

EFFECTO DEL MANTENIMIENTO AUTÓNOMO Y LA ELIMINACIÓN DE PÉRDIDAS EN LA SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA: UN MODELO SEM

JOSÉ DARÍO VÁSQUEZ MARTÍNEZ*

<https://orcid.org/0009-0001-4851-3353>

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

JORGE LUIS GARCÍA ALCARAZ

<https://orcid.org/0000-0002-7092-6963>

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

JOSÉ LUIS PEINADO PORTILLO

<https://orcid.org/0000-0002-2162-8118>

Departamento de Mecatrónica,
Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez, México

Recibido: 26 de febrero del 2026 / Aceptado: 12 de abril del 2026

Publicado: 15 de junio del 2026

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2026.n50.8627>

RESUMEN. Este estudio analiza cómo el mantenimiento autónomo (IAMA) fortalece la sostenibilidad económica (ECSU) en empresas manufactureras, considerando la eliminación de pérdidas (FELO) como eje del mantenimiento productivo total (TPM). El mantenimiento autónomo implica que los operarios participen en el cuidado básico de sus equipos para reducir fallas y tiempos muertos. Mediante un modelo de mínimos cuadrados parciales y ecuaciones estructurales (PLS-SEM) aplicado a 243 profesionales en Ciudad Juárez, México, se encontró que el IAMA reduce las pérdidas ($\beta = 0,738$, $p < 0,01$), lo que mejora la ECSU

Este estudio no fue financiado por ninguna entidad.

* Autor corresponsal.

Correos electrónicos en orden de aparición: al250981@alumnos.uacj.mx; jorge.garcia2@uacj.mx; jose_peinado@utcj.edu.mx

Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

($\beta = 0,476$, $p < 0,01$). Asimismo, presenta un efecto directo menor sobre ECSU ($\beta = 0,179$, $p < 0,01$) y un efecto indirecto relevante ($\beta = 0,351$). El modelo explica el 54 % de FELO y el 38 % de ECSU, lo que evidencia una capacidad explicativa adecuada y un ajuste global satisfactorio mediante el cual genera beneficios económicos.

PALABRAS CLAVE: mantenimiento autónomo / eliminación de pérdidas / sostenibilidad económica / TPM / industria manufacturera

EFFECT OF AUTONOMOUS MAINTENANCE AND LOSS ELIMINATION ON ECONOMIC SUSTAINABILITY: A SEM MODEL

ABSTRACT. This study analyzes how Autonomous Maintenance (IAMA) strengthens Economic Sustainability (ECSU) in manufacturing companies, considering Loss Elimination (FELO) as a key mechanism within the Total Productive Maintenance (TPM) framework. In practical terms, autonomous maintenance involves the active participation of operators in the basic care of their equipment, which helps reduce failures and downtime. Using a PLS-SEM model applied to 243 professionals in Ciudad Juárez, Mexico, the results show that IAMA reduces losses ($\beta = 0,738$, $p < 0,01$), which in turn improves ECSU ($\beta = 0,476$, $p < 0,01$). Additionally, IAMA presents a smaller direct effect on ECSU ($\beta = 0,179$, $p < 0,01$) and a relevant indirect effect ($\beta = 0,351$). The model explains 54 % of FELO and 38 % of ECSU, highlighting loss reduction as the main mechanism through which autonomous maintenance generates economic benefits.

KEYWORDS: autonomous maintenance / loss elimination / economic sustainability / TPM / manufacturing industry

INTRODUCCIÓN

En el mundo industrial actual, las empresas de manufactura tienen el reto permanente de aumentar su eficiencia, reducir costos y ser competitivas a largo plazo, especialmente en materia de sostenibilidad económica (Ahuja & Khamba, 2008; García-Alcaraz et al., 2022). En este escenario, la continuidad operativa y el desempeño de los equipos se convierten en elementos críticos dentro de la gestión diaria de las organizaciones, lo que ha llevado a adoptar estrategias de mantenimiento con un enfoque cada vez más práctico y orientado a resultados. Estas demandas no solo buscan aumentar la productividad, sino que también se relacionan con la necesidad de garantizar la estabilidad de los procesos, la continuidad de las operaciones y la supervisión financiera en entornos productivos cada vez más complejos. En este contexto, manejar adecuadamente los recursos y reducir las pérdidas resultan muy importantes en la gestión industrial.

El mantenimiento productivo total (TPM) busca incrementar el rendimiento operativo, pero también disminuir las pérdidas por el mal estado de los equipos o incompetencias del personal involucrado (Ahuja & Khamba, 2008). En la práctica, este enfoque implica la participación directa de los operarios en actividades de mantenimiento y en la detección oportuna de fallas, lo que contribuye a mejorar la eficiencia de los procesos. El TPM surgió en Japón con un enfoque netamente técnico; sin embargo, ha evolucionado para transformarse en uno que ya integra aspectos sociales. Es decir, se busca lograr una adecuada interacción entre los factores humanos y los tecnológicos, lo cual permite obtener mayor rendimiento financiero (Nakajima, 1988; Singh & Awoke, 2023). Así pues, el TPM ha logrado una nueva visión del mantenimiento tradicional conectando de manera armoniosa la función operativa, los recursos humanos y los resultados esperados de la empresa.

El TPM se estructura en torno a múltiples pilares interrelacionados, entre los que se incluyen la clasificación, el orden, la limpieza, la estandarización y la disciplina (5S), los cuales constituyen la base operativa sobre la que se sostienen al establecer condiciones de orden, disciplina y mejora continua del mantenimiento planificado y la mejora enfocada (Nakajima, 1988). El presente estudio se centra de manera específica en la implementación del mantenimiento autónomo (IAMA) y su relación con la eliminación de pérdidas (FELO) y la sostenibilidad económica (ECSU). Adopta un enfoque parsimonioso que permite aislar estos mecanismos específicos dentro de un sistema más amplio sustentado en dicha base organizacional.

