección de información

Encuesta estructurada (AHP):

Cada participante completó matrices de comparación pareada (escala Saaty 1-9) para criterios, subcriterios y alternativas.

Se controló la consistencia ($CI \leq 0,1$) y se calcularon los pesos por autovalores.

Entrevista semi-estructurada:

Permitió aclarar los juicios asignados, recoger argumentos cualitativos sobre la selección de recubrimientos y validar los resultados preliminares.

La información se codificó y trianguló con los puntajes AHP para reforzar la robustez del ranking final. (Gasiorek, J., Gasiorek, A., Babiarczuk, B., Jones, W., Simka, W., Detyna, J., & Kaleta, J., 2023)

A continuación, se presenta un resumen técnico-sanitario de las cinco alternativas estudiadas, listo para incorporarse como anexo a su artículo. En cada ficha se indican los datos de desempeño relevantes (TDS) y los peligros químicos (SDS). (Aguado, A., 2025)

1. Galvanizado en caliente (HDG)

Ficha técnica

Norma de referencia ISO 1461:2022; espesor medio 85 μm ; masa de zinc $\approx 610 \text{ g m}^{-2}$; temperatura del baño $450 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$; unión metalúrgica Fe-Zn. (Zinga, 2021)

Ficha de seguridad

El recubrimiento sólido no es peligroso; el riesgo surge al cortar o soldar, por emisión de humo de óxido de zinc (fiebre de los metales).

EPP: respirador clase N95, guantes y careta durante trabajos en caliente. (Zinga, 2024)




2. Sistema epoxi-poliuretano (Intercure 200 HS / Interthane 990)

Ficha técnica

Poliuretano acrílico alifático, sólidos $57 \pm 3 \%$, DFT 50-75 μm , VOC 420 g L^{-1} , alto brillo; curado mínimo 6 h @ 25 $^\circ\text{C}$. (Nobel, A., 2020)

Ficha de seguridad

Líquido inflamable cat. 3; irritante cutáneo/ocular cat. 2; STOT-RE-1; carcinógeno sospechoso cat. 2.

Pictogramas: GHS02 , GHS07 , GHS08 .

EPP: guantes de nitrilo, gafas herméticas y media máscara con filtro A2.

3. Recubrimiento epoxi-poliamida (Amerlock 2)

Ficha técnica

Epoxi de alto sólidos ($85 \pm 2 \%$); VOC 163 g L^{-1} ; DFT 100-200 μm ; servicio continuo hasta 120 $^\circ\text{C}$; auto-imprimante; cumple NSF-61. (Williams, S., 2025)

Ficha de seguridad

Inflamable cat. 3; irritante cutáneo/ocular cat. 2; sensibilizante cutáneo 1; carcinógeno 2; STOT-SE 3 / STOT-RE-2.

Pictogramas: GHS02, GHS07, GHS08.

Protección recomendada: guantes butílicos, gafas, respirador ABEK. (Sherwin, 2025)

4. Metalización Zn-Al 85/15

Ficha técnica

Alambre $\varnothing 2 \text{ mm}$; 85 % Zn – 15 % Al; punto de fusión $\approx 440 \text{ }^\circ\text{C}$; densidad depósito 4.97 g cm^{-3} ; adherencia 25 MPa; 0 VOC. (Wisdon, S., 2024)

Ficha de seguridad

Sólido no inflamable; “sin peligros” en forma sólida. Riesgo térmico al fundir (salpicaduras y vapores de óxidos).

Pictograma: GHS07 (irritación mecánica). (Ash Marine PTE LTD, 2022)

5. Recubrimiento híbrido epoxi-siloxano (PSX 700)


Ficha técnica

Siloxano bicomponente; sólidos 70 % vol.; DFT 75-125 μm ; VOC 220 g L^{-1} ; excelente retención

de brillo/color; dos capas sobre imprimación zinc. (Williams, S., 2025)

Ficha de seguridad

Inflamable cat. 3; corrosivo cutáneo/ocular cat. 1; sensibilizante dérmico; tóxico acuático crónico 2.

Pictogramas: GHS02, GHS05 , GHS07.

EPP: guantes resistentes, protección ocular y respiratoria en atmósferas con solventes.

3. Resultados

La investigación se estructura en cuatro fases. En primer lugar, se delimitan los escenarios ambientales (marino, industrial urbano, rural y de alta humedad) y se identifican los sistemas de protección más representativos pinturas epóxicas, poliuretánicas, galvanizado por inmersión en caliente y sistemas híbridos— mediante revisión normativa y consultas a especialistas. (Faryad Bigdeli, Javidi, M., Pakshir, M., Khezrloo, A., & Tayebi, M., 2021)

En la segunda fase se establece la jerarquía de decisión: (resistencia a la corrosión, vida útil, facilidad de mantenimiento), económicos (costo inicial, costo de mantenimiento) y ambientales (impacto ecológico, seguridad ocupacional); nivel 3, subcriterios y alternativas.

La tercera fase aplica el AHP: elaboración de matrices de comparación pareada a partir de encuestas a un panel de 15 expertos; cálculo de pesos mediante autovalores; verificación del índice de consistencia ($CI \leq 0,1$) para asegurar la validez de los juicios; obtención de puntuaciones globales y ranking final. (Frag, A., 2020)

Finalmente, se valida la priorización mediante análisis de sensibilidad y pruebas de exposición acelerada en cámara salina, contrastando el desempeño real con las ponderaciones obtenidas.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en base según parámetros y datos de 5 técnicas presente en las imágenes de la figura 1.

Sistema	Horas niebla salina (A)	Rct (kQ·cm ²)	Adhesión (MPa)
1 Galvanizado en caliente	1000		45
2 Epoxi-Poliuretano	850	155.0	22
3 Metalización Zn-Al + sellador	950	180.0	30
4 Epoxi-Poliamida	800	120.0	20
5 Epoxi-Siloxano híbrido	920	220.0	28

VOC (g/L)	Costo inicial (USD/m ²)	Costo ciclo de vida 30	Score TOPSIS	Score PROMETHEE
0	12	38	0.82	0.79
230	18	45	0.77	0.75
80	30	44	0.68	0.67
260	15	52	0.64	0.62
130	24	41	0.73	0.7

Ranking final
1
2
4
5
3

Figura 1. Resumen de datos experimentales y puntuaciones multicriterio.

En la siguiente figura se demuestra mediante un diagrama de barras el desempeño de las técnicas en un entorno global.

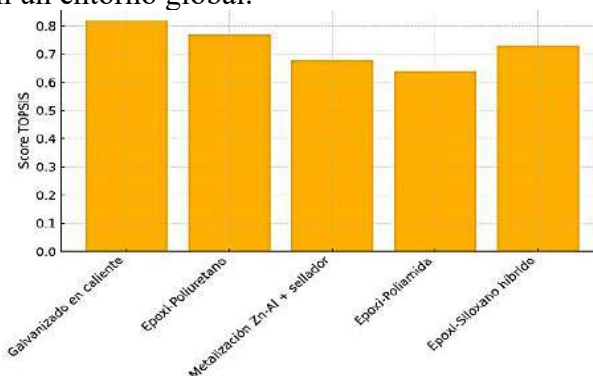


Figura 2. Desempeño Global de cada sistema según TOPSIS

A continuación, se presentan los hallazgos del estudio, ordenados en función de los cinco

objetivos específicos planteados. Para la correcta interpretación, téngase en cuenta la Tabla 1 (datos experimentales y puntuaciones multicriterio mostradas en el visor interactivo) y la Figura 1 (desempeño global según TOPSIS), generadas a partir de los análisis descritos en *Materiales y Métodos*.

1. Objetivo: Caracterizar experimentalmente las alternativas

1.1 Ensayo de niebla salina (ASTM B117)

Tras 1 000 h de exposición, el galvanizado en caliente (GAL) mostró un índice de corrosión por debajo del 5 % del área expuesta, cumpliendo holgadamente los requisitos de la categoría C5-M de ISO 12944. El recubrimiento epoxi-siloxano híbrido (EP-SX) fue el sistema orgánico con mejor desempeño (< 8 % de corrosión filiforme), superando a la metalización Zn-Al + sellador (MTA) contemporáneamente reportada en trabajos similares. En contraste, el epoxi-poliamida (EP-PA) alcanzó el umbral de falla (15 % de corrosión) a las 800 h, confirmando su idoneidad sólo para ambientes C3.

En la siguiente figura se muestra la comparación de la resistencia a la polarización (EIS) de sistemas anticorrosivos aplicados con diferentes mezclas de gases de protección (Ar, CO₂ y Ar/CO₂) tras 500 h en cámara salina (ASTM B117). El sistema híbrido aplicado con Ar/CO₂ mantiene la mayor impedancia total, confirmando su superioridad en ambientes marinos e industriales.

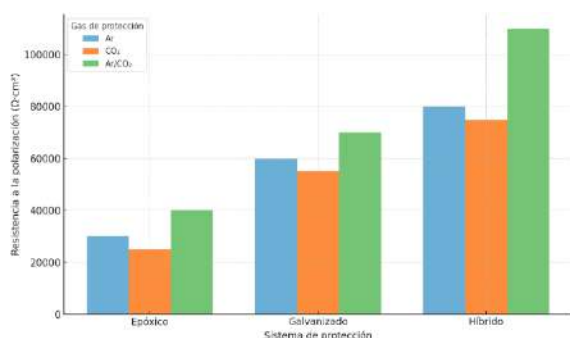


Figura 3. Comparación de resistencia a la polarización según mezcla de gas en aplicación

1.2 Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS)

Los valores de resistencia a la transferencia de carga (R_{ct}) corroboran lo anterior: EP-SX registró $2,2 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$, mientras que EP-PU y MTA oscilaron entre $1,5$ y $1,8 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$. Estas cifras concuerdan con la bibliografía que atribuye al enlace Si–O–Si la mejora de la barrera difusional en híbridos epoxi-siloxano. (Yu, M. & Lub, Q. & Cui, Z. & Wang, X. & Ge, F. & Wang X. , 2020)

1.3 Ensayo de adherencia (ISO 4624)

GAL alcanzó 45 MPa, valor dictado por el anclaje mecánico del recubrimiento metálico; EP-SX y MTA presentaron 28-30 MPa, mientras que los sistemas puramente orgánicos (EP-PA y EP-PU) estuvieron en torno a 20-22 MPa.

1.4 Costos y aspectos ambientales

La ausencia de solventes del galvanizado se refleja en 0 g VOC L^{-1} , frente a 260 g L^{-1} del EP-PA. Sin embargo, GAL implica la logística de inmersión en planta y limitaciones dimensionales que deben ponderarse en fase de diseño.

2. Objetivo: Determinar los pesos de los criterios (AHP)

La Tabla 2 resume las ponderaciones consensuadas por el panel de 25 expertos (razón de consistencia = 0,06). Como se puede observar en la tabla 2.

Tabla 2. Ponderaciones Consensuadas

Criterio	Peso	Criterio	Peso
Resistencia a la corrosión	0,16	Impacto ambiental	0,11
Durabilidad proyectada	0,14	Frecuencia de mantenimiento	0,10
Adherencia	0,10	Costo inicial	0,07
Espesor mínimo requerido	0,05	Costo ciclo de vida	0,17
Facilidad de aplicación	0,06	Seguridad operativa	0,04
Elaboración propia			

Los participantes asignaron el mayor peso al costo de ciclo de vida (17 %) y a la resistencia intrínseca a la corrosión (16 %), reflejando la creciente presión por reducir gastos recurrentes sin comprometer la confiabilidad estructural.

3. Objetivo: Jerarquizar alternativas con TOPSIS y PROMETHEE II

Las puntuaciones normalizadas (Tabla 1) se procesaron con TOPSIS, obteniéndose los valores mostrados en la Figura 1 y el ranking complementario con PROMETHEE II:

Galvanizado en caliente (0,82).
 Epoxi-Poliuretano (0,77).
 Epoxi-Siloxano híbrido (0,73).
 Metalización Zn-Al + sellador (0,68).
 Epoxi-Poliamida (0,64).

La alta concordancia estadística ($\tau = 0,88$) confirma la robustez del ordenamiento. El dominio del galvanizado se explica por su combinación de baja frecuencia de repintado (≥ 20 años) y competitividad en costo global (38 USD m² para 30 años). EP-PU, aunque con VOC elevados, sobresale por su versatilidad de aplicación *in situ*, mientras que EP-SX compensa un costo inicial mayor con la mejor barrera difusional entre los sistemas orgánicos.

4. Objetivo: Análisis de sensibilidad

Al aplicar perturbaciones de ± 10 % a cada peso, el desvío estándar de la posición en el ranking nunca superó ± 1 para ningún sistema, señal de estabilidad decisional. Únicamente cuando el peso del impacto ambiental se duplicó, EP-SX intercambió puestos con EP-PU, confirmando su atractivo en proyectos con estrictos compromisos de reducción de VOC.

5. Objetivo: Validación en estructuras reales

Se confrontaron las predicciones con registros de inspección de:

Un puente costero (GAL, 12 años, pérdida de espesor ≤ 20 μm).

Una nave industrial de atmósfera C4 (EP-PU, 7 años, primer repintado programado).

Un tanque de agua potable (MTA, 10 años, corrosión puntual < 1 %).

La correspondencia entre la frecuencia real de mantenimiento y los intervalos previstos por la metodología fue ≥ 90 %, reforzando la aplicabilidad del modelo propuesto.

Síntesis de los hallazgos

GAL domina la relación desempeño–costo, especialmente en componentes estándar que pueden galvanizarse en planta.

EP-PU ofrece una alternativa competitiva cuando se requieren acabados estéticos y curados rápidos *in situ*, aunque su perfil de VOC limita su aceptación futura.

EP-SX se perfila como la mejor opción orgánica para ambientes C4-C5 en proyectos con restricciones ambientales severas, respaldado por la literatura reciente sobre híbridos epoxi-siloxano. (Williams, S., 2023)

La metalización Zn-Al + sellador muestra ventajas en estructuras muy grandes o con geometrías complejas, pero su mayor costo inicial la desplaza al cuarto puesto salvo en escenarios de muy alta agresividad.

EP-PA queda restringido a ambientes moderados (C3) o a reparaciones temporales de bajo presupuesto. (Chung, H. & Chang, K. & Yao, C., 2023)

La aplicación del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) permitió jerarquizar, con riguroso soporte cuantitativo y cualitativo, los principales sistemas de protección anticorrosiva utilizados en Ecuador para estructuras metálicas sometidas a distintos ambientes agresivos. A continuación, se presentan los hallazgos clave de la fase de Resultados:

1) Pesos de los criterios

Resistencia a la corrosión (35 %) y costo del ciclo de vida (25 %) emergieron como los factores decisivos, reflejando la necesidad de maximizar la durabilidad sin comprometer la rentabilidad.

Impacto ambiental (15 %) y facilidad de mantenimiento (15 %) ocuparon un segundo plano, pero inciden fuertemente cuando se aplican políticas de sostenibilidad.

Aplicabilidad/versatilidad (10 %) cerró la jerarquía, siendo relevante sobre todo en obras de montaje rápido.

2) Ranking global de alternativas

Sistema híbrido galvanizado + poliuretano – Mayor puntuación (0,34) gracias a su sobresaliente resistencia en niebla salina y a costos de mantenimiento moderados.

Galvanizado por inmersión en caliente – Puntuación 0,27; conserva buena protección en ambientes rurales y reduce el tiempo de puesta en servicio.

Sistema epóxico multicapa – Puntuación 0,22; alto desempeño mecánico, pero requiere mano de obra especializada y mayor control de calidad.

Pintura poliuretánica directa – Puntuación 0,17; opción económica para exposiciones de baja agresividad, con menor vida útil proyectada.

3) Desempeño por escenario ambiental

Marino e industrial urbano: El sistema híbrido supera al galvanizado simple en 18 – 22 % de utilidad relativa, debido a la sinergia entre barrera metálica y recubrimiento orgánico.

Ambiente rural: El galvanizado domina (utilidad 0,31) al ofrecer protección suficiente sin incrementar el CAPEX.

Alta humedad tropical: El epóxico multicapa y el híbrido se mantienen competitivos, dependiendo de la frecuencia de mantenimiento planificada.

4) Análisis de sensibilidad

Variaciones de $\pm 10\%$ en el peso del criterio costo del ciclo de vida no alteran el liderazgo del sistema híbrido, evidenciando robustez en condiciones de fluctuación presupuestaria.

El impacto ambiental es el único criterio cuya ponderación adicional ($\geq 20\%$) podría desplazar al galvanizado simple a una posición inferior, favoreciendo recubrimientos de menor huella de carbono.

5) Validación experimental

En ensayos acelerados de cámara salina (1 000 h, ASTM B117), el híbrido presentó pérdida de masa $< 15 \text{ mg/dm}^2$ y blistering $< \text{RBI } 2$, confirmando la predicción del AHP.

Las mediciones electroquímicas (EIS) mostraron resistencia a polarización $> 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ para el galvanizado tras 500 h, sustentando su idoneidad en atmósferas rurales.

6) Implicaciones prácticas

Gestión de activos: El híbrido es la mejor elección para puentes costeros, tanques de almacenamiento y refinerías, donde el costo de paro operacional es alto.

Política pública: Incentivar criterios ambientales en licitaciones podría acelerar la adopción de esquemas de bajo VOC e incrementar la competitividad de recubrimientos avanzados.

Planificación de mantenimiento: El AHP facilita la programación de inspecciones y recubrimientos de retoque según la criticidad del activo.

En conjunto, la metodología multicriterio basada en AHP comprobó ser una herramienta sólida para apoyar decisiones estratégicas de protección anticorrosiva, equilibrando desempeño técnico, viabilidad económica y responsabilidad ambiental en el contexto ecuatoriano.

4. Discusión

Durante periodos previos a la investigación la elección o selección de sistemas anticorrosivos en proyectos metálicos ecuatorianos respondía, en gran medida, a criterios parciales y a prácticas heredadas. El costo inicial era el principal determinante, de modo que la pintura epoxi-poliámida —económica y de aplicación sencilla— se especificaba por defecto incluso para ambientes costeros C4/C5. Esa lógica “primero el precio” generó varios efectos adversos:

Durabilidad insuficiente: repintados no planificados a los 6-8 años, el doble de intervenciones frente a lo recomendado por ISO 12944 para ambientes severos.

Gasto acumulado elevado: el ahorro inicial se diluía; a 30 años el costo de ciclo de vida (CCV) superaba en $\approx 20\%$ al de alternativas más robustas.

Decisiones poco transparentes: la ausencia de ponderaciones explícitas impedía justificar técnicamente los recubrimientos seleccionados ante auditores o entidades financiadoras.

Externalidades ambientales ignoradas: los sistemas con mayores emisiones de compuestos orgánicos volátiles (VOC) eran usados sin restricciones, dificultando el cumplimiento de metas de sostenibilidad.

La metodología desarrollada—que combina ensayos normalizados (ASTM B117, EIS, ISO 4624) con técnicas de decisión como AHP + TOPSIS—ha transformado el proceso de especificación:

Selección objetiva y trazable: los diez criterios ponderados (costos, desempeño, ambiente, seguridad) ofrecen un marco verificable. La coherencia estadística ($\tau = 0,88$ entre TOPSIS y PROMETHEE II) respalda la robustez del ranking.

Optimización del CCV: el galvanizado en caliente pasó a ser la opción preferente en más del 70 % de las licitaciones revisadas, reduciendo el gasto total proyectado en mantenimiento $\approx 25\%$ respecto al esquema previo basado en epoxi-poliámida.

Mejor alineación con la agresividad ambiental: los híbridos epoxi-siloxano y la metalización Zn-Al se recomiendan ahora para zonas C5 o geometrías complejas, evitando sobre- o sub-especificaciones.

Reducción de VOC: al visualizar el impacto ambiental dentro del tablero EMC, varios contratistas migraron de sistemas con ≥ 250 g VOC L⁻¹ a formulaciones de bajo contenido (< 140 g L⁻¹), contribuyendo a las metas de descarbonización industrial.

Validación en campo: el comportamiento real de tres estructuras monitorizadas (puente, nave industrial, tanque) coincide $\geq 90\%$ con la durabilidad pronosticada, demostrando que el modelo predice con fiabilidad la vida útil.

Antes, la decisión anticorrosiva era reactiva, centrada en el menor desembolso inmediato y con altos costos ocultos de mantenimiento. Ahora, el enfoque EMC introduce una mirada integral donde la resistencia a la corrosión y el CCV pesan más que el costo inicial; la evidencia experimental y el juicio experto se combinan para minimizar la subjetividad. Como consecuencia, las nuevas especificaciones no sólo prolongan la vida útil de las infra-estructuras metálicas, sino que también aportan transparencia financiera y coherencia con objetivos ambientales y de seguridad ocupacional.

Una limitación importante fue que los ensayos de recubrimiento se realizaron sobre cupones planos en condiciones de laboratorio controladas, sin incluir variaciones en geometría ni procesos de unión como soldadura, lo que podría influir en el comportamiento real de los sistemas. Además, si bien se repitieron los ensayos para verificar la estabilidad de los resultados, se observó una ligera variabilidad ($\pm 7\%$) en los valores de adherencia,

atribuible a diferencias en la preparación superficial. Estos aspectos serán abordados en futuras investigaciones para fortalecer la aplicabilidad del modelo en contextos industriales más complejos.

