

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Instituto de Ingeniería y Tecnología

Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura

Maestría en Ingeniería Industrial



Impacto del mantenimiento productivo total en la sustentabilidad industrial

Tesis para obtener el grado de:

Maestro en Ingeniería Industrial

Lic. José Darío Vásquez Martínez

Directores:

Dr. Jorge Luis García Alcaraz

Dra. Ingrid Iovana Burgos Espinoza

Ciudad Juárez, Chihuahua

Mayo de 2026

Agradecimientos

A Dios, por brindarme la fortaleza, la salud y la oportunidad de culminar esta etapa en mi vida.

A mi familia, por su apoyo constante, paciencia y confianza a lo largo de este proceso.

A mi asesor, por sus enseñanzas, orientación y exigencia académica, que contribuyeron de manera significativa a mi formación y al desarrollo de esta investigación.

Este logro representa el resultado del esfuerzo, la disciplina y el compromiso personal invertido durante este proceso.

Dedicatoria

A mi familia, por ser el pilar fundamental en mi vida, por su apoyo constante y por impulsarme a seguir adelante en cada etapa de mi formación.

A quienes han confiado en mí y han formado parte de este proceso, exigiéndome a dar lo mejor en cada paso.

A mí mismo, por la disciplina, el esfuerzo y la constancia invertidos para alcanzar este objetivo.

Resumen

El Mantenimiento Productivo Total (TPM, por sus siglas en inglés) ha cobrado relevancia en la industria manufacturera por su capacidad para mejorar la confiabilidad de los equipos, reducir las pérdidas operativas y fortalecer la eficiencia de los procesos. Sin embargo, en los últimos años también ha surgido interés por analizar su relación con la sustentabilidad industrial, particularmente desde las dimensiones sociales, económicas, ambientales y digitales. En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo analizar la relación entre distintos factores críticos del TPM y la sustentabilidad industrial en empresas manufactureras de Ciudad Juárez, Chihuahua.

La investigación se desarrolló con un enfoque cuantitativo, no experimental y de corte transversal. La información se recopiló mediante un cuestionario estructurado aplicado a 243 profesionales del sector manufacturero con experiencia en mantenimiento, producción, calidad e ingeniería. Para el análisis de los datos se empleó el modelado de ecuaciones estructurales mediante mínimos cuadrados parciales (PLS-SEM) utilizando el software WarpPLS 8.0, lo que permitió evaluar relaciones directas, indirectas y efectos de mediación entre las variables estudiadas.

Los resultados mostraron que las dimensiones Implementación de Mantenimiento Autónomo (IAMA) y Enfoque en Eliminación de Pérdidas (FELO) se relacionan de manera significativa con la Sustentabilidad Económica (ECSU) dentro del contexto manufacturero. Asimismo, las dimensiones Compromiso de la Dirección y Cultura Organizacional (MCOC), Participación Activa de Todos los Niveles (APAL) y Capacitación Continua (COTR) presentaron asociaciones relevantes con la Sustentabilidad Social (SOSU). De forma complementaria, los resultados permitieron observar que la implementación de prácticas de TPM asociadas con la participación del personal, la capacitación y la reducción de pérdidas operativas mantiene una relación favorable con distintos indicadores de sustentabilidad social y económica dentro del entorno manufacturero.

En términos generales, los hallazgos sugieren que el TPM no debe entenderse únicamente como una estrategia enfocada en el mantenimiento de equipos, sino como un

sistema de gestión con implicaciones organizacionales más amplias. Desde una perspectiva práctica, los resultados aportan evidencia útil para organizaciones interesadas en fortalecer simultáneamente su desempeño operativo y sus iniciativas de sustentabilidad dentro del entorno manufacturero.

Palabras clave: mantenimiento productivo total (TPM), sustentabilidad industrial, manufactura, PLS-SEM, factores críticos de éxito, sustentabilidad económica, sustentabilidad social.

Abstract

Total Productive Maintenance (TPM) has gained relevance in the manufacturing industry due to its contribution to equipment reliability, operational efficiency, and reduction of production losses. In recent years, interest has also emerged in understanding its relationship with industrial sustainability, particularly from social and economic perspectives. Therefore, the objective of this research was to analyze the relationship between critical TPM factors and industrial sustainability in manufacturing companies located in Ciudad Juárez, Chihuahua.

The study was conducted under a quantitative, non-experimental, and cross-sectional approach. Data were collected through a structured questionnaire applied to 243 professionals from the manufacturing sector with experience in maintenance, production, quality, and engineering activities. Data analysis was performed using Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM) through WarpPLS 8.0 software, which allowed the evaluation of direct, indirect, and mediating relationships among the studied variables.

The results showed that the dimensions Autonomous Maintenance Implementation (IAMA) and Focus on Eliminating Losses (FELO) were significantly related to Economic Sustainability (ECSU). Likewise, the dimensions Management Commitment and Organizational Culture (MCOC), Active Participation at All Levels (APAL), and Continuous Training (COTR) presented relevant associations with Social Sustainability (SOSU).

Overall, the findings suggest that TPM should not be understood only as a maintenance-oriented strategy, but also as a management system with broader organizational implications. From a practical perspective, the results provide useful evidence for manufacturing organizations interested in strengthening both operational performance and sustainability-oriented practices.

Keywords: Total Productive Maintenance (TPM), industrial sustainability, manufacturing, PLS-SEM, critical success factors, economic sustainability, social sustainability.

Índice

Agradecimientos	ii
Dedicatoria.....	iii
Resumen	iv
Abstract.....	vi
Índice de figuras	xi
Índice de tablas.....	xii
Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema.....	8
1.3 Objetivos	10
1.3.1 Objetivo General	10
1.3.2 Objetivos específicos.	10
1.4 Hipótesis general	10
1.5 Justificación	11
1.6 Alcance o delimitación	12
Marco Teórico	14
2.1 Fundamentos de la Manufactura Esbelta y TPM	14
2.1.1 Definición y principios de Lean manufacturing.	14
2.1.2 Relación entre Lean manufacturing y la reducción de desperdicios.....	15
2.1.3 Mantenimiento Productivo Total (TPM): Definición, objetivos y beneficios.	16
2.2 Orígenes y evolución del TPM en la industria japonesa.....	17
2.3 Pilares del Mantenimiento Productivo Total.....	19
2.4 Métricas Clave en TPM	20
2.4.1 Eficiencia Global del Equipo y su importancia en la medición del desempeño	21
2.4.2 Tiempo Medio Entre Fallos y el Tiempo Medio de Reparación	22
2.4.3 Indicadores de sustentabilidad industrial aplicados a TPM	22
2.5. Sustentabilidad Industrial y TPM	23
2.5.1 Definición y principios de sustentabilidad en la industria	23
2.5.2 Cómo el TPM contribuye a la reducción de desperdicios y optimización de recursos	23
2.5.3 Impacto del TPM en la eficiencia energética y reducción de costos operativos.....	23
2.5.4 Reducción de residuos y huella de carbono con TPM	24
2.5.5 Relación entre TPM y economía circular	24
2.6. Factores Críticos de Éxito en la Implementación de TPM.....	26
2.6.1 Importancia del compromiso organizacional y liderazgo	26

2.6.2 Capacitación y participación de los empleados en TPM	26
2.6.3 Identificación de barreras en la implementación de TPM	27
2.6.4 Estudios previos sobre factores de éxito en la adopción de TPM.....	28
2.7. Integración de TPM con la Industria 4.0	29
2.7.1 Uso de Internet de las Cosas (IoT) y Big Data en TPM.	29
2.7.2 Beneficios y desafíos de la digitalización del mantenimiento.....	30
2.7.3 Ejemplos de integración tecnológica en empresas manufactureras.	30
2.8. Estudios Previos sobre TPM y Sustentabilidad.....	31
2.8.1 Estudios internacionales sobre la relación entre TPM y la sustentabilidad.	31
2.8.2 Aplicaciones de TPM en diferentes sectores industriales.....	32
2.8.3 Estudios que analizan el impacto ambiental de TPM.	32
2.9 Creación y validación del cuestionario.....	32
2.9.1 Creación de cuestionarios	33
2.9.2 Validación de cuestionarios	34
2.10 Modelado de ecuaciones estructurales	35
2.10.1 Teoría de SEM	35
2.10.2 Tipos de variables en SEM	36
2.10.3 Efectos entre variables	36
2.11 Enfoque de mínimos cuadrados parciales (PLS).....	37
2.12 Conclusión del Marco Teórico	38
Metodología	41
3.1 Enfoque general del estudio y diseño del instrumento.....	41
3.2 Identificación de factores a partir de la literatura	42
3.3 Diseño y aplicación del cuestionario	43
3.4 Población, muestra y depuración de datos.....	45
3.5 Procedimiento de recolección de datos.....	47
3.6 Validación de las variables latentes	48
3.7 Modelado de ecuaciones estructurales (PLS-SEM)	50
3.8 Análisis de sensibilidad	52
3.9 Limitaciones del estudio.....	53
Resultados	55
4.1 Caracterización de la muestra	56
4.2 Evaluación del modelo de medición.....	59
4.2.1 Análisis descriptivo de los ítems.....	59
4.1 Modelo 1 de Sustentabilidad social.....	63
4.3.1 Modelo propuesto	63

4.3.2 Hipótesis del modelo.....	64
4.3.3 Evaluación del modelo de medición.....	64
4.3.4 Validez discriminante	65
4.3.5 Evaluación del modelo estructural.....	65
4.3.6 Validación de hipótesis	67
4.3.7 Efectos indirectos y totales	68
4.3.8 Análisis de sensibilidad.....	68
4.4 Modelo 2 de sustentabilidad económica	69
4.4.1 Modelo propuesto	69
4.4.2 Hipótesis del modelo.....	70
4.4.3 Evaluación del modelo de medición.....	71
4.4.4 Validez discriminante	71
4.4.5 Evaluación del modelo estructural.....	72
4.4.6 Validación de hipótesis	74
4.4.7 Efectos indirectos y totales	75
4.4.8 Análisis de sensibilidad.....	76
4.5 Modelo reducido de sustentabilidad económica	77
4.5.2 Hipótesis del modelo.....	78
4.5.3 Evaluación del modelo de medición.....	78
4.5.4 Validez discriminante	79
4.5.5 Evaluación del modelo estructural.....	79
4.5.6 Validación de hipótesis	80
4.5.7 Efectos indirectos y totales	81
4.5.8 Análisis de sensibilidad.....	82
Discusión	84
5.1 Discusión de resultados modelo social.....	84
5.1.1 Relación entre MCOC y COTR – H ₁	84
5.1.2 Relación entre MCOC y APAL – H ₂	86
5.1.3 Relación entre COTR y APAL – H ₃	88
5.1.4 Relación entre COTR y SOSU – H ₄	90
5.1.5 Relación entre APAL y SOSU - H ₅	92
5.2 Discusión de resultados modelo económico	94
5.2.1 Relación entre IAMA y FELO – H ₁	94
5.2.2 Relación entre IAMA y SEER – H ₂	96
5.2.3 Relación entre FELO y SEER – H ₃	98
5.2.4 Relación entre IAMA y ECSU – H ₄	100
5.2.5 Relación entre SEER y ECSU – H ₅	102
5.2.6 Relación entre FELO y ECSU – H ₆	104

5.3 Discusión de resultados modelo económico simple	106
5.3.1 Relación entre IAMA y FELO– H_1	106
5.3.2 Relación entre IAMA y ECSU – H_2	107
5.3.3 Relación entre FELO y ECSU – H_3	108
5.3.4 Comparación entre modelos	109
5.3.5 Discusión teórica e implicaciones.....	110
5.3.6 Implicaciones prácticas.....	110
Conclusiones	112
6.1 Conclusiones del modelo social	113
6.2 Conclusiones del modelo económico.....	114
6.3 Conclusiones del modelo económico simplificado	116
6.4 Conclusión general de la investigación.....	118
Limitaciones e investigaciones futuras	121
Bibliografía	124

Índice de figuras

Figura 4.1. Modelo de sustentabilidad social.....	63
Figura 4.2. Modelo social evaluado	66
Figura 4.3. Modelo de sustentabilidad económica.....	70
Figura 4.4. Modelo sustentabilidad económica evaluado	73
Figura 4.5. Modelo de sustentabilidad económica reducido.....	77
Figura 4.6. Modelo reducido de sustentabilidad económica evaluado	80
Figura 5.1. Relación entre MCOC→COTR.....	85
Figura 5.2. Relación entre MCOC→APAL.....	87
Figura 5.3. Relación entre COTR→APAL.....	89
Figura 5.4. Relación entre COTR →SOSU	91
Figura 5.5. Relación entre APAL→SOSU	93
Figura 5.6. Relación entre IAMA →FELO	95
Figura 5.7. Relación entre IAMA →SEER.....	97
Figura 5.8. Relación entre FELO →SEER	99
Figura 5.9. Relación entre IAMA →ECSU	101
Figura 5.10. Relación entre SEER→ECSU	103
Figura 5.11. Relación entre FELO→ECSU	105
Figura 5.12. Relación entre IAMA →FELO	107
Figura 5.13. Relación entre IAMA→ECSU	108
Figura 5.14. Relación entre FELO→ECSU	109

Índice de tablas

Tabla 4.1 Puesto y años de trabajo	57
Tabla 4.2 Puesto de trabajo y tamaño de la empresa	58
Tabla 4.3 Medidas de tendencia central (Mediana) y dispersión (rango intercuartílico, IQR) de los ítems del cuestionario	60
Tabla 4.4 Índices de validación de las variables del modelo de sustentabilidad social ...	64
Tabla 4.5 Matriz de Fornell-Larcker del modelo de sustentabilidad social	65
Tabla 4.6 Índices de ajuste y eficiencia del modelo estructural de sustentabilidad social.	65
Tabla 4.7 Coeficientes de trayectoria y significancia estadística del modelo de sustentabilidad social	67
Tabla 4.8 Efectos indirectos y totales del modelo de sustentabilidad socia	68
Tabla 4.9 Análisis de sensibilidad del modelo de sustentabilidad social.....	69
Tabla 4.10 Índices de validación del modelo de sustentabilidad económica.....	71
Tabla 4.11 Matriz de Fornell-Larcker del modelo de sustentabilidad económica	72
Tabla 4.12 Índices de ajuste y eficiencia del modelo estructural de sustentabilidad económica.	72
Tabla 4.13 Coeficientes de trayectoria y significancia estadística del modelo de sustentabilidad social	74
Tabla 4.14 Efectos indirectos y totales del modelo de sustentabilidad económica	75
Tabla 4.15 Análisis de sensibilidad del modelo de sustentabilidad económico	76
Tabla 4.16 Índices de validación del modelo reducido de sustentabilidad económica....	78
Tabla 4.17 Matriz de Fornell-Larcker del modelo reducido de sustentabilidad económica	79
Tabla 4.18 Índices de ajuste y eficiencia del modelo estructural reducido de sustentabilidad económica	79
Tabla 4.19 Coeficientes de trayectoria y significancia estadística del modelo reducido de sustentabilidad económica	81
Tabla 4.20 Efectos indirectos y totales del modelo de sustentabilidad social	81

Tabla 4.21 Análisis de sensibilidad del modelo reducido de sustentabilidad económico	
.....	82

Introducción

En este capítulo se presentan los antecedentes que sustentan el proyecto de investigación y contextualizan el planteamiento del problema. Asimismo, se formulan los objetivos, la hipótesis y la justificación del estudio. Finalmente, se definen el alcance y las delimitaciones que enmarcan la investigación.

1.1 Antecedentes

En esta sección se exponen las razones que sustentan el interés del proyecto de investigación, comenzando por una descripción general del problema abordado, centrada en el impacto del mantenimiento productivo total en la sustentabilidad industrial.

Lean Manufacturing se define como un proceso continuo y sistemático de identificación y eliminación del desperdicio o excesos, entendiendo como exceso toda aquella actividad que no agrega valor en un proceso, pero sí costo y trabajo (Socconini, 2019). Por lo cual, el TPM es un pilar fundamental en Lean Manufacturing, dado que busca que el equipo y la maquinaria operen de la mejor manera posible, manteniéndolos en óptimas condiciones y, sobre todo, sin interrupciones.

Recordemos que la manufactura esbelta utiliza un conjunto de herramientas para optimizar los procesos de producción, con el objetivo de reducir el desperdicio de materiales y mejorar la eficiencia operativa. Entre sus principales herramientas se encuentran algunas como lo son el TPM, Jidoka, el Indicador de OEE, Kanban y la metodología 5S, entre otras con gran aporte (García Alcaraz et al., 2022).

El TPM es una herramienta de manufactura esbelta orientada a mantener la maquinaria y los equipos en condiciones operativas estables, con el propósito de prevenir interrupciones en el flujo de producción derivadas de fallas, desajustes de calibración o defectos asociados al proceso. Bajo este enfoque, la continuidad operativa deja de depender únicamente de intervenciones correctivas y pasa a relacionarse con prácticas sistemáticas de prevención y control.

La literatura señala que esta lógica de mantenimiento contribuye a reducir los tiempos de inactividad y a disminuir los riesgos asociados a la operación industrial (Schindlerová, 2020). A su vez, la integración del TPM con los principios Lean favorece

mejoras en la calidad del producto y en la estabilidad del proceso productivo, particularmente en entornos donde la mejora continua y la reducción de desperdicios forman parte de la estrategia organizacional.

El origen del TPM comenzó en el período posterior a la Segunda Guerra Mundial, y todo ello se debió a que las industrias japonesas adoptaron y adaptaron diversas técnicas, métodos de gestión y de manufactura provenientes de los Estados Unidos. Con el tiempo, los productos fabricados en Japón ganaron reputación por su alta calidad, lo que facilitó su exportación a los países industrializados de Occidente y atrajo la atención mundial sobre los métodos de gestión japoneses.

Con todo esto, Japón comenzó a implementar prácticas de mantenimiento preventivo (MP) en todos sus equipos, así como la aplicación de la ingeniería de confiabilidad, en la que el TPM actualmente se conoce como una versión mejorada y optimizada del mantenimiento productivo estadounidense, dado que se adaptó y se mejoró para satisfacer las necesidades específicas del contexto industrial japonés (Nakajima, 1988).