El TPM se basa en una filosofía integral que incorpora prácticas de mejora continua, como el Kaizen, que facilitan la estandarización de procesos, la identificación sistemática de desperdicios y la participación activa del personal operativo (Ahuja & Khamba, 2008; Nakajima, 1988). En este sentido, uno de los pilares fundamentales del TPM, la IAMA, únicamente es factible de implementar si existe una cultura organizacional orientada a

la mejora continua, donde los operarios adquieran habilidades para detectar anomalías, prevenir fallas y proponer mejoras en el uso de los equipos (Al-refaie et al., 2022).

Es importante señalar que, aunque el TPM se sustenta en prácticas como el Kaizen y herramientas como las 5S, estos elementos no forman parte del modelo estructural analizado en este estudio. Su inclusión en esta sección responde a la necesidad de contextualizar el entorno organizacional en el que se desarrolla el mantenimiento autónomo; sin embargo, el análisis empírico se centra exclusivamente en la relación entre la IAMA, la FELO y la ECSU. Esta delimitación permite mantener claridad en la interpretación de los resultados y evita atribuir efectos a variables que no fueron modeladas directamente.

Como se mencionó, uno de los pilares más importantes del TPM es la IAMA, el cual se enfoca en inculcar en los operadores de máquinas el desarrollo de tareas de mantenimiento básico: limpiarlas, inspeccionarlas y lubricarlas cuando se requiera. Estos simples hábitos crean mayor conciencia en el operador, en cómo se opera cada una de las máquinas y equipos. Ello permite identificar fallas tempranas y falta de calibración, lo que reduce la cantidad de defectos e incrementa su disponibilidad y la productividad del sistema (Bataineh et al., 2019; Chundhoo et al., 2025; Singh & Awoke, 2023).

Por su parte, la FELO es considerada la piedra angular del TPM, ya que permite identificar y mitigar grandes pérdidas de los sistemas productivos, tales como fallos, tiempos de ajuste, microparos, retrasos en la velocidad, fallos de calidad y merma de la eficiencia operativa (Braglia et al., 2008). La FELO bien ejecutada fomenta una cultura de mejoramiento continuo y disminuye desperdicios del proceso productivo. Además, en estudios previos, se ha relacionado con incrementos en la eficiencia global de los equipos (OEE), lo que facilita la estabilización de los procesos (Escobal et al., 2025).

La IAMA y la FELO deben ofrecer algún beneficio a las empresas para poder justificar inversiones en ellas, tales como la ECSU, la cual se define como la capacidad organizacional para mantener estándares competitivos, optimizar los recursos, minimizar los desechos o desperdicios y, así, incrementar el rendimiento financiero (Badghish & Soomro, 2024; Barney, 1991). De acuerdo con la teoría de recursos y capacidades, la autonomía operativa y la disciplina organizacional generan ventajas competitivas cuando se materializan (Barney, 1991).

Estudios previos demuestran que el involucramiento del personal en las prácticas de mantenimiento impacta directamente en la reducción de pérdidas y rentabilidad económica (Morales Méndez & Rodríguez, 2017; Santos et al., 2012). No obstante, persisten vacíos en la literatura que limitan la comprensión de estos mecanismos. Desde el punto de vista empírico, son escasos los estudios que han cuantificado el papel mediador que la FELO podría desempeñar entre el IAMA y la ECSU. Desde el punto de vista metodológico, la mayoría de los trabajos previos han analizado estas relaciones de forma bivariada o descriptiva sin emplear modelos que estimen simultáneamente efectos directos e indirectos

entre variables latentes (García-Alcaraz et al., 2022). Finalmente, desde una perspectiva contextual, la evidencia sobre el TPM en el sector manufacturero de Ciudad Juárez —región con alta concentración de industria maquiladora, rotación de personal y presión competitiva— resulta limitada pese a tratarse de un entorno particularmente relevante para estudiar la relación entre prácticas de mantenimiento y desempeño económico. Ante estas brechas, se plantean las siguientes preguntas de investigación:

1. ¿Cuál es el efecto de la implementación del mantenimiento autónomo en la eliminación de pérdidas al implementar el mantenimiento productivo total?
2. ¿Cuál es el efecto de la implementación del mantenimiento autónomo en la sostenibilidad económica al implementar el mantenimiento productivo total?
3. ¿Cuál es el efecto de la eliminación de pérdidas en la sostenibilidad económica al implementar el mantenimiento productivo total?

Si bien la dirección general de estas relaciones parece intuitiva desde la experiencia profesional en mantenimiento, la literatura carece de estimaciones que cuantifiquen la magnitud de dichos efectos, que identifiquen el peso relativo de los mecanismos directos frente a los indirectos o que evalúen posibles comportamientos no lineales en función del nivel de implementación. El modelado de ecuaciones estructurales (SEM) permite abordar estas cuestiones de forma simultánea superando las limitaciones de los análisis bivariados o descriptivos que predominan en la literatura sobre TPM (García-Alcaraz et al., 2022; Hair et al., 2016).

El modelo estructural planteado articula tres dimensiones centrales del TPM: la IAMA, la FELO y la ECSU. En ese sentido, se examinan tanto los efectos directos como los mecanismos indirectos mediante los cuales el IAMA podría incidir en la ECSU, considerando a la FELO como posible variable mediadora dentro de la dinámica operativa y financiera del sistema productivo. Desde una perspectiva operativa, cuando las rutinas de IAMA se internalizan de manera consistente por el personal operativo, tienden a generar mayores niveles de estabilidad operativa y una reducción gradual de microparos y defectos acumulativos (Al-refaie et al., 2022; Singh & Gurtu, 2022).

En este sentido, el IAMA podría trascender su carácter técnico y constituirse en un mecanismo organizacional que facilite la estructuración progresiva de esfuerzos orientados a la FELO, lo que permite proponer la hipótesis siguiente:

H1. La implementación del mantenimiento autónomo tiene un efecto directo y positivo sobre el enfoque de eliminación de pérdidas.