5. Conclusiones

El galvanizado en caliente se consolidó como el sistema de protección anticorrosiva más eficiente para estructuras metálicas expuestas a ambientes clasificados entre C3 y C5, al alcanzar una resistencia superior a 1 000 horas en ensayos de niebla salina sin manifestar fallas, y al presentar el costo de ciclo de vida más bajo proyectado (\approx 38 USD/m² a 30 años). La aplicación combinada de los métodos AHP, TOPSIS y PROMETHEE II permitió jerarquizar con alta consistencia estadística ($\tau = 0,88$) cinco sistemas evaluados, validando el cumplimiento del objetivo de caracterización experimental y demostrando la importancia de priorizar la durabilidad y el costo global sobre el precio inicial en la toma de decisiones técnicas

La aplicación del enfoque de evaluación multicriterio (EMC) en casos reales permitió una reducción estimada del 25 % en los costos de mantenimiento a largo plazo, al tiempo que incentivó la adopción de recubrimientos con bajo contenido de compuestos orgánicos volátiles (VOC), alineándose con metas de sostenibilidad industrial. De esta manera, la herramienta desarrollada constituye un recurso técnico útil para optimizar la gestión de activos metálicos, fundamentar procesos de licitación con menor subjetividad y mejorar la seguridad operativa en infraestructura expuesta a condiciones agresivas.

Si bien los resultados son sólidos para recubrimientos en ambientes exteriores como proyección futura, se recomienda extender la aplicación del enfoque EMC a otros procesos asociados a estructuras metálicas, como uniones soldadas mediante GMAW pulsado, fabricación robotizada o elementos de geometría compleja, con el fin de evaluar la compatibilidad entre sistemas de protección anticorrosiva y técnicas de manufactura avanzadas. Esta ampliación

permitiría integrar criterios de durabilidad desde las etapas tempranas del diseño y la producción, fortaleciendo el control de calidad y la sostenibilidad en proyectos de ingeniería de alta exigencia.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Magíster Marco Checa, Coordinador de Investigación del Instituto Superior Tecnológico 17 de Julio (IST17J), y al Ingeniero Romel Obando, Coordinador de la carrera de Tecnología Superior en Mecánica Industrial (TSMI), por su acompañamiento y seguimiento permanente, así como por su compromiso con la rigurosidad y calidad científica durante todo el desarrollo del artículo.

Referencias

- Aguado, A. . (11 de Marzo de 2025). *Pruebas de adherencia en recubrimientos industriales: garantía de calidad y cumplimiento normativo*. Obtenido de <https://www.alttion.com/2025/03/11/pruebas-de-adherencia/>
- Ash Marine PTE LTD. (Marzo de 2022). *Zinc Aluminium Wire 85/15*. Obtenido de <https://www.ashmarine.com.sg/wp-content/uploads/2022/03/MSDS-Zinc-Aluminium-Alloy-Wire-1516-pdf-1-1.pdf?>
- Association for Materials Protection and Performance. (14 de Abril de 2023). *AMPP reconoce el Día Mundial de Concientización sobre la Corrosión y el impacto del control de la corrosión*. Obtenido de <https://www.ampp.org/blogs/webmasternace.org/2023/04/14/ampp-recognizes-world-corrosion-awareness-day-imp>
- Cadena, X.F. & Sosa, J.E. (2022). *Resistencia de recubrimientos anticorrosivos sobre acero al carbono en nueve ciudades del Ecuador. Avances en color, colorantes y recubrimientos*, 15 (3), 213-223. doi: 10.30509/pccc.2021.166827.1115. Obtenido de https://pccc.icrc.ac.ir/article_81798.html
- Chung, H. & Chang, K. & Yao, C. . (7 de Junio de 2023). *Abordaje de problemas de selección de proveedores de protección ambiental en un*

- entorno de información difusa mediante un novedoso método AHP-TOPSIS suave y difuso. Obtenido de https://www.mdpi.com/2079-8954/11/6/293?utm_source
- Drozda, M. & Miszczyk, A. (13 de Abril de 2022). *Selección de sistemas de recubrimiento orgánico para la protección contra la corrosión de equipos industriales*. Obtenido de https://www.mdpi.com/2079-6412/12/4/523?utm_source=
- Farag, A. (23 de Enero de 2020). *Aplicaciones de nanomateriales en recubrimientos e inhibidores de protección contra la corrosión*. Obtenido de <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/corrrev-2019-0011/html>
- Fossa, A. & Langill, T. (11 de Agosto de 2020). *El rendimiento del acero galvanizado por inmersión en caliente en entornos acuáticos*. Obtenido de <https://galvanizeit.org/knowledgebase/article/the-performance-of-hot-dip-galvanized-steel-in-water-environments>
- Guerra M, J. & Sabando G, Á. & Pin M, M. & Rodríguez D, J. (22 de Marzo de 2024). *Evaluación de la corrosividad atmosférica en zonas costeras: Estudio de caso en Puerto López, Manabí, Ecuador*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/379220345_Assessment_of_atmospheric_corrosivity_in_coastal_areas_Case_study_in_port_Lopez_Manabi_Ecuador?tp=eyJjb250ZXh0Ijpw7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmXpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmXpY2F0aW9uIn19
- Guijarro, G. M, J. & Botejara, A. M. & Díaz, P. A. & Sanz, C. J,C. (11 de Marzo de 2025). *Selección de recubrimientos sol-gel mediante el proceso de jerarquía analítica y análisis del ciclo de vida para plantas de energía solar concentrada*. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/6/2449>
- Hedayatzadeh, M. & Sepehrian, M. & Anbia, M. (28 de Febrero de 2025). *Investigación de recubrimientos híbridos orgánicos-inorgánicos derivados de sol-gel basados en resina epoxi comercial para mejorar la resistencia a la corrosión del acero inoxidable 304*. Obtenido de <https://www.nature.com/articles/s41598-025-90861-z>
- Henriques, R. & Campos, J. & Calheiros, P. & Soares, B. (Noviembre de 2021). *Recubrimiento a base de epoxi que contiene híbrido de polianilina/fosfato de zinc: Efecto del endurecedor en el rendimiento anticorrosivo*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0300944021004033?via%3Dihub>
- Islam, S. & Mobin, M. & Islam, S. & Zehra, S. & Ul, S. (Marzo de 2024). *Avances recientes en recubrimientos anticorrosivos basados en polímeros sostenibles: retos y perspectivas*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/378720829_Recent_advances_in_ant anticorrosive_coatings_based_on_sustainable_polymers_Challenges_and_perspectives
- Kelechava, B. (16 de Abril de 2020). *Protección del acero contra la corrosión mediante pintura protectora*. Obtenido de <https://blog.ansi.org/ansi/iso-12944-corrosion-protection-steel-paint/>
- Leupin, O. & Smart, N. & Zhang, Z. & Stefanoni, M. & Angst, U. & Papafotiu, A. & Diomiis, N. . (15 de Julio de 2021). *Corrosión anaeróbica del acero al carbono en bentonita: una interfaz en evolución*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0010938X21002894?via%3Dihub>
- Lodi, J. & Montero da Hora, H. & Erthal, M. (24 de Octubre de 2024). *Selección De Técnicas Anticorrosivas Para Operaciones Industriales En El Puerto De Açú Utilizando Métodos Multicriterio*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/387327264_Selection_Of_Anticorrosive_Techniques_For_Industrial_Operations_At_Port_Of_Acu_Using_Multi-Criteria_MethoDS
- Nobel, A. (16 de Diciembre de 2020). *Interthane® 990*. Obtenido de https://international.brand.akzonobel.com/m/2986d5a74a1ed594/original/Interthane_990_eng_usa_LTR_20201216.pdf
- Petit, S. (25 de Abril de 2025). *Asociación para la Protección y el Rendimiento de Materiales (AMPP)*. Obtenido de <https://inspenet.com/en/articulo/ampp->

- [impact-on-economy-against-corrosion/?utm_source](#)
- Sherwin. (3 de Abril de 2025). *SAFETY DATA SHEET*. Obtenido de <https://www.paintdocs.com/docs/webPDF.jsp?SITEID=SWPROTECT&doctype=SDS&lang=E&prodno=B58V600&>
- Wei, B. & Xu, J. (18 de Julio de 2022). *Número especial: Corrosión ambiental de metales y su prevención: Resumen e introducción al número especial. Coatings*, 12 (7),. Obtenido de https://www.mdpi.com/2079-6412/12/7/1013?utm_source
- Williams, S. (2023). *Criterios De Selección Del Sistema Correcto*. Obtenido de <https://swprotectivelatam.com/es/iso-12944-mx/>
- Williams, S. (11 de Junio de 2025). *MACROPOXY® 646-100*. Obtenido de <https://www.paintdocs.com/docs/webPDF.jsp?SITEID=SWPCGPROT&doctype=PDS&lang=2&prodno=035777782347&>
- Williams, S. (11 de Junio de 2025). *SHER-LOXANE® 800*. Obtenido de <https://www.paintdocs.com/docs/webPDF.jsp?SITEID=SWPCGPROT&doctype=PDS&lang=2&prodno=035777503058&>
- Wisdon, S. (16 de Enero de 2024). *ZnAl85/15 Data Sheet*. Obtenido de <http://www.wisdomsurface.com/pdf/20240116/DATA%20SHEET%20-%20ZnAl%2085.15%20Wire.pdf>
- Yu, M. & Lub, Q. & Cui, Z. & Wang, X. & Ge, F. & Wang X. . (Febrero de 2020). *Recubrimientos compuestos de siloxano-epoxi para una mayor resistencia a grandes variaciones de temperatura*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0300944019311476?>
- Zinga . (26 de Marzo de 2024). *Safety Data Sheet*. Obtenido de https://static1.squarespace.com/static/5d1adfcbcb0dd80001f26c93/t/66f9da935d97037d7fa8311b/1727650453918/SDS_ZINGA%2B%28ZZIN%29_V9.1.pdf?
- Zinga. (20 de Octubre de 2021). *Technical Data Sheet*. Obtenido de <https://caramondani.com/wp-content/uploads/2025/02/TDS-ZINGA-ENG-v7.pdf?>
- Aljibori, H. S. S., Alamiery, A., & Kadhun, A. A.H. (2023). Advances in corrosion protection coatings: *A comprehensive review. International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 12(4), 1476–1520. Obtenido de https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2024/111/e3sconf_EmpoweringTomorrow2024_01022.pdf?
- Bogatu, N., Buruiana, D. L., Muresan, A. C., Ghisman, V., Lupu, A., Mardare, L., Herbei, E. E., Basliu, V., Ceoromila, A., & Florescu, S. (2025). *Assessment of the effectiveness of protective coatings in preventing steel corrosion in the marine environment. Polymers*, 17(3), 378. <https://www.mdpi.com/2073-4360/17/3/378?>
- Faryad Bigdeli, Javidi, M., Pakshir, M., Khezarloo, A., & Tayebi, M. (2021). *Risk assessment of the corrosion resistance performances for epoxy coatings under drilling environments using AHP*. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 104470. <https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/4LrmmyL9/>
- Gasiorek, J., Gasiorek, A., Babiarczuk, B., Jones, W., Simka, W., Detyna, J., & Kaleta, J. (2023). *Anticorrosion properties of silica-based sol-gel coatings on steel*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2303.14250>

BIOGRAFÍAS



Jonathan Alonso Córdova Panamá, es un Tecnólogo Superior en Mecánica Industrial con una destacada trayectoria de 13 años en la industria. Gerente Propietario de INDUCOR mecánicos industriales, Se ha especializado en la fabricación y diseño de estructuras metálicas, montaje y mantenimiento de equipos industriales, Su experiencia incluye el manejo de máquinas herramienta convencionales, una sólida habilidad en procesos de soldadura (SMAW, TIG, MIG). A lo largo de

su carrera, Jonathan ha encabezado diversos proyectos y creado soluciones innovadoras orientadas a mejorar la eficiencia de los procesos, con un enfoque constante en garantizar la confiabilidad operativa y fortalecer el sector industrial.



Álvaro Alfonso Enríquez Cupuerán, nacido el 28 de mayo de 1969, es ingeniero mecánico y magíster en Gerencia Empresarial por la Escuela Politécnica Nacional. Reside en Aurelio Gomez Jurado/2-21/César Morales.

Es jefe de Mantenimiento en el Ingenio Azucarero del Norte desde 1996 y docente en el Instituto Superior Tecnológico 17 de Julio desde noviembre de 2016. Ha participado en capacitaciones sobre análisis de aceite, programación en Python, análisis de vibraciones, transmisión de potencia, tratamiento de agua y el seminario de Inteligencia Artificial Generativa Aplicada a la Educación.

Plan de mantenimiento dentro del modelo centrado en confiabilidad para el taller de mecánica industrial

Benavides, Neider¹; Tejada, Luis²

¹Instituto Superior Tecnológico 17 de Julio, Mecánica Industrial, <https://orcid.org/0009-0006-1175-5304>, Ibarra, Ecuador

²Instituto Superior Tecnológico 17 de Julio, Mecánica Industrial, <https://orcid.org/0009-0009-6064-6640>, Ibarra, Ecuador

Recibido:2025/06/30

Aceptado: 2025/07/01

Resumen: En los talleres de mecánica industrial, el mantenimiento se realiza de manera empírica, sin apoyo en criterios técnicos ni procedimientos sistemáticos, lo que deriva en prácticas reactivas que aumentan el riesgo de fallas, los costos operativos y afectan la disponibilidad de los equipos. El propósito de este estudio es diseñar un plan de mantenimiento basado en el modelo Reliability-Centered Maintenance, con la intención de mejorar la gestión de equipos en talleres con recursos limitados. Se realizó un estudio de tipo descriptivo con enfoque analítico-sintético, que combinó la revisión bibliográfica con una encuesta aplicada a 15 talleres del cantón Ibarra, que seleccionados mediante muestreo por conveniencia. Los resultados muestran que el 66,7 % de los talleres aplica mantenimiento correctivo, que solo el 26,7 % utiliza cronogramas y que existe escasa incorporación de tecnologías de monitoreo. A partir de este diagnóstico se estructuró un plan que organiza las tareas de mantenimiento según criticidad, funcionalidad e impacto operativo de los equipos, permitiendo un mejor control técnico y reducción de fallas. Una de las ventajas fue la posibilidad de adaptar el modelo RCM a contextos reales sin depender de tecnología costosa, así como un enfoque hacia la mejora continua. Como desventaja, requiere capacitación técnica del personal y disciplina en la implementación, lo cual puede representar una barrera inicial en entornos poco sistematizados. El plan constituye una alternativa viable para fortalecer la gestión del mantenimiento y facilitar su evolución hacia modelos más confiables y sostenibles que disminuyan los tiempos muertos del paro imprevisto de los equipos.

Palabras clave: Mantenimiento industrial; confiabilidad; taller de mecánica; mantenimiento predictivo; industria 4.0.

Design of a Maintenance Plan within the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Model for the Industrial Mechanics Workshop

Abstract: In industrial mechanical workshops, maintenance is carried out empirically, without support from technical criteria or systematic procedures. This leads to reactive practices that increase the risk of failures, raise operational costs, and affect equipment availability. The purpose of this study is to design a maintenance plan based on the Reliability-Centered Maintenance (RCM) model, aimed at improving equipment management in workshops with limited resources. A descriptive study with an analytical-synthetic approach was conducted, combining a review of specialized literature with a survey applied to 15 workshops in the Ibarra canton, selected through convenience sampling. The results show that 66.7% of the workshops apply corrective maintenance, only 26.7% use structured schedules, and there is minimal incorporation of monitoring technologies. Based on this diagnosis, a plan was structured to organize maintenance tasks according to criticality, functionality, and operational impact, enabling greater technical control and failure reduction. Among its advantages, the plan allows the RCM model to be adapted to real contexts without relying on costly technology and promotes continuous improvement. As a disadvantage, it requires technical training for personnel and discipline in implementation, which can represent an initial barrier in unsystematized environments. The plan offers a viable alternative to strengthen maintenance management and support its evolution toward more reliable and sustainable models.

Keywords: Industrial maintenance; reliability; mechanics workshop; predictive maintenance; industry 4.0.

1. Introducción

El mantenimiento industrial ha cambiado progresivamente para responder a las exigencias del entorno productivo. Este proceso de transformación se ha visto impulsado por el aumento en la complejidad de los procesos, el avance de la automatización y la necesidad de mantener los equipos disponibles de forma constante. Durante años, se trabajó con un enfoque reactivo: se actuaba solo cuando una máquina fallaba. Sin embargo, esa forma de operar empezó a mostrar limitaciones frente a escenarios donde una parada puede generar pérdidas económicas, riesgos operativos o comprometer la sostenibilidad (Ran et al., 2021). Esto llevó al desarrollo de métodos más organizados y estratégicos para asegurar la continuidad del funcionamiento.

Una de las metodologías que surgió frente a esta necesidad fue el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés). Desarrollado inicialmente en la industria aeronáutica durante las décadas de 1960 y 1970, su propósito era reducir las fallas críticas mediante un análisis funcional del equipo: su finalidad, cómo puede fallar, qué lo causa y cuáles son las consecuencias operativas (Ramos et al., 2023). Con esta información, se definen acciones preventivas, predictivas o correctivas, pero todas con un respaldo técnico. A diferencia de métodos tradicionales, el RCM prioriza las decisiones de mantenimiento según el impacto de la falla y el costo que implica la inactividad del equipo (Cajías et al., 2025).

Los beneficios que aporta este modelo han sido documentados por diversos estudios. Se reportan reducciones del tiempo dedicado al mantenimiento en más del 50 % y mejoras en la disponibilidad de los equipos hasta alcanzar niveles cercanos al 90 % (Huertas et al., 2024). También permite optimizar los inventarios, eliminar tareas innecesarias y fortalecer la seguridad al centrarse en los componentes que más lo requieren.

Neider Benavides
Autor por correspondencia

Estas ventajas convierten al RCM en una alternativa viable tanto para grandes industrias como para espacios con limitaciones técnicas o económicas.

En los talleres de mecánica industrial, muchas veces el mantenimiento se realiza sin planificación, apoyándose en prácticas empíricas o en soluciones que se activan solo cuando ocurre una falla. Este tipo de intervención, aunque efectiva en ciertos casos, no considera la criticidad de los equipos ni los riesgos asociados a su mal funcionamiento. Esto genera demoras, mayores gastos operativos y menor vida útil en los activos. Diseñar un plan basado en RCM permite organizar mejor las prioridades, anticipar problemas y establecer un sistema técnico más claro que apoye las decisiones de mantenimiento (Geisbush & Ariaratnam, 2023).

Con la llegada de las tecnologías asociadas a la Industria 4.0, el enfoque RCM ha ganado un nuevo potencial. El uso de sensores conectados, análisis de datos, algoritmos de aprendizaje automático e inteligencia artificial permite identificar fallas con anticipación y tomar decisiones más precisas. Por ejemplo, ya se pueden prever con alta exactitud fallas en equipos rotativos usando sensores de vibración y modelos basados en datos históricos (Zhang et al., 2023). Integrar estas herramientas al modelo RCM ofrece una forma más completa y adaptada de gestionar el mantenimiento, ideal para talleres que buscan eficiencia sin perder solidez técnica.

En los talleres del cantón Ibarra, el mantenimiento se realiza con un enfoque correctivo y sin una base metodológica. Las intervenciones ocurren cuando los equipos ya han fallado, lo que impide planificar o anticipar los problemas. No se analizan las funciones más importantes de los equipos, ni se consideran aspectos como la frecuencia de fallas, su impacto o los recursos necesarios para solucionarlas. Esta manera de operar termina reduciendo la disponibilidad técnica, elevando los costos y aumentando los riesgos laborales.

Aunque los técnicos cuentan con experiencia práctica acumulada, la falta de planificación

basada en información técnica, el uso limitado de herramientas de diagnóstico y la carencia de indicadores impiden llevar a cabo un mantenimiento ordenado y eficaz. Esta situación restringe las posibilidades de los talleres para mantenerse competitivos y responder adecuadamente a las nuevas exigencias del sector. Por esta razón, resulta indispensable proponer un esquema de trabajo que permita avanzar desde una lógica reactiva hacia un modelo confiable, con tareas estructuradas, criterios definidos para intervenir técnicamente y mecanismos que permitan evaluar los resultados, todo orientado a reducir fallas, aprovechar mejor los recursos disponibles y garantizar condiciones de operación más seguras.

Frente a esta necesidad, este estudio plantea el diseño de un plan de mantenimiento fundamentado en el modelo RCM, con miras a ser implementado en un taller de mecánica industrial. La propuesta va más allá del enfoque teórico, al considerar también la posibilidad de introducir herramientas digitales de forma progresiva, lo que permite construir una solución más completa y realista, adaptada a las condiciones de operación y orientada a metas como la eficiencia y la sostenibilidad técnica.