Dicho modelo surgió como una evolución del mantenimiento preventivo, pero con una orientación más proactiva que busca involucrar a todos los niveles de la organización. A diferencia de los métodos tradicionales, centrados en la reparación de averías una vez ocurridas, el TPM impulsa la participación de todos los empleados, desde los operadores de maquinaria hasta la alta gerencia, en actividades orientadas a la prevención de fallos y a la mejora de la disponibilidad del equipo.

Nakajima (1988) menciona que el TPM puede describirse como un concepto japonés que utiliza la gestión de equipos para permitir a una organización mejorar de manera efectiva el rendimiento de sus equipos en el área de manufactura, todo ello mediante la participación de todos sus empleados. Esta filosofía busca involucrar a toda la organización para maximizar la eficiencia operativa y promover una cultura de mejora continua.

Agustiady Tina (2024) describe la implementación del TPM en cuatro etapas: preparación, introducción, implementación e institucionalización. Cuando iniciamos, comenzamos con la etapa de preparación, en la que se busca sensibilizar y comprometer

a la alta dirección para, posteriormente, continuar con una capacitación integral y la creación de comités específicos. En dichas fases se establecen indicadores clave de rendimiento (KPI) y se desarrolla un plan maestro que integre el TPM en la cultura organizacional de la empresa.

La fase de introducción marca el inicio formal de las actividades asociadas al TPM. En esta etapa suelen incorporarse proveedores y aliados estratégicos, ya que la coordinación entre actores externos e internos influye directamente en los objetivos de calidad y eficiencia establecidos por la organización.

Posteriormente, durante la implementación, se desarrollan los denominados pilares del TPM, que integran actividades relacionadas con el mantenimiento autónomo, la mejora continua, la supervisión operativa y el control de procesos. Conforme el sistema madura, estas prácticas tienden a incorporarse de manera más estable en la dinámica organizacional, lo que favorece la continuidad de las iniciativas de mejora a largo plazo.

Agustiady Tina (2024) plantea que los pilares del TPM constituyen la base estructural del modelo y recurre a la analogía de una “casa” para explicar la interdependencia entre sus componentes. Dentro de esta estructura se integran elementos como 5S, mantenimiento autónomo, mejoras enfocadas, mantenimiento planeado, mantenimiento de calidad, capacitación y entrenamiento, así como prácticas relacionadas con la seguridad, la salud y el medio ambiente.

Desde una perspectiva similar, Socconini (2019) sostiene que la implementación efectiva del TPM depende de la articulación sistemática de dichos componentes, especialmente del mantenimiento autónomo, de las mejoras enfocadas y los procesos de capacitación. Si bien la literatura coincide en su relevancia, la efectividad de su implementación parece depender de la coherencia con la cultura organizacional y del nivel de compromiso directivo, aspectos que podrían condicionar su consolidación práctica.

La implementación del TPM requiere un compromiso organizacional y procesos continuos de capacitación orientados al fortalecimiento de competencias técnicas y operativas vinculadas al mantenimiento productivo. Bajo esta lógica, el mantenimiento deja de limitarse a una función correctiva y comienza a integrarse como un elemento

estratégico relacionado con la mejora continua y con iniciativas asociadas a la sustentabilidad industrial.

En particular, la medición del desempeño del TPM suele basarse en indicadores que permiten analizar tanto la confiabilidad de los equipos como la eficiencia de los procesos de mantenimiento asociados. Entre estas métricas, el OEE se ha consolidado como un indicador integrador ampliamente utilizado para evaluar de manera conjunta la disponibilidad operativa, el rendimiento y la calidad en ciertos entornos productivos (Zubair, 2021). A través de este indicador es posible estimar una aproximación cuantitativa del nivel de aprovechamiento del tiempo programado en la producción, lo que facilita la identificación de pérdidas asociadas a paros no planeados, disminuciones en la velocidad de operación y defectos en la calidad de la producción.

Además del OEE, la gestión del mantenimiento incorpora métricas orientadas a evaluar la confiabilidad y la capacidad de respuesta operativa de los equipos. Entre las más utilizadas se encuentran el Tiempo Medio Entre Fallos (MTBF) y el Tiempo Medio de Reparación (MTTR), indicadores que permiten cuantificar la frecuencia de las fallas y el tiempo necesario para restablecer las condiciones normales de operación.

El MTBF se asocia con el intervalo promedio de funcionamiento entre una falla y la siguiente, por lo que suele emplearse como una medida indirecta de la confiabilidad del equipo. En contraste, el MTTR representa el tiempo necesario para recuperar la operatividad tras una interrupción, desde la detección del problema hasta la finalización de la intervención técnica (Muchiri, 2011).

Desde esta perspectiva, el análisis conjunto de estas métricas facilita la comprensión de la dinámica de las pérdidas asociadas al mantenimiento, en especial en relación con la disponibilidad y la estabilidad del proceso productivo. Desde una perspectiva sistémica, el monitoreo continuo puede contribuir a identificar oportunidades de mejora que incidan no solo en la eficiencia operativa, sino también en la reducción de desperdicios y reprocesos, vinculados a los objetivos de sustentabilidad industrial.

La adopción del TPM suele asociarse con mejoras en la eficiencia de los procesos productivos, en particular con la reducción de costos derivados de fallas recurrentes y el fortalecimiento de las condiciones de seguridad industrial.

En este sentido, se han reportado ciertos efectos, como la disminución de los tiempos de inactividad y la prolongación del ciclo de vida útil de los equipos, lo que puede traducirse en una menor necesidad de inversiones prematuras en nueva maquinaria y en un aprovechamiento más eficiente de los recursos existentes.

Por consiguiente, el TPM genera efectos en la industria tanto en el ámbito operativo como en el ámbito cultural. Además, en el ámbito tangible podemos observar una mejora en la efectividad del equipo, lo que se traduce en una reducción de las paradas no programadas, así como en la implementación sistemática de acciones de mejora continua y en el fortalecimiento de competencias técnicas mediante procesos de capacitación.

En el plano intangible, diversos estudios han señalado que su aplicación puede favorecer el desarrollo del sentido de pertenencia, la responsabilidad compartida y las habilidades para la resolución de problemas, además de promover una mayor colaboración entre las áreas de producción y mantenimiento, lo que contribuye progresivamente a la consolidación de una cultura de mejora continua (Chan, 2005).

Desde una perspectiva ambiental, el TPM apoya la reducción del consumo de recursos al mantener los equipos en óptimas condiciones y evitar consumos excesivos de energía y materiales en la industria. Cuando se reducen errores y defectos en la producción, se disminuye la generación de residuos y desechos industriales, esto contribuye a que las metas de sustentabilidad industrial disminuyan el impacto ambiental en sus operaciones.

Diversos estudios han señalado una relación entre el TPM y la sustentabilidad industrial. Samadhiya y Agrawal (2023) indican que el TPM mejora significativamente la sustentabilidad industrial al maximizar la OEE, reducir desperdicios y paradas no programadas, y promover la mejora continua con el mantenimiento autónomo y la participación de los empleados. Además, el pilar de seguridad y medio ambiente en el TPM garantiza el cumplimiento normativo y fomenta entornos seguros, y el compromiso de la alta dirección permite integrar prácticas sostenibles y reducir costos operativos.

Por otra parte, el TPM busca optimizar la productividad y la eficiencia de la organización, al mismo tiempo que fomenta un entorno de trabajo seguro y respetuoso

con el medio ambiente. La integración de sistemas de gestión en Seguridad, Salud y Medio Ambiente contribuye a reducir la incidencia de accidentes laborales y a mitigar los impactos adversos sobre el entorno, aspectos que se alinean con los pilares del TPM orientados a la prevención y al cumplimiento de estándares de sustentabilidad (Juan A. Marín-García, 2013).

Cuando el personal se hace cargo del mantenimiento de sus equipos, la eficiencia energética y el aprovechamiento de los materiales mejoran notablemente. Esto sucede porque, al minimizar las averías constantes, el proceso se vuelve mucho más estable, evitando ese gasto extra de recursos y emisiones que generan los fallos operativos. Además, cuidar la maquinaria para que dure más tiempo reduce la necesidad de comprar activos nuevos antes de tiempo, lo que disminuye el desecho de chatarra industrial. En definitiva, el TPM funciona como un aliado de la sustentabilidad, siempre que la empresa lo integre de verdad en su visión ambiental a largo plazo.

Varios estudios han investigado la relación entre el TPM y la sustentabilidad industrial en distintos contextos, destacando los beneficios ambientales y económicos que este enfoque puede aportar. Un ejemplo importante es el efecto de la implementación de TPM en Portugal, donde se aplicó en una empresa que fabrica embragues y controles hidráulicos. La investigación mostró que el TPM mejoró la disponibilidad de las máquinas y la OEE, lo que se tradujo en una gran reducción de fallas y de los tiempos de inactividad. Estos resultados resaltan el impacto positivo del TPM en la sustentabilidad operativa y en la reducción de desperdicios (Halloui, 2023).

Aunque estudios recientes han analizado cómo se utilizan tecnologías de la Industria 4.0, como el Internet de las cosas (IoT), la computación en la nube, los sensores inalámbricos y el big data, en las prácticas de TPM de grandes empresas manufactureras en el sur de Brasil. La investigación encontró avances importantes en el mantenimiento predictivo y la eficiencia operativa a partir de múltiples estudios de caso; sin embargo, también se enfrentó a retos relacionados con los altos costos de la puesta en marcha de nuevas tecnologías digitales y con la variedad de sistemas empleados (Tortorella, 2021).

Los estudios revisados sugieren que el efecto del TPM sobre la sustentabilidad industrial depende del contexto organizacional y del grado de integración de las prácticas

de mantenimiento en la estrategia productiva. Aunque la evidencia reporta mejoras operativas y ambientales, los resultados no parecen manifestarse de manera homogénea entre los sectores o regiones industriales.

En el entorno manufacturero contemporáneo, la combinación de TPM y herramientas de Lean Manufacturing se ha asociado con incrementos en la eficiencia operativa y con iniciativas orientadas a reducir los impactos ambientales (Aldave-Vasquez, 2024). Sin embargo, la articulación efectiva de estos enfoques aún enfrenta limitaciones en la cultura organizacional, la integración tecnológica y la continuidad de las prácticas de mejora.

En el contexto industrial, la implementación del TPM suele orientarse principalmente a la mejora del desempeño operativo, privilegiando indicadores como la disponibilidad, la reducción de fallas y la eficiencia global de los equipos. Sin embargo, esta orientación no siempre considera explícitamente su posible contribución a los objetivos de la sustentabilidad industrial, en particular en sus dimensiones social y económica (Halloui, 2023). Esta situación puede generar una desconexión entre las prácticas de mantenimiento y las estrategias organizacionales a largo plazo, limitando la capacidad de las empresas para integrar el TPM como un elemento que aporte valor más allá del ámbito técnico.

Adicionalmente, aunque la literatura reconoce la importancia de factores como el compromiso de la alta dirección, la participación del personal y la capacitación continua en la efectividad del TPM (Díaz-Reza et al., 2018), su influencia conjunta no ha sido analizada de manera sistemática en relación con los resultados de sustentabilidad. En consecuencia, persiste la falta de claridad sobre los mecanismos mediante los cuales estos factores pueden potenciar o limitar el impacto del TPM en el desempeño organizacional, lo que dificulta la formulación de estrategias de mantenimiento alineadas con objetivos sostenibles (Shannon et al., 2023).

En este sentido, la ausencia de modelos que integren los factores críticos del TPM con resultados de sustentabilidad puede derivar en decisiones organizacionales centradas exclusivamente en la eficiencia operativa, lo que limita la incorporación de criterios sociales y económicos en la gestión del mantenimiento. Esta situación puede restringir la

capacidad de las organizaciones para alinear sus estrategias de mantenimiento con objetivos de sustentabilidad a largo plazo, lo que afecta su competitividad y su capacidad de adaptación a entornos industriales cada vez más exigentes.

No obstante, la evolución tecnológica y la creciente disponibilidad de herramientas analíticas avanzadas plantean la necesidad de revisar y adaptar estos modelos tradicionales. La incorporación de tecnologías digitales y modelos de análisis de datos podría ampliar el alcance del TPM, particularmente en la toma de decisiones basada en evidencia y en el monitoreo predictivo del desempeño ambiental.

Bajo esta perspectiva, futuras investigaciones podrían examinar con mayor profundidad los mecanismos mediante los cuales el TPM se integra con los objetivos de sustentabilidad industrial, considerando variables contextuales como la madurez organizacional, la infraestructura tecnológica y la cultura corporativa.

1.2 Planteamiento del problema

El TPM se ha consolidado como un enfoque recurrente en entornos industriales orientado a mejorar el desempeño operativo. Su implementación suele asociarse con reducciones en los tiempos de inactividad, incrementos en la disponibilidad de equipos y mejoras en indicadores como la OEE, aspectos que han favorecido su incorporación en las estrategias organizacionales de competitividad (Al-refaie et al., 2022; Kumar Sharma y Gopal Sharma, 2014).

No obstante, cuando se lleva el análisis al ámbito de la sustentabilidad industrial, los efectos asociados al TPM adquieren mayor complejidad. Diversas investigaciones sugieren que su implementación puede contribuir a la reducción de residuos y al uso más eficiente de los recursos productivos; sin embargo, la literatura aún presenta limitaciones para modelar de manera sistemática la relación entre las prácticas de mantenimiento y los resultados sostenibles medibles, ya sean sociales, económicos o ambientales.

En consecuencia, persiste una brecha conceptual respecto de cómo los pilares del TPM podrían influir en los indicadores formales de sustentabilidad industrial, especialmente al considerar variables contextuales como la madurez organizacional, la integración tecnológica y la cultura de mejora continua.

Diversos estudios han señalado que el desempeño del TPM no se explica exclusivamente por su diseño técnico, sino también por la interacción de factores organizacionales que condicionan su implementación. Entre los elementos frecuentemente asociados con su efectividad se encuentran el compromiso de la alta dirección, la participación del personal operativo y la existencia de programas sistemáticos de capacitación continua (Gelaw et al., 2024; Samadhiya y Agrawal, 2023). Sin embargo, la evidencia disponible no permite establecer con claridad qué combinaciones de estos factores resultan determinantes ni bajo qué configuraciones organizacionales generan efectos consistentes en indicadores vinculados con la sustentabilidad.

La implementación del TPM también está influida por dinámicas internas que pueden limitar su alcance. La resistencia al cambio, la desalineación entre objetivos estratégicos y operativos, así como las restricciones presupuestarias, tienden a favorecer adopciones parciales o fragmentadas del sistema (Shaaban y Awni, 2014; Singh y Ahuja, 2013). En tales contextos, el énfasis suele desplazarse hacia resultados operativos de corto plazo, lo que puede restringir la integración de metas ambientales y sociales en el esquema de mantenimiento.

Una parte considerable de la literatura se ha concentrado en variables productivas tradicionales como la disponibilidad, la eficiencia y la reducción de fallas, mientras que los estudios que examinan la relación entre TPM y la sustentabilidad social o ambiental siguen siendo relativamente escasos (Samadhiya y Agrawal, 2023).

Esta orientación temática ha contribuido a mantener una brecha analítica respecto del papel que los factores críticos del TPM podrían desempeñar en la consolidación de modelos integrales de sustentabilidad industrial. Como resultado, aún persiste la incertidumbre sobre cómo el TPM puede integrarse de manera efectiva en las estrategias organizacionales orientadas a la sustentabilidad.

En consecuencia, resulta pertinente investigar cómo los factores críticos de éxito del TPM inciden en los resultados de sustentabilidad industrial, considerando no solo los beneficios operativos esperados, sino también las condiciones organizacionales que pueden potenciar o limitar su efecto. La pregunta que orienta esta investigación es: ¿cómo

y en qué medida la implementación del TPM contribuye al logro de los objetivos de sustentabilidad industrial?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Analizar la influencia del TPM en la sustentabilidad industrial mediante la evaluación empírica de factores críticos de éxito, la validación de un instrumento de medición y la modelación de relaciones estructurales, considerando su incidencia en las dimensiones social y económica de los sistemas productivos.

1.3.2 Objetivos específicos.

1. Identificar los factores críticos de éxito para la implementación del TPM y las métricas vinculadas a las dimensiones sociales y económicas de la sustentabilidad industrial.
2. Diseñar y validar un instrumento de medición que integre los factores críticos de éxito del TPM y las dimensiones sociales y económicas de la sustentabilidad industrial.
3. Analizar la estructura factorial de los factores críticos de éxito del TPM y su relación con las dimensiones sociales y económicas de la sustentabilidad industrial.
4. Estimar, mediante modelación estadística, la relación entre los factores críticos de éxito del TPM y las dimensiones sociales y económicas de la sustentabilidad industrial.
5. Evaluar la sensibilidad del modelo para determinar la incidencia de los factores críticos de éxito del TPM en las dimensiones sociales y económicas de la sustentabilidad industrial.

1.4 Hipótesis general

Se plantea que los factores críticos de éxito del TPM presentan una relación estadísticamente significativa con las dimensiones sociales y económicas de la sustentabilidad industrial.

1.5 Justificación

El TPM se ha implementado en diversos entornos industriales con el propósito de mejorar la eficiencia operativa y la confiabilidad de los equipos. No obstante, en un contexto marcado por mayores exigencias ambientales y sociales, su evaluación ya no puede limitarse únicamente a los indicadores productivos.

La sustentabilidad industrial ocupa actualmente un lugar estratégico dentro de las organizaciones, lo que vuelve pertinente analizar si los efectos del TPM trascienden la mejora técnica de los procesos y pueden vincularse con objetivos organizacionales de largo plazo (Samadhiya y Agrawal, 2023).

La literatura especializada ha asociado el TPM con reducciones en la frecuencia de fallas, incrementos en la disponibilidad operativa y mejoras en indicadores como la OEE. Estos avances han validado su efectividad en la productividad, pero llevar ese éxito al terreno de la sustentabilidad requiere un análisis mucho más profundo. La realidad es que un proceso más rápido o fluido no asegura, por sí solo, que los materiales se aprovechen mejor. Muchas veces, la optimización operativa se queda corta al intentar resolver problemas de fondo como la generación de desechos o la reducción de la huella ambiental (Aldave-Vasquez, 2024).