En el ámbito económico, se ha planteado que los efectos derivados del IAMA pueden extenderse más allá del desempeño estrictamente operativo. La disminución de fallos imprevistos y la mejora en la disponibilidad de los equipos suelen relacionarse con mayores

niveles de eficiencia y con un control más estable de costos; particularmente, en contextos manufactureros caracterizados por alta presión competitiva (Samadhiya & Agrawal, 2024; Shannon et al., 2023). Sin embargo, la traducción de dichas mejoras en resultados económicos sostenibles no necesariamente ocurre de forma inmediata ni homogénea entre organizaciones, ya que puede depender del grado de madurez en la implementación del TPM y de factores estructurales propios del entorno productivo. Por ello, se debe evaluar empíricamente si la IAMA mantiene una relación directa con la ECSU. Al respecto, se propone la hipótesis siguiente:

H2. La implementación del mantenimiento autónomo tiene un efecto directo y positivo sobre la sostenibilidad económica.

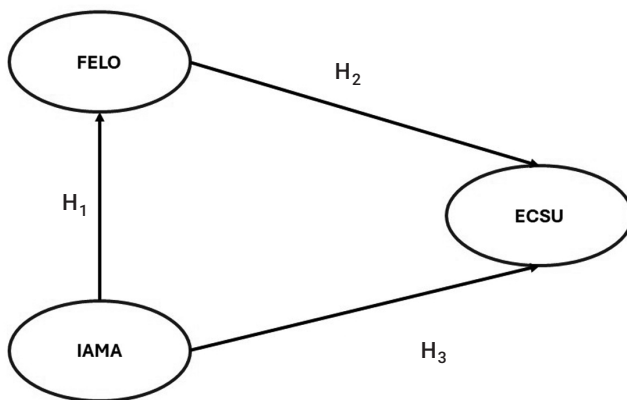
El enfoque en la eliminación de pérdidas constituye uno de los pilares operativos del TPM y ha sido señalado como mecanismo relevante para la generación de mejoras económicas sostenidas en el tiempo. La reducción sistemática de desperdicios, tiempos muertos y reprocesos tiende a producir efectos acumulativos sobre la eficiencia productiva y sobre el control presupuestal (Au-Yong et al., 2022; Samadhiya et al., 2023). Aun así, la magnitud de estos beneficios puede variar en función del nivel de integración entre las prácticas técnicas y la cultura organizacional existente. En consecuencia, resulta necesario analizar de manera directa el efecto del enfoque de eliminación de pérdidas sobre la sostenibilidad económica. Al respecto, se propone la hipótesis siguiente:

H3. El enfoque en la eliminación de pérdidas tiene un efecto directo y positivo sobre la sostenibilidad económica.

La Figura 1 ilustra las hipótesis propuestas.

Figura 1

Hipótesis de investigación propuestas



Este artículo se estructura en cinco secciones. Luego de la sección introductoria, en la sección de metodología, se describe cómo está diseñada la investigación, qué herramienta se emplea para la recolección de datos y bajo qué enfoque estadístico se analiza el modelo propuesto. Más adelante, en la sección de resultados, se presentan los hallazgos más relevantes del modelo estructural. En la sección de discusión, se interpretan los resultados tomando como referencia la literatura previa y, finalmente, en la sección de conclusiones, se sintetizan las contribuciones del estudio y sus implicaciones tanto prácticas como teóricas.

METODOLOGÍA

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de alcance explicativo y diseño transversal. Se eligió la técnica de mínimos cuadrados parciales y ecuaciones estructurales (PLS-SEM), implementada en el software WarpPLS 8.0 (Kock, 2023), por tres razones. La primera fue porque permite estimar simultáneamente múltiples relaciones causales entre variables latentes, lo que resulta necesario para evaluar si FELO actúa como variable mediadora entre IAMA y ECSU. La segunda, porque el enfoque PLS es adecuado para modelos con orientación predictiva y tamaños de muestra moderados (Hair et al., 2016). La tercera, debido a que WarpPLS permite analizar relaciones no lineales mediante funciones *warped*, lo que posibilita identificar rendimientos marginales decrecientes que no serían detectables mediante regresión convencional (Kock, 2023). La delimitación del modelo a tres constructos responde a criterios de parsimonia y viabilidad estadística, ya que incluir simultáneamente todos los pilares del TPM comprometería la estabilidad de las estimaciones (Hair et al., 2016).

La recolección se llevó a cabo entre marzo y abril de 2025; la población objetivo estuvo conformada por profesionales del sector manufacturero con experiencia en procesos de mantenimiento y operación de equipos. Así, la unidad de análisis corresponde a trabajadores que desempeñan funciones de gestión, supervisión u operación del mantenimiento. La muestra final estuvo integrada por 243 participantes seleccionados mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia que consideró la accesibilidad a las empresas y la disponibilidad de los encuestados.

El instrumento de recolección de datos fue un cuestionario estructurado elaborado a partir de la literatura sobre los factores críticos del TPM y su relación con la sostenibilidad (Braglia et al., 2008; García-Alcaraz et al., 2022), el cual se adjunta como documento complementario para efectos de validación del instrumento. El contenido fue validado por un grupo de expertos académicos e industriales, quienes evaluaron la claridad y la coherencia de los ítems. La aplicación del cuestionario se realizó de forma electrónica, garantizando la confidencialidad y el consentimiento informado de los participantes, los cuales debían estar vinculados profesionalmente a empresas manufactureras con prácticas documentadas de TPM y desempeñar funciones de gestión, supervisión u operación del

mantenimiento. Estos criterios se verificaron mediante preguntas de filtro al inicio del cuestionario.

Los ítems se midieron mediante una escala tipo Likert de cinco puntos. El uso de escalas perceptuales tipo Likert es una práctica consolidada en la investigación sobre TPM cuando se trabaja con variables latentes que, por su naturaleza multidimensional, no pueden medirse directamente mediante un único indicador objetivo (Hair et al., 2016; García-Alcaraz et al., 2022; Samadhiya & Agrawal, 2024).