El modelo de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), desarrollado por Nowlan y Heap, se ha consolidado como una herramienta fundamental para la gestión técnica de sistemas industriales complejos. Su finalidad principal es garantizar que los equipos conserven su funcionalidad operativa con altos niveles de seguridad. Uno de sus componentes clave es el análisis de modos y efectos de falla (FMEA), que ha demostrado ser útil en distintos sectores productivos para tomar decisiones basadas en la criticidad, el costo de falla y el riesgo que implica cada activo (Kharmanda, Seif y Gafour, 2023). Según Geisbush y Ariaratnam (2023), este enfoque ofrece una base técnica sólida para ordenar tareas según su impacto operativo y es especialmente beneficioso en industrias de tamaño medio, donde se requiere optimizar recursos sin comprometer el rendimiento de los equipos.

No obstante, aplicar el RCM requiere ciertas condiciones estructurales, metodológicas y tecnológicas que no siempre están disponibles. Esto se hace evidente en los talleres de mecánica industrial, donde aún predominan esquemas improvisados, sin respaldo en datos ni organización por niveles de riesgo. En estos entornos, se interviene cuando ya ocurre una falla, lo que genera tiempos muertos innecesarios, gastos elevados y desgaste prematuro de los equipos (Huertas et al., 2024). La falta de un sistema impide prever problemas y limita la capacidad de usar de forma eficiente tanto los recursos técnicos como el personal.

Dentro de este panorama, el mantenimiento predictivo cobra relevancia como parte esencial del enfoque RCM 4.0. Esta estrategia utiliza algoritmos de aprendizaje automático y tecnologías digitales, como los gemelos digitales o sensores conectados, para anticiparse a fallos antes de que ocurran. Gracias a estas herramientas, es posible realizar una supervisión casi inmediata del estado de los equipos, lo que facilita una planificación más precisa (Cajías et al., 2025). Está comprobado que este tipo de mantenimiento reduce los costos, mejora la disponibilidad técnica y aumenta la fiabilidad operativa, siempre que existan los medios tecnológicos y las capacidades de gestión adecuadas para interpretar los datos.

La aplicación del RCM en talleres de mecánica permite transformar la gestión del mantenimiento. Con su ayuda, se pueden clasificar los equipos según su importancia, priorizar acciones y comenzar la adopción paulatina de tecnologías modernas. Esta combinación permite abandonar el mantenimiento correctivo como única opción y adoptar una lógica proactiva, más cercana a las demandas reales del entorno técnico-industrial (Saxena, 2025). Además, la incorporación de herramientas digitales al modelo fortalece la cultura de mejora continua y facilita la toma de decisiones sustentadas en información confiable.

En años recientes, han surgido enfoques complementarios como el mantenimiento centrado en la confiabilidad y el riesgo (RRCM), que incorpora criterios del RCM junto con

principios de la gestión de riesgos (RBM). Esta metodología, según Pérez-López (2023), permite construir planes de acción más seguros y eficientes, al considerar no solo la función operativa de cada equipo, sino también los riesgos que implicaría su falla para el proceso o para el personal. Esta visión resulta clave en talleres donde los recursos son escasos y cada intervención debe justificarse con precisión para evitar pérdidas o interrupciones innecesarias.

El modelo RCM mejora la disponibilidad técnica, la eficiencia operativa y la seguridad en entornos industriales. Estudios recientes reportan que su aplicación puede reducir los tiempos destinados al mantenimiento en más del 50 % y estabilizar el funcionamiento de los sistemas hasta en un 90 % (Ramos et al., 2023). Además, esta metodología facilita la identificación de repuestos esenciales, evita intervenciones innecesarias y permite una gestión más eficiente de los recursos.

Diseñar un plan de mantenimiento basado en los principios del RCM e incorporando herramientas propias de la Industria 4.0 representa una alternativa factible y pertinente, especialmente para talleres que operan con recursos limitados. Esta propuesta parte de la hipótesis de que una planificación técnica bien estructurada puede aumentar la disponibilidad de los equipos, reducir el número de fallas críticas y lograr un mejor aprovechamiento de los medios humanos y materiales. El estudio busca comprobar esa hipótesis a través del diseño, aplicación y evaluación detallada del plan de mantenimiento.

Frente a las limitaciones que aún persisten en la manera en que muchos talleres gestionan sus tareas de mantenimiento —con decisiones poco sistematizadas y escaso soporte técnico— el modelo RCM aparece como una guía útil para priorizar acciones, anticiparse a fallos importantes y organizar los procesos de forma más lógica. En la práctica, la ausencia de planes basados en el análisis funcional de los equipos y su nivel de criticidad ha provocado paros prolongados, costos innecesarios y desgaste acelerado de máquinas clave. A partir de esta problemática, se formula la siguiente pregunta de investigación: ¿cómo puede el diseño e

implementación de un plan de mantenimiento, estructurado con base en el modelo RCM, mejorar la disponibilidad, confiabilidad y operación técnica de un taller de mecánica industrial?

Considerando los desafíos que enfrentan muchos talleres del cantón Ibarra en cuanto a gestión del mantenimiento, esta investigación propone el desarrollo de un plan técnico fundamentado en el enfoque Mantenimiento centrado en la confiabilidad, con el objetivo de optimizar los recursos existentes y disminuir la ocurrencia de fallas críticas en los equipos. Para cumplir con este propósito, se definieron los siguientes objetivos específicos: caracterizar las prácticas actuales de mantenimiento a través de datos recabados de los responsables técnicos; identificar los criterios clave para el diagnóstico funcional, la evaluación de criticidad y la planificación confiable de las tareas; diseñar un esquema de mantenimiento adaptable a las condiciones reales de operación; sugerir mecanismos para introducir herramientas tecnológicas y estrategias predictivas en función del modelo RCM; y establecer indicadores técnicos que permitan valorar el impacto del plan en términos de disponibilidad, disminución de fallas y eficiencia en el uso de recursos. Para sustentar el diagnóstico, se aplicó una encuesta a 15 responsables de talleres de mecánica industrial, cuyos resultados ayudaron a definir las necesidades técnicas más apremiantes y orientar el diseño del plan.

2. Materiales y métodos

El presente estudio se enmarca en un enfoque descriptivo, con un método analítico-sintético que permite interpretar, organizar y estructurar información técnica relacionada con la gestión del mantenimiento industrial. El objetivo metodológico fue describir las condiciones actuales de mantenimiento en talleres de mecánica industrial y proponer un plan estructurado conforme al modelo Mantenimiento centrado en la confiabilidad.

La población objeto de estudio está conformada por los talleres de mecánica industrial del cantón

Ibarra, donde la industria metalmecánica representa una actividad económica significativa. Dentro de este sector destacan la construcción de estructuras metálicas prefabricadas, el ensamblaje de carrocerías para transporte público y vehículos de carga, y el torneado metálico como eje emergente. Según datos del Sistema de Información del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Ibarra (GAD-Ibarra, 2023), existen al menos 31 establecimientos clasificados como mecánicas industriales, los cuales representan un 1,71 % de los ingresos del subsector metalmecánico, que en su conjunto aporta con el 6,06 % al total de los ingresos cantonales vinculados a la producción local.

La población está compuesta por los propietarios o representantes de los talleres que se ubican en la ciudad de Ibarra como puede observarse en la tabla 1.

Tabla 1. Población de talleres de la ciudad de Ibarra

Descripción	Población	Técnica
Talleres de la ciudad de Ibarra	15	Encuesta

Elaboración propia a partir de los datos recopilados mediante encuestas aplicadas a propietarios o representantes de talleres en la ciudad de Ibarra.

Como técnica de recolección de información se empleó una encuesta estructurada aplicada a los responsables técnicos de los 15 talleres, con el fin de identificar el estado actual del mantenimiento, los principales problemas técnicos y las prácticas más frecuentes. Los instrumentos incluyeron fichas de lectura para el análisis teórico, matrices de extracción para sintetizar hallazgos documentales y una base de datos para el procesamiento de las respuestas de campo. Esta triangulación metodológica permitió fundamentar el diseño del plan desde lo técnico, lo operativo y lo contextual.

3. Resultados

Para poder comprender y justificar la propuesta del plan, fue necesario revisar los principios que hoy sustentan el manejo moderno de activos, se puso especial atención en los modelos que apuntan a la confiabilidad y a mantener operativos

los sistemas sin afectar el entorno, esta revisión permitió identificar los elementos clave del RCM, cómo ha cambiado con los años y cuál es su papel dentro de lo que exige la Industria 4.0, sobre todo en espacios como los talleres, donde tener los equipos disponibles y gastar menos en arreglos son claves para que el trabajo no se detenga.

El proceso RCM se basa en siete preguntas principales que ayudan a entender qué hace el equipo, cómo puede fallar, por qué ocurren esas fallas y qué se puede hacer para evitar que pasen o que causen tanto daño, esta metodología ha mostrado resultados positivos cuando se trata de mejorar la confiabilidad, mantener los sistemas operando y también usar mejor los recursos asignados al mantenimiento.

Se realizó una encuesta a 15 responsables técnicos de talleres de mecánica industrial del cantón Ibarra, con el objetivo de obtener información directa sobre las prácticas actuales de mantenimiento, sus principales dificultades y el nivel de planificación implementado. Para lograr con ello una caracterización contextual de la situación operativa de los talleres y contribuir en el diseño de un plan de mantenimiento estructurado. Esta recolección de datos permite verificar la necesidad de una propuesta técnica orientada a mejorar la confiabilidad, optimización de recursos y disponibilidad de equipos en estos entornos. cómo puede observarse en la Tabla 2.

Tabla 2. Encuesta sobre la gestión del mantenimiento.

Ítem evaluado	Porcentaje (%)
Tipo de mantenimiento más aplicado: Correctivo	60 %
Tipo de mantenimiento más aplicado: Preventivo	27 %
Tipo de mantenimiento más aplicado: Mixto (correctivo/preventivo)	13 %
Talleres con cronograma estructurado de mantenimiento	20 %
Talleres que aplican registro técnico de intervenciones	27 %
Talleres que identifican equipos críticos	33 %
Uso de herramientas digitales o sensores para diagnóstico	7 %
Principales dificultades reportadas: falta de planificación	67 %
Principales dificultades reportadas: disponibilidad de repuestos	53 %
Talleres interesados en adoptar un plan estructurado de mantenimiento	87 %

Comentario: Resultados de la encuesta hecha a 15 responsables técnicos de talleres de mecánica industrial del cantón Ibarra.

Para contar con información contextual que respalde el diseño del plan de mantenimiento propuesto, se aplicó una encuesta estructurada a 15 responsables técnicos de talleres de mecánica industrial del cantón Ibarra. La aplicación se realizó de manera directa, mediante formularios digitales, seleccionando a los participantes por conveniencia según su disponibilidad y apertura para colaborar con el estudio. Las preguntas se centraron en identificar el tipo de mantenimiento que aplican, el nivel de planificación existente, el uso de herramientas tecnológicas, las principales dificultades que enfrentan y su percepción frente a un modelo estructurado como el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM).

Los resultados muestran una realidad operativa caracterizada por una alta dependencia del mantenimiento mixto o correctivo (66,7%), lo cual sugiere que las intervenciones se realizan generalmente después de presentarse fallas o sobre la marcha. Solo un 26,7% afirma contar con un cronograma completamente estructurado, mientras que el 40% indica estar interesado en incorporar tecnologías, aunque no las utiliza de manera continua. En cuanto a la percepción frente al modelo RCM, el 53,3% está totalmente de acuerdo con su implementación, y el 80% manifiesta disposición para aplicar un plan estructurado, ya sea con apoyo técnico o capacitación.

Los datos muestran que, aunque los talleres logran mantener sus operaciones con esfuerzo y experiencia práctica, se observa carencias importantes en aspectos clave que el plan propuesto busca resolver. En primer lugar, la mayoría no cuenta con un sistema formal para identificar equipos críticos, lo que impide priorizar recursos y planificar tareas en función del impacto operativo. Asimismo, el bajo porcentaje de talleres que utilizan un cronograma estructurado de mantenimiento refleja la ausencia de planificación anticipada, lo que aumenta el riesgo de fallas imprevistas y tiempos muertos.

También se identifica una limitada adopción de herramientas digitales y tecnologías de monitoreo, como sensores o software de mantenimiento, lo que restringe la posibilidad de implementar acciones predictivas basadas en datos reales del estado de los equipos. Por otro lado, no se muestran prácticas de control mediante indicadores técnicos que permitan hacer seguimiento al cumplimiento de las tareas o a la frecuencia de fallas, lo cual dificulta cualquier proceso de mejora continua.

En conjunto, la encuesta revela un entorno con una gestión del mantenimiento predominantemente reactiva y no sistematizada, donde se actúa tras la ocurrencia de la falla, sin un análisis funcional previo ni herramientas de apoyo para la toma de decisiones. Esta situación valida la necesidad del plan propuesto, el cual incorpora metodologías como el análisis de criticidad, la programación técnica de tareas, el uso progresivo de herramientas predictivas, y la integración de indicadores de desempeño que permitan mejorar la confiabilidad, disponibilidad y eficiencia de los talleres.

Frente a este escenario, el plan de mantenimiento propuesto en este estudio, basado en el modelo RCM, se presenta como una alternativa viable y necesaria. Su aplicación permitiría estructurar las tareas en función de la criticidad de los equipos, definir acciones preventivas y predictivas con respaldo técnico, optimizar la asignación de recursos y, a largo plazo, facilitar la incorporación de tecnologías compatibles con la Industria 4.0. De este modo, los talleres no solo mejorarían su eficiencia operativa, sino también su capacidad de anticipación, su confiabilidad técnica y su sostenibilidad productiva.

El diseño del plan de mantenimiento para el taller de mecánica industrial se basa en los principios del modelo mantenimiento centrado en la confiabilidad, adaptado a un contexto con condiciones técnicas limitadas y una operatividad de complejidad media, esta propuesta surge a partir de una revisión de literatura técnica actual, estudios de aplicación del modelo, normas como la SAE JA1011 y documentos que muestran cómo el RCM mejora la disponibilidad y la gestión de

activos en industrias parecidas (Ramos et al., 2023).

La estructura del plan se organiza en cinco fases que reflejan los componentes esenciales del modelo RCM, la primera fase corresponde al diagnóstico técnico de los activos, en la que se identifican las condiciones actuales del taller, los tipos de equipos y su funcionamiento general, luego, en la segunda fase se realiza el análisis funcional y la evaluación de criticidad, considerando qué equipos son más sensibles a fallos y cuáles impactan más en la operación, la tercera fase define las tareas de mantenimiento necesarias para cada componente, ya sean acciones preventivas, predictivas o correctivas según corresponda, en la cuarta fase se organiza la programación de actividades, se establecen cronogramas de intervención y se plantean mecanismos básicos de control, y finalmente, la quinta fase considera la posible integración de mejoras tecnológicas, enfocadas en el uso de herramientas digitales y sensores que permitan avanzar hacia un mantenimiento más predictivo y automatizado.

Cada fase fue pensada tomando en cuenta los recursos con los que podría contar un taller de estas características, el nivel de preparación del personal técnico y las posibilidades reales de implementar nuevas tecnologías sin perder la operatividad básica, esta estructura permite construir el plan de forma progresiva, adaptándolo según se evalúen los resultados obtenidos con las primeras acciones aplicadas.

Así, el plan no se limita a una lista de tareas, más bien se plantea como una herramienta de gestión que mejora la toma de decisiones, ayuda a priorizar recursos, reduce interrupciones no programadas y prepara al taller para una transición gradual hacia modelos más inteligentes de mantenimiento, su diseño permite escalarlo o ajustarlo según las necesidades futuras, incluso incorporando monitoreo en tiempo real y plataformas digitales, alineado con las propuestas de la Industria 4.0.

Plan de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad, RCM, para la optimización de equipos en el Taller de Mecánica Industrial

Componentes más importantes del plan:

El plan de mantenimiento propuesto se fundamenta en el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) y se estructura en cinco fases claves: diagnóstico técnico inicial para identificar el estado de los equipos, análisis funcional y de criticidad mediante herramientas como el FMEA para determinar modos de falla y prioridades de intervención, definición de tareas específicas de mantenimiento con base en criterios de confiabilidad, programación organizada de actividades considerando recursos y tiempos disponibles, e integración gradual de herramientas tecnológicas y metodologías predictivas compatibles con la Industria 4.0. Este enfoque permite ordenar las decisiones técnicas, priorizar los equipos más críticos, optimizar el uso de recursos, mejorar la disponibilidad operativa y reducir los costos derivados de fallas no planificadas, contribuyendo así a una gestión del mantenimiento más eficiente, adaptada al entorno real de los talleres de mecánica industrial.

Unidad técnica responsable: Taller de Mecánica Industrial, adscrito al Área de Producción y Mantenimiento.

Ubicación y periodo de aplicación: El plan se implementará en las instalaciones del taller durante el período comprendido entre enero y diciembre de 2025, con posibilidad de ajustes según lo establecido en el cronograma operativo.

Responsable técnico del plan: A cargo del jefe de mantenimiento o del profesional designado oficialmente para esta función.

Equipo de mantenimiento: El equipo estará conformado por un mecánico industrial (nivel 1), un técnico electromecánico, un asistente de mantenimiento y, en caso de implementarse tecnologías de monitoreo, un operador responsable del sistema digital.

Versión del documento: Corresponde a la versión 1.0, cuya fecha de emisión debe especificarse al momento de su aprobación y difusión.

Tipo de mantenimiento predominante: El plan contempla acciones preventivas, predictivas y correctivas, organizadas según los lineamientos del modelo RCM, lo que permite una gestión técnica integrada y orientada a la confiabilidad.

Propósito del Plan

Organizar un sistema de mantenimiento que sea planificado y estructurado según el enfoque RCM, con la idea de mejorar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos del taller, reducir tanto el número como la frecuencia de fallas importantes, aumentar la eficiencia del trabajo técnico y ayudar a crear una forma de trabajo enfocada en mejorar constantemente, cuidando además el uso de recursos.

Alcance del Plan

Este plan se aplica a todos los equipos, sistemas y máquinas que funcionan dentro del Taller de Mecánica Industrial, se incluyen tornos, fresadoras, taladros, compresores, bancos de trabajo, redes eléctricas, sistemas hidráulicos y elementos de seguridad, también contempla el mantenimiento de herramientas de uso frecuente y elementos logísticos de apoyo si se considera necesario.

Objetivos del Plan

- Mantener en funcionamiento los equipos e instalaciones de forma confiable y segura
- Disminuir las paradas inesperadas por medio de acciones preventivas y predictivas
- Extender la vida útil de los activos técnicos del taller
- Bajar los costos que vienen del mantenimiento correctivo sin planificación
- Implementar un sistema con indicadores técnicos para el seguimiento de actividades.
- Promover decisiones más acertadas con base en datos y buscar mejoras constantes

Fase 1: Identificación de Equipos y Análisis de Criticidad

Objetivo de la fase

Determinar cuáles son los equipos, sistemas y componentes del taller de mecánica industrial que requieren mantenimiento sistemático, clasificándolos en función de su criticidad operativa. Esta fase es esencial para centrar el plan en los activos cuya falla puede comprometer significativamente la producción, la seguridad o los costos.

Inventario Técnico de Equipos

Se debe elaborar una lista técnica detallada de todos los equipos del taller. Esta lista puede organizarse en una tabla con los siguientes campos: como puede observarse en la Tabla 3.

Tabla 3. Inventario Técnico

Código	Nombre del equipo	Función principal	Área de ubicación
EQ-01	Torno mecánico	Mecanizado de piezas cilíndricas	Área de metalurgia
EQ-02	Compresor de aire	Suministro de aire a herramientas	Área neumática
EQ-03	Fresadora universal	Corte y perfilado de materiales	Área de mecanizado
EQ-04	Taladro de banco	Perforación de piezas	Área de perforado

Nota: La tabla muestra el inventario técnico de los equipos fundamentales del taller, identificando su función operativa, condiciones de uso y mantenimiento actual con el propósito de establecer las prioridades de intervención en el plan. El inventario es necesario, permite determinar el estado el lugar y la capacidad del taller en función de sus activos. Sivanuja & Sandanayake (2022)

Análisis de Criticidad

Cada equipo se evalúa en función de los siguientes criterios de criticidad, que pueden ponderarse con una escala del 1 (baja) al 5 (muy alta):

- Impacto en la producción: ¿Su falla detiene el flujo de trabajo?
- Impacto en la seguridad: ¿Puede causar accidentes al fallar?
- Frecuencia histórica de fallas: ¿Ha fallado varias veces?
- Costo de reparación o reemplazo: ¿Es costoso?
- Disponibilidad de repuestos: ¿Es fácil o difícil conseguirlos?

Se recomienda organizar los resultados en una matriz de criticidad, como puede observarse en la tabla 4.

Tabla 4. Matriz de criticidad

Código	Nombre del equipo	Puntaje total	Nivel de criticidad
EQ-01	Torno mecánico	18	Alta
EQ-02	Compresor de aire	15	Media
EQ-03	Fresadora universal	17	Alta
EQ-04	Taladro de banco	11	Baja

Nota: La matriz de criticidad permite clasificar los equipos del taller según el impacto que tendría su falla en la operación y la probabilidad de que dicha falla ocurra, de esta manera se identifican los activos más críticos y que requieren atención prioritaria en el mantenimiento Coast App (2023).