Por lo tanto, no basta con suponer que el mantenimiento conduce a la sustentabilidad; se requiere un análisis más cuidadoso para comprender cómo se establece esa relación. Para saber qué causa qué, es necesario considerar factores que a menudo se ignoran, como la profundidad de implementación del programa o su alineación con la estrategia ambiental de la empresa. Estos elementos son los que marcan la diferencia y nos obligan a crear modelos de estudio más precisos que capten estas interacciones en la rutina diaria de la planta.

Entre los factores críticos de éxito asociados al TPM destacan el compromiso de la alta dirección, la participación del personal y la capacitación continua. El análisis de estos elementos permite explorar su posible relación con los resultados de la sustentabilidad industrial.

Desde una perspectiva práctica, comprender estas relaciones puede facilitar el diseño de programas de mantenimiento alineados con los objetivos ambientales y sociales

en las organizaciones. Las crecientes exigencias normativas y de responsabilidad corporativa han provocado cambios en los sistemas de gestión empresarial, lo que requiere enfoques integrales que vayan más allá de la mera mejora de la producción (Crosby, 2022). Desde esta perspectiva sistémica, es posible identificar las condiciones que permiten al TPM integrarse a la sustentabilidad de manera genuina y duradera.

Por lo cual, esta investigación busca aportar evidencia empírica para comprender mejor el papel del TPM en la industria sustentable, definiendo con claridad sus alcances y desafíos. Con este análisis, esperamos ofrecer una base sólida para futuros estudios y una herramienta útil para quienes deben tomar decisiones en entornos industriales cada vez más exigentes.

1.6 Alcance o delimitación

La presente investigación se sustenta en un enfoque teórico y empírico, mediante el análisis estadístico de la información recolectada con herramientas aplicadas en campo. Incluye también, una revisión sistemática de la literatura científica y de reportes técnicos, sobre experiencias de implementación del TPM en distintos entornos industriales. Este método de trabajo permite realizar un seguimiento de las pruebas reales en relación con los conceptos ya registrados.

El objetivo central de esta investigación es analizar la relación entre el TPM y variables de sustentabilidad industrial, en especial aquellas asociadas con la eficiencia energética, la reducción de desperdicios y el impacto ambiental. Para ello, se toman en cuenta indicadores utilizados con frecuencia en el área de mantenimiento, como la OEE, el MTBF y el MTTR, ya que permiten evaluar el desempeño de los equipos y comprender cómo este puede influir en el consumo de recursos y en la generación de residuos en los procesos productivos.

La investigación no contempla la aplicación directa del modelo en una empresa en particular ni la intervención en procesos productivos específicos. El estudio se enfoca principalmente en el análisis estadístico y conceptual de la relación entre las variables, con el objetivo de identificar patrones y conexiones que permitan comprender con mayor claridad el fenómeno analizado.

Debido a esto, los resultados se presentan desde un enfoque que busca ofrecer pruebas claras de cómo el TPM influye realmente en la sustentabilidad industrial. La intención de las conclusiones no es solo cerrar el tema, sino dejar planteadas las bases para que otros investigadores profundicen en estos hallazgos. Asimismo, sirven de guía para empresas que quieran integrar el mantenimiento con prácticas verdes, siempre teniendo en cuenta los límites propios del diseño de esta investigación.

En este contexto, el siguiente capítulo desarrolla el marco teórico de la investigación, en el que se examinan las bases del TPM y su relación con la sustentabilidad industrial, lo cual sirve de fundamento para el análisis metodológico posterior.

Marco Teórico

El presente capítulo reúne los fundamentos conceptuales necesarios para analizar la relación entre el TPM y la sustentabilidad industrial desde un enfoque sistémico. Además de revisar los principales conceptos teóricos, se busca comprender cómo las prácticas de mantenimiento pueden influir tanto en el desempeño organizacional como en el uso eficiente de los recursos y en la reducción de los impactos ambientales.

En este contexto, se reconsideran los principios de la manufactura esbelta como un marco complementario, especialmente aquellos relacionados con la eliminación de residuos, la estabilidad operativa y la mejora continua, pues estos principios establecen condiciones estructurales que optimizan los procesos de producción.

La revisión incorpora, además, el análisis de la evolución histórica del TPM, de sus pilares estructurales y de su adaptación a modelos contemporáneos de gestión que integran tecnologías digitales y enfoques propios de la Industria 4.0, con el propósito de contextualizar su relevancia en entornos industriales de alta complejidad y con exigencias crecientes en materia de sustentabilidad.

De igual forma, se revisan las métricas empleadas para evaluar el desempeño del TPM, así como los factores críticos de éxito identificados en la literatura especializada. En conjunto, estos elementos nos permiten establecer una base conceptual para interpretar la posible conexión entre el TPM y las distintas dimensiones de la sustentabilidad industrial, como la social, la económica, la ambiental y la digital, que van más allá de los indicadores tradicionales de producción.

2.1 Fundamentos de la Manufactura Esbelta y TPM

2.1.1 Definición y principios de Lean manufacturing.

La manufactura esbelta se presenta como una respuesta a los esquemas tradicionales de producción en masa, al proponer una reorganización del sistema productivo orientada a identificar y suprimir las actividades que no generan valor. Más que un conjunto de herramientas operativas constituye un enfoque integral de gestión que redefine la forma en que se planifican, ejecutan y controlan los procesos industriales.

Su consolidación está vinculada al Sistema de Producción Toyota, desarrollado en Japón durante la segunda mitad del siglo XX, en el que se sistematizaron prácticas destinadas a reducir desperdicios y a estabilizar el flujo de producción. En este marco, la mejora continua (Kaizen), la estandarización y la eliminación de ineficiencias operativas se convirtieron en principios rectores para fortalecer la competitividad organizacional (García Alcaraz et al., 2022; Socconini, 2019).

Desde una perspectiva analítica, la manufactura esbelta trasciende la mera búsqueda de eficiencia técnica. Promover la reducción de sobreproducción, inventarios excesivos y reprocesos, favorece una utilización más racional de materiales y energía. En consecuencia, su lógica de funcionamiento se vincula de manera indirecta con objetivos de sustentabilidad, en la medida en que contribuye a disminuir el consumo de recursos y la generación de residuos en los sistemas productivos.

2.1.2 Relación entre Lean manufacturing y la reducción de desperdicios.

La manufactura esbelta consiste en identificar y eliminar, de forma sistemática, las actividades que no generan valor en el proceso productivo. Entre los desperdicios más citados se encuentran la sobreproducción, el inventario excesivo, los defectos, el transporte innecesario, los tiempos de espera, los movimientos improductivos, el sobreprocesamiento y el desaprovechamiento del talento humano (Socconini, 2019). El control de estos elementos permite estabilizar el flujo de producción y reducir las variaciones que afectan los costos y la calidad.

Desde esta perspectiva, metodologías como las 5S, Kanban y el TPM no deben verse como islas, sino como piezas que, al trabajar juntas, refuerzan el sistema (Cua et al., 2001). La diferencia clave es el enfoque: mientras que Lean se concentra en agilizar el flujo y eliminar los desperdicios que saltan a la vista, el TPM se enfoca en que las máquinas sean confiables y estén siempre disponibles. Sin esa estabilidad en el equipo que aporta el TPM, es prácticamente imposible mantener la continuidad que exige Lean.

Dentro del enfoque de manufactura esbelta, la estabilidad operativa es un aspecto clave para mantener un flujo continuo en los procesos productivos. La presencia de fallas inesperadas, tiempos prolongados de inactividad o variaciones en el desempeño de la maquinaria puede afectar la sincronización de las operaciones, generando esperas,

reprocesos y mayores costos operativos (Hallioui, 2023; Singh y Gurtu, 2021). Estas situaciones reflejan la relación entre la confiabilidad de los equipos y el desempeño general del sistema productivo.

En esta situación, el TPM puede considerarse una parte importante que respalda los principios Lean al centrarse en la estabilización del rendimiento de los equipos. Su enfoque en prevenir fallas, detectar anomalías de forma temprana y participar en las operaciones ayuda a reducir la variabilidad no planificada, lo cual es necesario para mantener sistemas de producción eficientes.

2.1.3 Mantenimiento Productivo Total (TPM): Definición, objetivos y beneficios.

El TPM se entiende como un enfoque de gestión orientado a mejorar la confiabilidad operativa mediante la aplicación de prácticas preventivas, predictivas y de mantenimiento autónomo en los procesos productivos. Más allá de enfocarse únicamente en la reparación de fallas, este sistema promueve la participación del personal en diferentes niveles de la organización, integrando el mantenimiento en la operación diaria (Nakajima, 1988). Bajo este enfoque, la confiabilidad de los equipos no depende solo de aspectos técnicos, sino también de factores organizacionales como la disciplina operativa, las rutinas de trabajo y el compromiso de la dirección.

Desde un punto de vista práctico, el TPM busca transformar el sistema productivo al optimizar la disponibilidad, el desempeño y la calidad; pilares que dan vida al indicador OEE. No obstante, elevar este indicador no es un proceso aislado, sino el resultado de reducir las paradas inesperadas, controlar los defectos y evitar las fugas de rendimiento (Zubair, 2021). Si bien el mantenimiento planificado y la estabilidad de los procesos son claves para minimizar fallas, el éxito real de estas acciones siempre estará condicionado por qué tan madura sea la organización y qué tan alineada esté su estrategia.

Uno de los aspectos distintivos del TPM es la distribución de responsabilidades en el cuidado de los equipos y activos productivos. La participación de operadores, supervisores y directivos en actividades de mantenimiento autónomo y mejora continua permite que el mantenimiento deje de verse únicamente como una función del área técnica y pase a formar parte de las actividades generales de la organización (Marta Wolska et al., 2023). Esto favorece el desarrollo de una cultura preventiva que puede contribuir a

mejorar la estabilidad operativa y a disminuir la dependencia de los mantenimientos correctivos.

En términos más amplios, algunos estudios recientes han relacionado el TPM con mejoras en las condiciones laborales y con la reducción de problemas derivados de las ineficiencias operativas, especialmente cuando se implementa junto con sistemas de manufactura esbelta (Singh y Gurtu, 2021; Tortorella, 2021). No obstante, estos resultados pueden variar según el tipo de industria, la forma en que se aplique el TPM y el nivel de integración con las políticas de sustentabilidad de cada organización.

Las tendencias actuales apuntan a un TPM mucho más tecnológico. La integración de sensores IoT y el procesamiento de datos a gran escala permiten que el mantenimiento sea predictivo y no solo preventivo, conectando el estado físico de los equipos con sistemas inteligentes de gestión.

Esta convergencia tecnológica amplía las posibilidades de monitoreo predictivo y de optimización energética, especialmente en entornos industriales de alta complejidad operativa (García Alcaraz et al., 2022). Sin embargo, la eficacia de dichas integraciones depende de la infraestructura tecnológica existente y de la capacidad organizacional para interpretar y utilizar la información resultante, lo que añade nuevas variables a la medición de su impacto.

2.2 Orígenes y evolución del TPM en la industria japonesa.

El cambio en el mantenimiento industrial no es sólo una evolución tecnológica de las prácticas correctivas, preventivas y predictivas, sino también la consecuencia de una evolución estructural en la forma en que se gestionan los sistemas productivos. En las primeras fases de la industrialización prevalecía una actitud reactiva en la que sólo se intervenía cuando se producían fallos.

Con el paso del tiempo, el aumento de la complejidad tecnológica y la necesidad de mantener operaciones más estables impulsaron la adopción de esquemas preventivos basados en revisiones programadas y en procedimientos estandarizados. Posteriormente, el desarrollo de herramientas de monitoreo y análisis de datos permitió anticipar posibles fallas y dio paso a enfoques de mantenimiento predictivo centrados en el seguimiento de las condiciones de operación de los equipos (Tortorella, 2021).

En dicho contexto surgió el TPM en Japón como una evolución del mantenimiento preventivo tradicional. Su desarrollo no respondió únicamente a necesidades técnicas relacionadas con la confiabilidad de los equipos, sino también a una cultura organizacional orientada a la mejora continua, a la disciplina operativa y a la participación del personal. Nakajima (1988) lo definió como un sistema integral que involucra a todos los niveles de la organización en la gestión del mantenimiento, promoviendo la corresponsabilidad en el cuidado de los activos y en la mejora continua de indicadores como la Eficiencia Global del Equipo (OEE). Sin embargo, desde sus primeras aplicaciones se observó que su efectividad dependía de factores organizacionales como el compromiso de la dirección y la alineación estratégica.

Con su expansión a otros países, se identificó que la implementación del TPM no siempre podía replicarse de la misma manera. Estudios realizados fuera del contexto japonés identificaron diversas barreras relacionadas con aspectos culturales, la resistencia al cambio y la falta de capacitación del personal (Singh y Ahuja, 2013; Singh y Gurtu, 2021). Esto mostró que el modelo necesitaba adaptarse a distintas estructuras organizacionales y dinámicas de trabajo.

En el último tiempo, el TPM ha dado un salto hacia la digitalización al integrarse con los pilares de la Industria 4.0. No se trata solo de añadir sensores inteligentes o usar IoT, sino de transformar los datos en decisiones reales. Según autores como Mendes et al. (2023) esta combinación puede aumentar la disponibilidad de los equipos, especialmente en plantas con procesos altamente automatizados. Sin embargo, el éxito no es automático: la tecnología por sí sola no sirve si la empresa carece de la infraestructura necesaria o si el personal no sabe interpretar la avalancha de información que estos sistemas generan.

Al mismo tiempo, se observa un cambio en la narrativa académica: el TPM ya no se concibe únicamente como una técnica de eficiencia, sino como una pieza clave para la sustentabilidad. Esto significa que la gestión industrial está empezando a medir el éxito del mantenimiento no solo en términos monetarios, sino también en su impacto social y ambiental.

Se ha indicado que su uso actual requiere identificar factores clave, posibles obstáculos y formas de conectar con prácticas sostenibles para asegurar su relevancia en

entornos globalizados (Gelaw et al., 2024). Desde esta perspectiva, el TPM se ve no solo como una herramienta para mejorar las operaciones, sino también como parte de estrategias más amplias para ser competitivos y responsables en la industria.

Desde un punto de vista histórico-analítico, el desarrollo del TPM muestra una extensión gradual de su alcance: de instrumento enfocado en la estabilidad técnica de los equipos a un marco de gestión susceptible de ser integrado con procesos de digitalización y metas de sustentabilidad. Sin embargo, la magnitud de esta expansión sigue condicionada por factores contextuales que deben investigarse empíricamente con rigor, sobre todo cuando se busca determinar su efecto en resultados concretos de sustentabilidad industrial.

2.3 Pilares del Mantenimiento Productivo Total

Las bases del TPM constituyen la estructura conceptual y práctica que define su aplicación en las empresas industriales. Según la concepción inicial de Nakajima (1988) y desarrollos posteriores, estos elementos no sólo pretenden mejorar la fiabilidad técnica de los equipos, sino que engranan la participación conjunta de los niveles jerárquicos para estabilizar y mejorar el rendimiento operativo;

- **5S y su vinculación con el TPM:** La metodología 5S establece condiciones estructurales de orden, limpieza y disciplina que constituyen un prerrequisito para la implementación efectiva del TPM. Un entorno sistemáticamente organizado favorece la identificación temprana de desviaciones operativas, facilita la consolidación del mantenimiento autónomo y contribuye a la estandarización de las prácticas en el área de trabajo (Socconini, 2019).

- **Mantenimiento Autónomo y su incidencia en la productividad:** El mantenimiento autónomo compromete a los operadores con las tareas elementales de inspección, limpieza y conservación de los equipos. Esta rutina disminuye la dependencia del mantenimiento correctivo y fomenta una cultura de corresponsabilidad en el uso de la maquinaria (García Alcaraz et al., 2022). Como consecuencia, se favorece la estabilidad operativa y se reduce la incidencia de fallas imprevistas.

- **Mantenimiento planificado y reducción de fallos:** Este pilar se enfoca en planificar de manera organizada actividades preventivas y predictivas para evitar

interrupciones inesperadas. La estructuración de planes de mantenimiento y la optimización de los tiempos de intervención contribuyen a minimizar las pérdidas asociadas a paros no programados (Tortorella et al., 2021).

- **Mejoras enfocadas y su contribución a la eliminación de pérdidas:** Las mejoras enfocadas se orientan a identificar y corregir las causas raíz de los problemas recurrentes en el sistema productivo. Mediante herramientas como el diagrama de causa-efecto y el ciclo PDCA, se busca eliminar las pérdidas crónicas y estabilizar el desempeño del proceso (Nakajima, 1988).

- **Seguridad, Salud y Medio Ambiente en TPM y su aporte a la sustentabilidad:** Este pilar integra la prevención de riesgos laborales con la reducción de los impactos ambientales derivados de fallas o ineficiencias operativas. Su implementación favorece condiciones de trabajo seguras y contribuye a disminuir los desperdicios y el consumo innecesario de recursos (Halloui, 2023).

La aplicación integrada de estos pilares puede traducirse en mejoras del desempeño técnico y en niveles más altos de confiabilidad de los equipos productivos. Sin embargo, para evaluar estos efectos de manera más objetiva, es necesario utilizar herramientas cuantitativas que permitan analizar los resultados y distinguir entre mejoras operativas temporales y cambios más estructurales en el sistema de mantenimiento.

En este sentido, indicadores como la Eficiencia Global del Equipo (OEE), el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) y el Tiempo Medio de Reparación (MTTR) permiten analizar el comportamiento de los activos industriales y evaluar la consistencia de las prácticas de mantenimiento implementadas. Además de proporcionar información descriptiva, estas métricas también sirven como apoyo para la toma de decisiones relacionadas con la asignación de recursos y la reducción de pérdidas dentro de los procesos productivos.

2.4 Métricas Clave en TPM

Evaluar el éxito del TPM no es posible sin un marco de medición que permita comparar, de forma objetiva, si las acciones en el taller realmente se traducen en mejores resultados operativos. Más allá de un simple seguimiento técnico, los indicadores cuantitativos ofrecen una base sólida para entender hasta qué punto el mantenimiento influye en la

estabilidad de la planta. Como bien señaló Nakajima (1988), estas métricas actúan como un sistema de retroalimentación esencial: permiten contrastar las metas estratégicas de la empresa con lo que realmente ocurre en el día a día de la operación.