El instrumento final estuvo conformado por ítems agrupados en tres constructos latentes: la IAMA, la FELO y la ECSU. En total, se consideraron 13 ítems en el modelo estructural final (3 para IAMA, 5 para FELO y 5 para ECSU). Los ítems fueron seleccionados a partir de un instrumento más amplio previamente validado en estudios de TPM y se incluyen como material complementario para garantizar la transparencia del modelo de medición. Ningún ítem fue eliminado durante el proceso de estimación, ya que todos cumplieron con los criterios de validez y fiabilidad establecidos en la literatura (Hair et al., 2016). La fiabilidad y validez de este enfoque se verifica en la sección de resultados. En particular, la validez de constructo se evaluó mediante el modelo de medición siguiendo los criterios establecidos en la literatura (Hair et al., 2016).

Los datos se depuraron para eliminar respuestas inconsistentes y valores atípicos. Posteriormente, se realizó un análisis descriptivo inicial y la validación del modelo de medición evaluando la fiabilidad interna mediante los coeficientes de Cronbach (α) y fiabilidad compuesta (CR), la validez convergente a través de la varianza media extraída (AVE) y la validez discriminante utilizando el criterio de Fornell-Larcker.

El modelo estructural se evaluó mediante indicadores de ajuste global que incluyeron el Average Path Coefficient (APC), el Average R^2 (ARS), el Average Variance Inflation Factor (AVIF) y el Goodness of Fit (GoF). Se consideraron como criterios de aceptación valores significativos para el APC ($p < 0.05$), valores elevados de ARS, valores de AVIF inferiores a 3.3 y valores GoF superiores a 0.36, según los criterios establecidos por Hair et al. (2016) y Kock (2023). La significancia estadística de los parámetros se determinó mediante remuestreo (*bootstrapping*) para estimar la estabilidad de los efectos directos e indirectos. Más adelante, en la Figura 2, se representa el modelo simplificado en el que la IAMA actúa como variable exógena, el FELO como variable mediadora y la ECSU como variable endógena.

Además del análisis estructural lineal tradicional, se analizaron posibles efectos no lineales entre las variables latentes a través de funciones warped integradas en WarpPLS 8.0. Este enfoque permite modelar relaciones curvilíneas sin asumir una forma funcional específica a partir de las puntuaciones estandarizadas de las variables latentes (Kock, 2023). Las gráficas reportadas en la sección de resultados corresponden a las curvas de

mejor ajuste generadas por el *software*, las cuales muestran la variación en la intensidad del efecto a lo largo de distintos niveles de implementación de las prácticas analizadas.

De forma complementaria, se realizó un análisis de sensibilidad probabilístico con el propósito de evaluar la estabilidad de las relaciones estructurales bajo distintos escenarios de implementación. Para ello, se utilizaron las herramientas de simulación incluidas en WarpPLS que estiman probabilidades condicionales de ocurrencia de valores altos y bajos en las variables endógenas a partir de los coeficientes estructurales obtenidos y la distribución observada de los datos (Kock, 2023). Este procedimiento permitió analizar en términos perceptuales, y con base en las respuestas obtenidas, cómo varía el comportamiento del modelo ante cambios en los niveles de las variables exógenas y mediadoras.

En la siguiente sección, se presentan los resultados empíricos derivados de la estimación del modelo estructural.

RESULTADOS

Caracterización de la muestra

El cuestionario se aplicó a 243 profesionales del sector manufacturero de Ciudad Juárez, México, principalmente ingenieros (62,1 %), supervisores (35 %) y gerentes (2,9 %). En cuanto a la experiencia laboral, el 47 % indicó contar con entre 2 y 5 años de experiencia en actividades de mantenimiento, lo que refleja un perfil técnico-operativo con dominio práctico de los procesos.

La mayoría de los participantes pertenece a los sectores automotriz (25,5 %) y electrónico (20,1 %), seguidos del metalmecánico (20 %), médico (18 %) y plástico (10 %). Además, el 69,5 % labora en empresas grandes con más de 250 empleados, donde las prácticas de TPM están consolidadas. La predominancia de empresas grandes es coherente con el objeto de estudio, dado que la implementación estructurada del TPM requiere infraestructura, recursos y niveles de estandarización más frecuentes en entornos de gran escala (Ahuja & Khamba, 2008). El perfil de los encuestados —ingenieros y supervisores— respalda la pertinencia de las respuestas.

Fiabilidad y validez del modelo de medida

Los resultados del modelo de medición evidencian niveles adecuados de fiabilidad interna y de validez convergente (ver Tabla 1). Los coeficientes de α de Cronbach (0,785-0,890) y la fiabilidad compuesta (0,875-0,919) superan el umbral recomendado de 0,70 para la fiabilidad interna. Asimismo, las varianzas medias extraídas (AVE = 0,669-0,701) confirman una convergencia sólida entre los ítems de cada constructo. Los valores del factor de inflación de la varianza (VIF < 2,6) descartan problemas de colinealidad, mientras que el criterio de

Fornell-Larcker valida la discriminación entre constructos. Además, las cargas factoriales de los ítems fueron superiores a 0,70 y estadísticamente significativas ($p < 0,001$), lo que confirma la validez de constructo del modelo de medición (Hair et al., 2016).

Tabla 1

Validación de índices de las variables latentes

Variable	Cronbach's α	CR	AVE	VIF
IAMA	0,785	0,875	0,701	2,215
FELO	0,876	0,910	0,669	2,540
ECSU	0,890	0,919	0,695	1,594

Nota. Cronbach's α = alfa de Cronbach; CR = fiabilidad compuesta; AVE = varianza extraída promedio; VIF = factor de inflación de la varianza.

Resultados del modelo estructural

El modelo estructural simplificado se presenta en la Figura 2, donde se observan tres relaciones directas y significativas entre las variables analizadas. La IAMA ejerce un efecto positivo sobre el FELO con $\beta = 0,738$ ($p < 0,01$), mientras que FELO influye directamente sobre la ECSU con $\beta = 0,476$ ($p < 0,01$). Por su parte, IAMA muestra un efecto directo menor, aunque significativo, sobre ECSU ($\beta = 0,179$, $p < 0,01$).