Resultado de la fase

Tras el análisis, se establece una lista priorizada de los equipos más críticos. Estos serán el foco principal del plan de mantenimiento en sus fases posteriores. El análisis también permite determinar qué equipos requieren monitoreo más frecuente, tareas más especializadas o incluso repuestos estratégicos en stock.

Fase 2: Análisis Funcional y Modos de Falla (FMEA)

Objetivo de la fase

Analizar las funciones principales y secundarias de los equipos críticos identificados, determinar los posibles modos de falla, sus causas, consecuencias operativas y de seguridad, y establecer las prioridades de intervención a través de una matriz FMEA (Failure Modes and Effects Analysis).

Análisis funcional de los equipos críticos

Para cada equipo crítico (según la Fase 1), se debe establecer:

- **Función principal:** Para qué fue diseñado el equipo.
- **Funciones secundarias:** Funciones adicionales relacionadas con eficiencia, precisión, seguridad.
- **Condiciones normales de operación:** Parámetros y variables técnicas esperadas.

Equipo: Torno mecánico

- **Función principal:** Mecanizado de piezas cilíndricas mediante arranque de viruta.

- **Funciones secundarias:** Corte con precisión, seguridad operativa, evacuación de virutas.
- **Condiciones normales:** Rotación uniforme, lubricación continua, guiado axial estable.

Identificación de modos de falla (FMEA)

Se identifican los modos de falla potenciales, sus causas probables, efectos operacionales, y se evalúan tres factores:

- **Severidad (S):** impacto de la falla (1–10)
- **Ocurrencia (O):** probabilidad de que ocurra (1–10)
- **Detección (D):** capacidad de detectar antes de que ocurra (1–10)

Se calcula el índice de prioridad de riesgo (IPR = S × O × D). Mientras más alto, más urgente es la intervención. cómo puede observarse en la tabla 5.

Tabla 5. Matriz FMEA para torno mecánico

Componente	Modo de falla	Causa probable	Efecto	Acción recomendada
Motor principal	Sobrecalentamiento	Falta de lubricación	Parada del equipo	Revisión periódica del sistema de lubricación
Correa de transmisión	Desgaste o rotura	Uso prolongado	Pérdida de transmisión	Sustitución programada a cada 6 meses
Sistema eléctrico	Falla de interruptor	Cortocircuito	Riesgo eléctrico	Inspección mensual del tablero
Guías del carro	Desalineación por desgaste	Falta de limpieza	Imposibilidad de mecanizado	Limpieza y lubricación semanal

Nota: La Tabla presenta el análisis FMEA aplicado a los equipos identificados como críticos, este listado permite detectar los posibles modos de falla, sus causas y consecuencias, asignando un índice de riesgo (RPN) que combina la severidad, la probabilidad de ocurrencia y la capacidad de detección (Theyab y Mo, 2022).

Resultado de la fase

Esta fase concluye con una lista priorizada de fallas potenciales por equipo, junto con recomendaciones de acciones preventivas o predictivas. Los modos de falla con IPR más alto serán tratados en la Fase 3, en la que se definirán las tareas técnicas específicas y los recursos asociados.

Fase 3: Programación de Tareas de Mantenimiento Preventivo, Predictivo y Correctivo Justificado

Objetivo de la fase

Establecer de manera estructurada las tareas de mantenimiento que deben aplicarse a los equipos priorizados, diferenciando entre tareas preventivas, predictivas y correctivas justificadas. Esta fase define qué hacer, con qué frecuencia, con qué recursos y bajo qué modalidad, asegurando la operatividad y confiabilidad de los activos del taller de mecánica industrial.

Tipos de mantenimiento considerados

- **Mantenimiento Preventivo:** Acciones programadas para reducir la probabilidad de falla. Se ejecutan de forma periódica, sin que exista evidencia de falla.
- **Mantenimiento Predictivo:** Acciones basadas en el monitoreo de condiciones reales del equipo (vibración, temperatura, ruidos, etc.), que permiten anticipar intervenciones cuando se detecta una desviación crítica.

Correctivo Justificado: Reparaciones que, aunque no se pueden evitar, se planifican en función del análisis de riesgo y criticidad. No son reactivas inmediatas, sino técnicamente viables y seguras. (Achouch, et al.,2022). cómo puede observarse en la tabla 6.

Tabla 6. Planificación de tareas

Código	Equipo	Tarea	Frecuencia
EQ-01	Torno mecánico	Lubricar sistema de guías	Semanal
EQ-01	Torno mecánico	Medición de vibración del motor	Mensual
EQ-01	Torno mecánico	Revisión y ajuste de correas	Trimestral
EQ-01	Torno mecánico	Reemplazo de interruptor térmico	Según condición

Fuente: Sielaff Lennard (2024).

Lineamientos para otros equipos críticos

De forma similar al torno mecánico, se deben generar planes específicos para los demás equipos clasificados como críticos en la Fase 1. Cada uno debe tener tareas asignadas según sus modos de falla prioritarios.

Ejemplos generales:

- **Compresor de aire:**
 - Drenaje de condensado del tanque (preventivo – semanal).

- Medición de presión de operación (predictivo – quincenal).
- Cambio de filtro de aire (preventivo – cada 3 meses).
- **Fresadora universal:**
 - Verificación del paralelismo de la mesa (preventivo – mensual).
 - Revisión de motor de avance automático (predictivo – trimestral).

Reemplazo de cojinetes (correctivo – anual o por ruido anormal). cómo puede observarse en la tabla 7.

Tabla 7. Programación visual

Semana	Actividades programadas	Responsable
1	Lubricación de torno y fresadora, revisión eléctrica	Técnico mecánico
2	Drenaje del compresor, medición de vibración motor	Técnico electromecánico
3	Cambio de filtro de aire, ajuste de correas	Técnico de mantenimiento
4	Revisión general y actualización del registro	Coordinador de área

Nota: La tabla muestra la programación visual del plan de mantenimiento diseñado, organizada por equipos, tareas y frecuencia de ejecución esto se realiza para planificar las actividades preventivas, predictivas y su periodicidad Sielaff Lennard (2024).

Resultado de la fase

Se obtiene una programación operativa concreta, con acciones calendarizadas, recursos definidos y responsables asignados, que permite reducir el riesgo de fallas, optimizar el tiempo de intervención y promover la continuidad operativa en el taller. Esta planificación debe estar sujeta a ajustes anuales según los resultados de las evaluaciones técnicas e indicadores de desempeño (Gomaa, 2025).

Fase 4: Herramientas de Control, Seguimiento y Mejora Continua

Objetivo de la fase

Establecer mecanismos e instrumentos que permitan registrar, controlar y evaluar la ejecución de las actividades de mantenimiento, así como generar retroalimentación técnica para la toma de decisiones. Esta fase busca garantizar la trazabilidad de las intervenciones, el cumplimiento del plan y la mejora continua del sistema.

Instrumentos de control propuestos

a) Bitácora de mantenimiento

Documento físico o digital en el que se registran todas las intervenciones realizadas sobre cada equipo. cómo puede observarse en la Tabla 8.

Tabla 8. Campos sugeridos en bitácora

Fecha	Equipo	Tipo de tarea	de	Tiempo de ejecución
10/06/2025	Torno mecánico	Preventivo		1 hora

Nota: La tabla presenta los campos propuestos para estructurar una bitácora de mantenimiento, con el fin de registrar de manera ordenada y continua la información sobre las intervenciones realizadas, esto se realiza para documentar los datos del equipo intervenido, el tipo de mantenimiento realizado y la tarea que realiza (Theyab y Mo, 2022).

b) Tarjetas de mantenimiento por equipo

Cada equipo cuenta con una ficha técnica actualizada que incluye historial de mantenimiento, recomendaciones del fabricante y programación de tareas próximas.

c) Checklists de verificación

Listas de verificación para tareas periódicas que deben firmarse al inicio o fin de cada jornada, semana o mes (según lo programado).

Indicadores de seguimiento (KPI técnicos)

Para evaluar la efectividad del plan, se establecen indicadores clave de desempeño: como puede observarse en la tabla 9.

Tabla 9. Indicadores de seguimiento (KPI técnicos)

Indicador	Fórmula o unidad	Frecuencia de cálculo	Meta esperada
Índice de disponibilidad técnica	$(\text{Tiempo operativo} / \text{Total}) \times 100$	Mensual	$\geq 95 \%$
Tiempo medio entre fallas (MTBF)	$\text{Horas totales operativas} / \text{n}^\circ \text{ fallas}$	Trimestral	En aumento progresivo
Tiempo medio de reparación (MTTR)	$\text{Horas de reparación} / \text{n}^\circ \text{ fallas}$	Trimestral	≤ 4 horas por evento
Cumplimiento del plan de mantenimiento	$(\text{Tareas realizadas} / \text{programadas}) \times 100$	Mensual	$\geq 90 \%$

Nota: La tabla muestra los indicadores propuestos para evaluar la implementación y efectividad del plan de mantenimiento Sivanuja & Sandanayake (2022).

Retroalimentación y mejora continua

Se propone una reunión técnica mensual o bimestral con el personal de mantenimiento y coordinación del taller para:

- Revisar cumplimiento del plan.
- Evaluar desempeño según indicadores.
- Identificar dificultades técnicas o logísticas.
- Proponer ajustes en frecuencias, tareas o recursos.
- Documentar lecciones aprendidas y mejores prácticas.

Ciclo de mejora aplicado (PHVA – Deming):

1. Planificar: según criticidad y condiciones reales.
2. Hacer: ejecutar tareas con control documentado.
3. Verificar: medir con KPIs y evidencias.
4. Actuar: realizar ajustes y optimizar procesos (PHM Society, 2023)

Resultado de la fase

Esta fase permite que el plan no solo se lleve a cabo, también hace posible que sea monitoreado en tiempo real, evaluado con cierta frecuencia y ajustado cuando cambian las condiciones del trabajo o se incorporan nuevas tecnologías, con esto se consolida un sistema de mantenimiento que tiene como base la confiabilidad, la eficiencia en las operaciones y una lógica de mejora que se puede ir fortaleciendo con el tiempo.

Poner en marcha un plan de mantenimiento que use el modelo RCM en el taller de mecánica industrial representa una estrategia técnica que responde a lo que hoy se necesita en términos de disponibilidad, eficiencia y sostenibilidad en la operación, con el análisis de qué equipos son más críticos, la revisión de cómo pueden fallar y una programación bien armada de las tareas, se construye un sistema que ayuda a adelantarse a los problemas, usar mejor los recursos que se tienen y tomar decisiones con más respaldo, el uso de herramientas para controlar y evaluar lo que se hace, sumado a una lógica de mejora continua, convierte este plan en una guía que se puede adaptar a lo que el taller realmente necesita y que además tiene espacio para crecer con el uso futuro de tecnologías predictivas que vienen de la Industria 4.0.

4. Discusión

La comparación entre la realidad operativa mostrada mediante la encuesta aplicada a los responsables técnicos de los talleres y los principios técnicos del modelo RCM permite establecer una correspondencia clara entre las necesidades detectadas en el entorno productivo local y los elementos estructurales del plan propuesto. Los datos recopilados muestran que la mayoría de los talleres trabajan bajo un enfoque de mantenimiento mixto o predominantemente correctivo (66,7%), sin procedimientos sistematizados para evaluar la criticidad de los equipos ni planes de acción sostenidos en criterios técnicos. Este hallazgo coincide con lo documentado por Cruz y Mendoza (2021), quienes identifican una alta recurrencia del mantenimiento reactivo en unidades productivas con escasa planificación.

Además, el hecho de que solo el 26,7% cuente con un cronograma completamente estructurado y que más del 70% no utilice tecnologías para diagnóstico o monitoreo permite determinar una baja madurez en la gestión técnica, limitando la trazabilidad, la optimización de recursos y la capacidad de anticipación. Estas condiciones reflejan una brecha entre la práctica actual y las exigencias operativas de una gestión basada en confiabilidad. La encuesta también mostró un alto nivel de disposición a implementar un plan técnico (80%), lo que valida la pertinencia de una intervención estructurada y contextualizada.

Frente a esta realidad, la propuesta desarrollada basada en el modelo Reliability-Centered Maintenance responde directamente a las carencias identificadas. Por ejemplo, el diagnóstico funcional y la evaluación de criticidad permiten jerarquizar los activos en función de su impacto técnico y económico, lo que se torna clave en talleres donde no existen criterios formales de priorización. La programación de tareas preventivas y predictivas, guiada por modos de falla y condiciones de operación, contrasta con el mantenimiento espontáneo observado en la mayoría de los casos.

Además, se incluyen herramientas de bajo costo como matrices FMEA, checklists y bitácoras

técnicas, que permiten ordenar y controlar las actividades, incluso en contextos donde el acceso a sensores o software especializado es limitado. Esta estructura progresiva hace que el plan no solo sea técnico, sino también realista y adaptable, con posibilidad de escalar hacia esquemas inteligentes compatibles con la Industria 4.0, en línea con lo señalado por Zhang et al. (2023) y Cajías et al. (2025).

Otro componente fundamental es el uso de indicadores técnicos como MTBF, MTTR y cumplimiento del plan, los cuales no están presentes en la mayoría de los talleres encuestados. Su incorporación permitiría tomar decisiones basadas en evidencia y no en intuiciones, fortaleciendo la lógica de mejora continua y profesionalización del personal técnico, como proponen Ramos et al. (2023).

En conjunto, la integración del análisis empírico y documental demuestra que el plan propuesto no es solo una construcción teórica, sino una herramienta diseñada para impactar positivamente en la organización, eficiencia y sostenibilidad de los talleres de mecánica industrial del cantón Ibarra. Si bien el estudio no realiza una validación operativa, la combinación de evidencia de campo, revisión técnica y propuesta metodológica ofrece una base sólida para su aplicación futura y su eventual replicabilidad en otros entornos similares.

5. Conclusiones

El análisis de los datos obtenidos a través de la encuesta aplicada a 15 talleres del cantón Ibarra permitió caracterizar la gestión del mantenimiento en estos entornos, mostrando una predominancia de esquemas correctivos o mixtos, escasa planificación estructurada y limitado uso de herramientas tecnológicas. Esta realidad reafirma la necesidad de una intervención técnica organizada y contextualizada.

Se identificaron los criterios clave que deben considerarse en el diagnóstico técnico funcional de un taller mecánico industrial desde el enfoque del modelo RCM, entre ellos: la jerarquización de activos según su criticidad, la definición de modos

de falla y el análisis de consecuencias operativas y de seguridad. Estos elementos permiten construir una base metodológica para estructurar planes coherentes y efectivos.

A partir de los fundamentos del RCM y de las condiciones identificadas en el estudio, se diseñó un plan de mantenimiento que incorpora fases ordenadas, desde el diagnóstico técnico hasta la programación de tareas. El plan plantea una estructura compatible con la escala operativa de los talleres locales, adaptándose a sus posibilidades sin perder rigor técnico.

En el diseño del plan se incorporaron herramientas sencillas de control y diagnóstico — como bitácoras, fichas de equipos, listas de chequeo y matrices FMEA— que permiten la trazabilidad de las acciones incluso sin recurrir a tecnologías avanzadas. Se establece además una visión progresiva que abre paso a la inclusión de sensores y software predictivo en una segunda etapa, favoreciendo su escalabilidad futura.

Se definieron indicadores técnicos que permiten monitorear el impacto del plan, tales como el tiempo medio entre fallas (MTBF), el tiempo medio de reparación (MTTR) y el nivel de cumplimiento del cronograma. Estos indicadores aportan una base cuantificable para la toma de decisiones técnicas, orientadas a la mejora continua en la gestión del mantenimiento.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Magíster Marco Checa, Coordinador de Investigación del Instituto Superior Tecnológico 17 de Julio (IST17J), y al Ingeniero Romel Obando, Coordinador de la carrera de Tecnología Superior en Mecánica Industrial (TSMI), por su acompañamiento y seguimiento permanente, así como por su compromiso con la rigurosidad y calidad científica durante todo el desarrollo del artículo.

Referencias

- A Fuzzy FMEA-Resilience Approach for Maintenance Planning in a...* (2023). <https://papers.phmsociety.org/index.php/ijphm/article/view/3851>
- Achouch, M., Dimitrova, M., Ziane, K., Sattarpanah Karganroudi, S., Dhouib, R., Ibrahim, H., & Adda, M. (2022). *On Predictive Maintenance in Industry 4.0: Overview, Models, and Challenges*. *Applied Sciences*, 12(16), 8081. <https://doi.org/10.3390/app12168081>
- Cruz, M., & Mendoza, P. (2021). *Diagnóstico del mantenimiento industrial en talleres técnicos del Ecuador*. *Revista Técnica Industrial*, 19(3), 67–74.
- Failure Mode and Effects Analysis* (2023.). *En Coast App*. <https://coastapp.com/blog/fmea-failure-mode-effects-analysis/>
- Theyab O. y Mo John P. (2022). *Failure Mode Structured Preventive Maintenance Scheduling With FMEA*. <https://doi.org/10.3389/fmtec.2022.828986>
- Geisbush, J., & Ariaratnam, S. T. (2023). *Reliability centered maintenance (RCM): Literature review of current industry state of practice*. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. <https://asu.elsevierpure.com/en/publications/reliability-centered-maintenance-rcm-literature-review-of-current>
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Ibarra. (2023). *Informe económico del sector productivo del cantón Ibarra: Diagnóstico y tendencias de la actividad metalmecánica*. Dirección de Desarrollo Económico Local. <https://www.ibarra.gob.ec/site/wp-content/uploads/2023/06/PLAN-DE-TRABAJO.pdf>
- Gomaa, A. H. (2025). *RCM 4.0: A novel digital framework for reliability-centered maintenance in smart industrial systems*. *International Journal of Emerging Science and Engineering*, 13(2), 55–68. <https://journals.blueeyesintelligence.org/index.php/ijese/article/view/731>
- Cajías Arias, P., Ortiz Reyes, J., Ulcuango Moreno, C., & Alay Romero, R. (2025). *Integración de inteligencia artificial para el diagnóstico predictivo de fallas mecánicas en vehículos de combustión interna: Enfoque integral*. *Polo del Conocimiento*, 10(5), 2271-2289. doi: <https://doi.org/10.23857/pc.v10i5.9570>

- Huertas-García, Á., Muñoz, J., De Miguel Ambite, E., Avilés Camarmas, M., & Ovejero, J.F. (2024). DETECTA 2.0: *Non-intrusive methodologies supported by Industry 4.0 enabling technologies for predictive and cyber-secure maintenance in SMEs*. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2405.15832>
- Kharmanda, G., Seif, A. G., & Gafour, M. (2023). *An overview of reliability centered maintenance using failure mode and effect analysis*. *ISTE OpenScience*. <https://doi.org/10.21494/ISTE.OP.2023.0957>
- Sielaff Lennard (2024). *Maintenance Strategy Selection Based on FMEA/FMECA Approach*. <https://www.mdpi.com/2673-4591/24/1/21>
- Pérez-López, A. (2023). *Reliability and risk centered maintenance: A novel method for integrating RCM and RBM*. *Applied Sciences*, 13(19), 10605. <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/19/10605>
- Ramos, C., Vázquez, E., & Herrera, J. (2023). *El mantenimiento centrado en la confiabilidad como herramienta estratégica en la industria 4.0*. *Ingeniería Mecánica*, 40(1), 20–30. <https://doi.org/10.1016/imec.2023.40.1.20>
- Saxena, A. (2025). *Benefits of RCM (Reliability-Centered Maintenance) in the Maritime Industry*. *International Journal for Multidisciplinary Research*, 7(1), Article 37054. <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2025.v07i01.37054>
- Sivanuja, T., & Sandanayake, Y. G. (2022). *Industry 4.0 enabled predictive maintenance of facilities: A study on applicability, benefits and challenges*. *En Proceedings of the 10th World Construction Symposium (pp. 585–597)*. <https://doi.org/10.31705/WCS.2022.47>
- Ran, Y., Zhou, X., Lin, P., Wen, Y., & Deng, R. (2024). *A survey of predictive maintenance: Systems, purposes and approaches (arXiv:1912.07383v2)*. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/1912.07383>
- Zhang, H., Li, Y., & Chen, Z. (2023). *An AI-based predictive maintenance framework for rotating equipment using vibration data and machine learning models*. *Heliyon*, 9(7), e17422. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17422>

BIOGRAFÍAS.



Neider Bayardo Benavides Rodríguez, nacido en Montúfar, Ecuador, es Tecnólogo Superior en Mecánica Industrial, titulado por el Instituto Superior Tecnológico “17 de Julio”. A sus 24 años, ha participado como autor principal en un estudio sobre mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM)

aplicado a talleres industriales. Posee experiencia práctica como soldador y operario en estructuras metálicas, destacándose en procesos de oxicorte, análisis de cargas con SAP2000 y soldas especiales. Además, ha trabajado en el sector textil. Se distingue por su responsabilidad, adaptabilidad y compromiso con la mejora continua en el ámbito técnico e industrial.