No obstante, estos indicadores no son infalibles. Su utilidad depende totalmente de que los datos sean confiables, de que el cálculo se haga con rigor y, sobre todo, de que la organización sepa leer qué hay detrás de cada cifra. Si no se cumplen estas condiciones, se corre el riesgo de obtener diagnósticos superficiales o incompletos que no reflejan la complejidad real del sistema de mantenimiento.

2.4.1 Eficiencia Global del Equipo y su importancia en la medición del desempeño

Entre los indicadores utilizados en TPM, la Eficiencia Global del Equipo (OEE, por sus siglas en inglés) es uno de los más empleados para evaluar el desempeño operativo de los equipos. Este indicador considera aspectos como la disponibilidad, el rendimiento y la calidad, lo que permite estimar el nivel de aprovechamiento de los activos productivos durante la operación.

A pesar de su utilidad, el OEE no debe analizarse como un indicador absoluto de eficiencia. Sus resultados pueden verse afectados por factores como cambios en la programación de la producción, variaciones en la demanda o limitaciones propias de la organización. Por ello, suele ser necesario complementarlo con otras métricas que permitan identificar con mayor precisión el origen de las pérdidas dentro del proceso productivo.

En este contexto, indicadores como el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) y el Tiempo Medio de Reparación (MTTR) ayudan a evaluar la confiabilidad y el desempeño del sistema de mantenimiento. El uso conjunto de estas métricas permite obtener una visión más amplia del comportamiento de los equipos y de las condiciones de operación.

Además, el análisis del OEE facilita la identificación de pérdidas y áreas de mejora en el proceso productivo, lo que apoya la toma de decisiones orientadas a incrementar la eficiencia operativa de los equipos (Tortorella, 2021).

2.4.2 Tiempo Medio Entre Fallos y el Tiempo Medio de Reparación

El MTBF funciona como un termómetro de la fiabilidad, ya que mide el tiempo promedio entre una avería y otra. Cuando este valor es alto, significa que los equipos logran trabajar por largos periodos sin detenerse. Según Hallioui (2023), esta continuidad es fundamental para estabilizar el proceso productivo y asegurar que el sistema rinda al máximo de su capacidad.

En complemento, el MTTR es el tiempo promedio necesario para restablecer el funcionamiento de un equipo tras una avería. La disminución del MTTR se asocia con una recuperación operativa más ágil, una mayor disponibilidad de los activos y una menor afectación en los tiempos de producción (Agustiadya Tina, 2024).

2.4.3 Indicadores de sustentabilidad industrial aplicados a TPM

El TPM no incide únicamente en la eficiencia operativa, sino que también guarda relación con las dimensiones de la sustentabilidad industrial. Variables como el consumo energético por unidad producida, la cantidad de residuos generados o la huella de carbono asociada a las operaciones constituyen referencias útiles para evaluar el impacto ambiental de las prácticas de mantenimiento en la organización (Tortorella, 2021). Bajo esta perspectiva, el uso racional de los recursos y la reducción de desperdicios se vinculan con esquemas productivos orientados a una mayor sustentabilidad (Hallioui, 2023).

Además del desempeño técnico, los parámetros de sustentabilidad permiten examinar las implicaciones ambientales, energéticas e incluso sociales derivadas de la gestión del mantenimiento. Su consideración facilita observar cómo las decisiones asociadas al TPM repercuten en el consumo de insumos, la generación de desechos y el control de emisiones, aportando elementos complementarios para la toma de decisiones en entornos industriales con un enfoque sostenible.

Con este enfoque, incluir la sustentabilidad en el TPM ayuda a comprender sus efectos no solo en el rendimiento técnico directo, sino también en el rendimiento técnico indirecto. La conexión entre el mantenimiento y los criterios ambientales o sociales indica que la confiabilidad operativa podría contribuir a la creación de sistemas de producción más alineados con enfoques actuales, como la economía circular. Por lo tanto, el análisis del TPM desde un enfoque de sustentabilidad no solo se centra en medir la eficiencia

interna, sino que también permite evaluar cómo puede contribuir a crear modelos industriales más respetuosos con el medio ambiente y mejor organizados.

2.5. Sustentabilidad Industrial y TPM

2.5.1 Definición y principios de sustentabilidad en la industria

La sustentabilidad industrial se entiende como un enfoque de gestión que busca equilibrar el desempeño económico con las responsabilidades ambientales y sociales en las organizaciones (Agustiady Tina, 2024). Bajo esta perspectiva, la producción sostenible no solo implica mejorar el uso de los recursos, sino también disminuir el impacto ambiental y promover condiciones laborales adecuadas.

De esta manera, la sustentabilidad deja de enfocarse únicamente en la eficiencia operativa y pasa a formar parte de la toma de decisiones en los procesos productivos. Según Hallioui (2023), este enfoque se basa principalmente en tres dimensiones interrelacionadas: la económica, la ambiental y la social. El equilibrio entre estas áreas puede influir en la permanencia y competitividad de las organizaciones a largo plazo.

2.5.2 Cómo el TPM contribuye a la reducción de desperdicios y optimización de recursos

El TPM puede vincularse con la sustentabilidad en la medida en que favorece condiciones operativas más estables, reduce la ocurrencia de fallas y limita las pérdidas en el sistema productivo. La implementación de prácticas como el mantenimiento autónomo y el mantenimiento planificado contribuye a un uso más racional de los insumos, a la reducción de residuos y al control de desechos potencialmente peligrosos (Nakajima, 1988). Asimismo, cuando los equipos operan con parámetros adecuados, se tiende a mejorar el aprovechamiento energético y a mitigar los efectos ambientales derivados de las ineficiencias en los procesos (Tortorella, 2021).

2.5.3 Impacto del TPM en la eficiencia energética y reducción de costos operativos

Uno de los efectos más relevantes del TPM se observó en el desempeño energético de los procesos productivos. Cuando los equipos reciben mantenimiento sistemático, tienden a operar con mayor estabilidad, lo que se refleja en un menor consumo de energía y en una menor cantidad de intervenciones correctivas. Esta condición no solo repercute en la

contención de costos operativos, sino también en la reducción de la huella de carbono asociada a la operación industrial (Agustiady Tina, 2024).

Asimismo, la incorporación de herramientas digitales, como el Internet de las Cosas (IoT) y los esquemas de mantenimiento predictivo, facilita el seguimiento del comportamiento energético de los equipos y permite realizar ajustes oportunos en las variables de operación. De este modo, se favorece un uso más eficiente de la energía en el sistema productivo (Halloui, 2023).

2.5.4 Reducción de residuos y huella de carbono con TPM

Una gestión estructurada del mantenimiento contribuye a reducir los desperdicios derivados de fallas recurrentes y de defectos en la producción. Al reducirse la frecuencia de reparaciones mayores y de reemplazos prematuros de componentes, se limita la generación de residuos industriales y de emisiones asociadas a procesos ineficientes (Tortorella, 2021).

De igual forma, el control técnico de insumos como lubricantes, refrigerantes y otros materiales auxiliares permite evitar consumos innecesarios y disminuir la generación de desechos potencialmente peligrosos. En conjunto, estas prácticas favorecen entornos de manufactura más limpios y alineados con criterios de sustentabilidad (Nakajima, 1988)

2.5.5 Relación entre TPM y economía circular

La articulación entre el TPM y los principios de la economía circular puede comprenderse a partir de su incidencia en la gestión del ciclo de vida de los activos industriales. Al priorizar estrategias preventivas y predictivas, el mantenimiento contribuye a preservar la funcionalidad de los equipos, lo que potencialmente reduce la obsolescencia prematura y la necesidad de reemplazos frecuentes. En este sentido, la extensión de la vida útil de la maquinaria no solo impacta en la confiabilidad operativa, sino que también incide en la reducción de residuos y en un uso más racional de los recursos productivos (Nakajima, 1988).

La literatura reciente sugiere que los efectos del TPM trascienden la mejora de la disponibilidad y de la fiabilidad técnica, al relacionarse con resultados vinculados a la

sustentabilidad industrial. La reducción de desperdicios, la mitigación de emisiones y la reutilización de componentes pueden verse favorecidas cuando los sistemas de mantenimiento se integran de manera sistemática en la estrategia organizacional (Halloui, 2023).

Desde esta perspectiva, el TPM puede entenderse como un facilitador potencial de prácticas circulares, ya que articula la prevención de fallas, la estabilidad operativa y la gestión eficiente de los recursos.

Hay investigaciones que analizan este vínculo desde la teoría de los recursos (Resource-Based View). La idea central es que saber gestionar los activos y el mantenimiento no es solo una tarea técnica, sino una ventaja estratégica real (Samadhiya y Agrawal, 2023). En este escenario, el compromiso de los directivos y la participación activa de los operadores son los que realmente mueven la balanza: no solo para que la planta sea más eficiente, sino también para asegurar que los recursos se aprovechen mejor y que el impacto ambiental sea el mínimo posible.

A esto se suma el papel de la Industria 4.0, que ha traído herramientas tecnológicas que abren nuevas puertas a la producción sostenible. Gracias al monitoreo en tiempo real y a la analítica de datos, hoy es posible adelantarse a las fallas y ajustar el consumo energético con una precisión antes impensable, lo que ayuda a eliminar desperdicios en pleno proceso (Mendes et al., 2023; Tortorella, 2021). Eso sí, el éxito de esta tecnología no es igual para todos; depende mucho de la infraestructura digital de cada empresa y de qué tan bien alineen sus planes de mantenimiento con sus metas de sustentabilidad.

En conjunto, el TPM mantiene una relación estrecha con principios asociados a la manufactura esbelta y a la economía circular. La prolongación de la vida útil de los equipos, la reducción de desperdicios y el uso más eficiente de los recursos pueden favorecer modelos productivos de menor impacto ambiental.

Además, la articulación entre el mantenimiento, las herramientas digitales y las estrategias de sustentabilidad amplía las posibilidades de desarrollar sistemas industriales más resilientes y orientados a objetivos de largo plazo.

2.6. Factores Críticos de Éxito en la Implementación de TPM

La implementación efectiva del TPM en una organización no ocurre de forma automática; requiere la presencia de factores clave que favorecen su integración en la cultura operativa y su coherencia con la estrategia empresarial. Estos elementos influyen directamente en la sustentabilidad del sistema y en la obtención de resultados consistentes a lo largo del tiempo (Samadhiya y Agrawal, 2023; Shannon et al., 2023).

2.6.1 Importancia del compromiso organizacional y liderazgo

El respaldo de la alta dirección y la existencia de un liderazgo claro constituyen condiciones indispensables para que el TPM se consolide en la organización (Agustiady Tina, 2024). La consolidación del TPM suele estar asociada a la capacidad de la alta dirección para asignar recursos de manera consistente, definir objetivos estratégicos claros y promover una cultura organizacional orientada a la mejora continua. Sin este andamiaje, los esfuerzos de implementación pueden dispersarse o resultar inconsistentes, lo que reduce su impacto en el desempeño operativo.

De forma complementaria, el liderazgo distribuido a lo largo de los distintos niveles jerárquicos contribuye a fortalecer la participación del personal y a facilitar la incorporación progresiva de rutinas de mantenimiento, así como la interiorización de los principios del TPM (Halloui, 2023). Cuando mandos medios y supervisores asumen un rol activo en la coordinación de estas prácticas, suele observarse una mayor alineación entre las directrices estratégicas y la operación cotidiana.

Un liderazgo organizacional coherente también construye una visión preventiva del mantenimiento, con procesos de capacitación y seguimiento para aplicar de manera sistemática las prácticas del TPM (Tortorella, 2021). Por el contrario, la falta de compromiso gerencial se manifiesta en esfuerzos aislados, programas interrumpidos y resultados por debajo de lo esperado.

2.6.2 Capacitación y participación de los empleados en TPM

La capacitación suele considerarse un componente estratégico dentro del TPM, en la medida en que facilita que los empleados desarrollen las competencias técnicas y operativas necesarias para aplicar de manera consistente las metodologías de mantenimiento (Nakajima, 1988).

En este contexto, los procesos de capacitación suelen dirigirse tanto al personal operativo como a los niveles de supervisión y gestión, con el propósito de fortalecer el conocimiento sobre los principios del TPM y prácticas relacionadas con el mantenimiento autónomo y el mantenimiento planificado (Agustiady Tina, 2024).

Por otra parte, la participación del personal también se relaciona con la continuidad de las prácticas de mantenimiento dentro de la organización. Diversos estudios indican que involucrar a los trabajadores en actividades de mejora continua y de mantenimiento autónomo puede ayudar a disminuir las fallas y fortalecer la responsabilidad compartida en el cuidado de los equipos y activos productivos (Tortorella, 2021).

Además, algunas organizaciones que han desarrollado programas de capacitación estructurados reportan mejoras en la confiabilidad de los equipos y reducciones en los tiempos de inactividad. Sin embargo, estos resultados pueden variar según factores como el clima organizacional y el nivel de apoyo de la dirección (Halloui, 2023).

2.6.3 Identificación de barreras en la implementación de TPM

Aunque el TPM suena muy bien en teoría, llevarlo a la práctica es otro tema. En el día a día de las fábricas suelen surgir barreras que frenan su avance o hacen que se pierda el impulso con el tiempo. Estos problemas no son iguales en todas partes; aparecen tanto en la oficina como en el taller, y diversos estudios en distintos sectores industriales lo confirman.

Uno de los puntos más difíciles es la resistencia al cambio. Es normal que el personal sienta desconfianza si ve que el TPM significa simplemente "más trabajo" o si les cambian las rutinas que ya dominan. Si el operador siente que es una carga extra, terminará haciendo las cosas de forma superficial, y ahí es donde el sistema pierde toda su fuerza (Shaaban y Awni, 2014). Al final, que esta resistencia sea mayor o menor depende mucho de qué tan buena sea la comunicación interna y de si los jefes están ahí para apoyar y no solo para exigir.

Otro problema serio es la falta de alineación con la estrategia de la empresa. Si el TPM va por un lado y los objetivos del negocio por otro, lo más probable es que los esfuerzos se queden en intentos aislados que no perduren (Kaur et al., 2013). Es

básicamente una desconexión entre lo que se planea y lo que realmente se hace en las máquinas.

Tampoco podemos ignorar el tema del dinero y la tecnología. Si no hay inversión en capacitación o en buenas herramientas de diagnóstico, es muy difícil sostener el TPM a largo plazo. Esto se nota mucho más en las PYMES, donde el presupuesto siempre está apretado por las urgencias del día a día (Shaaban & Awni, 2014). Eso sí, si la empresa ya tiene un sistema de gestión sólido, estas limitaciones suelen doler menos.

Por último, está el reto de integrar el TPM con otras metodologías, como Lean o Seis Sigma. A veces, tener tantos enfoques al mismo tiempo confunde a la gente, genera papeleo adicional y no queda claro qué es la prioridad (Singh y Ahuja, 2013).

No es que sea malo combinarlos, pero para que funcione, el diseño de la organización debe ser muy coherente. En definitiva, superar estas barreras no es solo aplicar herramientas; se trata de que el liderazgo y la gestión del cambio se tomen en serio para que el TPM se vuelva parte del ADN de la empresa.

2.6.4 Estudios previos sobre factores de éxito en la adopción de TPM

Muchos autores han tratado de entender por qué algunas empresas triunfan con el TPM y otras no. Por ejemplo, Hallioui (2023) menciona que las organizaciones que logran estabilizar esta filosofía suelen tener tres cosas en común: jefes que no quitan el dedo del renglón, una cultura que busca mejorar siempre y programas de capacitación que no son solo para cumplir el expediente. Lo interesante aquí es que estos rasgos no funcionan por separado; dependen muchísimo de la situación específica de cada sector industrial.

A esto se suma lo que plantean Agustiady Tina (2024) sobre la tecnología. Ellos subrayan que meter herramientas de mantenimiento predictivo, como el Internet de las Cosas (IoT), le da un impulso enorme al TPM porque permite saber qué le pasa a la máquina en tiempo real. Pero ojo, esto no es magia: la tecnología solo sirve si la empresa tiene la madurez digital necesaria para entender esos datos y usarlos para tomar decisiones rápidas en el piso de venta.

Por otro lado, si miramos la industria manufacturera, se nota que el TPM rinde mucho más cuando se conecta con metas de sustentabilidad y ahorro de energía (Tortorella et al., 2021). Esto cambia la jugada, porque el éxito del mantenimiento ya no

se mide solo con indicadores técnicos, sino que se vuelve parte de una estrategia más grande para que la empresa sea competitiva y, al mismo tiempo, responsable con el medio ambiente.

En resumen, la literatura nos dice que el éxito del TPM no se basa en una receta única. Es más bien un equilibrio entre el liderazgo, el talento de la gente y el grado en que el mantenimiento se integra con otras iniciativas de la empresa. Al final, el TPM es un marco flexible; su efectividad real depende de que el diseño del programa encaje con la realidad y las condiciones de cada planta.

2.7. Integración de TPM con la Industria 4.0

Es innegable que el avance digital ha transformado por completo la forma de hacer mantenimiento en la industria. Hoy, el TPM está dejando atrás los métodos tradicionales para moverse hacia un modelo mucho más conectado y basado en datos, lo que encaja perfectamente con la visión de la Industria 4.0.

Pero este cambio no se trata solo de comprar tecnología o instalar sensores. Según Hallioui (2023), estamos ante una verdadera reconfiguración de cómo se gestiona el mantenimiento. Al integrar herramientas como el IoT, el Big Data o incluso la inteligencia artificial, las empresas no solo buscan anticiparse a las averías, sino también optimizar el uso de sus recursos y ser mucho más eficientes en su operación diaria.

2.7.1 Uso de Internet de las Cosas (IoT) y Big Data en TPM.

Incorporar el IoT a las rutinas de mantenimiento ha cambiado las reglas del juego, principalmente porque permite generar un flujo constante de datos en tiempo real. Esto es, en esencia, lo que sostiene hoy en día a los modelos predictivos (Tortorella, 2021). Al usar sensores para monitorear variables como la temperatura, la vibración o el gasto de energía, es posible adelantarse al desgaste de las máquinas y prever cuándo podrían fallar. Eso sí, hay que ser claros: la precisión de estas predicciones no es mágica; depende totalmente de qué tan buenos sean los datos recolectados y de los modelos que se usen para analizarlos.