Desde la perspectiva de la magnitud de los coeficientes estandarizados, el efecto de IAMA sobre FELO puede interpretarse como fuerte dentro del modelo, mientras que el efecto de FELO sobre ECSU resulta moderado y el efecto directo de IAMA sobre ECSU es más reducido, aunque estadísticamente significativo (Hair et al., 2016).

En conjunto, los resultados respaldan las tres hipótesis propuestas (H1-H3) y validan la coherencia interna del modelo evidenciando un poder explicativo moderado ($R^2 = 0,54$ para FELO y $R^2 = 0,38$ para ECSU). Estos resultados indican una relación positiva entre el IAMA, el FELO y la ECSU (ver Tabla 2). De acuerdo con los criterios empleados en PLS-SEM, estos valores pueden interpretarse como una capacidad explicativa moderada para FELO y débil a moderada para ECSU, lo que indica que el modelo explica una proporción relevante de la variabilidad de ambas variables endógenas (Hair et al., 2016).

Desde la percepción de los trabajadores, las empresas manufactureras que fortalecen el mantenimiento autónomo tienden a reducir de manera significativa las pérdidas operativas, lo que, posteriormente, se traduce en mejoras en la sostenibilidad económica. Según las respuestas obtenidas, cuando las organizaciones promueven la participación activa de los operarios en la limpieza, inspección y ajuste básico de los equipos, es más probable detectar fallas antes de que generen paros no planificados o defectos en la producción. Esta reducción en interrupciones y desperdicios, desde una perspectiva perceptual, impacta directamente en la eficiencia del proceso y en la disminución de costos operativos.

Índices de ajuste global y efectos indirectos

El ajuste del modelo en la Figura 2 fue satisfactorio con valores consistentes con los umbrales recomendados en la literatura para modelos PLS-SEM y WarpPLS. En particular, se obtuvo un APC = 0,465 ($p < 0,001$), ARS = 0,464 ($p < 0,001$), AVIF = 2,142 ($< 3,3$) y GoF = 0,565. Estos resultados se encuentran dentro de los criterios establecidos y respaldan la adecuación global del modelo estructural propuesto descartando problemas relevantes de colinealidad (Hair et al., 2016; Kock, 2023).

Figura 2

Modelo estructural del estudio simplificado

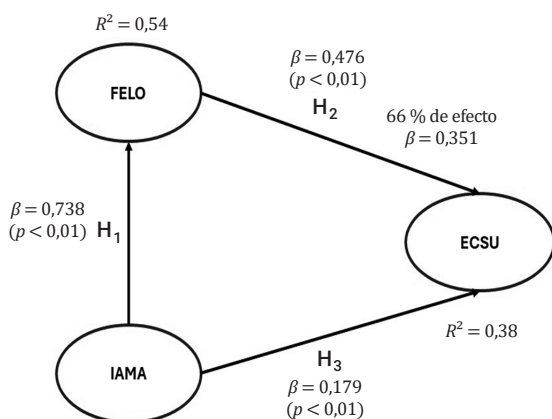


Tabla 2

Resultados del modelo estructural simplificado

Relación	β	p	Resultado
IAMA → FELO	0,738	$p < 0,01$	Significativo
FELO → ECSU	0,476	$p < 0,01$	Significativo
IAMA → ECSU	0,179	$p < 0,01$	Significativo

Nota. R^2 FELO = 0,54; R^2 ECSU = 0,38

El análisis de efectos indica que la IAMA influye en la ECSU tanto de forma directa como indirecta a través del FELO. El efecto indirecto se obtuvo a partir del producto de los coeficientes de las rutas IAMA→FELO y FELO→ECSU; es decir, $0,738 \times 0,476 = 0,351$. Por su parte, el efecto total de IAMA sobre ECSU fue $\beta = 0,530$, resultado de sumar el efecto directo (0,179) y el efecto indirecto (0,351) (Hair et al., 2016).

A partir de estos valores, el efecto indirecto representa aproximadamente el 66,2 % del efecto total [$(0,351 / 0,530) \times 100$], lo que evidencia que una parte sustancial de la

relación entre mantenimiento autónomo y sostenibilidad económica ocurre a través de la eliminación de pérdidas. En este sentido, el papel mediador del FELO resulta relevante, ya que el impacto del mantenimiento autónomo sobre el desempeño económico se explica en gran medida por su capacidad para reducir pérdidas operativas.

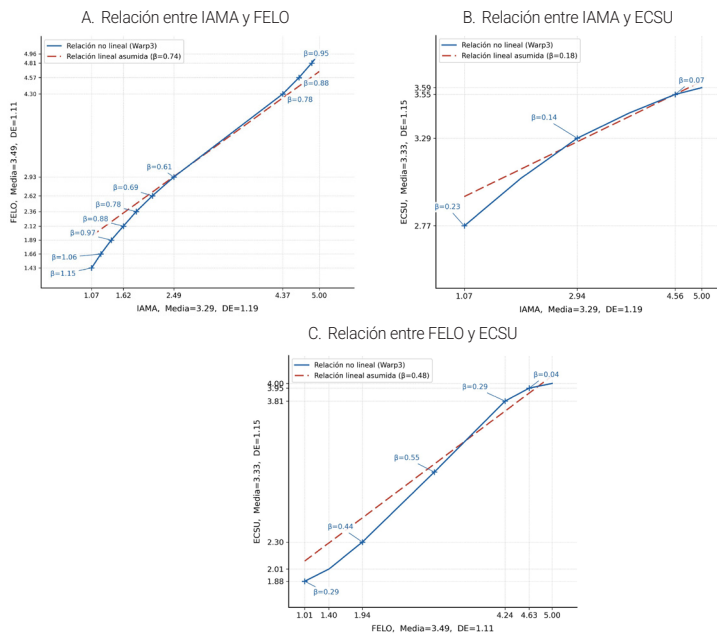
De manera complementaria al análisis lineal, se examinó el comportamiento no lineal de las relaciones estructurales mediante las funciones warped incluidas en WarpPLS 8.0. Este procedimiento permite estimar relaciones curvilíneas entre variables latentes, a partir de sus puntuaciones estandarizadas, sin imponer una forma funcional específica e identificando variaciones en la intensidad del efecto a lo largo de distintos niveles de la variable predictora (Kock, 2023).