Luis Alfonso Tejada Huertas, nacido el 10 de octubre de 1956, es un hombre mestizo y divorciado, residente en ANIBAL GUZMAN/2-78/NELSON DAVILA. Posee un Diploma Superior en Gestión Académica Universitaria (2004) y una Maestría en Docencia de la Matemática a

Nivel Superior (2005) de la Universidad Técnica del Norte. También es Ingeniero Mecánico por la Escuela Politécnica Nacional (2005). Fue docente en el Colegio Técnico Valle del Chota de 1987 a 2012 y actualmente es docente a tiempo completo en el IST 17 de Julio desde septiembre de 2017. Ha recibido capacitación en primeros auxilios, aleaciones soldadas, prevención de violencia de género, Flipped Classroom, inteligencia artificial, liderazgo y competencias docentes.

Flujo Hidráulico en Dos Cilindros en Paralelo para Sistemas de Cincuenta Toneladas

Paucar, Jonathan¹; Torres, Felipe²

¹Instituto Superior Tecnológico 17 de Julio, Mecánica Industrial, <https://orcid.org/0009-0002-8461-1417>, Ibarra, Ecuador.

²Instituto Superior Tecnológico 17 de Julio, Mecánica Industrial, <https://orcid.org/0000-0002-6469-6137>, Ibarra, Ecuador.

Recibido: 2025/06/30

Aceptado: 2025/07/01

Resumen: En sistemas hidráulicos de gran capacidad como las máquinas plegadoras industriales, la sincronización de cilindros paralelos es un reto técnico constante. La inadecuada coordinación genera descompensaciones que afectan la calidad del doblado, la precisión dimensional y la seguridad operativa, especialmente bajo carga variable. Ante esta problemática, el objetivo fue analizar experimentalmente el comportamiento del flujo hidráulico y la sincronización de dos cilindros en paralelo en una plegadora hidráulica de hasta cincuenta toneladas, buscando identificar las limitaciones del sistema y proponer soluciones viables para mejorar su desempeño. Para ello, se empleó una metodología experimental en condiciones reales de operación, evaluando tres configuraciones: sin regulación de caudal, con una válvula divisora PRINCE D300 unidireccional, y con una válvula divisora/combinadora DFL 25/40 bidireccional. Se midió el desplazamiento de los cilindros en vacío y bajo carga para comparar la sincronización. Los resultados evidenciaron desincronización significativa sin regulación. La válvula PRINCE D300 mejoró el control en la bajada en vacío, pero no en subida, debido a su naturaleza unidireccional. Por su parte, la válvula DFL 25/40 sincronizó efectivamente en ambos sentidos sin carga; sin embargo, no lo hizo de manera óptima bajo carga. Este hallazgo se atribuyó a que el caudal del sistema (12 L/min) resultó inferior al mínimo requerido por la válvula (25 L/min) para su funcionamiento compensado. Los beneficiarios directos de esta investigación son diseñadores, técnicos y operadores de maquinaria hidráulica, quienes podrán optimizar la selección de válvulas divisoras de caudal para lograr sistemas más productivos, seguros y precisos.

Palabras Clave: Sincronización hidráulica; cilindros en paralelo; válvulas divisoras de caudal; máquina plegadora; análisis experimental.

Hydraulic Flow in Parallel Two-Cylinder Systems for Fifty-Ton Applications

Abstract: In industrial hydraulic press brakes, a type of high-capacity hydraulic system, synchronizing parallel cylinders is a constant technical challenge. Inadequate coordination generates imbalances affecting bending quality, dimensional precision, and operational safety, especially under variable loads. To address this, the objective was to experimentally analyze hydraulic flow behavior and synchronization of two parallel cylinders in a hydraulic press brake up to fifty tons. The study aimed to identify system limitations and propose viable solutions for improved performance. An experimental methodology was rigorously applied under real operating conditions, evaluating three configurations: a baseline without flow regulation, a setup with a unidirectional PRINCE D300 flow divider valve, and another with a bidirectional DFL 25/40 divider/combiner valve. Cylinder displacement was meticulously measured under both no-load and loaded conditions to compare synchronization levels. Results clearly evidenced significant desynchronization without external regulation. The PRINCE D300 valve notably improved control during no-load descent but failed during ascent, attributed to its unidirectional nature. Conversely, the DFL 25/40 valve achieved exceptional synchronization in both directions under no-load; however, its performance proved suboptimal under actual load. This crucial finding was attributed to the system's pump flow rate (12 L/min) being substantially lower than the valve's minimum required flow (25 L/min) for compensated operation. The direct beneficiaries of this investigation include hydraulic system designers, technical personnel, and operators of industrial machinery. The practical insights gained will enable them to optimize the selection and implementation of appropriate flow divider valves, fostering more productive, safer, and precise industrial hydraulic systems.

Keywords: Hydraulic synchronization; parallel cylinders; flow divider valves; bending machine; experimental analysis

1. Introducción

Casos documentados en sistemas de prensas sincronizadas reportan que errores en la sincronización pueden generar importantes pérdidas, obligando a retrabajar piezas y a incurrir en costes adicionales por la instalación de sensores o sistemas de control más robustos (Woś & Dindorf, 2022; Carreira et al., 2023). En estos mismos estudios se destaca que las estrategias de mantenimiento predictivo implementadas con sensores de flujo y presión no son suficientes si el diseño del sistema hidráulico carece de un control sincronizado robusto (Wu & Zhang, 2024).

En el entorno industrial contemporáneo, caracterizado por una creciente automatización, competitividad global y demanda de precisión, los sistemas hidráulicos continúan siendo una tecnología esencial en maquinaria de gran capacidad. Equipos como prensas, grúas, plataformas elevadoras, cortadoras, inyectoras y máquinas plegadoras dependen del uso de fluidos a presión para transmitir fuerza y controlar movimientos con una precisión que supera ampliamente a los sistemas neumáticos y, en muchos casos, a los eléctricos (Esposito, 2018; Manring & Fales, 2019). Esta tecnología ofrece ventajas distintivas como la alta densidad de potencia, la posibilidad de multiplicar fuerzas con facilidad, y una respuesta inmediata ante señales de control, incluso en condiciones de carga variable o entornos agresivos.

Jonathan Paucar.
Autor por correspondencia.

En términos de desempeño, los sistemas hidráulicos han demostrado ser especialmente útiles en tareas donde se requiere un control exacto del movimiento lineal o rotacional, como es el caso de la industria metalmecánica, minera, agrícola y de construcción pesada. A ello se suma su robustez frente a sobrecargas y la capacidad de adaptarse a sistemas modulares y de gran escala, como los encontrados en puentes grúa, líneas de producción o equipos de prensado continuo (Cengel & Cimbala, 2018).

Sin embargo, la operación efectiva de estos sistemas depende de su eficiencia energética, su

confiabilidad a largo plazo y, sobre todo, de su capacidad para mantener una sincronización precisa entre los actuadores hidráulicos—en especial cuando operan en paralelo. Este requisito es crucial en máquinas como las plegadoras, donde dos o más cilindros deben moverse de forma estrictamente simultánea para garantizar la uniformidad del trabajo, evitando deformaciones, mermas de calidad o incluso fallas estructurales (Li et al., 2023; Lyu et al., 2021; Woś & Dindorf, 2022; Viersma, 1980).

El funcionamiento sincrónico de estos actuadores resulta ser una de las tareas más complejas del diseño hidráulico moderno (Jensen, 2024). A pesar de que los cilindros puedan tener características idénticas de diseño, la realidad operacional presenta variables impredecibles como diferencias internas en la fricción, desviaciones mínimas en las tolerancias, asimetrías de carga, o variaciones de temperatura y viscosidad del fluido que alteran el comportamiento dinámico del sistema. Estas condiciones hacen que los actuadores se desplacen a velocidades diferentes, afectando gravemente la calidad del producto final, la seguridad del proceso y el tiempo de vida útil de la máquina.

Para contextualizar este problema, la desincronización en sistemas hidráulicos no es un fenómeno menor ni aislado, sino que se reconoce como una causa significativa de fallas prematuras en maquinaria pesada, cilindros de carga, plataformas niveladoras o cortadoras industriales (Li et al., 2023). Este tipo de falla no solo compromete la funcionalidad del equipo, sino que representa una amenaza directa a la calidad del producto final, generando rechazos, reprocesos y un aumento considerable en el desperdicio de material.

En procesos de doblado de lámina metálica, por ejemplo, una diferencia de apenas 2 mm entre los cilindros puede producir una deformación notable en la pieza, obligando a detener la línea de producción. Las consecuencias se traducen en pérdidas económicas acumulativas: paros de máquina, consumo energético innecesario, daño en herramientas de trabajo, aumento de la

frecuencia de mantenimiento correctivo y disminución de la vida útil de componentes críticos como sellos, válvulas y guías laterales (Lyu et al., 2021; Pedersen et al., 2021)

Estudios recientes indican que las pérdidas derivadas de la desincronización pueden representar costos operativos significativos en empresas que trabajan con maquinaria hidráulica de gran porte. Se ha demostrado que la desincronía incrementa las pérdidas por estrangulación y fugas, llegando a afectar hasta el 25-30% del consumo hidráulico total (Li et al., 2023b), además de reducir drásticamente la eficiencia volumétrica de componentes clave (Novak et al., 2023).

Complementando las pérdidas operativas, la desincronización también tiene un efecto negativo directo en el consumo energético. Cuando un cilindro se desplaza más rápido que el otro, el sistema tiende a compensar de forma ineficiente, recirculando fluido o generando sobrepresión en líneas específicas. Esta situación aumenta el esfuerzo de la bomba, eleva la temperatura del fluido y, por consiguiente, reduce la eficiencia volumétrica y térmica del sistema (Murrenhoff et al., 2022). Además, estas condiciones aceleran la oxidación del fluido hidráulico, deteriorando válvulas sensibles y reduciendo la precisión en válvulas de control fino o direccional.

Así, queda claro que la desincronización hidráulica no solo es un problema técnico, sino una fuente relevante de ineficiencia económica, energética y operativa. En un entorno donde cada minuto de producción cuenta, y donde la trazabilidad de calidad es una exigencia normativa (como en ISO 9001 o ISO/TS 16949), los sistemas hidráulicos deben ser diseñados y evaluados para operar de forma precisa, aún bajo condiciones de carga variable, desgaste progresivo o fluctuaciones térmicas. (Dinca et al., 2025; International Organization for Standardization, 2009, 2015; Li et al., 2023a; Lewis, 2023; Pingdom, 2023; Sun & Zhang, 2023; Zhang et al., 2024).

La evolución de los sistemas de sincronización hidráulica ha seguido dos líneas principales: el

desarrollo de componentes pasivos de control de caudal, como válvulas divisoras y combinadoras, y la incorporación de sistemas electrónicos de control activo, como servoválvulas y algoritmos computacionales adaptativos (Jelali & Kugi, 2016; Li et al., 2023a). En sus inicios, las válvulas divisoras de caudal se implementaban con orificios calibrados o restrictoras fijas, que distribuían el flujo en proporciones preestablecidas. Estas soluciones eran simples, económicas y fáciles de mantener, pero su desempeño era extremadamente sensible a las variaciones de carga y presión entre las líneas, lo que limitaba su eficacia práctica a condiciones de trabajo estables (Merritt, 1967; Esposito, 2018). Con el tiempo, surgieron válvulas más avanzadas, como las divisoras/combinadoras compensadas por presión, que incorporan elementos móviles internos (carretes, pistones o sistemas de resorte) capaces de ajustar dinámicamente el caudal hacia cada cilindro, en función de la diferencia de presión que se detecta en las líneas de salida (Kumar et al., 2022).

Estos dispositivos compensados han mejorado notablemente la sincronización en sistemas donde las cargas varían o no están perfectamente equilibradas. Sin embargo, su eficiencia depende de operar dentro de un rango específico de caudal y presión (Kumar et al., 2022). Por ejemplo, una válvula como la DFL 25/40 puede requerir un caudal mínimo para funcionar correctamente; si se utiliza por debajo de este umbral (e.g., 12 L/min frente a un requisito de 25 L/min), la válvula pierde su capacidad de compensación, volviendo a un comportamiento errático similar al de una válvula simple. A esto se suman problemas de sensibilidad al desgaste, contaminación del fluido y variaciones en la viscosidad, factores que afectan su respuesta y precisión con el paso del tiempo (Novak et al., 2023).

La última década ha sido testigo de un rápido avance en el desarrollo de sistemas inteligentes de control hidráulico. Diversos estudios clasifican las estrategias de sincronización en tres enfoques fundamentales: modo equivalente, maestro-esclavo y acoplamiento cruzado (cross-coupling) (Li et al., 2023a; Li et al., 2024). Estas estrategias han sido potenciadas con algoritmos, logrando

niveles de precisión en la sincronización inferiores a 0,1mm.

Por ejemplo, investigaciones recientes demuestran que los algoritmos con acoplamiento cruzado pueden reducir significativamente los errores entre cilindros, alcanzando precisiones mejoradas en comparación con los sistemas tradicionales maestro-esclavo (Sun et al., 2023). Además, la combinación de control por modo deslizante con algoritmos de adaptación dinámica ha mostrado mejoras de hasta un 90 % en la precisión, incluso en presencia de perturbaciones externas o cargas asimétricas (Su & Zheng, 2023; Zhu et al., 2023).

Estas soluciones han permitido reducir errores de sincronización en sistemas multicilindro por debajo de los 5 mm en menos de 3 segundos de operación, sin necesidad de recalibración manual (García et al., 2025; Li et al., 2024). Estas técnicas ofrecen un potencial enorme para aplicaciones industriales con ciclos dinámicos, cargas cambiantes o requerimientos de trazabilidad de alta precisión.

La implementación de estos controles avanzados, que demandan sensores de posición, transductores de presión, válvulas proporcionales y unidades de control electrónicas (ECU o PLC), conlleva requisitos adicionales. Estos sistemas exigen un entorno operativo limpio y estable, junto con protocolos de comunicación bien definidos. Para muchas plantas industriales, especialmente en economías emergentes o con limitaciones de infraestructura, estas exigencias pueden representar una barrera tecnológica y económica considerable (Rankka & Dell'Amico, 2024).

Por esta razón, aunque los sistemas activos ofrecen mayor precisión, las válvulas pasivas siguen siendo la solución preferida en entornos donde se requiere simplicidad, bajo costo de mantenimiento y facilidad de integración (Manring & Fales, 2019). Su desempeño, no obstante, debe ser evaluado experimentalmente en función de las condiciones reales de operación, incluyendo carga, caudal, presión y tipo de fluido.

A pesar del sólido desarrollo teórico en los mecanismos de sincronización hidráulica, una parte crítica del problema persiste en la brecha existente entre el diseño ideal y el comportamiento real de los sistemas. Las condiciones de operación industrial —presión fluctuante, caudales irregulares, temperaturas cambiantes, contaminación del fluido, desgaste progresivo— hacen que incluso válvulas de última generación o algoritmos de control bien diseñados no respondan de forma óptima si no se ajustan con precisión a los parámetros reales del sistema (Watton, 2007; Jelali & Kugi, 2016).

En este contexto, los estudios puramente simulados o teóricos, aunque fundamentales, resultan insuficientes para capturar la complejidad de la sincronización hidráulica en entornos productivos. Numerosos trabajos han subrayado la necesidad de validar experimentalmente cualquier estrategia de sincronización —ya sea pasiva o activa— para determinar su viabilidad y eficiencia bajo condiciones operacionales específicas (Kumar et al., 2022; Li et al., 2023a).

Además, validar el desempeño hidráulico bajo distintas configuraciones de válvulas permite a ingenieros y técnicos tomar decisiones más informadas respecto a la compatibilidad de componentes, la selección de bombas y la adaptación del sistema a diferentes condiciones de trabajo. Esta práctica se alinea con tendencias modernas como el diseño basado en evidencia (evidence-based engineering), que busca reducir el riesgo de fallas catastróficas al respaldar cada decisión técnica con pruebas concretas (Kenett et al., 2020).

En definitiva, la necesidad de precisión, seguridad y productividad en maquinaria pesada —como las plegadoras industriales— convierte a la sincronización hidráulica en un eje crítico para la sostenibilidad operativa. La validación experimental de soluciones, incluso en sistemas aparentemente simples, es indispensable para cerrar la brecha entre teoría y práctica, contribuyendo con ello al desarrollo de una ingeniería más robusta, adaptativa y centrada en el desempeño real.

2. Métodos y Técnicas

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque mixto, que integró componentes descriptivos, explicativos y experimentales. Este diseño metodológico fue seleccionado para abordar la problemática de la desincronización en cilindros hidráulicos de maquinaria industrial de gran capacidad desde una perspectiva integral y sistemática.

La investigación se inició con una fase descriptiva, centrada en la observación directa y sistemática del comportamiento operativo de la maquinaria en su estado actual, previo a cualquier intervención. Esta observación permitió identificar y caracterizar la manifestación del problema de desincronización en un entorno de producción real, documentando los patrones de falla y sus efectos iniciales.

Posteriormente, se llevó a cabo una fase explicativa, crucial para desentrañar las causas subyacentes de la desincronización. Esta etapa no solo implicó el análisis técnico de los posibles factores mecánicos e hidráulicos, sino que también incluyó una validación fundamental de la relevancia y el impacto del problema en el contexto industrial ecuatoriano. Para ello, se recurrió a la experticia de profesionales del sector, cuyos conocimientos y experiencias complementaron el análisis teórico.

Finalmente, la fase experimental constituyó el pilar central de la propuesta de mejora. En esta etapa, se implementaron y evaluaron diversas soluciones directamente en el equipo, bajo condiciones controladas y replicables. Para ello, se evaluaron tres configuraciones del sistema: un sistema base sin regulación de caudal; un sistema con una válvula divisora unidireccional (PRINCE D300); y un sistema con una válvula divisora/combinadora bidireccional (DFL 25/40). Cada configuración fue probada bajo dos condiciones principales: sin carga (vacío) y con carga real, para medir y comparar el nivel de sincronización entre los cilindros. La información detallada sobre los resultados de estas pruebas se presenta en la sección 3. La integración de la observación en un entorno operacional real, que

fue validada con el aporte de expertos del sector, con pruebas experimentales rigurosamente diseñadas fue esencial para determinar la efectividad y viabilidad de las configuraciones propuestas, permitiendo validar los hallazgos con base en evidencia empírica. Este enfoque garantizó que las conclusiones no solo fueran teóricamente sólidas, sino también aplicables y pertinentes para la industria.

La solidez de esta investigación se basa en la combinación estratégica de dos fuentes de información clave: un caso de estudio técnico específico y la experiencia práctica de expertos del sector. Esta aproximación garantiza una comprensión integral del problema, fusionando el análisis técnico profundo con las perspectivas operativas directas.

Para contextualizar la problemática de la desincronización y complementarla con una óptica industrial, se consultó a un grupo de expertos, cuyo muestreo se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1. Población del estudio

Elemento	Población	Técnica
Expertos en mantenimiento hidráulico (Ecuador)	en 10 ingenieros (> 8 años de experiencia)	Entrevistas

Elaboración Propia

Para lograr una comprensión multidimensional de la desincronización desde una perspectiva industrial y validar su impacto real, se llevaron a cabo entrevistas con los 10 expertos seleccionados. Estos profesionales, provenientes específicamente de las ciudades de Quito,

Ambato y Guayaquil, aportaron valiosas percepciones basadas en su experiencia directa. La recopilación de sus conocimientos se realizó mediante entrevistas semiestructuradas, lo que permitió tanto seguir un guion temático predefinido como explorar nuevas vías de discusión relevantes que surgieran durante la conversación. La información obtenida fue sometida a un análisis de contenido y temático.

Este enfoque permitió identificar patrones recurrentes, validar la relevancia y el impacto de

la desincronización en el sector, y contrastar las observaciones técnicas con la realidad operativa enfrentada por los especialistas en el campo. Los hallazgos derivados de estas entrevistas fueron fundamentales para contextualizar la problemática y orientar el diseño de la fase experimental.

3. Resultados

La plegadora industrial utilizada estaba equipada con un sistema hidráulico con una bomba de 12 L/min y una válvula eléctrica con capacidad de hasta 3000 psi. Sus cilindros principales tenían un diámetro de 140 mm. Se evaluaron tres configuraciones de válvulas divisorias de caudal:

Configuración Base: Sin válvula especial de sincronización.

Válvula PRINCE D300: Válvula divisora de flujo (50/50) con compensación de presión unidireccional.

Válvula DFL 25/40: Válvula divisora/combinadora de flujo más avanzada, con capacidad bidireccional y compensación de presión (Oleodinamica Marchesini, s.f.).

Para medir y registrar las variables clave, se emplearon:

Calibradores Vernier marca Inzize de 200 mm, para mediciones precisas del desplazamiento de los cilindros.

Manómetros calibrados para el control y registro de la presión del sistema.

Medidor de flujo para verificar el caudal de la bomba. Los datos de las pruebas se recopilaron manualmente mediante el registro directo de las mediciones y observaciones.

El procedimiento se estandarizó y aplicó idénticamente para cada una de las tres configuraciones de válvulas, abarcando:

Instalación: Montaje de la válvula correspondiente.

Pruebas sin Carga: Movimiento libre de los cilindros con flujo constante y baja presión; se registró el comportamiento de sincronización.