Por otro lado, el Big Data es lo que permite darle sentido a ese volumen masivo de información. Como señalan Agustiady Tina (2024), esta capacidad analítica sirve para

encontrar patrones de uso o fallas ocultas que a simple vista pasarían desapercibidas. Sin embargo, el valor estratégico de contar con todos esos datos solo se nota si la empresa tiene la capacidad interna para traducir esos números en decisiones técnicas concretas. Cuando esta conexión entre datos y operación funciona bien, se empieza a notar una mejora clara en la disponibilidad de los equipos y, lógicamente, una caída en los costos y en esos tiempos muertos que tanto afectan a la producción.

2.7.2 Beneficios y desafíos de la digitalización del mantenimiento.

Entre los principales beneficios de digitalizar el TPM se encuentran:

- Mayor precisión en la detección de fallas.
- Disminución de paros no programados.
- Reducción del costo total de mantenimiento.
- Optimización del inventario de refacciones.

Mejora en la planeación de recursos y de tiempos de intervención (Hallioui, 2023).

Sin embargo, la migración hacia esquemas de mantenimiento digitalizados también enfrenta obstáculos organizacionales y técnicos que dificultan su consolidación. Entre las barreras más mencionadas en la literatura se encuentran la falta de infraestructura tecnológica, las resistencias culturales al cambio y la escasez de personal capacitado en datos. Dichas circunstancias pueden entorpecer la implementación de prácticas avanzadas de mantenimiento predictivo, especialmente en empresas con menor madurez digital (Tortorella, 2021).

2.7.3 Ejemplos de integración tecnológica en empresas manufactureras.

Diversos estudios de caso han documentado experiencias de integración del TPM en entornos digitalizados. En industrias como la automotriz o la metalmecánica, la instalación de sensores inteligentes en las líneas de producción ha permitido obtener información en tiempo real sobre el rendimiento de los motores y de los sistemas hidráulicos. En ciertos escenarios, se han reportado casos en los que esta estrategia logra reducir los tiempos de inactividad hasta en un 30%, aunque esa cifra no es una regla fija; depende muchísimo de qué tan estandarizados estén los procesos y de la fiabilidad de los modelos de análisis (Agustiady Tina, 2024).

Por otra parte, el uso de plataformas en la nube ha sido un gran avance para monitorear los activos a distancia, lo que permite que los equipos técnicos y de operación se coordinen de forma mucho más ágil. Al unir el TPM con estas herramientas digitales, no solo mejoran los números de disponibilidad, sino que también se da un paso importante hacia la sustentabilidad. Como menciona Hallioui (2023), esto ocurre porque se logra un control más fino del consumo de energía y se desperdicia menos material. Eso sí, el alcance real de estos beneficios siempre estará sujeto a qué tan bien logre la empresa absorber la tecnología y alinearla con su estrategia general

2.8. Estudios Previos sobre TPM y Sustentabilidad

La relación entre el TPM y el cuidado del entorno ha sido un tema recurrente en la investigación industrial reciente. Los datos indican que no se trata solo de que las máquinas funcionen bien; aplicar el TPM de forma sistemática ayuda a bajar el impacto ambiental, mejora el uso de la energía y eleva el perfil sostenible de la empresa Tortorella (2021). Eso sí, hay que ser claros: estos beneficios no caen del cielo, sino que dependen totalmente de qué tan bien se logre conectar el mantenimiento con la estrategia ambiental de la compañía.

2.8.1 Estudios internacionales sobre la relación entre TPM y la sustentabilidad.

Experiencias en países como Japón, Alemania y Brasil han demostrado que el TPM es una herramienta efectiva para dejar de desperdiciar recursos. En Brasil, por ejemplo, (Tortorella, 2021) observó que las plantas que adoptaron el TPM no solo tenían máquinas más disponibles, sino que gastaban menos luz y agua. Pero ojo: estos resultados no fueron casualidad; las empresas ya contaban con sistemas de medición ambiental bien establecidos.

En el caso de Alemania, estudios recientes de Hallioui (2023), muestran que combinar el mantenimiento preventivo con el predictivo ayuda directamente a bajar la huella de carbono y el desperdicio de materiales. Lo que esto nos dice, desde una visión más amplia, es que el impacto ambiental positivo no es un "efecto automático" del TPM, sino el fruto de saber unir el mantenimiento con un seguimiento riguroso de indicadores verdes.

2.8.2 Aplicaciones de TPM en diferentes sectores industriales.

Hoy vemos que el TPM se aplica con éxito en sectores muy variados, desde el farmacéutico hasta el textil. En la industria de la impresión, se ha visto que ayuda a tirar menos papel y tinta, además de ahorrar energía, siempre que se trabaje de la mano con el control de calidad (Cost reduction and quality improvements in the printing industry, 2017). No obstante, que esto funcione en una planta y en otra no, depende mucho de qué tan disciplinada sea la operación y de qué tan estandarizados estén sus procesos.

En el sector de alimentos, por ejemplo, el enfoque en la limpieza y el mantenimiento planeado ha sido clave para reducir residuos y mejorar la trazabilidad (Hallioui, 2023). Aquí el TPM no solo ayuda a la eficiencia, sino que se vuelve un aliado para cumplir con normas de seguridad y medio ambiente, integrándose en un sistema de gestión mucho más robusto.

2.8.3 Estudios que analizan el impacto ambiental de TPM.

Lo que la literatura más reciente nos sugiere es que el TPM se vuelve un verdadero motor de sustentabilidad cuando se le añaden métricas ambientales. Si la empresa empieza a medir el consumo de energía por cada unidad que fabrica o cuánta basura genera realmente, es mucho más fácil encontrar dónde se puede mejorar (Tortorella, 2021). Pero con la efectividad de estos números depende de que los sistemas de información sean confiables y de que no se deje de medir a mitad del camino.

En definitiva, el TPM ha dejado de ser una simple técnica para que las máquinas no se rompan; hoy es parte de una estrategia para ser competitivo sin dañar el entorno. Al final, los avances reales vendrán de la coherencia entre el liderazgo de la empresa, una cultura que respalde estos cambios y que los indicadores ambientales se tomen tan en serio como los de producción.

2.9 Creación y validación del cuestionario

Crear un cuestionario no es solo redactar preguntas; en la investigación aplicada, es una etapa crítica donde se busca "aterrizar" conceptos complejos como el TPM y la sustentabilidad en datos reales. No basta con formular reactivos; se trata de un proceso sistemático para traducir la teoría en variables que realmente se puedan medir y analizar estadísticamente. En estudios donde lo que medimos son percepciones y conductas del

personal, la calidad de esta herramienta es lo que sostiene la validez de todo el análisis posterior.

En estudios organizacionales, en los que predominan variables perceptuales y comportamentales, la solidez del instrumento determina directamente la validez de las inferencias posteriores.

Cuando hablamos de medir liderazgo, mantenimiento autónomo o desempeño sostenible, necesitamos que el cuestionario capture lo que pasa de verdad en la planta, no solo lo que dicen los manuales. Como bien señalan autores como Hair (2022) y DeVellis (2017) la confiabilidad del instrumento es el primer paso para que los resultados sean estables. Eso sí, no hay que olvidar que un cuestionario que funciona en un sector puede no encajar en otro, por lo que siempre hace falta una adaptación cuidadosa al contexto industrial donde se va a aplicar.

2.9.1 Creación de cuestionarios

Diseñar un cuestionario es, en realidad, un proceso de ida y vuelta donde se mezcla la teoría con la experiencia de campo. El punto de partida suele ser la revisión de literatura para identificar escalas que ya hayan demostrado funcionar en estudios previos (Boateng, 2018). Esto ayuda a que los ítems tengan un respaldo sólido y a evitar confusiones en el lenguaje técnico.

Sin embargo, copiar y pegar escalas de otros países o industrias puede traer sesgos. Por eso, es fundamental recurrir a expertos temáticos para que evalúen si las preguntas son claras y realmente vienen al caso. Aquí es muy útil usar el índice de Lawshe (1975) para ponerle un número al acuerdo entre especialistas. Pero seamos realistas: aunque el juicio de expertos ayuda mucho, nunca elimina del todo la subjetividad, por lo que hace falta dar un paso más.

Ahí es donde entran las pruebas piloto con la población real. Aplicar el cuestionario a un grupo pequeño permite detectar si hay términos confusos o si las escalas Likert se entienden bien. A veces, un operario interpreta un concepto técnico de forma distinta a un gerente (Hair, 2022) y detectar estas brechas a tiempo es lo que hace que el diseño sea dinámico y no una etapa cerrada de oficina.

2.9.2 Validación de cuestionarios

Una vez recolectados los datos, toca comprobar estadísticamente si las preguntas representan bien a los conceptos teóricos. Lo primero es la confiabilidad interna, que solemos medir con el alfa de Cronbach o la confiabilidad compuesta. Lo estándar es buscar valores arriba de 0.70 (Hair, 2022), aunque si los números son exageradamente altos, hay que tener cuidado: podría significar que estamos preguntando lo mismo varias veces de forma redundante.

Para la validez convergente, usamos la Varianza Media Extraída (AVE), que nos dice qué tanta varianza del concepto logra captar sus indicadores. El mínimo suele ser 0.50 (Fornell, 1981), pero este dato no se debe ver solo; también hay que revisar las cargas factoriales de cada ítem, porque un buen AVE no compensa si hay preguntas que aportan muy poco al modelo.

Finalmente, para asegurar que los conceptos no se mezclen entre sí, revisamos la validez discriminante con el criterio de Fornell-Larcker y el índice HTMT. Este último, propuesto por Henseler et al. (Henseler et al., 2015), es especialmente estricto y útil cuando estudiamos variables que se parecen mucho, como la cultura organizacional y el compromiso de personal.

Aplicar estos procedimientos con rigor es lo que permite fortalecer la robustez del instrumento y justifica el uso de técnicas más complejas, como el Modelado de Ecuaciones Estructurales o los enfoques PLS-SEM (Díaz-Reza et al., 2018). Pero hay que ser realistas: la validación estadística no es una garantía absoluta. Al final, qué tanto podamos generalizar estos hallazgos siempre va a depender del tamaño de la muestra, de la diversidad de las empresas analizadas y de las condiciones específicas en que se aplique el estudio.

En definitiva, todo este proceso de creación y validación es la base necesaria para que el TPM y la sustentabilidad estén bien representados en la investigación. Solo contando con medidas que sean realmente confiables es que podemos lanzarnos a explorar, mediante modelos estructurales, si existe una verdadera relación de causa y efecto entre los factores de éxito y el desempeño sostenible de la organización

2.10 Modelado de ecuaciones estructurales

El modelado de ecuaciones estructurales (SEM) no es simplemente una herramienta estadística más; es un marco que nos permite evaluar, al mismo tiempo, cómo medimos nuestras variables y cómo se relacionan entre sí. A diferencia de las regresiones comunes, el SEM tiene la ventaja de integrar dos mundos en un solo sistema: el modelo de medida, que conecta lo que observamos con los conceptos abstractos, y el modelo estructural, que pone a prueba las relaciones de causa y efecto que planteamos en la teoría (Hair, 2022)

Esta herramienta es sumamente valiosa para estudiar fenómenos como el TPM y la sustentabilidad industrial, donde los resultados no dependen de una sola variable, sino de interacciones complejas entre la gestión, la cultura y la operación. El SEM nos permite modelar efectos directos e indirectos al mismo tiempo, lo que facilita la detección de mecanismos explicativos que suelen quedar ocultos en los modelos lineales tradicionales. Eso sí, hay que ser claros: la validez de los resultados depende totalmente de la coherencia del diseño conceptual inicial; el SEM no sustituye a la teoría, sino que la pone a prueba bajo supuestos estadísticos rigurosos.

2.10.1 Teoría de SEM

Desde un punto de vista metodológico, el funcionamiento del SEM se divide en dos componentes que trabajan en conjunto. Por una parte, el modelo de medida se asegura de que los ítems del cuestionario realmente reflejen a los constructos que queremos analizar. Por otra parte, el modelo estructural entra en juego para examinar la fuerza y la dirección de las hipótesis que hemos planteado (Hair, 2022).

Una de las grandes aportaciones de este método es que incorpora explícitamente el error de medición. En la investigación organizacional, donde variables como el liderazgo o la sustentabilidad no se pueden medir con una regla física, dependemos de escalas de percepción. El SEM reconoce que estas mediciones no son perfectas, lo que ayuda a reducir el sesgo y nos ofrece una visión más realista de los datos (Fornell, 1981).

En la práctica, el enfoque de mínimos cuadrados parciales (PLS-SEM) ha ganado mucha popularidad por ser flexible con el tamaño de las muestras y por no exigir una distribución normal de los datos (Hair, 2022). No obstante, es importante entender que el PLS-SEM prioriza explicar la varianza por encima de buscar un ajuste global perfecto del

modelo. Por este motivo, su uso debe estar bien justificado; en nuestro estudio, donde buscamos predecir cómo los factores del TPM afectan la sustentabilidad en entornos industriales específicos, este enfoque resulta ser el más adecuado.

2.10.2 Tipos de variables en SEM

Dentro del SEM, los conceptos que estudiamos se definen como variables latentes, ya que son fenómenos que no pueden observarse directamente. Para darles forma, utilizamos indicadores observados, que, en nuestro caso, son los ítems del cuestionario. Estructuralmente, el modelo separa estas variables en dos tipos: exógenas y endógenas. Las exógenas son las que inician el proceso (las predictoras), mientras que las endógenas son las que reciben el efecto y reflejan los resultados del sistema.

En esta investigación, los factores de éxito del TPM se configuran como variables exógenas, mientras que las dimensiones de la sustentabilidad —ambiental, social y económica— actúan como variables endógenas. Esta clasificación no es un simple detalle técnico; es una decisión de diseño teórica que, si se hace mal, puede arruinar la interpretación de todo el modelo (Hair, 2022; Kock, 2023). Por eso, la distinción entre lo que predice y lo que es predicho debe tener una base lógica sólida antes de tocar el software estadístico.

2.10.3 Efectos entre variables

La verdadera potencia del SEM radica en su capacidad para desmenuzar cómo se transmiten los efectos en el modelo. Los efectos directos nos muestran la influencia inmediata de una variable sobre otra, pero en las empresas las relaciones suelen ser más enredadas. Aquí es donde los efectos indirectos cobran importancia, ya que emergen cuando la influencia se transmite a través de un "mediador". Por ejemplo, podríamos encontrar que el compromiso de la dirección no impacta la sustentabilidad de golpe, sino que lo hace a través de mejorar primero la capacitación del personal.

Además, el modelo permite analizar los efectos de mediación y moderación (Henseler et al., 2015). La mediación nos dice si una variable intermedia explica la relación entre otras dos, mientras que la moderación nos indica si la intensidad de una relación cambia dependiendo de una tercera variable. Todo esto permite construir un

marco de análisis integral para la ingeniería industrial, que muestra cómo las prácticas de gestión y las capacidades de la organización se traducen en resultados sostenibles dentro de un sistema productivo real (Díaz-Reza et al., 2018).

Al final, la elección del enfoque PLS-SEM se sustenta en el objetivo de evaluar hasta qué punto los factores del TPM pueden predecir las dimensiones de la sustentabilidad. Aun así, los hallazgos deben interpretarse con cautela, reconociendo que trabajamos con un diseño transversal y datos perceptuales, lo que siempre requiere prudencia al establecer conclusiones sobre causalidad.

2.11 Enfoque de mínimos cuadrados parciales (PLS)

La decisión de emplear el modelado de ecuaciones estructurales mediante mínimos cuadrados parciales (PLS-SEM) como eje analítico responde a las necesidades específicas de la arquitectura teórica y los datos de esta investigación. A diferencia de las metodologías basadas en covarianzas (CB-SEM), la lógica del PLS-SEM prioriza la optimización de la varianza explicada de las variables endógenas. Esta característica resulta determinante cuando el interés del investigador no es solo la confirmación de una teoría previa, sino la exploración de nexos complejos y la capacidad predictiva del modelo (Hair, 2022).

Si bien herramientas tradicionales como la regresión lineal múltiple son comunes en el estudio de fenómenos organizacionales, su alcance se ve limitado al no permitir la gestión explícita del error de medición ni el modelado de constructos latentes. Por otro lado, aunque el CB-SEM es robusto para la validación teórica, impone restricciones severas en cuanto a la normalidad de los datos y el volumen muestral. En este escenario, el PLS-SEM surge como una alternativa más versátil, especialmente en el campo de la ingeniería industrial, donde los datos a menudo no cumplen con distribuciones paramétricas estrictas y se busca entender cómo variables de gestión impactan directamente en indicadores de rendimiento (Kock, 2023).

Desde una óptica metodológica, se ha valorado la flexibilidad del método para operar con escalas de tipo Likert y muestras de tamaño moderado, sin sacrificar la rigurosidad. No obstante, es preciso señalar que el uso de PLS-SEM implica un cambio de paradigma: se transita de la búsqueda del ajuste global del modelo a un enfoque

centrado en la relevancia predictiva. Esta versatilidad ha favorecido su adopción en estudios recientes sobre manufactura esbelta y TPM, lo que permite abordar fenómenos multidimensionales y constructos de reciente aparición, como la integración digital en el mantenimiento o la sustentabilidad social (Chundhoo, 2025).

El proceso de evaluación se ha estructurado en la secuencia clásica de dos fases. Inicialmente, se somete a examen el modelo de medida para garantizar que los constructos posean la validez y fiabilidad necesarias. Para la consistencia interna, se han tomado como referencia el alfa de Cronbach y la confiabilidad compuesta (CR), observando el umbral de 0.70 sugerido por (Hair, 2022)

Complementariamente, la validez convergente se verifica a través de la Varianza Media Extraída (AVE), asegurando que cada constructo capture al menos el 50% de la varianza de sus ítems. Para la validez discriminante, se ha optado por el uso combinado del criterio de Fornell-Larcker y el ratio HTMT, siendo este último fundamental para descartar solapamientos conceptuales entre dimensiones.