Los resultados indican que las relaciones IAMA→FELO, IAMA→ECSU y FELO→ECSU no siguen una trayectoria estrictamente lineal, sino que presentan una mayor intensidad del efecto en los niveles de implementación bajos y medios (ver Figura 3).

El comportamiento observado en la relación IAMA→ECSU indica que el impacto del mantenimiento autónomo sobre la sostenibilidad económica en términos perceptuales no es uniforme a lo largo de los distintos niveles de implementación. Las mejoras económicas más relevantes, según las respuestas obtenidas, se concentran en las fases iniciales y de consolidación intermedia. En niveles más altos de madurez operativa, los efectos tienden a estabilizarse, lo que sugiere la presencia de rendimientos marginales decrecientes.

Figura 3

Comportamiento no lineal de las relaciones estructurales estimadas mediante WarpPLS



Asimismo, la relación entre el enfoque en la eliminación de pérdidas y la sostenibilidad económica (FELO→ECSU), desde la perspectiva de los encuestados, presenta un comportamiento no lineal con un efecto más pronunciado en los niveles de implementación bajos y medios. Conforme el enfoque se consolida y alcanza niveles más altos, el impacto adicional sobre la sostenibilidad económica tiende a moderarse.

Análisis de sensibilidad

En la Tabla 3, se ilustra el análisis de sensibilidad basado en probabilidades, donde el signo + indica niveles altos percibidos de implementación, mientras que - indica niveles bajos. Así, por ejemplo, cuando se obtiene IAMA+, la probabilidad de percibir un FELO+ es de 0,511 y la de percibir un ECSU+ es de 0,468. En escenarios con niveles bajos percibidos de implementación de IAMA o FELO, las probabilidades de obtener ECSU son 0,703 y 0,432, respectivamente. Estos resultados, basados en las respuestas de los participantes, sugieren un mayor riesgo percibido en términos de desempeño económico, lo que puede orientar la toma de decisiones en contextos organizacionales.

Tabla 3

Análisis de sensibilidad

Variable dependiente	Condición	Valor base	IAMA (+) 0,191	IAMA (-) 0,150	FELO (+) 0,138	FELO (-) 0,862
FELO	+	0,138	& = 0,098; IF = 0,511	& = 0,000; IF = 0,000	—	—
FELO	-	0,150	& = 0,000; IF = 0,000	& = 0,106; IF = 0,703	—	—
ECSU	+	0,199	& = 0,089; IF = 0,468	& = 0,004; IF = 0,027	& = 0,077; IF = 0,559	&=0,004; IF = 0,027
ECSU	-	0,154	& = 0,012; IF = 0,064	& = 0,065; IF = 0,432	& = 0,008; IF = 0,059	& = 0,081; IF = 0,541

Nota. (&) coeficiente de sensibilidad; IF = índice de impacto; (+) incremento en la variable; (-) disminución de la variable. Los guiones indican combinaciones no aplicables.

DISCUSIÓN

Los datos recopilados permiten desentrañar cómo se comportan las variables analizadas en el ámbito del TPM, especialmente, en el vínculo entre el FELO, el ECSU y el IAMA. En términos generales, los datos empíricos revelan que la adopción del mantenimiento autónomo intensifica las estrategias de gestión meticulosa de pérdidas, por lo que se eleva el rendimiento financiero de las empresas manufactureras.

Este comportamiento se ajusta a la visión sociotécnica del TPM, donde el rendimiento organizacional depende tanto de la infraestructura técnica como de la participación

sistemática del personal operativo en actividades de mejora continua. Incorporar rutinas esenciales de verificación, limpieza y control acelera la detección precoz de fallos y uniformiza las prácticas operativas, lo que crea un ambiente más seguro para el funcionamiento de los sistemas productivos. Estos hallazgos se corresponden con investigaciones anteriores que subrayan la importancia crucial de la implicación operativa en la optimización del rendimiento productivo (Chundhoo et al., 2025; Nakajima, 1988).

Cabe destacar que, si bien la existencia de una relación positiva entre el IAMA y el ECSU puede anticiparse desde la experiencia profesional, el modelo estructural aporta hallazgos que trascienden dicha intuición. En particular, los resultados indican que el 66 % del efecto total de IAMA sobre ECSU opera de forma indirecta a través de FELO, proporción que no resulta evidente sin un análisis mediacional formal. Asimismo, el comportamiento no lineal identificado —con rendimientos marginales decrecientes en niveles altos de implementación— es información útil para la toma de decisiones que la experiencia práctica por sí sola difícilmente podría cuantificar.

Además, los descubrimientos indican que la evolución en la IAMA no solo se asocia con mayores niveles de fiabilidad operativa de los dispositivos, sino que también contribuye a estructurar prácticas sistemáticas orientadas a la reducción de pérdidas. Este hallazgo resulta consistente con lo reportado por Bataineh et al. (2019), quienes identificaron una relación positiva entre mantenimiento autónomo y desempeño manufacturero; así como con Shannon et al. (2023), quienes señalaron que la integración de prácticas de mantenimiento en la rutina operativa favorece mejoras acumulativas en eficiencia. En este sentido, el papel mediador de FELO, observado en el modelo estructural, refuerza la idea de que las acciones de mantenimiento no impactan directamente en los resultados económicos de manera aislada, sino que operan a través de mecanismos intermedios vinculados con la gestión de pérdidas. La disminución de errores, interrupciones imprevistas y reprocesos se traduce en una mayor eficiencia y reducción de costos, pilares de la ECSU en entornos manufactureros competitivos.