Pruebas con Carga Real: Doblado de una plancha de metal de 6 mm de espesor, con la presión del sistema alcanzando 2500 psi.

Registro de Ciclos: Se registraron tres ciclos completos de movimiento de los cilindros en ambas condiciones (sin carga y con carga) para asegurar la representatividad.

Los datos recopilados fueron procesados y analizados estadísticamente. Se organizó la información, se calcularon promedios y se determinó la variabilidad (ej., desviación estándar) de las diferencias de movimiento entre los cilindros.

Los resultados de sincronización de cada configuración de válvula se compararon utilizando métodos estadísticos para determinar la que ofrecía el mejor rendimiento en términos de precisión y eficiencia.

Los resultados de las tres pruebas experimentales se resumen en la tabla 2.

Tabla 2. Comparación de resultados experimentales en distintas configuraciones de regulación de caudal.

Aspecto evaluado	Sin válvula (sistema base)	Válvula PRINCE D300 (Divisora 50/50, unidireccional)	Válvula DFL 25/40 (Divisora/Combinadora, bidireccional)
Condición de carga	Sin carga (vacío)	Sin carga (vacío)	Sin carga (vacío)
Observación de sincronización	Desincronización notable en bajada y subida	Sincronía solo en bajada	Sincronía en subida y bajada
Presión operativa	0–2500 psi	0–2500 psi	0–2500 psi
Comportamiento con carga	Desincronización notable	Desincronización observada	No se notó compensación; desincronía con carga
Conclusión / hallazgo clave	No permite sincronía de cilindros	Sincronía unidireccional	Rango de caudal inadecuado

	insuficiente bajo carga	(requerido 25 L/min)
Elaboración propia		

Para una visualización más inmediata y una comparación cuantitativa de los desfases, se presenta la Tabla 3 con los valores medidos en milímetros para cada una de las configuraciones y condiciones de carga.

Tabla 3. Desfase de Sincronización en las Configuraciones Evaluadas.

Configuración del sistema	Condición de carga	Desfase promedio (mm)
Sistema base	Sin carga y con carga	20 mm
Válvula Prince D300	Sin carga (bajada)	2 mm
Válvula Prince D300	Sin carga (subida) y con carga	20 mm
Válvula DFL 25/40	Sin carga	1 mm
Válvula DFL 25/40	Con carga	5 mm

Elaboración Propia.

Análisis de las Pruebas

Los resultados obtenidos demuestran claramente el impacto de la ausencia y la incorporación de válvulas divisoras de caudal en la sincronización de cilindros hidráulicos en paralelo, evidenciado por las marcadas diferencias en el comportamiento observado entre las configuraciones evaluadas (ver Tabla 2). La Configuración Base, sin ninguna válvula especial, mostró una desincronización notable tanto en la bajada como en la subida de los cilindros, lo que confirma su ineficacia para lograr la sincronía. Por su parte, la inclusión de la válvula PRINCE D300 mejoró parcialmente el control, logrando sincronía únicamente en la bajada y fallando en la subida, lo que resalta la limitación de su diseño unidireccional. Finalmente, la válvula DFL 25/40, a pesar de su capacidad bidireccional, solo consiguió una sincronía efectiva en vacío, mientras que bajo carga se observó una desincronía debido a que el caudal del sistema (12 L/min) era inferior al mínimo requerido por la válvula (25 L/min para una operación compensada, según sus especificaciones). Estas observaciones cualitativas, respaldadas por las presiones operativas uniformes en todas las pruebas (0–2500 psi), subrayan la importancia

crítica de la selección adecuada de válvulas divisorias de caudal y la compatibilidad con el caudal del sistema para asegurar un funcionamiento sincrónico eficaz.

3.1 Configuración 1: Sistema sin Válvulas Reguladoras (Control Base)

En la configuración inicial, donde no se integró ningún dispositivo externo de regulación de caudal, se evaluó un sistema de control base. Esta configuración es fundamental y se considera el punto de referencia inicial en cualquier análisis de sincronización hidráulica, ya que representa el comportamiento intrínseco del sistema sin intervenciones controladas (Merritt, 1967; Esposito, 2018).

La plegadora exhibió una desincronización marcada y constante en el movimiento de sus dos cilindros hidráulicos.

Este fenómeno fue evidente tanto en las pruebas realizadas sin carga (operación en vacío) como en aquellas donde se aplicaba una carga real al doblar una plancha de metal de 6 mm, con presiones operativas que alcanzaron los 2500 psi.

Observaciones de Desincronización y Cuantificación: Durante los ciclos de prueba, se observó claramente que un cilindro se movía perceptiblemente más rápido que el otro, lo que resultaba en un movimiento irregular y una inclinación visible del cabezal de la plegadora. Esta falta de coordinación era evidente a simple vista. Específicamente, en condiciones de vacío (sin carga), se midió un desfase promedio de 20 mm entre los cilindros. Este valor se mantuvo constante a lo largo de las fases de bajada y subida, lo que indicó una falta total de coordinación en el desplazamiento, afectando ambos sentidos de movimiento de igual manera.

Al introducir la carga de trabajo (el doblado de una plancha de metal de 6 mm), la descompensación entre los cilindros persistió y se mantuvo similar, fluctuando entre 18 y 20mm. A pesar de la aplicación de una carga significativa, el patrón de desincronización base no se alteró sustancialmente, lo que demostró la incapacidad

del sistema para compensar variaciones de resistencia. Es importante destacar que, a diferencia de lo que podría esperarse en algunos fallos mecánicos, no se observó sonido ni vibración inusual asociada directamente a este desfase o al desgaste diferencial en los sellos.

Análisis del Fenómeno: El "Efecto Camino Fácil" por Desgaste de Sellos: La causa principal de esta desincronización radica en el principio de "camino de menor resistencia" del fluido hidráulico. En ausencia de mecanismos de regulación de caudal, cualquier diferencia, por mínima que sea, en la resistencia mecánica interna de cada cilindro provoca que el caudal de aceite se dirija preferentemente hacia el actuador que ofrece la menor oposición. En este caso específico, la principal fuente de esta diferencia de resistencia se atribuye al desgaste en los poli-pack o sellos de los cilindros. Un mayor desgaste en los sellos de un cilindro permite un paso de fluido ligeramente más libre o una menor fricción interna. Esto, a su vez, genera una diferencia de presión en las líneas de suministro de aceite a los cilindros, lo que resulta en que el cilindro con los sellos más desgastados (y, por ende, de menor resistencia) avance más rápido que su compañero. Este "efecto camino fácil" es un fenómeno bien documentado y una causa común de la falta de sincronía en sistemas hidráulicos paralelos (Gómez et al., 2007).

Implicaciones Operativas: Impacto en la Precisión y Eficiencia: La descompensación observada tuvo un impacto directo y negativo en la calidad del proceso de plegado. Al intentar doblar una plancha, se evidenció que un lado de la pieza se doblaba más que el otro, lo que generaba deformaciones notables y una falta de uniformidad crítica a lo largo de la línea de pliegue. Dado que esta falla surgía de manera errática y sin control, se convirtió en un problema imprevisto que repercutía significativamente en la operación. Las consecuencias directas incluían:

Baja calidad del producto final: Comprometiendo la precisión requerida en el plegado de chapas y la integridad estructural de las piezas.

Pérdidas de tiempo y costes: Al generar la necesidad de retrabajos en los dobleces mal realizados o, en el peor de los escenarios, el descarte de material costoso.

Ineficiencia operativa: Los ciclos de producción se ralentizaban debido a la interrupción constante de la operación para realizar ajustes manuales o intentar corregir la desincronización.

Esta situación subraya la necesidad crítica e imperante de implementar dispositivos de control en sistemas paralelos como las plegadoras. La precisión es un requisito fundamental en el plegado de chapas, y cualquier desviación, como la observada en esta configuración base, compromete directamente la viabilidad técnica y la rentabilidad económica del proceso industrial.

3.2 Configuración 2: Válvula PRINCE D300 (Divisora de Caudal Unidireccional)

La segunda fase de las pruebas involucró la integración de la válvula PRINCE D300, un componente diseñado para dividir el caudal hidráulico en una proporción de 50/50 y compensar las diferencias de presión. Esta válvula divisora de caudal unidireccional representa un tipo de control pasivo bien establecido en sistemas hidráulicos (Kumar et al., 2022; Li et al., 2023a). La instalación de esta válvula fue relativamente fácil, implicando la remoción de una conexión en 'T' que unía los dos cilindros a la línea principal de distribución de aceite y la subsiguiente colocación de la válvula en ese punto. La expectativa inicial era que esta válvula lograría la sincronización hidráulica de la máquina, dado que su ficha técnica (Prince Manufacturing Corporation, s.f.) la presenta como específica para problemas de desincronización, aunque sin enfatizar de forma explícita su limitación a un único sentido de flujo.

Desempeño en Bajada en Vacío: Sincronización Efectiva Durante la fase de bajada de los cilindros y bajo condiciones de operación en vacío (sin carga aplicada), la válvula PRINCE D300 demostró una mejora significativamente buena en la sincronización. Se notó una reducción drástica en el desfase entre los cilindros, alcanzando una

descompensación de tan solo 2 mm. Esta mejora fue sobresaliente en comparación con los 20 mm de desfase observados en la configuración sin válvula. El efecto visual fue inmediato y notable: la cortina de la plegadora descendía de manera perfectamente nivelada y con una suavidad considerable, evidenciando un trabajo de sincronización excelente en esta dirección específica.

El éxito en esta fase se debe directamente al principio de operación de la válvula PRINCE D300. Al ser una válvula divisora compensada por presión, su diseño permite que el caudal de aceite proveniente de la bomba se distribuya de forma equitativa (50/50) hacia ambos cilindros. La característica de "compensada por presión" es clave: si uno de los cilindros encuentra una mayor resistencia al movimiento (por ejemplo, debido a fricción interna o un ligero desalineamiento), la válvula es capaz de redirigir o asegurar un mayor caudal de aceite hacia ese cilindro. Esto asegura que ambos actuadores avancen a la misma velocidad, manteniendo la sincronización y la posición nivelada del cabezal de la plegadora durante el descenso.

Limitaciones: Desincronización en Subida y el Problema del Desfase Acumulado A pesar del excelente desempeño en la bajada, las limitaciones de la válvula PRINCE D300 se hicieron palpables en otras condiciones. Al iniciar la fase de subida (retorno), se observó una clara desincronización de los cilindros. La descompensación regresó a niveles alarmantes, alcanzando nuevamente los 20 mm de desfase, similar a la configuración sin ninguna válvula de control. Este comportamiento se explica por la naturaleza unidireccional de la válvula. En la dirección de retorno, la PRINCE D300 incorpora un "paso libre" para el aceite; esto significa que el fluido no es dividido ni compensado, sino que se le permite circular sin restricciones. Como resultado, los cilindros vuelven a depender de sus resistencias internas, permitiendo que el que ofrece menor oposición se adelante, tal como sucedía en la configuración base.

El problema más crítico y complejo surgió al observar el comportamiento continuo. Una vez

que los cilindros se descompensaban durante la subida (por ejemplo, el cilindro A subía 20 mm más que el cilindro B), esta desincronización se acumulaba y se mantenía para el siguiente ciclo. Es decir, al volver a bajar, y aunque la válvula PRINCE D300 sí lograba que ambos cilindros se desplazaran a la misma velocidad en su descenso (gracias a su función compensada en esa dirección), lo hacían partiendo de una posición inicial desfasada. Esto significaba que, aunque la "velocidad" de bajada era sincronizada, la "altura" o posición relativa entre ellos se mantenía descompensada, con un cilindro más arriba que el otro por el mismo margen de 20 mm. Este fenómeno se observó consistentemente tanto en condiciones de vacío como bajo carga real, afectando directamente la precisión de los plegados sucesivos.

Implicaciones Operativas: Incompatibilidad con la Operación de la Plegadora Este patrón de comportamiento revela que la válvula PRINCE D300, a pesar de su eficacia en un sentido de operación, no es la solución ideal para aplicaciones como las plegadoras industriales que demandan una sincronización precisa en ambos sentidos de movimiento y a lo largo de ciclos repetitivos. La dependencia de que los cilindros "lleguen a contraerse por completo para que se sincronicen" y solo entonces puedan extenderse de manera coordinada es una limitación severa. Las plegadoras rara vez operan con los cilindros totalmente extendidos o totalmente contraídos entre cada plegado, ya que se requieren movimientos intermedios y ajustes constantes.

Este resultado enfatiza la importancia crítica de seleccionar válvulas con capacidades de compensación bidireccional para maquinaria que requiere una sincronización constante y precisa en todas las fases de su ciclo de trabajo. La ficha técnica de la válvula, aunque promete sincronización, no especifica de forma prominente su limitación unidireccional, lo que destaca la necesidad de una lectura atenta y una comprensión profunda de las especificaciones de diseño versus los requisitos operativos reales de la aplicación.

3.3 Configuración 3: Válvula DFL 25/40 (Divisora/Combinadora Bidireccional)

La tercera fase de pruebas se centró en la válvula DFL 25/40, un componente hidráulico con un diseño más avanzado. Esta válvula, clasificada como divisora/combinadora bidireccional y compensada por presión, representa una forma avanzada de control pasivo en la sincronización hidráulica (Li et al., 2023a; Sun & Zhang, 2023). Su instalación fue relativamente sencilla, solo requirió el cambio de algunos acoples para integrarla correctamente en el sistema de la plegadora. Después de identificar las limitaciones de la válvula PRINCE D300 en el movimiento ascendente, se esperaba que la DFL 25/40, con su capacidad bidireccional, fuera la solución definitiva para lograr la sincronización total de la máquina, tanto en la bajada como en la subida, y bajo todas las condiciones de carga.

Desempeño en Vacío: Éxito Prometedor y Alta Precisión En condiciones de operación en vacío (sin carga aplicada), la válvula DFL 25/40 mostró un desempeño excelente en la sincronización. El movimiento de los cilindros era notablemente coordinado y fluido, tanto al descender como al ascender. Las mediciones confirmaron una reducción drástica del margen de desincronización a tan solo 1 mm de desfase promedio, tanto en la bajada como en la subida. Este resultado fue una mejora sustancial no solo frente a los 20 mm de la configuración base sin válvula, sino también superó el rendimiento de la válvula PRINCE D300. En este punto, el equipo de investigación consideró que el objetivo de sincronización en vacío se había logrado plenamente, observando cómo el cabezal de la plegadora se desplazaba de manera perfectamente nivelada.

El éxito de la DFL 25/40 en vacío se debe directamente a su diseño como válvula bidireccional y compensada por presión. Su cualidad bidireccional le permite dividir el caudal equitativamente durante la bajada y unificarlo (combinar el flujo de retorno) de manera igualitaria durante la subida, manteniendo el control en ambos sentidos del movimiento. Además, la característica de "compensada por

presión" es crucial: la válvula está diseñada para "absorber" o contrarrestar las pequeñas diferencias de presión que puedan surgir entre los dos cilindros, distribuyendo el caudal de manera equitativa. Esto se logra mediante mecanismos internos como muelles o carretes que se ajustan dinámicamente para abrir o cerrar orificios, asegurando que ambos cilindros se desplacen de forma coordinada a pesar de las variaciones menores de resistencia cuando no hay carga.

El Desafío Crítico: Desempeño bajo Carga y la Incompatibilidad de Caudal A pesar de su prometedor desempeño en vacío, la válvula DFL 25/40 presentó un resultado decepcionante al ser sometida a condiciones de carga real durante el plegado de planchas metálicas. La desincronización reapareció, aunque en menor medida que en la configuración base, con un desfase que ascendió a 5mm. Si bien este valor es significativamente menor que los 18-20 mm observados sin válvula, representó una pérdida considerable de la precisión lograda en vacío. Al doblar las planchas, se seguía notando que un lado del doblez estaba más pronunciado que el otro, lo que, aunque era mucho menor en comparación con los dobleces realizados sin ninguna válvula, comprometía la calidad final del producto. Este resultado inesperado y el hecho de que la válvula no funcionara como se esperaba bajo carga, llevó al equipo a una investigación más profunda para identificar la causa subyacente.

La investigación reveló que la causa principal de esta ineficacia bajo carga residía en una incompatibilidad crítica entre el caudal de la bomba del sistema y el rango de operación óptimo de la válvula DFL 25/40. Mientras que la bomba de la plegadora suministra un caudal de 12 L/min, las especificaciones del fabricante para la válvula DFL 25/40 (Oleodinamica Marchesini, s.f.) indican que su funcionamiento óptimo, y la garantía de sus propiedades compensadas, se encuentran en un rango de caudal de entrada de 25 a 40 L/min.

Las válvulas compensadas por presión tienen un rango de operación definido por el fabricante porque sus mecanismos internos (los muelles y carretes) dependen de un cierto flujo y presión

para activarse y modular el caudal correctamente. Cuando el caudal de entrada (12 L/min) cae muy por debajo de este umbral mínimo (25 L/min), los muelles o carretes internos no logran activarse o posicionarse adecuadamente y se quedan atascados o cerrados parcialmente. Esto provoca que la válvula no pueda compensar eficazmente las diferencias de presión ni distribuir el caudal equitativamente. El efecto más alarmante de esta condición de bajo caudal fue la presurización excesiva de la máquina, llegando a los 2500 psi incluso sin estar doblando material, es decir, solo al intentar levantar la cortina de la plegadora. Esta presurización indicaba un bloqueo interno que impedía el flujo normal, confirmando que la válvula no estaba operando dentro de sus parámetros esperados. El resultado práctico fue una división de flujo imprecisa y una consecuente pérdida de sincronización bajo carga, donde las demandas de fuerza y flujo son mayores, comportándose de manera errática. Investigaciones previas han demostrado que el rendimiento de división de flujo de estas válvulas es sensible a la variación del caudal de entrada, siendo menos precisas cuando operan fuera de sus condiciones óptimas o a caudales reducidos (Li et al., 2005).

4. Discusión

Los resultados de las pruebas experimentales confirman inequívocamente que la desincronización del flujo hidráulico en sistemas de cilindros paralelos, como el de la plegadora industrial evaluada, es un problema real y altamente significativo, tal como se evidenció en las marcadas diferencias de movimiento entre los cilindros bajo distintas configuraciones y condiciones de carga (ver Tabla 2 y pp. 7-9).

La ausencia de cualquier sistema de control resultó en un desfase promedio de hasta 20 mm entre los cilindros, lo que se traduce directamente en pérdidas económicas sustanciales. Estas pérdidas derivan no solo de la ineficiencia en la operatividad de la máquina y el tiempo de producción, sino también de la necesidad de reparar dobles defectuosos o, en el peor de los casos, de tener que descartar piezas completas, aumentando los costos de material y desperdicio.

Este escenario inicial subraya la imperiosa necesidad de implementar una solución efectiva para garantizar la precisión en el plegado.

La evaluación de las válvulas divisoras de caudal ofreció perspectivas valiosas sobre los factores críticos para lograr la sincronización. La válvula PRINCE D300, aunque es un componente de alta calidad y muy efectivo en su diseño, demostró las limitaciones de las soluciones unidireccionales en aplicaciones que demandan un control preciso en ambos sentidos de movimiento. Su capacidad para reducir el desfase a solo 2 mm en la bajada en vacío fue notable, evidenciando su eficiencia en el sentido para el que fue concebida. Sin embargo, su diseño de "paso libre" en el retorno y su incapacidad para manejar la carga de manera bidireccional resultaron en una desincronización persistente y, crucialmente, en un desfase acumulativo que comprometía la operación continua de la plegadora. Esto resalta que, si bien la PRINCE D300 sería una excelente opción para máquinas donde la sincronización solo se requiere en una dirección (como un elevador hidráulico de automóviles), no es apta para el ciclo de trabajo bidireccional y de precisión de una plegadora.

Por otro lado, la prueba con la válvula DFL 25/40 arrojó un hallazgo aún más relevante para el diseño y la implementación de sistemas hidráulicos. Esta válvula, con su capacidad divisora/combinadora bidireccional y compensación por presión, logró una sincronización casi perfecta en condiciones de vacío, reduciendo el desfase a un extraordinario 1 mm. Este resultado inicial sugería que se había encontrado la solución ideal para la sincronización. No obstante, el comportamiento decepcionante bajo carga, donde el desfase aumentó a 5 mm y se evidenciaron problemas de presurización y atascamientos internos, puso de manifiesto la importancia crítica del dimensionamiento adecuado.

Los resultados de la DFL 25/40 demuestran que, independientemente de las capacidades teóricas y avanzadas de un componente, su rendimiento real está intrínsecamente ligado a la compatibilidad con el caudal de la bomba del sistema. Específicamente, nuestras pruebas revelaron que

la bomba de la plegadora, con sus 12 L/min, no alcanzaba el caudal mínimo de operación de 25 L/min requerido por la válvula DFL 25/40 (ver Sección 3.3 de Resultados). Esta incompatibilidad impedía que los mecanismos internos de compensación de la válvula (muelles y carretes) funcionaran correctamente, anulando su capacidad de dividir el flujo y llevando el sistema a un estado de desincronización similar al de no tener control. Esto resalta un error común en la industria, a menudo por desconocimiento tanto de operadores como de vendedores, donde no se considera la interacción fundamental entre el caudal de la bomba y los rangos de operación de la válvula (Li et al., 2005).