Finalmente, una vez validado el instrumento, el análisis se traslada al modelo estructural. En esta etapa, el foco se desplaza hacia los coeficientes de determinación R^2 y la significancia de las trayectorias (*path coefficients*). Para robustecer las conclusiones sobre la utilidad del modelo, se incorporan métricas de diagnóstico como el estadístico Q^2 y el procedimiento PLSpredict, garantizando que los hallazgos no solo expliquen la muestra actual, sino que posean una capacidad de anticipación válida para contextos similares en el sector industrial.

Si bien estos criterios han sido aplicados de manera consistente en estudios sobre manufactura esbelta, TPM y sustentabilidad (Kumar Sharma y Gopal Sharma, 2014), debe reconocerse que la interpretación de los resultados depende del diseño transversal del estudio y de la naturaleza perceptual de los datos recolectados. En consecuencia, los coeficientes estimados no deben considerarse evidencia concluyente de causalidad, sino como aproximaciones empíricas a relaciones teóricamente fundamentadas.

2.12 Conclusión del Marco Teórico

A lo largo de este capítulo, se han articulado los pilares teóricos que dan soporte al estudio, estableciendo un diálogo entre la filosofía de la manufactura esbelta, el TPM y los

paradigmas actuales de sustentabilidad industrial. Esta revisión permite comprender cómo el TPM ha evolucionado desde sus bases originales enfocadas en la erradicación de pérdidas y la mejora continua (Nakajima, 1988; Socconini, 2019), hasta convertirse en un sistema integral que descansa en la participación activa del factor humano como motor de cambio organizacional.

La evidencia analizada sugiere que el impacto del TPM hoy en día supera los límites del mantenimiento técnico. En la actualidad, se perfila como una estrategia de gestión con repercusiones directas en la triple cuenta de resultados: económica, ambiental y social Hallioui (2023) y Samadhiya y Agrawal (2023). No obstante, es crucial subrayar que estos resultados no se deben únicamente a la implementación de herramientas; su éxito depende de variables críticas de mediación, como el liderazgo gerencial, la formación especializada y la capacidad de absorción tecnológica de la planta. Por tanto, los beneficios del TPM deben entenderse como un proceso dinámico que varía según el contexto de cada organización.

Finalmente, la integración del TPM con la Industria 4.0 marca una frontera relevante en este marco analítico. La incorporación de tecnologías disruptivas, como el Big Data y el Internet de las Cosas (IoT), está transformando las tareas reactivas en estrategias predictivas de alta precisión (Mendes et al., 2023; Tortorella, 2021). Esta transición no solo redefine el mantenimiento, sino que consolida una toma de decisiones basada en datos, elemento que resulta fundamental para enfrentar los desafíos de competitividad y sustentabilidad que se exploran en los capítulos siguientes.

De igual forma, se han identificado factores críticos que condicionan el éxito de la implementación del TPM, entre los que destacan el liderazgo organizacional, la participación del personal y la superación de barreras culturales y estructurales (Gelaw et al., 2024; Kaur et al., 2013; Singh y Ahuja, 2013). La evidencia empírica indica que la gestión de dichos factores aumenta la probabilidad de sustentabilidad a lo largo del tiempo, aunque los resultados dependen del contexto sectorial, de la madurez organizacional y de la disponibilidad de recursos.

Metodológicamente, el modelado de ecuaciones estructurales, en particular bajo el enfoque PLS-SEM, permite verificar empíricamente las relaciones planteadas entre los

factores clave del TPM y las dimensiones de la sustentabilidad industrial. Esta forma de abordaje puede combinar en un único sistema explicativo variables técnicas, organizacionales y sociales, reforzando la coherencia entre la formulación teórica y el diseño empírico de la investigación.

En síntesis, el marco teórico desarrollado establece los fundamentos conceptuales y metodológicos que orientan la formulación de las hipótesis y el modelo estructural propuesto. Sobre esta comprensión, los capítulos que siguen ahondarán en el diseño metodológico y en la evidencia empírica para intentar esclarecer la contribución del TPM como estrategia holística en la transformación hacia modelos de producción más sostenibles y competitivos.

En función de las características del problema de investigación, del tipo de variables analizadas y del enfoque predictivo del estudio, se considera que el uso de PLS-SEM constituye una alternativa metodológica adecuada. Este enfoque permite modelar relaciones complejas entre factores críticos del TPM y dimensiones de la sustentabilidad industrial, incorporando tanto efectos directos como indirectos, lo que resulta coherente con los objetivos planteados en la investigación.

Finalizada la revisión de la literatura, el capítulo posterior expone la ruta metodológica seguida, justificando la selección de la muestra y el procedimiento estadístico utilizado para validar el modelo propuesto.

Metodología

En este capítulo se explica el diseño metodológico seguido para realizar la investigación titulada "Impacto del Mantenimiento Productivo Total en la sustentabilidad industrial". El propósito es explicar con claridad cómo se llevará a cabo el estudio, las herramientas empleadas y el procedimiento seguido para analizar las relaciones entre los factores críticos de éxito del TPM y las dimensiones de la sustentabilidad industrial. La metodología se formuló con un enfoque cuantitativo, ya que la investigación pretende medir, modelar y analizar los datos recolectados mediante un cuestionario estructurado aplicado al personal de la industria maquiladora en Ciudad Juárez, Chihuahua.

El instrumento considera variables relacionadas con las prácticas de TPM y con los distintos componentes de la sustentabilidad: social, económico, ambiental y digital.

En el capítulo se abordan el tipo de investigación, el diseño y la validación del cuestionario, la caracterización de la muestra, la recolección y limpieza de datos, y la explicación del método estadístico para modelar las relaciones causales entre las variables planteadas. En este capítulo se describe, además, la estructura del mismo, los criterios utilizados para la validación de los constructos y la evaluación del modelo estructural mediante ecuaciones estructurales por mínimos cuadrados parciales (PLS-SEM).

Para resumir, este capítulo define el marco metodológico para determinar estadísticamente el impacto del TPM en cada una de las dimensiones de la sustentabilidad industrial, ofreciendo una perspectiva holística sobre cómo el mantenimiento productivo es una herramienta de competitividad y sustentabilidad en la industria manufacturera de Ciudad Juárez.

3.1 Enfoque general del estudio y diseño del instrumento

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, sustentado en la recopilación y el análisis de datos numéricos obtenidos mediante un instrumento estructurado aplicado a trabajadores del sector maquilador en Ciudad Juárez, Chihuahua. Este enfoque permite examinar objetivamente las relaciones entre los factores críticos de éxito en la implementación del TPM y las dimensiones de la sustentabilidad industrial, en particular en los ámbitos social y económico.

El diseño del estudio es de tipo no experimental, transversal y de alcance correlacional-explicativo, en virtud de que las variables analizadas no fueron manipuladas y la información se recolectó en un único momento. Bajo este esquema, los fenómenos se observan en su contexto natural, lo que permite identificar patrones de asociación y estimar la intensidad de las relaciones entre los constructos involucrados (Hair, 2022).

El carácter explicativo del estudio radica en analizar la interacción entre diversos factores críticos de éxito para el TPM, tales como el compromiso de la dirección, la participación de los trabajadores y la capacitación continua, en relación con las dimensiones social y económica de la sustentabilidad. En este sentido, se busca aportar evidencia empírica que permita comprender cómo dichas prácticas organizacionales se relacionan con el desempeño sustentable en entornos productivos.

3.2 Identificación de factores a partir de la literatura

La definición de los constructos considerados en el presente estudio se basó en una revisión de la literatura especializada sobre TPM y sustentabilidad industrial, con el propósito de identificar los factores consistentemente reportados en investigaciones empíricas en contextos manufactureros. Dicho análisis permitió identificar un conjunto de prácticas organizacionales vinculadas a la implementación del TPM, que han demostrado incidencia en el desempeño operativo y organizacional (Ahuja, 2007; Singh y Ahuja, 2013).

A partir de esta revisión, se delimitaron factores críticos de éxito del TPM, tales como el compromiso de la dirección, la participación activa de los trabajadores y la capacitación continua, ampliamente documentados como elementos relevantes para mejorar la eficiencia, la confiabilidad de los sistemas productivos y la estabilidad organizacional (Morales Méndez, 2017; Pinto, 2020).

De manera concomitante, se identificaron las dimensiones de la sustentabilidad pertinentes para el estudio, centrándose en los ámbitos social y económico, en función de su relevancia en entornos industriales y de su relación con el desempeño organizacional sostenible (García Alcaraz et al., 2022).

El proceso de revisión permitió establecer una base conceptual para la operacionalización de los constructos, garantizando que el diseño del instrumento de

medición se sustentara en evidencia empírica previa y en marcos teóricos consolidados. En consecuencia, los ítems del cuestionario se formularon mediante la adaptación de escalas previamente utilizadas en estudios similares, lo que contribuye a fortalecer la consistencia y la validez del instrumento en el contexto analizado (Hair, 2022; Henseler et al., 2015).

3.3 Diseño y aplicación del cuestionario

Para la recolección de información se diseñó un cuestionario estructurado titulado “Factores críticos de éxito y su relación con la sustentabilidad industrial”, con el propósito de identificar el grado de implementación de las prácticas del TPM y su relación con las dimensiones de la sustentabilidad industrial.

El instrumento fue elaborado tomando como base la literatura especializada en manufactura esbelta, mantenimiento productivo y sustentabilidad (Agustiady Tina, 2024; Nakajima, 1988; Samadhiya y Agrawal, 2023; Socconini, 2019), e integra constructos teóricos derivados de los factores críticos de éxito del TPM y de las dimensiones de la sustentabilidad industrial: social, económica, ambiental y digital.

El cuestionario se compone de 74 ítems organizados en 14 dimensiones latentes que reflejan tanto las prácticas operativas y gerenciales del TPM como los efectos percibidos sobre la sustentabilidad de las empresas. Las dimensiones incluidas son las siguientes:

1. Compromiso de la Dirección y Cultura Organizacional
2. Participación Activa de Todos los Niveles
3. Capacitación Continua
4. Implementación del Mantenimiento Autónomo
5. Enfoque en la Eliminación de Pérdidas
6. Colaboración Interdepartamental
7. Estándares Claros de Mantenimiento
8. Gestión de Datos y Retroalimentación
9. Sustentabilidad y Mejora Continua
10. Seguridad y Ergonomía
11. Sustentabilidad Económica

12. Sustentabilidad Social

13. Sustentabilidad Ambiental

14. Sustentabilidad Digital

Cada ítem fue redactado en forma de afirmación para medir el grado de acuerdo o la frecuencia de ciertas prácticas. Se utilizaron dos escalas tipo Likert de cinco puntos:

- **Escala de acuerdo:** de 1 (totalmente en desacuerdo) a 5 (totalmente de acuerdo).
- **Escala de frecuencia:** de 1 (nunca) a 5 (siempre).

Este tipo de escala permite captar con precisión las percepciones del personal sobre la implementación del TPM y facilita su análisis estadístico posterior mediante técnicas multivariadas (DeVellis, 2017).

El cuestionario incluyó una sección inicial de consentimiento informado, en la que se explicó que la participación era voluntaria y anónima, y que los datos serían tratados exclusivamente con fines académicos. Este apartado también garantizaba la confidencialidad de la información y solicitaba el consentimiento explícito del participante antes de continuar.

Posteriormente, se incorporó una sección de datos generales del participante, que permitió caracterizar la muestra según variables demográficas y laborales, tales como:

- Puesto de trabajo.
- Años de experiencia en la industria.
- Sector industrial.
- Tamaño de la empresa (pequeña, mediana o grande).
- Área de desempeño (producción, mantenimiento, calidad, seguridad, etc.).
- Nivel de conocimiento sobre TPM (nulo, básico, intermedio o avanzado).

Tras esta sección, se presentaron los 74 ítems distribuidos entre los 14 constructos mencionados. Por ejemplo:

1. En el Compromiso de la Dirección y Cultura Organizacional se incluyeron afirmaciones sobre el liderazgo, la comunicación de la visión de TPM, la existencia de políticas y el seguimiento del desempeño.

2. En Participación Activa de Todos los Niveles, se midieron prácticas relacionadas con los incentivos, los círculos de calidad y la comunicación entre turnos.
3. En Sustentabilidad Ambiental y Sustentabilidad Digital, se incluyeron ítems sobre la reducción del consumo energético, el uso de tecnologías IoT, la automatización y la digitalización de los registros.

El instrumento fue validado mediante el juicio de expertos, siguiendo el procedimiento propuesto por Lawshe (1975) para determinar la validez de contenido. Participaron académicos de ingeniería industrial y profesionales del sector maquilador, quienes evaluaron la pertinencia, la claridad y la congruencia de cada ítem.

Posteriormente, se aplicó una prueba piloto a un grupo reducido de trabajadores del mismo sector, con el fin de verificar la comprensión de los reactivos y ajustar la redacción o la secuencia, de ser necesario. Esta etapa permitió confirmar la claridad de las preguntas y la consistencia del formato digital.

El cuestionario final se aplicó en formato electrónico mediante Google Forms entre marzo y abril de 2025. La población objetivo fue la de empleados activos de la industria maquiladora de Ciudad Juárez, pertenecientes a distintas áreas operativas y de gestión.

La recolección de datos se realizó bajo el principio de anonimato, sin solicitar información personal sensible ni los nombres de las empresas. Además, se informó que los resultados se analizarían de forma agregada y confidencial, conforme a los lineamientos éticos de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ).

3.4 Población, muestra y depuración de datos

La población objetivo de esta investigación corresponde a los trabajadores de la industria maquiladora de Ciudad Juárez, Chihuahua, que laboran en áreas relacionadas con la producción, el mantenimiento, la calidad, la ingeniería y la seguridad industrial. Este sector representa uno de los principales motores económicos de la región y constituye un entorno propicio para analizar la implementación del TPM y su relación con las dimensiones de la sustentabilidad industrial.

El estudio utilizó un muestreo no probabilístico por conveniencia, debido a la naturaleza práctica del acceso a los participantes y a la disponibilidad de las empresas para colaborar con el proyecto. Este tipo de muestreo es común en investigaciones aplicadas de ingeniería industrial y gestión organizacional, donde se requiere la participación de personal con experiencia directa en procesos productivos (Hair, 2022)

En total, se recopilaron 302 cuestionarios respondidos por trabajadores activos del sector maquilador. No obstante, antes de realizar el análisis estadístico, se llevó a cabo un proceso de depuración de datos para asegurar la calidad y la confiabilidad de la información.

La depuración consideró los siguientes criterios:

1. Verificación de completitud: se eliminaron los cuestionarios con omisiones o respuestas incompletas en más del 10 % de los ítems.
2. Revisión de consistencia interna: se descartaron respuestas con una desviación estándar menor que 0.5, ya que reflejan una falta de variabilidad o una posible falta de atención por parte del participante.
3. Identificación de respuestas atípicas: se revisaron casos con patrones incoherentes o inconsistentes con el resto de la muestra, y se eliminaron para mantener la homogeneidad de los datos.
4. Validación de la varianza por constructo: se comprobó que cada cuestionario presentaba una dispersión adecuada en las escalas, evitando patrones uniformes que afectaran la validez del análisis.

Como resultado de este proceso, se excluyeron 59 cuestionarios, después de aplicar estos filtros, se obtuvieron 243 cuestionarios válidos, que constituyen la muestra final de análisis. Este tamaño muestral resulta adecuado para el método PLS-SEM, ya que supera el número mínimo recomendado por la “regla de las diez veces” (*ten times rule*), que establece que la muestra debe ser al menos diez veces el número máximo de relaciones estructurales que convergen en un constructo del modelo (Hair, 2022).

Asimismo, Kline (2016) señala que, para modelos de complejidad moderada, con entre seis y diez constructos, una muestra superior a 200 casos garantiza la estabilidad de las estimaciones. En consecuencia, los 243 cuestionarios válidos proporcionan una base

estadística sólida para estimar la fiabilidad, la validez y las relaciones estructurales en los tres modelos de sustentabilidad.

La muestra incluye participantes de distintos niveles jerárquicos, como operadores, técnicos, ingenieros, supervisores y mandos medios, lo que permite obtener una visión más amplia y representativa del impacto del TPM en el entorno industrial. Los datos validados se almacenaron en formato Microsoft Excel y, posteriormente, se procesaron en WarpPLS v.8 para el análisis estructural.

3.5 Procedimiento de recolección de datos

La recolección de datos se realizó mediante un cuestionario en formato digital, a través de la plataforma Google Forms. Esta herramienta permitió distribuir el instrumento de manera eficiente y alcanzar a trabajadores de distintos turnos y plantas de la industria maquiladora de Ciudad Juárez, Chihuahua.

Antes de iniciar el cuestionario, se incluyó una sección de consentimiento informado, en la que se explicó el propósito del estudio, la naturaleza voluntaria de la participación y el uso exclusivo de la información con fines académicos. Los participantes debían seleccionar la opción *“Sí, acepto participar y proporcionar mis respuestas”* para continuar con el cuestionario, mientras que al elegir *“No deseo participar”*, el formulario se cerraba automáticamente.

Durante la aplicación, se hizo hincapié en que todas las respuestas serían confidenciales y anónimas, sin incluir nombres personales ni de empresa, ni ningún dato sensible. Se informó, además, que los resultados se analizarían de forma agregada para proteger la identidad de los participantes y garantizar un manejo responsable de la información.

La aplicación del instrumento se realizó durante los meses de marzo y abril de 2025, en condiciones normales de operación en las empresas participantes. La población estuvo conformada por trabajadores de las áreas de producción, mantenimiento, calidad, ingeniería y seguridad industrial, quienes poseen experiencia directa en la implementación y la práctica de metodologías de mejora continua.

Al concluir el periodo de levantamiento de información, los datos fueron extraídos de la plataforma correspondiente y posteriormente transferidos a Microsoft Excel, donde

se llevó a cabo un proceso inicial de codificación y depuración. Una vez validada la consistencia de la base de datos, esta se analizó con el software WarpPLS, versión 8.0, con el fin de evaluar la fiabilidad, la validez de las variables latentes y las relaciones estructurales planteadas en el modelo PLS-SEM.

El conjunto de estas etapas permitió mantener la integridad del flujo de información, desde su recopilación hasta el análisis estadístico, asegurando la consistencia metodológica del estudio y su alineación con criterios aceptados en investigaciones aplicadas en el ámbito de la ingeniería industrial.