Desde un punto de vista teórico, los resultados de este estudio incrementan la comprensión que se tiene del TPM como un sistema integrado de componentes técnicos y organizacionales. La relación que se ha encontrado entre IAMA, FELO y ECSU puede ser interpretada a través de la teoría de los recursos y capacidades, ya que es evidencia empírica de que la autonomía operativa, las buenas prácticas de mantenimiento y la integración de los recursos humanos son capacidades internas difíciles de imitar y que generan ventajas competitivas para las empresas (Barney, 1991). Estos mismos hallazgos concuerdan con otros sobre TPM, pero desde la perspectiva de la visión basada en recursos. En estos, se indica que las actividades y prácticas de mantenimiento son capacidades estratégicas que influyen en el desempeño organizacional (Samadhiya & Agrawal, 2024). Así pues, el IAMA no debe ser considerado solo como una práctica operativa, sino también como un recurso estratégico a disponibilidad del sistema productivo.

Adicionalmente, se han observado comportamientos no lineales en las relaciones entre algunas de las variables analizadas, donde los impactos suelen ser más grandes en las etapas iniciales e intermedias del proceso de adopción. Sin embargo, conforme se consolida el grado de madurez organizacional, los efectos tienden a disminuir o estabilizarse. Este comportamiento coincide con lo reportado por Singh y Awoke (2023), quienes señalan que la intensidad del impacto de las prácticas de TPM en el desempeño operacional es variante según el nivel de implementación que este tenga. De esa forma, brinda mejores resultados cuando se corrigen ineficiencias en etapas tempranas del proceso de adopción. Así, los resultados de este estudio son una evidencia empírica que aporta un conocimiento complementario al análisis lineal tradicional sugiriendo que la gestión del TPM requiere de enfoques diferenciados en función del desarrollo organizacional.

En el plano práctico, los resultados aportan implicaciones relevantes para la gestión del mantenimiento industrial. Se sugiere que el fortalecimiento del mantenimiento autónomo constituya una etapa previa y necesaria para la implementación de iniciativas más avanzadas de mejora enfocada con el objetivo de maximizar los beneficios derivados del TPM. Este planteamiento es consistente con estudios que han señalado la importancia de consolidar los pilares básicos del TPM antes de avanzar hacia esquemas más complejos de optimización operativa (Ahuja & Khamba, 2008; Singh & Awoke, 2023). Asimismo, el uso de herramientas analíticas, como la evaluación de escenarios de sensibilidad, puede apoyar la toma de decisiones orientadas a mejorar la eficiencia operativa y reducir riesgos asociados al desempeño productivo y financiero, tal como se ha documentado en investigaciones recientes sobre excelencia operacional en mantenimiento (Mohad et al., 2025).

CONCLUSIONES

Los resultados del PLS-SEM han permitido evaluar de manera holística la IAMA, la FELO y la ENSU en el marco del TPM en el sector manufacturero. Los resultados permiten concluir que la participación del personal operativo de las máquinas en actividades básicas de mantenimiento se relaciona con una gestión eficiente de las pérdidas y las mejoras que se ven reflejadas a través de un mejor desempeño financiero. De la misma manera, se han identificado comportamientos no lineales en algunas de las relaciones, las cuales eran más notorias en etapas iniciales e intermedias y que tienden a estabilizarse al madurar su implementación.

Desde un punto de vista teórico, los resultados de este estudio indican que el TPM es una herramienta de manufactura esbelta que puede combinar aspectos sociales y técnicos facilitando la integración de los recursos humanos y las tecnologías disponibles para incrementar el rendimiento organizacional. Según la teoría de los recursos y capacidades, la autonomía de las operaciones, las buenas prácticas del mantenimiento y el enfoque y aprendizaje para eliminar pérdidas del proceso productivo son capacidades internas. Estas,

cuando se fortalecen, mejoran la estabilidad del proceso y facilitan el uso eficiente de los recursos, lo que trae como consecuencia un mejor desempeño económico.

En la práctica, los resultados indican que mejorar el mantenimiento autónomo es fundamental para implementar estrategias más avanzadas que busquen mejoras específicas y eliminen pérdidas. Implementar estas prácticas poco a poco puede ayudar a disminuir errores, tiempos perdidos y gastos operativos sin necesidad de realizar inversiones tecnológicas de inmediato. Esto es especialmente relevante en entornos de fabricación donde hay limitaciones de recursos y la necesidad de mantener un nivel constante de productividad.

Sin embargo, al interpretar los resultados, se debe tener en cuenta la metodología del estudio. Como se trata de un diseño transversal, no se puede analizar cómo cambian a lo largo del tiempo los efectos del TPM ni identificar con claridad las dinámicas de madurez ni los efectos acumulativos. Por eso, investigaciones futuras podrían emplear diseños longitudinales para observar cómo se implementan las medidas y estimar cambios en el desempeño económico con el tiempo. Además, como el análisis se centró en empresas manufactureras de Ciudad Juárez, México, los resultados dependen de características específicas de la región y de las organizaciones. Por lo tanto, se sugiere ampliar el área geográfica y los sectores a evaluar para comprobar la estabilidad del modelo en diferentes contextos productivos y mejorar su validez externa.

Asimismo, el estudio se basó en datos perceptuales, lo cual es consistente con la naturaleza latente de los constructos y ha sido validado estadísticamente. No obstante, futuras investigaciones podrían complementar estos hallazgos con indicadores operativos directos —como tasas de fallo u OEE— para triangular la evidencia y fortalecer la validez externa del modelo. Asimismo, el estudio no incluyó una medición del nivel de madurez en TPM ni del grado de adopción de pilares específicos en las empresas participantes, por lo que futuros estudios podrían incorporar estos criterios como variables de control o segmentación.