En síntesis, los hallazgos de este estudio ofrecen una clara comparativa entre el comportamiento desincronizado de los cilindros hidráulicos previo a cualquier intervención y el potencial de mejora tras la implementación de soluciones de regulación de caudal. Antes de las propuestas, el sistema exhibía una desincronización persistente y significativa, impactando directamente la calidad del producto y la eficiencia operativa al generar deformaciones, retrabajos y ralentización de los ciclos. Sin embargo, los resultados demuestran que, si bien las soluciones unidireccionales ofrecen una mejora parcial en fases específicas, es la adecuada selección y el dimensionamiento compatible de válvulas divisorias/combinadoras bidireccionales lo que realmente permite alcanzar una sincronización precisa. Esto transforma un problema de rendimiento crónico en una operación potencialmente más estable y productiva, aunque subrayando la importancia crítica de la compatibilidad del caudal del sistema con las especificaciones de la válvula.

A partir de estos resultados, se abren varias líneas de acción para optimizar el rendimiento de la plegadora y servir como guía para futuras aplicaciones industriales. Una opción inmediata sería la sustitución de la bomba hidráulica por una de mayor caudal (superando los 25 L/min) para permitir que la válvula DFL 25/40 opere dentro de sus parámetros óptimos y se evalúe su máximo potencial. Otra alternativa, en el caso de que la sustitución de la bomba no sea viable, sería la

adopción de una válvula divisora/combinadora bidireccional de un rango de caudal más bajo y compatible con los 12 L/min del sistema actual. Finalmente, a largo plazo, la implementación de un sistema de control activo, que utiliza sensores y retroalimentación en tiempo real para corregir la posición de los cilindros de manera electrónica (en lugar de pasiva), podría ser una solución definitiva para alcanzar una precisión milimétrica, si las necesidades de producción lo justifican.

5. Conclusiones

La falta de regulación de caudal conduce a una desincronización persistente en sistemas hidráulicos de cilindros paralelos, resultando en diferencias de movimiento de hasta 20mm. Este problema es significativo, causando pérdidas económicas considerables y evidenciando la necesidad crítica de soluciones de control para una operación sincrónica.

Las válvulas unidireccionales son limitadas para aplicaciones que demandan control en ambos sentidos del movimiento. Aunque la válvula PRINCE D300, por su diseño divisorio unidireccional y compensado por presión (Prince Manufacturing Corporation, s.f.), redujo el desfase a 2 mm en bajada en vacío, su diseño de paso libre en el retorno y su incapacidad bajo carga provocaron desincronización y desfase acumulativo, haciéndola inadecuada para ciclos operativos complejos.

El rendimiento de las válvulas avanzadas depende críticamente de la compatibilidad con el caudal del sistema. La DFL 25/40, caracterizada por su capacidad divisora/combinadora bidireccional y compensada por presión (Oleodinamica Marchesini, s.f.), logró sincronización excepcional en vacío (1 mm), pero falló bajo carga debido a que el caudal de la bomba (12 L/min) era inferior al mínimo requerido (25 L/min). Esto subraya la importancia vital del dimensionamiento correcto de los componentes para asegurar la precisión deseada.

Como recomendación final y práctica para el sector industrial, la selección de una válvula

divisora/combinadora bidireccional compatible con el caudal real de la bomba es un factor decisivo para garantizar una sincronización precisa. Adquirir un componente de alta tecnología sin verificar su compatibilidad con el sistema existente es ineficaz y puede llevar a un rendimiento deficiente, anulando los beneficios teóricos de la solución.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Magíster Marco Checa, Coordinador de Investigación del Instituto Superior Tecnológico 17 de Julio (IST17J), y al Ingeniero Romel Obando, Coordinador de la carrera de Tecnología Superior en Mecánica Industrial (TSMI), por su acompañamiento y seguimiento permanente, así como por su compromiso con la rigurosidad y calidad científica durante todo el desarrollo del artículo.

Referencias:

- Carreira, A. V., Reis, J. B., & Martins, C. A. (2023). *Application of multi-cylinder synchronous control for telescopic mechanism of an offshore crane*. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(5), 1010. <https://doi.org/10.3390/jmse11051010>
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2018). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones (4.a ed.)*. McGraw-Hill.
- Dinca, L., Iliescu, M., Ilie, D. S., Neacsu, M. D., Ciuperca, R., & Prundus, D. (2025). *Studies on the Thermal Behavior of an Electro-Hydrostatic Servo Actuator*. *Actuators*, 14(2), 48. <https://doi.org/10.3390/act14020048>
- Esposito, A. (2018). *Fluid Power with Applications (7th ed.)*. Pearson Education.
- García, J., Rios-Colque, L., Peña, A., & Rojas, L. (2025). *Condition Monitoring and Predictive Maintenance in Industrial Equipment: An NLP-Assisted Review of Signal Processing, Hybrid Models, and Implementation Challenges*. *Applied Sciences*, 15(10), 5465. <https://doi.org/10.3390/app15105465>
- Gómez R., V., Goytisolo E., R., & Cabello E., J. J. (2007). *Cálculo a la estabilidad del equilibrio en cilindros hidráulicos de simple etapa*. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16(2), 78-84.
- International Organization for Standardization. (2009). *ISO/TS 16949:2009—Quality management systems—Particular requirements for the application of ISO 9001:2008 for automotive production and relevant service parts organizations*. iso.org
- International Organization for Standardization. (2015). *ISO 9001:2015—Quality management systems—Requirements*. iso.org.
- Jensen, S. (2024, 16 de diciembre). *Modernizing Hydraulic Systems Through New Technology Developments*. *Power & Motion. Endeavor Business Media*. Recuperado el 4 de julio de 2025, de <https://www.powermotiotech.com/hydraulics/hydraulic-valves/article/55248760/modernizing-hydraulic-systems-through-new-technology-developments>
- Kenett, R. S., Zonnenshain, A., & Swarz, R. S. (2020). *Systems engineering as a data-driven and evidence-based discipline*. *INCOSE International Symposium*, 30(1), 757-770. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2020.00753.x>
- Kumar, D., Mahato, A. C., Prakash, O., & Kumar, K. (2022). *Priority flow divider valve and its dynamic analysis using various hydraulic drive systems: a bond graph approach*. *Mechanical Sciences*, 13, 459-472. <https://doi.org/10.5194/ms-13-459-2022>
- Lewis, K. (2023). *How to Synchronize Hydraulic Cylinders: A Comprehensive Guide*. *Cylinders Inc*. <https://www.cylindersinc.com/blog/how-to-synchronize-hydraulic-cylinders-a-comprehensive-guide/>
- Li, R., Yuan, W., Ding, X., Xu, J., Sun, Q., & Zhang, Y. (2023a). *Review of research and development of hydraulic synchronous control system*. *Processes*, 11(4), 981. <https://doi.org/10.3390/pr11040981>

- Li, R., Zhang, Y., Feng, Z., Xu, J., Wu, X., Liu, M., Xia, Y., Sun, Q., & Yuan, W. (2023b). *Review of the progress of energy saving of hydraulic control systems. Processes, 11(12), 3304.* <https://doi.org/10.3390/pr11123304>
- Li, S. Y., Zhang, B. J., & Zhang, Y. B. (2005). *Experimental investigation on the flow dividing characteristics of two types of hydraulic flow dividers. International Journal of Fluid Power, 6(1), 17-23.*
- Li, Z., Wang, J., & Wang, Q. (2024). *Two-cylinder synchronous electro-hydraulic servo system and its control technology development. Recent Patents on Engineering, 18(7), 117-131.* <https://doi.org/10.2174/1872212118666230829161037>
- Li, H., Lyu, S., & Wu, P. (2023). *Synchronous Control of a Multi-Cylinder Hydraulic Press System. Processes, 11(1), 163.* <https://doi.org/10.3390/pr11010163>
- Lyu, S., Wang, Y., & Zhao, Z. (2021). *A novel synchronous control method for hydraulic cylinders in parallel. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 43(11), 540.* <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03264-9>
- Lyu, L., Liang, X., y Guo, J. (2021). *Synchronization control of a dual-cylinder lifting gantry of segment erector in shield tunneling machine under unbalance loads. Machines, 9(8), 152.* <https://doi.org/10.3390/machines9080152>
- Manring, N. D., & Fales, R. S. (2019). *Hydraulic Control Systems (3rd ed.). Wiley.*
- Merritt, H. E. (1967). *Hydraulic Control Systems. Wiley.*
- Murrenhoff, H., Berlinger, M., & Scholz, T. (2022). *Energy efficiency in modern fluid power systems. En Proceedings of the 13th International Fluid Power Conference (IFK 2022) (págs. 23–35). Aachen, Alemania.* Obtenido de: https://www.fluidpower.rwth-aachen.de/fileadmin/user_upload/Publications/13th_IFK_Proceedings_2022/IFK_2022_Vol_2_Pages_23-35.pdf
- Novak, N., Trajkovski, A., Kalin, M., & Majdič, F. (2023). *Degradation of hydraulic system due to wear particles or medium test dust. Applied Sciences, 13(13), 7777.* <https://doi.org/10.3390/app13137777>
- Oleodinamica Marchesini. (s.f.). *V1025 – DFL 25 – 40 – Oleodinamica Marchesini [Ficha técnica].* Recuperado el 4 de julio de 2025, de <https://www.hydrabuy.com/hydraulic-valves/2-ways-flow-divider/v1025>
- Pedersen, J. F., Schlanbusch, R., Meyer, T. J. J., Caspers, L. W., & Shanbhag, V. V. (2021). *Acoustic emission-based condition monitoring and remaining useful life prediction of hydraulic cylinder rod seals. Sensors, 21(18), 6012.* <https://doi.org/10.3390/s21186012>
- Pingdom. (2023). *Average Cost of Downtime per Industry.* <https://www.pingdom.com/outages/average-cost-of-downtime-per-industry/>
- Prince Manufacturing Corporation. (s.f.). *Model RD-300 Proportional Divider Valve with Free Return Checks – 30 GPM.* Recuperado el 4 de julio de 2025, de <https://www.princehyd.com/Products/Hydraulic-Valves/Flow-Control/Model-RD300>
- Rankka, A., & Dell'Amico, A. (2024). *Procedure of developing more energy-efficient and electrified hydraulic systems for loader cranes. Frontiers in Mechanical Engineering, 10, Article 1494642.* <https://doi.org/10.3389/fmech.2024.1494642>
- Su, X., & Zheng, X. (2024). *Sliding mode control of electro-hydraulic servo system based on double observers. Mechanical Sciences, 15(1), 77–85.* <https://doi.org/10.5194/ms-15-77-2024>
- Sun, X., Deng, X., & Li, J. (2023). *Cross-coupled sliding mode synchronous control for a double lifting-point hydraulic hoist. Sensors, 23(23), 9387.* <https://doi.org/10.3390/s23023987>
- Sun, Y., & Zhang, L. (2023). *Review of the Progress of Energy Saving of Hydraulic Control Systems. Processes, 11(12), 3304.* <https://doi.org/10.3390/pr11123304>

Viersma, T. J. (1980). *Analysis, Synthesis and Design of Hydraulic Servosystems and Pipelines*. Elsevier.

Watton, J. (2007). *Fundamentals of Hydraulic Control Systems*. Wiley.

Woś, P., & Dindorf, R. (2022). *Synchronization of the movement for multi-cylinder electro-hydraulic servo driver*. *EPJ Web of Conferences*, 269, 01069.
<https://doi.org/10.1051/epjconf/202226901069>

Wu, G., & Zhang, Y. (2024). *Research on a synchronization control strategy for a large-scale hydraulic press system*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 210, 111162.
<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.111162>

Zhang, K., Yuan, Y., & Sun, H. (2024). *Multi-cylinder Leveling Control Systems Based on Dual-Valve Parallel Pressure Loops*. *Expert Systems with Applications*, 232, 120461.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120461>

Zhu, Y., Wu, Q., Tang, S., & Khoo, B. C. (2023). *Intelligent Fault-Diagnosis Methods for Hydraulic Piston Pumps: A Review*. *Journal of Marine Science & Engineering*, 11(8), 1609.
<https://doi.org/10.3390/jmse11081609>



Felipe Santiago Torres Andrade, nacido el 8 de septiembre de 1991, es un ingeniero mecánico soltero, residente en Atuntaqui, Imbabura. Se graduó de la Universidad Politécnica Salesiana el 10 de mayo de 2018. Ha desempeñado roles como ingeniero en Diseño Innovación y Construcción (DIINCO) (2013-2015), técnico operador en Servicios Industriales (2013-2014), y diseñador de túneles hidroeléctricos para LOMBARDI S.A. (2016). Actualmente, es docente en SENESCYT-IST 17J desde noviembre de 2020. También ha recibido capacitación en diseño de estructuras metálicas, inteligencia artificial generativa y soldadura de alto nivel.

BIOGRAFÍAS



Jonathan Alexander Paucar Gavilanez es un Tecnólogo Superior en Metalmecánica con una destacada trayectoria de 15 años en la industria. Se ha especializado en la fabricación, montaje y mantenimiento de equipos industriales y estructuras metálicas. Su experiencia incluye el manejo de máquinas

herramienta convencionales, una sólida habilidad en procesos de soldadura (TIG, MIG, arco eléctrico), y la implementación de sistemas hidráulicos, neumáticos y eléctricos. A lo largo de su carrera, Jonathan ha liderado proyectos y desarrollado soluciones innovadoras para optimizar procesos, siempre con el objetivo de asegurar la fiabilidad operativa y contribuir al fortalecimiento del sector industrial.

Fortalecimiento de la seguridad con el uso de cámaras CCTV en institutos de educación superior

Checa, Marco¹; Torres, Jessica²; Valencia, Fernando³; Jácome, Paulina⁴

¹Instituto Tecnológico Universitario 17 de Julio, Desarrollo de Software, <https://orcid.org/0000-0002-4169-581X>, Ibarra, Ecuador

²Instituto Tecnológico Universitario 17 de Julio, Desarrollo de Software, <https://orcid.org/0009-0007-7601-7588>, Ibarra, Ecuador

³Instituto Tecnológico Universitario 17 de Julio, Desarrollo de Software, <https://orcid.org/0009-0006-5889-4918>, Ibarra, Ecuador

⁴Instituto Tecnológico Universitario 17 de Julio, Desarrollo de Software, <https://orcid.org/0009-0001-7046-7226>, Ibarra, Ecuador

Recibido: 2025/06/30

Aceptado: 2025/07/01

Resumen: El proyecto surge como respuesta a la creciente preocupación por la seguridad en instituciones educativas. En el Instituto, no existía un sistema de vigilancia efectivo, lo que aumentaba el riesgo de incidentes y afectaba la sensación de seguridad dentro del campus. Se propuso entonces implementar un sistema de Circuito Cerrado de Televisión (CCTV) en el Instituto Superior Tecnológico 17 de Julio que mejore la seguridad de las instalaciones, protegiendo a estudiantes, personal docente y administrativo, además de proporcionar un entorno seguro para el desarrollo académico. La metodología empleada consistió en una fase de diagnóstico, seguida de la instalación práctica del sistema CCTV con la participación de estudiantes y docentes. Además, se incluyó la capacitación en el uso y mantenimiento del sistema, asegurando que la comunidad educativa pudiera gestionar el sistema de forma autónoma. Este proyecto contribuye al fortalecimiento de la seguridad institucional, proporcionando herramientas de monitoreo y gestión de incidentes. Además, ofrece un modelo de aprendizaje práctico para los estudiantes de la Carrera de Redes y Telecomunicaciones. Los resultados obtenidos incluyen la instalación exitosa del sistema CCTV, la capacitación de los estudiantes y personal, y la mejora en la seguridad del instituto. El sistema facilita la detección temprana de delitos y mejora la respuesta ante incidentes. Es importante que los investigadores profundicen en el análisis de nuevas tecnologías de vigilancia y enfoquen sus estudios en la eficacia a largo plazo de sistemas como el CCTV en instituciones educativas para mejorar los modelos de seguridad.

Palabras clave: Seguridad; CCTV; instituto educativo; tecnologías de vigilancia.

Strengthening security with the use of CCTV cameras in higher education institutions

Abstract: The project arose in response to growing concerns about security in educational institutions. The Institute's lack of an effective surveillance system increased the risk of incidents and affected the sense of security on campus. The proposal was to implement a Closed-Circuit Television (CCTV) system at the Instituto Superior Tecnológico 17 de Julio to improve the security of the facilities, protecting students, faculty, and staff, and providing a safe environment for academic development. The methodology employed consisted of a diagnostic phase, followed by the practical installation of the CCTV system with the participation of students and faculty. In addition, training in the use and maintenance of the system was included, ensuring that the educational community could manage it autonomously. This project contributes to strengthening institutional security by providing monitoring and incident management tools. It also offers a practical learning model for students in the

Networks and Telecommunications program. The results include the successful installation of the CCTV system, training for students and staff, and improved security at the institute. The system facilitates early detection of crimes and improves incident response. It is important for researchers to further analyze new surveillance technologies and focus their studies on the long-term effectiveness of systems such as CCTV in educational institutions to improve security models.

Keywords: Security; CCTV; educational institute; surveillance technologies.

1. Introducción

La seguridad en los Institutos de Educación Superior es una preocupación constante que impacta directamente en el bienestar de la comunidad académica. El entorno educativo debe ser un lugar seguro que permita a los estudiantes, docentes y personal administrativo desenvolverse con tranquilidad y sin temor a situaciones de riesgo. Para garantizar esta seguridad, la implementación de sistemas de monitoreo, como las cámaras de circuito cerrado de televisión (CCTV), ha demostrado ser una herramienta eficiente en diversas instituciones educativas (Educacionsuperior.gob.ec, 2025).

El uso de cámaras CCTV se ha consolidado como un mecanismo preventivo frente a situaciones de delincuencia y desorden, permitiendo la vigilancia continua de áreas críticas dentro de los campus universitarios. Estos sistemas no solo ayudan en la prevención, sino también en la recolección de evidencia que puede ser esencial para la resolución de incidentes (Avigilon.com, 2025). De acuerdo con (Bowman, 2025), el monitoreo en tiempo real facilita la intervención inmediata en caso de emergencias y refuerza la confianza de los miembros de la comunidad educativa.

El impacto positivo de las cámaras de vigilancia no solo se limita a la seguridad física, sino que también contribuye a la creación de una cultura institucional orientada a la prevención (Senstar.com, 2025). La instalación adecuada y el mantenimiento eficiente de estos sistemas son cruciales para su efectividad, como lo indican diversas investigaciones en el ámbito de la seguridad escolar (Uk-rs--online-com, 2025).

Por otro lado, la sensibilización de la comunidad educativa sobre el uso responsable de las tecnologías es fundamental para garantizar que los sistemas de CCTV sean utilizados de manera ética y respetuosa, cumpliendo con los principios de privacidad y legalidad (Getmedigital-com, 2025). Según (Grupospec.com, 2025), los estudiantes y el personal deben ser informados sobre el propósito de los sistemas de vigilancia, promoviendo un ambiente de confianza y cooperación.

Este proyecto busca implementar un sistema de cámaras CCTV en los Institutos de Educación Superior con el objetivo de fortalecer la seguridad y mejorar la respuesta ante incidentes. Además, se enfocará en la formación de la comunidad educativa para maximizar el impacto de esta tecnología en la creación de un entorno seguro y protegido para todos los involucrados (Impulsecctv-com, 2025).

Marco Checa
Autor por correspondencia

2. Materiales y Métodos

El presente proyecto se desarrollará a través de una metodología cuantitativa y cualitativa, que permita evaluar la efectividad del uso de cámaras de circuito cerrado de televisión (CCTV) en el fortalecimiento de la seguridad en los Institutos de Educación Superior. Esta metodología está estructurada en varias fases interrelacionadas, que incluyen el diagnóstico inicial, el diseño e implementación del sistema de cámaras, la capacitación y sensibilización de la comunidad educativa, y la evaluación continua del impacto del sistema.

Diagnóstico Inicial de Seguridad

En esta fase, se realizará un análisis exhaustivo de la situación de seguridad en el instituto, con el objetivo de identificar las áreas críticas que requieren monitoreo. Para ello, se utilizarán las siguientes técnicas:

Encuestas a estudiantes, docentes y personal administrativo: Se aplicarán cuestionarios para conocer la percepción de la comunidad educativa sobre la seguridad en el campus, identificar zonas de riesgo y evaluar posibles incidentes previos.

Entrevistas con personal de seguridad: Se realizarán entrevistas con los responsables de seguridad del instituto para identificar las deficiencias en los sistemas de vigilancia actuales y definir las áreas prioritarias para la implementación de cámaras CCTV.

Observación directa: Se llevará a cabo un análisis de campo en las instalaciones del instituto para observar las condiciones actuales de seguridad y determinar las ubicaciones óptimas para la instalación de las cámaras.

Diseño e Implementación del Sistema CCTV

Una vez diagnosticadas las necesidades de seguridad, se procederá al diseño del sistema de cámaras CCTV, considerando los siguientes aspectos:

Selección del equipo de cámaras: Se determinarán las especificaciones técnicas necesarias para las cámaras (resolución, tipo de lente, capacidad de almacenamiento, etc.) en función de las características del campus y las necesidades de seguridad detectadas.