3.6 Validación de las variables latentes

Previo al análisis del modelo estructural, se evaluarán las variables latentes consideradas en la investigación. Esta etapa tiene como finalidad verificar que los constructos derivados del instrumento de medición presenten niveles adecuados de confiabilidad y consistencia interna, así como una representación válida de los conceptos teóricos que sustentan el estudio.

El proceso de validación se realizará mediante el software WarpPLS versión 8.0, utilizando los criterios recomendados por (Hair, 2022; Kock, 2023) para estudios basados en ecuaciones estructurales por mínimos cuadrados parciales (*Partial Least Squares Structural Equation Modeling*, PLS-SEM).

La validación se estructura en cuatro etapas principales: fiabilidad interna, validez convergente, validez discriminante y verificación de la colinealidad.

a) Fiabilidad interna

La fiabilidad interna evalúa la consistencia de las respuestas dentro de cada constructo, es decir, qué tan homogéneos son los ítems que lo integran. Para ello, se calcularán dos indicadores:

Alfa de Cronbach (α): mide la consistencia interna de los ítems. Valores iguales o superiores a 0.70 indican un nivel aceptable de consistencia, mientras que valores superiores a 0.80 se consideran buenos en estudios aplicados (Kline, 2016).

Confiabilidad compuesta (CR): refleja la estabilidad del constructo frente a los errores de medición. De acuerdo con Hair (2022), valores de $CR \geq 0.70$ confirman una adecuada fiabilidad del modelo de medida.

b) Validez convergente

La validez convergente se refiere al grado en que los ítems de un mismo constructo se correlacionan entre sí y miden el mismo concepto teórico. Este criterio se evalúa mediante el cálculo de la Varianza Media Extraída (AVE). Un valor de $AVE \geq 0.50$ indica que más del 50 % de la varianza del constructo se explica por sus indicadores, lo que refleja una adecuada convergencia (Fornell, 1981).

Además, se revisarán las cargas factoriales individuales de los ítems, que deben ser superiores a 0.60 y estadísticamente significativas, lo cual confirma la contribución de cada ítem al constructo correspondiente (Hair, 2022).

c) Validez discriminante

La validez discriminante determina si los constructos son estadísticamente distintos entre sí. Para comprobarlo, se aplicarán dos métodos complementarios:

Criterio de Fornell-Larcker: la raíz cuadrada del AVE de cada constructo debe ser mayor que las correlaciones con los demás constructos del modelo. Esto asegura que cada variable latente explica mejor sus propios indicadores que los de los demás factores (Fornell & Larcker, 1981).

El índice HTMT (Heterotrait–Monotrait Ratio), propuesto por Henseler, Ringle y Sarstedt (2015), evalúa la proporción entre las correlaciones heterogéneas y homogéneas. Valores de HTMT < 0.90 se consideran evidencia suficiente de validez discriminante.

d) Colinealidad entre constructos

Finalmente, se revisará la posible colinealidad entre constructos mediante el factor de inflación de la varianza (VIF). De acuerdo con Kock (2023), los valores de $VIF \leq 3.3$ indican ausencia de problemas de colinealidad, lo que garantiza que los constructos son independientes y que los efectos estimados en el modelo estructural no están influidos por redundancias excesivas entre variables.

En conjunto, estos procedimientos permitirán confirmar que las variables latentes empleadas en el modelo son válidas, consistentes y estadísticamente adecuadas para el análisis estructural. La validación de los constructos constituye una etapa fundamental en el enfoque PLS-SEM, ya que garantiza la calidad de las mediciones antes de interpretar

las relaciones causales entre los factores del TPM y las dimensiones de la sustentabilidad industrial.

Los resultados de esta validación se presentarán en el capítulo siguiente, donde se analizarán los modelos estructurales correspondientes a cada dimensión de la sustentabilidad.

3.7 Modelado de ecuaciones estructurales (PLS-SEM)

Una vez establecidas la fiabilidad y la validez de las variables latentes, el análisis de las relaciones estructurales se desarrollará mediante el Modelado de Ecuaciones Estructurales basado en Mínimos Cuadrados Parciales (PLS-SEM), una técnica que permite estimar simultáneamente el modelo de medición y el modelo estructural entre constructos latentes dentro de un mismo sistema analítico (Hair, 2022; Kock, 2023).

La adopción de este enfoque metodológico se debe a su idoneidad para el tratamiento de modelos complejos, al uso de escalas de tipo Likert y a la ausencia de requisitos estrictos de normalidad de los datos. Asimismo, su aplicación ha sido ampliamente documentada en investigaciones sobre la manufactura esbelta, el TPM y el desempeño sostenible en sistemas productivos (Díaz-Reza et al., 2018; Gelaw et al., 2024; Samadhiya y Agrawal, 2023).

En el presente estudio, el modelado se estructurará a partir de los factores críticos de éxito del TPM como variables independientes y de las dimensiones de la sustentabilidad como variables dependientes. En congruencia con el alcance empírico de la investigación, se estimarán dos modelos estructurales independientes:

Modelo 1: Factores críticos de éxito del TPM → Sustentabilidad social.

Modelo 2: Factores críticos de éxito del TPM → Sustentabilidad económica.

Modelo 3: Factores críticos de éxito del TPM → Sustentabilidad económica, bajo una especificación alternativa con dos variables explicativas.

Cada modelo será estimado mediante el software WarpPLS v.8 que permite evaluar la confiabilidad de los constructos, estimar relaciones causales y analizar la calidad global del modelo a partir de indicadores estadísticos basados en la varianza.

a) Evaluación del modelo estructural

La evaluación de los modelos estructurales se realizará siguiendo los criterios establecidos por (Hair, 2022; Kline, 2016) y Los principales indicadores que se analizarán son:

Coefficientes de trayectoria (β): expresan la magnitud y la dirección de la relación entre los constructos. Se evaluará su significancia estadística mediante el procedimiento de bootstrapping con 500 remuestreos.

Coefficiente de determinación (R^2): mide la proporción de la varianza de la variable dependiente explicada por los constructos independientes. Los valores de $R^2 \geq 0.25$ se consideran aceptables en estudios de ciencias sociales aplicadas (Hair, 2022).

Efectos directos e indirectos: permiten identificar el papel mediador o moderador de ciertos factores del TPM en relación con la sustentabilidad.

Capacidad predictiva (Q^2): se calculará mediante el procedimiento de omisión (blindfolding). Un valor positivo de Q^2 indica que el modelo tiene poder predictivo.

Índices de ajuste global del modelo: se utilizarán los indicadores propuestos por (Kock, 2023):

1. Coeficiente de Trayectoria Medio (APC)
2. Promedio R-cuadrado (ARS)
3. Factor de Inflación de Varianza Media (AVIF)
4. VIF de colinealidad total media (AFVIF)
5. Bonura del Ajuste (GoF)

Un valor de $GoF \geq 0.36$ se interpretará como un ajuste fuerte del modelo, lo que indica un equilibrio adecuado entre la calidad de la medición y la capacidad explicativa.

b) Análisis de relaciones y mediaciones

Para complementar la interpretación, se analizarán los efectos directos, indirectos y totales en cada modelo, identificando las relaciones más significativas entre los factores críticos del TPM y las dimensiones de sustentabilidad. Este análisis permitirá distinguir, por ejemplo, si la capacitación continua y la participación activa actúan como mediadoras entre el compromiso directivo y los resultados en sustentabilidad social, o si la seguridad y ergonomía median los efectos sobre la sustentabilidad económica.

La estimación de estos efectos permitirá identificar mecanismos de influencia y rutas de mejora, lo que aportará valor a los resultados del estudio en el contexto de la industria maquiladora de Ciudad Juárez.

c) Evaluación complementaria del modelo

Como parte del análisis adicional, se incorporará un enfoque de sensibilidad probabilística para examinar el comportamiento del modelo bajo distintos niveles de implementación del TPM. Este procedimiento permite explorar variaciones en los resultados de sustentabilidad en función de distintas condiciones organizacionales y estimar la probabilidad de alcanzar escenarios favorables o desfavorables.

La inclusión de este tipo de análisis ha sido reportada en investigaciones relacionadas con la manufactura esbelta y el mantenimiento productivo total, al aportar una perspectiva más cercana al contexto operativo real de las organizaciones (Díaz-Reza et al., 2018).

La integración de estos procedimientos analíticos contribuye a una evaluación más robusta de las relaciones entre el TPM y la sustentabilidad industrial, facilitando una interpretación coherente de los resultados y su pertinencia en el ámbito de la ingeniería industrial.

3.8 Análisis de sensibilidad

Como complemento al análisis estructural, se incorporará un enfoque de sensibilidad probabilística orientado a examinar la estabilidad y el comportamiento de los modelos estimados bajo distintos niveles de implementación del TPM.

Este procedimiento permite identificar escenarios potenciales de riesgo y de oportunidad asociados a diferentes grados de madurez en la adopción de prácticas TPM en las organizaciones. En términos analíticos, facilita la estimación de la probabilidad de alcanzar resultados favorables en las dimensiones de sustentabilidad —social y económica— en función de las variaciones en los niveles de los constructos evaluados.

El análisis se llevará a cabo mediante las herramientas disponibles en el software WarpPLS versión 8.0, que permite generar escenarios probabilísticos a partir de los valores estandarizados (Z-scores) de las variables latentes. Este tipo de aproximación

resulta útil para explorar relaciones no lineales y dependencias entre constructos en modelos basados en la varianza (García Alcaraz et al., 2022; Kock, 2023).

Para el desarrollo del análisis se considerarán tres tipos de probabilidades:

1. Probabilidad aislada (P): representa la probabilidad de que un constructo alcance niveles altos o bajos de desempeño de manera independiente.
2. Probabilidad conjunta (P&): evalúa la ocurrencia simultánea de dos o más constructos en niveles similares, lo que permite identificar combinaciones relevantes entre los factores del TPM.
3. Probabilidad condicional (PIF): estima la probabilidad de que una variable dependiente (por ejemplo, la sustentabilidad económica) alcance un nivel alto, dado un nivel elevado de un factor específico del TPM.

La interpretación de estas probabilidades se realizará considerando las relaciones significativas obtenidas en el modelo estructural. Por ejemplo, una probabilidad condicional elevada entre el mantenimiento autónomo y la sustentabilidad económica sugiere que el fortalecimiento de dicha práctica incrementa la probabilidad de obtener resultados económicos favorables.

Adicionalmente, este análisis permitirá comparar el comportamiento de las dimensiones de sustentabilidad consideradas e identificar en qué casos el TPM presenta un mayor impacto relativo. Esto proporciona un soporte analítico para la toma de decisiones en entornos industriales, orientando la priorización de recursos hacia las prácticas con mayor potencial de contribución.

En conjunto, la incorporación del análisis de sensibilidad amplía el alcance interpretativo del modelo PLS-SEM, al ofrecer una visión complementaria basada en escenarios probabilísticos, lo que contribuye a una comprensión más integral de la relación entre el TPM y la sustentabilidad industrial.

3.9 Limitaciones del estudio

El diseño metodológico adoptado en esta investigación implica ciertas restricciones que deben considerarse al interpretar los resultados.

En primer lugar, el estudio se desarrolló con un enfoque no experimental y de corte transversal, lo que implica que la información se recopiló en un único momento, sin

intervención alguna en las variables analizadas. En consecuencia, las relaciones identificadas entre los constructos responden a asociaciones estadísticas sustentadas teóricamente, sin que sea posible establecer inferencias de causalidad en sentido temporal.

En segundo lugar, la selección de la muestra se realizó mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia, lo que limita la posibilidad de generalizar los resultados a la industria maquiladora en su conjunto. No obstante, el tamaño de la muestra y la diversidad de perfiles operativos, técnicos, de ingeniería y de personal de supervisión incluidos permiten contar con una base empírica adecuada para el análisis estadístico y la interpretación de los fenómenos en el contexto estudiado.

Adicionalmente, el uso de un cuestionario autoaplicado implica que la información recopilada se basa en las percepciones de los participantes, lo que puede introducir sesgos derivados de la deseabilidad social o de la interpretación individual de los ítems. Para reducir este riesgo, se aseguró el anonimato de las respuestas y se llevó a cabo un proceso de depuración de datos para identificar y eliminar registros inconsistentes.

Por otra parte, los hallazgos obtenidos se circunscriben al entorno de la industria maquiladora en Ciudad Juárez, lo que otorga pertinencia contextual al estudio, pero sugiere cautela al extrapolar los resultados a otros sectores productivos o a regiones con características organizacionales distintas.

A pesar de estas consideraciones, la aplicación del enfoque PLS-SEM, junto con la validación estadística de los constructos y el análisis de sensibilidad, proporciona un marco analítico coherente que respalda la validez interna del estudio y permite una comprensión estructurada de la relación entre el TPM y las dimensiones de sustentabilidad evaluadas.

En el capítulo siguiente se presentan los resultados del modelado estructural y del análisis de sensibilidad aplicados a las cuatro dimensiones de sustentabilidad.

Resultados

En este capítulo se presentaron los resultados del análisis estadístico de la información recabada mediante el cuestionario aplicado a trabajadores de la industria maquiladora de Ciudad Juárez, Chihuahua. El objetivo de esta sección fue exponer de manera clara y ordenada la evidencia empírica que permitió evaluar la relación entre los factores críticos de éxito del TPM y las distintas dimensiones de la sustentabilidad industrial consideradas en la investigación.

De acuerdo con la ruta metodológica propuesta, el tratamiento de los datos se realizó mediante la técnica PLS-SEM, utilizando el software WarpPLS 8.0. Este procedimiento facilitó la validación simultánea de los parámetros de medición y de las trayectorias estructurales definidas entre los constructos latentes del estudio.

El reporte de los hallazgos se estructuró de manera sistemática, atendiendo a los protocolos analíticos habituales en investigaciones que emplean PLS-SEM. En primer lugar, se presentó la caracterización de la muestra, con el propósito de contextualizar el perfil de los participantes y el entorno industrial en el que se desarrolló el estudio. Tras definir la estructura general, se procedió a evaluar la calidad de las mediciones. En este apartado se reportan los niveles de fiabilidad interna y se contrastan los criterios de validez convergente y discriminante, lo que certifica la idoneidad de los datos para el análisis estructural.

Una vez validada la calidad del modelo de medición, se presentaron los resultados del modelo estructural, analizando la magnitud, la dirección y la significancia estadística de las relaciones entre los factores críticos de éxito del TPM y las dimensiones de la sustentabilidad industrial. Para ello, se estimaron tres modelos estructurales independientes, correspondientes a las dimensiones social, económica, ambiental y digital.

Finalmente, el capítulo concluyó con una síntesis de los principales hallazgos empíricos, destacando los factores del TPM que tuvieron mayor influencia en cada una de las dimensiones de la sustentabilidad industrial. Estos resultados constituyeron la base

del capítulo siguiente, en el que se discutirían e interpretarían los hallazgos a la luz de la literatura especializada y de los objetivos planteados en la investigación.

4.1 Caracterización de la muestra

La caracterización de la muestra tuvo como finalidad describir el perfil general de los participantes y proporcionar un marco contextual que permitiera interpretar adecuadamente los resultados obtenidos. Este análisis resultó relevante en la medida en que las prácticas de TPM y su impacto en la sustentabilidad dependen, en gran medida, del nivel de involucramiento, de la experiencia y de la posición organizacional de los individuos que participan en su implementación.

Se obtuvo un total de 302 encuestas, de las cuales 243 fueron consideradas válidas para el análisis estadístico, tras la eliminación de 59 registros durante el proceso de depuración de datos. El cuestionario conformado por 74 ítems distribuidos en 14 dimensiones, las cuales son:

1. Compromiso de la Dirección y Cultura Organizacional → MCOC
2. Participación Activa de Todos los Niveles → APAL
3. Capacitación Continua → COTR
4. Implementación de Mantenimiento Autónomo → IAMA
5. Enfoque en la Eliminación de Pérdidas → FELO
6. Colaboración Interdepartamental → CID
7. Estándares Claros de Mantenimiento → ECM
8. Gestión de Datos y Retroalimentación → GDR
9. Sustentabilidad y Mejora Continua → SMCpls
10. Seguridad y Ergonomía → SEER
11. Sustentabilidad Económica → ECSU
12. Sustentabilidad Social → SOSU
13. Sustentabilidad Ambiental → SAM
14. Sustentabilidad Digital → SDI

Sin embargo, para los fines del presente estudio, solo se seleccionaron las dimensiones relacionadas con la sustentabilidad económica y social.

Los participantes fueron trabajadores activos del sector industrial de Ciudad Juárez, Chihuahua, México, que se desempeñaban principalmente en áreas vinculadas a la operación, el mantenimiento, la calidad, la ingeniería y la gestión de recursos humanos. Asimismo, la muestra incluyó distintos niveles jerárquicos, como operadores, técnicos,

ingenieros, supervisores, mandos medios y gerentes, lo que nos permitió captar una perspectiva más amplia sobre la implementación del TPM en las organizaciones.

En términos de experiencia laboral, la mayoría de los encuestados reportó entre dos y cinco años en su puesto actual, lo que sugiere un nivel de familiaridad adecuado con los procesos productivos y las prácticas de mejora continua. Esta condición resultó particularmente relevante, ya que indicó que las respuestas provienen de personal con exposición directa a la operación y la gestión de equipos industriales, así como a iniciativas relacionadas con el TPM.

Tabla 4.1. Puesto y años de trabajo

Años de experiencia	Puesto de trabajo					Total
	Gerente	Ingeniero	Operador	Supervisor	Técnico	
1-2 Años	1	10	64	7	34	116
2-5 Años	3	14	28	11	21	77
5-10 Años	1	13	10	2	3	29
Mas de 10 Años	2	6	6	4	3	21
Total	7	43	108	24	61	243

La distribución presentada en la Tabla 4.1 permitió observar una concentración significativa en los perfiles operativos y técnicos, particularmente entre operadores (108) y técnicos (61), seguidos de ingenieros (43) y supervisores (24). Este patrón sugirió que la información recopilada provino, en su mayoría, del personal directamente involucrado en la ejecución de actividades productivas y de mantenimiento, lo que fortaleció la validez empírica de los resultados al estar sustentados en la experiencia práctica.