Finalmente, el modelo se centró en el aspecto económico de la sostenibilidad. Esto permitió que el modelo sea más simple y facilitó su estimación, pero limitó la comprensión completa del impacto del TPM. En este sentido, futuras investigaciones podrían ampliar el modelo para incorporar otros pilares del TPM —como el mantenimiento planificado, la mejora enfocada o las 5S—, así como dimensiones sociales, ambientales y tecnológicas. Esta expansión permitiría investigar más a fondo las condiciones en las que el TPM contribuye a una sostenibilidad industrial más efectiva y a resultados organizacionales sostenibles a largo plazo.

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

José Darío Vázquez Martínez: conceptualización, *data curation*, análisis formal, investigación, metodología, visualización, escritura-borrador original, redacción: revisión y edición. **Jorge Luis García Alcaraz:** conceptualización, análisis formal, metodología, supervisión, validación, redacción: revisión y edición. **José Luis Peinado Portillo:** supervisión, redacción: revisión y edición.

DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE IA GENERATIVA

Los autores utilizaron herramientas de IA generativa únicamente para mejorar la redacción, gramática y claridad del manuscrito. La interpretación de resultados, análisis y conclusiones corresponden exclusivamente a los autores.

REFERENCIAS

- Ahuja, I. P. S., & Khamba, J. S. (2008). Total productive maintenance: Literature review and directions. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 25(7), 709–756. <https://doi.org/10.1108/02656710810890890>
- Al-refaie, A., Lepkova, N., & Camilbel, M. E. (2022). The relationships between the pillars of TPM and TQM and manufacturing performance using structural equation modeling. *Sustainability*, 14(3), 1497. <https://doi.org/10.3390/su14031497>
- Au-Yong, C. P., Azmi, N. F., & Myeda, N. E. (2022). Promoting employee participation in operation and maintenance of green office building by adopting the total productive maintenance (TPM) concept. *Journal of Cleaner Production*, 352, 131608. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131608>
- Badghish, S., & Soomro, Y. A. (2024). Artificial Intelligence Adoption by SMEs to Achieve Sustainable Business Performance: Application of Technology–Organization–Environment Framework. *Sustainability*, 16(5), 1864. <https://doi.org/10.3390/su16051864>
- Barney, J. (1991). Firm resources and sustained competitive advantage. *Journal of Management*, 17(1), 99–120. <https://doi.org/10.1177/014920639101700108>
- Bataineh, O., Al-Hawari, T., Alshraideh, H., & Dalalah, D. (2019). A sequential TPM based scheme for improving production effectiveness presented with a case study. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 25(1), 144-161 <https://doi.org/10.1108/JQME-07-2017-0045>
- Braglia, M., Frosolini, M., & Zammori, F. (2008). Overall equipment effectiveness of manufacturing lines (OEEML): An integrated approach to assess systems

- performance. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 20(1), 8-29. <https://doi.org/10.1108/17410380910925389>
- Chundhoo, V., Chattopadhyay, G., Karmakar, G., & Appuhamillage, G. K. (2025). Embedding risk in total productive maintenance model. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 16, 1645-1662. <https://doi.org/10.1007/s13198-025-02736-1>
- Escobal, P., Gonzales, A., & Chavez-Ugaz, R. (2025). Productivity Improvement in a Canned Fish Production Company Applying 5S, TQM, and Three Pillars of TPM Tools. En L. C. Tang (Ed.), *Proceedings of the 11th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA 2024)* (pp. 131–144). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-6492-1_11
- García-Alcaraz, J. L., Morales-García, A. S., Díaz-Reza, J. R., Jiménez-Macías, E., Javierre-Lardies, C., & Blanco-Fernández, J. (2022). Effect of lean manufacturing tools on sustainability: the case of Mexican maquiladoras. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(26), 39622-39637. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18978-6>
- Hair, J. F., Hult, G. T. M., Ringle, C. M., & Sarstedt, M. (2016). *A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM)*. Sage Publications.
- Kock, N. (2023). *WarpPLS 8.0 user manual*. ScriptWarp Systems.
- Mohad, F. T., Gomes, L. C., Tortorella, G. L., & Lermen, F. H. (2025). Operational excellence in total productive maintenance: statistical reliability as support for planned maintenance pillar. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 42(4), 1274–1296. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-09-2023-0290>
- Morales Méndez, J. D., & Rodríguez, R. S. (2017). Total productive maintenance (TPM) as a tool for improving productivity: A case study of application in the bottleneck of an auto-parts machining line. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92, 1013–1026. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0052-4>
- Nakajima, S. (1988). *Introduction to total productive maintenance (TPM)*. Productivity Press.
- Samadhiya, A., & Agrawal, R. (2024). Total productive maintenance and sustainability performance: Resource-based view perspective. *Benchmarking: An International Journal*, 31(7), 2177–2196. <https://doi.org/10.1108/BIJ-10-2022-0635>
- Samadhiya, A., Agrawal, R., & Garza-Reyes, J. A. (2023). Investigating the influence of total productive maintenance key success factors on the social sustainability dimension of manufacturing SMEs. *Benchmarking: An International Journal*, 30(10), 4651–4680. <https://doi.org/10.1108/BIJ-05-2022-0287>

- Santos, R. M., Sassi, A. C., Sá, B. M., Miguez, S. A., & Pardauil, A. A. (2012). Ergonomics Program Management in Tucuruí Hydropower Plant using TPM methodology [Conference paper]. *Work*, 41, 2822-2830. <https://doi.org/10.3233/WOR-2012-0530-2822>
- Shannon, N., Trubetskaya, A., Iqbal, J., & McDermott, O. A. (2023). A total productive maintenance and reliability framework for an active pharmaceutical ingredient plant utilising design for Lean Six Sigma. *Heliyon*, 9(10), e20516. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20516>
- Singh, A. P., & Awoke, N. F. (2023). Relationship between TPM practices and operational performance in soft drinks manufacturing industry. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 29(4), 729–762. <https://doi.org/10.1108/JQME-10-2022-0067>
- Singh, R. K., & Gurtu, A. (2022). Prioritizing success factors for implementing total productive maintenance (TPM). *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 28(4), 810–830. <https://doi.org/10.1108/JQME-09-2020-0098>