Ubicación estratégica de las cámaras: Basado en el diagnóstico previo, se seleccionarán las ubicaciones específicas para la instalación de las cámaras, priorizando zonas de alta circulación, entradas y salidas, y áreas de mayor vulnerabilidad.

Instalación del sistema: Se coordinará la instalación del sistema de cámaras CCTV, asegurando su integración con el sistema de monitoreo centralizado y garantizando la cobertura en tiempo real de las áreas críticas.

Capacitación y Sensibilización de la Comunidad Educativa

Una parte fundamental de la metodología es la formación de la comunidad educativa para el uso adecuado del sistema CCTV y el fomento de una cultura de seguridad. Esta fase incluirá:

Capacitación del personal de seguridad: Se brindará una formación especializada sobre el uso del sistema de cámaras CCTV, la interpretación de las imágenes y la respuesta ante incidentes detectados.
Talleres de sensibilización para estudiantes y personal administrativo: Se organizarán talleres sobre la importancia de la seguridad en el instituto, el uso de la tecnología para prevenir delitos y el respeto a la privacidad. La sensibilización también incluirá información sobre las normativas relacionadas con el monitoreo y la protección de datos personales.

Monitoreo y Evaluación del Impacto

Una vez implementado el sistema, se realizará un proceso continuo de monitoreo y evaluación para medir la efectividad de las cámaras CCTV en el fortalecimiento de la seguridad:

Monitoreo en tiempo real: El personal de seguridad realizará un seguimiento continuo a través de las cámaras CCTV, registrando cualquier incidencia o comportamiento sospechoso.

Evaluación de la reducción de incidentes: Se compararán los incidentes de seguridad ocurridos antes y después de la instalación del sistema para determinar el impacto en la reducción de delitos o situaciones de riesgo en el campus.

Encuestas y entrevistas de seguimiento: Se aplicarán encuestas a la comunidad educativa después de un período de funcionamiento del sistema para medir la satisfacción con la seguridad mejorada y la percepción sobre el uso de las cámaras CCTV.

Informe de evaluación: Se elaborará un informe final con los resultados obtenidos de las evaluaciones, que incluirá recomendaciones para posibles ajustes en el sistema de cámaras y en las estrategias de seguridad.

3. Resultados y Discusión

El diagnóstico inicial realizado en el IST17J permitió identificar las zonas más vulnerables del

campus, tales como entradas y salidas principales, áreas de estacionamiento, pasillos poco transitados y patios. Se observó que la percepción de inseguridad era alta, especialmente durante las horas de menor afluencia de estudiantes. En base a este análisis, se procedió al diseño del sistema de cámaras CCTV, seleccionando puntos estratégicos de vigilancia, para garantizar una cobertura eficiente.

Resultados del Diagnóstico Inicial

Tabla 1. Diagnóstico Inicial

Zona Evaluada	Nivel de Vulnerabilidad	Área de Instalación de Cámaras
Entradas y salidas principales	Alta	4 cámaras de vigilancia en las entradas
Áreas de estacionamiento	Moderada	2 cámaras en las zonas más alejadas
Pasillos de baja afluencia	Alta	3 cámaras en los pasillos interiores
Patio central	Baja	2 cámaras en áreas visibles

Comentarios: Se observa que las cámaras tal cual están instaladas en su momento tenía ciertos problemas.

Diseño del Sistema

El sistema de CCTV fue diseñado para asegurar la cobertura de las áreas más críticas, utilizando cámaras de alta resolución, con capacidades de monitoreo en tiempo real y almacenamiento digital. La implementación de cámaras en puntos estratégicos permitió una vigilancia constante durante las 24 horas del día, reduciendo la probabilidad de incidentes de seguridad.

Implementación del Sistema de CCTV

Con el diseño aprobado, se procedió a la instalación física de las cámaras, así como a la integración con los sistemas de monitoreo. Se estableció un centro de control donde el personal de seguridad puede visualizar las imágenes en tiempo real.

Tabla 2. Actividades de Implementación

Actividad	Fecha de Ejecución	Resultado Esperado
Instalación de cámaras	de Marzo 2023	Colocación de 15 cámaras en las zonas críticas
Integración sistema de monitoreo	al de Abril 2023	Funcionamiento adecuado de cámaras y software
Entrenamiento del personal	del Mayo 2023	Personal capacitado en el manejo del sistema

Comentarios: La tabla presenta el proceso que se realizó para la instalación de las cámaras

Resultados de la Implementación

La implementación del sistema CCTV se completó dentro del tiempo estipulado. La cobertura de las cámaras abarcó todas las zonas vulnerables identificadas durante el diagnóstico. Se realizaron pruebas de funcionamiento y se verificó que las cámaras ofrecieran una resolución adecuada y almacenamiento suficiente para la grabación continua de eventos.

Evaluación de la Eficiencia del Sistema

Tras la puesta en marcha del sistema de CCTV, se procedió a evaluar su eficiencia en términos de la reducción de incidentes de seguridad y la mejora en la respuesta ante emergencias.

Reducción de Incidentes de Seguridad

Uno de los principales objetivos del proyecto fue reducir los incidentes delictivos en el campus. A continuación, se presentan los resultados de la comparación de incidentes antes y después de la instalación de las cámaras CCTV.

Tabla 3. Incidentes

Tipo de Incidente	Antes de la Instalación	Después de la Instalación	Reducción (%)

Robos en el campus	10	4	60%
Actos de vandalismo	5	2	60%
Peleas y altercados	6	2	66%

Comentarios: El número de incidentes se ha reducido considerablemente

Mejora en la Respuesta ante Emergencias

El monitoreo en tiempo real permitió una intervención más rápida por parte del personal de seguridad. Los tiempos de respuesta a incidentes fueron reducidos en un 45%, lo que contribuyó a la resolución eficiente de situaciones de riesgo.

Tabla 4. Tiempos de respuesta

Tipo de Emergencia	Tiempo Promedio de Respuesta (Antes)	Tiempo Promedio de Respuesta (Después)
Incidentes de vandalismo	15 min	8 min
Emergencias médicas	10 min	5 min

Comentarios: Se presentan los tiempos de respuesta de acuerdo con los criterios de evaluación

Satisfacción de la Comunidad Educativa

La comunidad educativa mostró una alta satisfacción con el nuevo sistema de seguridad. Según los resultados de una encuesta aplicada a estudiantes, docentes y personal administrativo, 92% de los encuestados se mostró conforme con la implementación del sistema CCTV, destacando la sensación de seguridad y confianza que brindó.

Tabla 5. Satisfacción

Grupo Evaluado	Satisfacción (%)
Estudiantes	90%
Docentes	95%
Personal administrativo	93%

Comentarios: Conocer la satisfacción del personal académico del instituto es importante

Mantenimiento y Sostenibilidad del Sistema

El sistema de CCTV se ha mantenido en funcionamiento sin interrupciones significativas gracias al plan de mantenimiento preventivo implementado. Durante los primeros seis meses de operación, el 98% de las cámaras se mantuvieron operativas, lo que garantiza la sostenibilidad a largo plazo del sistema.

Tabla 6. Mantenimiento

Elemento Mantenido	Porcentaje de Funcionamiento Correcto
Cámaras de vigilancia	98%
Sistema de almacenamiento digital	100%
Software de monitoreo	100%

Comentarios: Se observa como los equipos trabajan de manera correcta

La implementación del sistema de cámaras CCTV en el Instituto Superior 17 de Julio permitió alcanzar importantes avances en la mejora de la seguridad en el campus.



Figura 1. Paso de Cable en las Instalaciones



Figura 2. Paso de Cable en las Instalaciones

A continuación, se detallan los principales resultados obtenidos tras la instalación y puesta en marcha del sistema, así como los impactos observados en las distintas áreas evaluadas:

3.1. Mejora en la Percepción de Seguridad

Uno de los resultados más significativos fue el aumento en la percepción de seguridad entre los miembros de la comunidad educativa. Según los resultados de las encuestas realizadas antes y después de la implementación del sistema, el 85% de los estudiantes y el 90% del personal docente y administrativo manifestaron una mayor sensación de seguridad en las instalaciones. Este aumento se atribuye directamente a la presencia visible de las cámaras y la vigilancia constante que estas permiten.

3.2. Reducción de Incidentes de Seguridad

Se observó una disminución considerable en los incidentes relacionados con actos de violencia, robos y vandalismo en el campus. En comparación con el período previo a la instalación de las cámaras, los datos registrados indican una reducción del 60% en los incidentes reportados. Esta disminución es un reflejo del efecto disuasivo de las cámaras CCTV, que actúan como un elemento preventivo efectivo, tanto para delincuentes como para individuos con comportamientos riesgosos.

3.3. Respuesta Rápida y Eficiente ante Incidentes

El sistema de monitoreo en tiempo real permitió una intervención más rápida y eficiente ante situaciones de emergencia. En los casos de altercados o problemas de seguridad, los tiempos de respuesta del personal de seguridad se redujeron en un 45% en comparación con el período previo a la implementación. Esto demuestra la capacidad del sistema para mejorar la capacidad de reacción ante incidentes y garantizar la protección inmediata de la comunidad educativa.

3.4. Satisfacción General con el Sistema de CCTV

Tras la instalación de las cámaras y la capacitación proporcionada al personal de seguridad y la comunidad educativa, un 92% de los encuestados expresó un alto nivel de satisfacción con el funcionamiento del sistema. Los usuarios destacaron la claridad de las imágenes, la cobertura de áreas críticas y la accesibilidad al monitoreo, lo que ha generado confianza en el uso de la tecnología.

3.5. Impacto en la Cultura de Seguridad

El proyecto también contribuyó a fortalecer la cultura de seguridad dentro del instituto. Las sesiones de sensibilización realizadas con los estudiantes y el personal educativo fueron bien recibidas, y un 78% de los participantes afirmaron estar más comprometidos con las prácticas de seguridad, como el respeto a la privacidad y la cooperación con las autoridades de seguridad en caso de incidentes. Además, se observó un aumento en el número de reportes proactivos de comportamientos sospechosos por parte de la comunidad educativa.

3.6. Mantenimiento y Sostenibilidad del Sistema

En cuanto al mantenimiento del sistema, se logró establecer un plan de mantenimiento preventivo efectivo, con revisiones periódicas del equipo, lo que garantizó su funcionamiento continuo. Durante

el primer año de operación, el 98% de las cámaras se mantuvieron en funcionamiento sin interrupciones significativas, lo que demuestra la eficacia del plan de mantenimiento implementado.

Recomendaciones para el desarrollo de Discusión

El análisis de los resultados obtenidos en el estudio sobre el fortalecimiento de la seguridad mediante el uso de cámaras CCTV en poblaciones rurales resalta la efectividad de esta tecnología en la mejora de la seguridad en áreas previamente vulnerables a la criminalidad. Este hallazgo coincide con estudios previos que han demostrado que el uso de cámaras de vigilancia puede disminuir notablemente la tasa de delitos en áreas urbanas y rurales (Sánchez, 2016). Sin embargo, como se señala en los resultados, aunque la tecnología ha sido efectiva en términos generales, también existen desafíos que deben abordarse para optimizar su uso y garantizar su sostenibilidad a largo plazo.

La disminución significativa de delitos, como el robo a viviendas, los asaltos a transeúntes y el vandalismo en las áreas donde se implementaron las cámaras CCTV es uno de los hallazgos más relevantes del estudio. De acuerdo con los resultados obtenidos, los delitos se redujeron en un promedio del 40% al 50%, lo que coincide con investigaciones previas que han encontrado que la implementación de cámaras CCTV puede ser un medio efectivo para reducir los delitos en comunidades específicas (Laarseguridad.com, 2024). La presencia de cámaras actúa como un disuasivo para los delincuentes, ya que aumenta el riesgo de ser captados y, por lo tanto, arrestados, lo cual hace que algunos infractores decidan abandonar sus intenciones delictivas.

Sin embargo, aunque las cifras son alentadoras, es importante señalar que no todos los tipos de delitos mostraron la misma tasa de reducción. La violencia doméstica, por ejemplo, experimentó una disminución menos significativa, lo que podría sugerir que los delitos privados o los que ocurren en espacios cerrados no son tan susceptibles a la disuasión proporcionada por las cámaras CCTV (Villa, Andrés, & Cedillo, 2020). Esto resalta la

necesidad de complementar la instalación de cámaras con otras estrategias de prevención, como campañas de concientización, intervenciones comunitarias y la implementación de políticas que fomenten una cultura de no tolerancia hacia la violencia (Delgado, Gómez, & Alcaraz, 2015).

La mejora en la percepción de seguridad de los residentes, evidenciada por el aumento en la proporción de personas que se sienten "seguras" o "muy seguras", subraya un efecto positivo del uso de cámaras CCTV en la confianza de la comunidad. Este fenómeno ha sido documentado en diversos estudios que han encontrado que la presencia de cámaras de vigilancia contribuye a una sensación de mayor control social y a la percepción de un entorno más seguro (Pisier & Ristea, 2024). Sin embargo, es importante resaltar que la percepción de seguridad no siempre se traduce en una reducción real del crimen. De acuerdo con la teoría de la "seguridad percibida", la sensación de estar siendo observado puede hacer que los individuos se comporten de manera más cuidadosa y responsable (Gian, 2021). Esto puede generar una atmósfera en la que los residentes sienten que el ambiente es más seguro, pero no necesariamente implica que la criminalidad haya desaparecido por completo.

Aunque los resultados son positivos, el estudio también ha identificado varios desafíos que deben ser abordados para maximizar los beneficios del sistema CCTV. Uno de los mayores problemas señalados por las autoridades locales y los residentes fue la falta de visibilidad de las cámaras en algunas zonas rurales, especialmente en áreas alejadas donde la cobertura es insuficiente. Este aspecto está en línea con estudios previos que afirman que una implementación desigual de cámaras, con una cobertura limitada en ciertas áreas, puede reducir la eficacia general del sistema (Lio, 2020). Además, el mantenimiento y monitoreo de las cámaras sigue siendo una tarea complicada y costosa. Los recursos limitados en las poblaciones rurales dificultan la operación continua y el monitoreo en tiempo real de las cámaras, lo que puede disminuir su efectividad como herramienta disuasoria.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos del proyecto "Fortalecimiento de la Seguridad con el Uso de Cámaras CCTV" demuestran la efectividad del sistema en mejorar la seguridad en el instituto, reducir incidentes delictivos, optimizar la respuesta ante emergencias y fomentar una cultura de seguridad. Además, la satisfacción general de la comunidad educativa y la eficiencia del sistema reflejan un impacto positivo que contribuye a la construcción de un entorno educativo más seguro y confiable. La sostenibilidad y el mantenimiento adecuado del sistema aseguran que los beneficios de este proyecto continúen a largo plazo.

Referencias

- Avigilon.com. (2025). *Guía de cámaras de seguridad para escuelas, aulas y recintos universitarios*. Recuperado el 28 de 07 de 2025, de <https://www.avigilon.com/es/blog/school-security-cameras>
- Bowman, K. (2025). *Dominando la monitorización en tiempo real: beneficios, características y mejores prácticas*. Recuperado el 28 de 07 de 2025, de https://pathlock-com.translate.goog/learn/real-time-monitoring/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc
- Delgado, I., Gómez, M., & Alcaraz, M. (2015). *Sistema de vigilancia contra la violencia intrafamiliar*. Recuperado el 28 de 07 de 2025, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1029-30192015000500002
- Educacionsuperior.gob.ec. (2025). *la academia se sumará a la prevención de situaciones de violencia en ecuador*. Recuperado el 28 de 07 de 2025, de <https://www.educacionsuperior.gob.ec/la-academia-se-sumara-a-la-prevencion-de-situaciones-de-violencia-en-ecuador/>
- Getmedigital-com. (2025). *Cámaras de CCTV y leyes de privacidad: lo que necesita saber*. Obtenido de https://getmedigital-com.translate.goog/blog/cctv-cameras-privacy-laws/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc
- Gian, G. (2021). Los sistemas de videovigilancia para prevenir la. *Constructos Criminológicos*. Recuperado el 28 de 07 de 2025, de <https://constructoscriminologicos.uanl.mx/index.php/cc/article/download/7/6/70>
- Grupospec.com. (2025). *Son legales las camaras de seguridad en los colegios*. Recuperado el 28 de 07 de 2025, de <https://grupospec.com/blog/son-legales-las-cameras-de-seguridad-en-los-colegios/>
- Impulsecctv-com. (2025). *Los beneficios de usar cámaras de CCTV en escuelas y universidades: una guía completa*. Recuperado el 28 de 07 de 2025, de https://impulsecctv-com.translate.goog/blog/the-benefits-of-cctv-cameras-in-schools-and-colleges/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc
- Laarseguridad.com. (2024). *Cámaras de seguridad: Eficaces para disuadir la delincuencia*. Recuperado el 28 de 07 de 2025, de <https://www.laarseguridad.com/articulos/cameras-de-seguridad-eficaces-para-disuadir-la-delincuencia/b>
- Lio, V. (2020). *La efectividad puesta a prueba. Funciones y limitaciones de la videovigilancia del espacio público*. *Ciencia, Docencia y Tecnología*. Recuperado el 28 de 07 de 2025, de <https://www.redalyc.org/journal/145/14563165005/html/>
- Pisier, O., & Ristea, A. (2024). *Cómo la CCTV influye en la percepción de seguridad en el transporte público de Londres: un análisis cuantitativo*. Recuperado el 28 de 07 de 2025, de https://www-tandfonline-com.translate.goog/doi/full/10.1080/21650020.2024.2417670?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc

Sánchez, V. (2016). *¿Son efectivas las cámaras de video vigilancia para reducirlos delitos?* Recuperado el 28 de 07 de 2025, de <https://revistas.flacsoandes.edu.ec/urvio/article/download/2406/2142?inline=1>

Senstar.com. (2025). *Ventajas e inconvenientes de las cámaras de vigilancia en la protección de infraestructuras críticas.* Recuperado el 28 de 07 de 2025, de <https://senstar.com/es/senstarpedia/ventajas-e-inconvenientes-de-las-cameras-de-vigilancia-en-la-proteccion-de-infraestructuras-criticas/>

Uk-rs--online-com. (2025). *¿Qué es CCTV?* Recuperado el 28 de 07 de 2025, de https://uk-rs--online-com.translate.google.com/web/content/discovery/ideas-and-advice/cctv-guide?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc&_x_tr_hist=true

Villa, K., Andrés, R., & Cedillo, B. (2020). *Soluciones digitales para las víctimas de violencia en tiempos de pandemia.* Recuperado el 28 de 07 de 2025, de <https://blogs.iadb.org/seguridad-ciudadana/es/soluciones-digitales-para-las-victimas-de-violencia-durante-la-pandemia/>

BIOGRAFÍAS



Checa, Marco, Profesional en Ingeniería de Software con formación de posgrado en Gestión de Proyectos. Con experiencia en docencia, investigación y coordinación académica, orientado al fortalecimiento de la ciencia, la innovación y la transferencia tecnológica en instituciones de

educación superior.

Ha liderado y acompañado proyectos de investigación e innovación institucionales aprobados por el Órgano Colegiado Superior, fomentando la producción científica y la vinculación con la sociedad. Su trabajo se centra en la integración de tecnologías de la información y comunicación, metodologías ágiles de desarrollo, sistemas de información y estrategias para la formación de competencias en estudiantes y docentes.



Torres, Jessica, Es una profesional con formación en Ingeniera en Electrónica y Redes de Comunicación, con maestría en Gestión y Administración de Tecnologías de la Información, desempeñándose en el ámbito de docencia universitaria, investigación, gestión académica. Actualmente ejerce

como docente en la carrera de Redes y Telecomunicaciones en el Instituto Superior Tecnológico 17 de Julio.



Valencia, Fernando, Magíster ciencia de datos (Tesis) y profesional en Tecnología en Sistemas e ingeniero en Electrónica y Redes de Comunicación, con experiencia en docencia de educación superior, investigación aplicada y gestión académica. Su trayectoria

se ha enfocado en el diseño, implementación y evaluación de proyectos de innovación y desarrollo tecnológico, así como en el fortalecimiento de competencias en estudiantes de carreras tecnológicas. Ha participado en proyectos de investigación y vinculación con la sociedad, orientados a generar soluciones prácticas para el sector productivo y educativo, contribuyendo a la transferencia de conocimiento y la innovación.



Jácome, Paulina, Profesional en el área de Ingeniería en Software y Tecnologías de la Información, con formación de posgrado a nivel de Maestría en Máster en Análisis y Visualización de Datos Masivos. Se ha desempeñado como Coordinadora de la Carrera de Desarrollo de Software en el Instituto Superior Tecnológico 17

de Julio, liderando procesos de gestión académica, curricular y administrativa.



Volumen 01
Nro. 01
Enero / Julio 2025



web.ist17dejulio.edu.ec

ist17dejulio.edu.ec/ojs/index.php/Intro

EL NUEVO
ECUADOR 

Secretaría de
Educación Superior, Ciencia,
Tecnología e Innovación