Desde una perspectiva analítica, esta predominancia de perfiles operativos introdujo una condición relevante en la interpretación de los resultados, ya que las percepciones sobre el TPM tendieron a verse más influidas por la experiencia directa en el piso de producción que por enfoques estratégicos de alto nivel. En consecuencia, ciertos constructos, en particular aquellos relacionados con el liderazgo o la alineación organizacional, pudieron presentar variabilidad según el nivel jerárquico del encuestado.

En relación con las áreas funcionales, los participantes se concentraron en los departamentos de producción, mantenimiento, calidad, ingeniería y seguridad industrial. Esta distribución resultó consistente con la lógica de implementación del TPM, dado que

estas áreas constituyeron el núcleo operativo en el que se ejecutaban prácticas como el mantenimiento autónomo, el mantenimiento planeado y la mejora continua.

Por otra parte, el análisis del tipo de empresa en la que laboran los participantes permitió identificar el contexto estructural en el que se desarrollan dichas prácticas, en particular en cuanto al puesto de trabajo y al tamaño de la empresa.

Tabla 4.2. Puesto de trabajo y tamaño de la empresa

Años de experiencia	Puesto de trabajo					Total
	Gerente	Ingeniero	Operador	Supervisor	Técnico	
Micro	1	2	3	1	2	9
Pequeña	1	6	12	3	5	27
Mediana	2	15	34	7	18	76
Grande	3	20	59	13	36	131
Total	7	43	108	24	61	243

Tal como se observó en la Tabla 4.2, predominan las empresas grandes, que concentran la mayor proporción de la muestra. Este resultado fue consistente con la configuración del sector maquilador en la región, caracterizada por sistemas de producción a gran escala y una alta dependencia de la confiabilidad de los equipos.

En cuanto a los sectores industriales, se identificó una mayor participación de los sectores automotriz, electrónico, eléctrico y metalmecánico. Esta concentración sugirió que los resultados obtenidos reflejaron entornos productivos en los que la eficiencia operativa y la gestión del mantenimiento fueron factores críticos para la competitividad, lo que reforzó la pertinencia del análisis del TPM en este contexto.

Adicionalmente, la combinación del tamaño de la empresa y el sector industrial permitió inferir que una parte considerable de los participantes se encontraba en organizaciones con estructuras formales y procesos estandarizados, donde la implementación del TPM tendía a ser más sistemática. No obstante, la presencia de empresas medianas y pequeñas introdujo cierta heterogeneidad que pudo influir en la madurez de la adopción de esta metodología.

Finalmente, se identificó que los participantes presentaron distintos niveles de conocimiento sobre el TPM, predominando los niveles de básico a intermedio, mientras que una proporción menor reportó un dominio avanzado. Esta variabilidad sugirió que la implementación del TPM no fue homogénea entre las organizaciones analizadas, lo

que pudo traducirse en diferencias en la percepción de sus beneficios, en particular en dimensiones relacionadas con la sustentabilidad.

En conjunto, la caracterización de la muestra permitió establecer que la información analizada provenía de un entorno industrial con alta participación operativa, diversidad organizacional y distintos niveles de madurez en la adopción del TPM. Este contexto constituyó la base sobre la cual se interpretaron los resultados de los modelos de medición y de estructura, desarrollados en los apartados siguientes.

4.2 Evaluación del modelo de medición

Una vez caracterizada la muestra, se evaluó el modelo de medición para verificar la calidad de los constructos empleados en el modelo propuesto. Este análisis se desarrolló bajo el enfoque de Modelado de Ecuaciones Estructurales mediante Mínimos Cuadrados Parciales (PLS-SEM), considerando criterios de fiabilidad interna, validez convergente y validez discriminante.

En una primera etapa, se analizó el comportamiento descriptivo de los ítems para identificar tendencias generales en las respuestas y posibles patrones de dispersión. Posteriormente, se evaluó la consistencia interna de los constructos, así como la magnitud de las cargas factoriales y los indicadores de la varianza extraída promedio. Finalmente, se examinó la validez discriminante para asegurar la adecuada diferenciación entre los constructos del modelo.

4.2.1 Análisis descriptivo de los ítems

Previo a la evaluación de la fiabilidad y validez del modelo de medición, se examinó el comportamiento descriptivo de los ítems con el propósito de identificar tendencias generales en las respuestas y posibles patrones de variabilidad en los constructos considerados. Dado que los datos fueron recolectados mediante una escala tipo Likert, se optó por la mediana como medida de tendencia central y el rango intercuartílico (IQR) como indicador de dispersión, lo que permitió una representación más robusta de la distribución frente a posibles desviaciones de la normalidad.

La distribución de los valores observados para cada ítem se presentó en la Tabla 4.3, donde se reportaron las medianas y los rangos intercuartílicos correspondientes a los

constructos incluidos en los modelos analizados. En el modelo de sustentabilidad social se consideraron los factores del TPM asociados al compromiso de la dirección y a la cultura organizacional (MCOC), a la participación activa de todos los niveles (APAL) y a la capacitación continua (COTR), los cuales se vincularon con la SOSU. De manera complementaria, en los modelos de sustentabilidad económica se integraron constructos como la implementación de mantenimiento autónomo (IAMA), el enfoque en la eliminación de pérdidas (FELO), la seguridad y la ergonomía (SEER) y su relación con la ECSU, lo que permitió evaluar distintos niveles de interacción entre las prácticas de mantenimiento y los resultados organizacionales.

Tabla 4.3: Medidas de tendencia central (mediana) y dispersión (rango intercuartílico, IQR) de los ítems del cuestionario.

Implementación de Mantenimiento Autónomo – IAMA			
¿Los operarios cuentan con herramientas y dispositivos inteligentes para facilitar la inspección y el ajuste de los equipos durante el mantenimiento autónomo?	IAMA 1	3.183	1.984
¿El mantenimiento autónomo ha mejorado la disponibilidad y el rendimiento de los equipos, reduciendo la necesidad de intervención del personal de mantenimiento especializado?	IAMA 2	3.364	1.907
¿Se han digitalizado los registros de inspección autónoma para mejorar su accesibilidad y análisis?	IAMA 3	3.430	1.857
Enfoque en la Eliminación de Pérdidas – FELO			
¿Se ha reducido la variabilidad en la producción gracias a las mejoras derivadas del TPM?	FELO 1	3.419	1.858
¿Los operarios pueden identificar fácilmente las pérdidas más críticas en su área de trabajo?	FELO 2	3.599	1.834
¿Se realizan reuniones específicas para analizar y reducir el impacto de fallos repetitivos?	FELO 3	3.565	1.847
¿El TPM ha reducido la necesidad de reprocesos y productos defectuosos?	FELO 4	3.562	1.776
¿Se ha mejorado la eficiencia operativa en términos de uso de materiales y tiempos de producción?	FELO 5	3.677	1.704
Seguridad y Ergonomía – SEER			
¿Se han reducido los accidentes laborales gracias a la implementación de TPM?	SEER 1		
¿Las auditorías de seguridad incluyen revisión del cumplimiento de TPM?	SEER 2		
¿El personal está capacitado para responder ante emergencias en mantenimiento?	SEER 3		

¿Se han implementado mejoras en los equipos para reducir riesgos ergonómicos?	SEER 4		
¿Las mejoras ergonómicas han impactado positivamente en la productividad?	SEER 5		
Sustentabilidad Económica – ECSU			
¿Se han identificado oportunidades de reducción de costos gracias al TPM?	ECSU 1	3.454	1.930
¿El costo de mantenimiento ha disminuido de manera constante tras implementar TPM?	ECSU 2	3.355	1.885
¿El TPM ha generado ahorros en consumo de materiales?	ECSU 3	3.532	1.885
¿Los costos por fallos imprevistos han sido cuantificados y se han adoptado medidas correctivas?	ECSU 4	3.442	1.930
¿Las inversiones en TPM han demostrado un retorno positivo en términos de reducción de pérdidas?	ECSU 5	3.539	1.802
Compromiso de la Dirección y Cultura Organizacional - MCOC			
¿La alta dirección ha comunicado una visión clara sobre la importancia del TPM?	MCOC 1	3.59	2.06
¿Existen reuniones periódicas donde se revisan los avances del TPM?	MCOC 2	3.46	2.14
¿La empresa cuenta con políticas documentadas sobre la relación entre TPM y sustentabilidad?	MCOC 3	3.81	1.9
¿La empresa ha recibido certificaciones o reconocimientos por la implementación de TPM?	MCOC 4	3.58	2.1
¿Se han desarrollado estrategias para asegurar la continuidad del TPM ante cambios de liderazgo?	MCOC 5	3.56	1.97
¿Existen indicadores de desempeño para medir la efectividad del liderazgo en TPM?	MCOC 6	3.68	2.1
Participación activa de todos los niveles - APAL			
¿Los operarios reciben incentivos por reportar mejoras en TPM?	APAL 1	3.36	2.23
¿Existen programas de reconocimiento a los equipos que logran mejoras significativas en mantenimiento?	APAL 2	3.47	2.29
¿Se han implementado círculos de calidad para discutir problemas recurrentes de mantenimiento?	APAL 3	3.7	1.97
¿Las reuniones de producción incluyen análisis de problemas relacionados con TPM?	APAL 4	3.48	1.98
¿Los empleados de distintos turnos comparten información sobre el estado de los equipos?	APAL 5	3.48	2.18
Capacitación continua - COTR			
¿El programa de formación en TPM incluye la identificación de desperdicios en procesos productivos?	COTR 1	3.67	1.99
¿Se evalúan las habilidades del personal antes y después de la capacitación en TPM?	COTR 2	3.355	1.885

¿Existen simuladores virtuales para el entrenamiento en mantenimiento predictivo?	COTR 3	3.55	2.15
¿Los empleados tienen acceso a material de consulta sobre buenas prácticas en mantenimiento?	COTR 4	2.88	2.45
¿Los nuevos empleados reciben formación específica sobre TPM desde su ingreso?	COTR 5	3.43	2.3
Sustentabilidad Social - SOSU			
¿El TPM ha mejorado la percepción del personal sobre su entorno laboral?	SOSU 1	3.52	1.96
¿Se han reducido las quejas de los empleados sobre condiciones de trabajo relacionadas con mantenimiento?	SOSU 2	3.55	1.95
¿El TPM ha mejorado la retención de personal debido a mejores condiciones de trabajo?	SOSU 3	3.45	2.02
¿Los programas de capacitación en TPM incluyen desarrollo de habilidades de liderazgo?	SOSU 4	3.50	1.99
¿Los operarios sienten que tienen mayor control sobre sus condiciones de trabajo gracias a TPM?	SOSU 5	3.53	1.96

En general, las medianas de los ítems se situaron en valores cercanos o superiores a 3.5, lo que sugirió una percepción favorable por parte de los encuestados respecto a la implementación de prácticas asociadas al TPM y su contribución a las dimensiones de sustentabilidad analizadas. Este comportamiento se observó con mayor consistencia en los ítems vinculados al MCOC, donde los valores reflejaron la existencia de mecanismos formales de comunicación estratégica, el establecimiento de lineamientos organizacionales y el seguimiento de indicadores.

En contraste, algunos ítems asociados a la COTR presentaron valores relativamente menores, en particular aquellos relacionados con el uso de herramientas tecnológicas avanzadas en los procesos de formación. Este comportamiento podría haber indicado que, si bien hubo esfuerzos de capacitación, estos no necesariamente incorporaron enfoques más especializados o digitalizados, lo que podría haber generado una brecha en el desarrollo de capacidades en las organizaciones.

En términos de dispersión, los valores del rango intercuartílico se situaron en un nivel moderado, lo que indicó un grado aceptable de consenso entre los participantes. No obstante, ciertos ítems presentaron mayor variabilidad, especialmente los vinculados a los incentivos de SEER, lo que sugiere que estas prácticas no se implementaron de manera homogénea en todas las empresas analizadas.

Este comportamiento diferenciado entre constructos permitió inferir que los factores críticos de éxito del liderazgo organizacional, como el MCOC, presentaron un mayor grado de consolidación, mientras que aquellos relacionados con la capacitación y el FELO mostraron niveles de adopción más heterogéneos. Esta condición resultó relevante para el análisis posterior, en la medida en que dichas diferencias podrían haber influido tanto en la consistencia interna de los constructos como en la magnitud de las relaciones estructurales estimadas en los modelos de sustentabilidad social y económica.

En conjunto, los resultados descriptivos proporcionaron una base empírica inicial para evaluar el modelo de medición. No obstante, la variabilidad observada en algunos ítems sugirió la necesidad de analizar con mayor detalle su comportamiento en términos de fiabilidad y validez, a fin de asegurar la robustez del modelo propuesto en cada uno de los escenarios

4.1 Modelo 1 de Sustentabilidad social

4.3.1 Modelo propuesto

El modelo propuesto para la evaluación de la sustentabilidad social considera la relación entre los factores críticos del TPM: Compromiso de la Dirección y Cultura Organizacional (MCOC), Capacitación Continua (COTR) y Participación Activa de Todos los Niveles (APAL), como variables explicativas de la SOSU. La estructura del modelo se presentó en la Figura 4.1

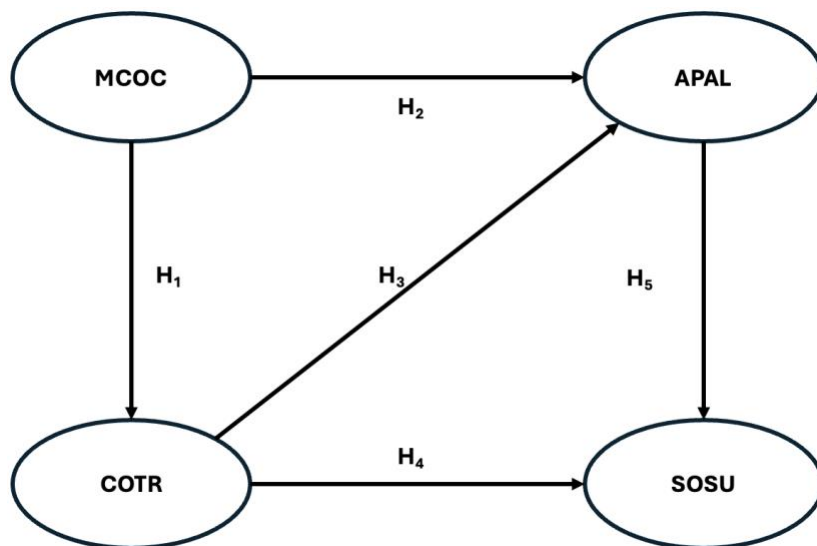


Figura 4.1. Modelo de sustentabilidad social.

4.3.2 Hipótesis del modelo

A partir de las relaciones planteadas en el modelo, se establecen las siguientes hipótesis:

- **H1:** El Compromiso de la Dirección y Cultura Organizacional (MCOC) tuvo un efecto positivo sobre la Capacitación Continua (COTR).
- **H2:** El Compromiso de la Dirección y Cultura Organizacional (MCOC) tuvo un efecto positivo sobre la Participación Activa de Todos los Niveles (APAL).
- **H3:** La Capacitación Continua (COTR) tuvo un efecto positivo sobre la Participación Activa de Todos los Niveles (APAL).
- **H4:** La Capacitación Continua (COTR) tuvo un efecto positivo sobre la Sustentabilidad Social (SOSU).
- **H5:** La Participación Activa de Todos los Niveles (APAL) tuvo un efecto positivo sobre la Sustentabilidad Social (SOSU).

Con base en las hipótesis planteadas, se procedió a evaluar empíricamente el modelo propuesto mediante el enfoque de modelado de PLS-SEM, con el objetivo de analizar la validez de los constructos y la significancia de las relaciones establecidas entre las variables.

4.3.3 Evaluación del modelo de medición

La Tabla 4.4 presentó los principales resultados de la validación de las variables utilizadas en el modelo de sustentabilidad social. Los valores de alfa de Cronbach y confiabilidad compuesta indicaron una adecuada consistencia interna, mientras que el promedio de varianza extraída (AVE) confirmó el cumplimiento de la validez convergente.

Los índices de inflación de la varianza (VIF) evidenciaron la ausencia de problemas de colinealidad entre los indicadores. Asimismo, los valores de Q^2 (Stone-Geisser) respaldaron la validez predictiva del modelo. En cuanto a la normalidad, la prueba de Jarque-Bera (JB) indicó que únicamente el constructo de SOSU cumplió con este supuesto, lo que justificó el uso del enfoque PLS-SEM.

Tabla 4.4. Índices de validación de las variables del modelo de sustentabilidad social

Indicador	MCOC	COTR	APAL	SOSU
R ²		0.452	0.667	0.584
Adjusted R ²		0.450	0.665	0.581
Composite reliability	0.934	0.909	0.905	0.936
Cronbach's alpha	0.915	0.875	0.869	0.914
Average variance extracted (AVE)	0.703	0.668	0.657	0.745
VIF (collinearity)	2.246	2.801	3.294	2.353
Q ²		0.454	0.668	0.585
Normality (JB)	No	No	No	Yes

4.3.4 Validez discriminante

La Tabla 4.5 mostró la validez discriminante mediante el criterio de Fornell-Larcker, donde se observó que la raíz cuadrada del AVE (valores en la diagonal) es superior a las correlaciones entre constructos, lo que confirmó la independencia de las variables latentes.

Tabla 4.5. Matriz de Fornell-Larcker del modelo de sustentabilidad social

	MCOC	COTR	APAL	SOSU
MCOC	0.839			
COTR	0.660	0.817		
APAL	0.721	0.759	0.810	
SOSU	0.603	0.702	0.715	0.863

En conjunto, estos resultados permitieron sostener que el modelo de medición de la sustentabilidad social cumplió con los criterios de fiabilidad, validez convergente y validez discriminante, lo que proporcionó una base sólida para el análisis posterior del modelo estructural.

4.3.5 Evaluación del modelo estructural

La evaluación del modelo estructural se realizó mediante índices globales de ajuste y de eficiencia, que permitieron evaluar la calidad del modelo estimado. La Tabla 4.6 presentó los valores correspondientes al coeficiente promedio de trayectoria (APC), al coeficiente de determinación promedio (ARS), al R² ajustado promedio (AARS), así como a los indicadores de colinealidad (AVIF y AFVIF) y al índice de bondad de ajuste

(GoF). En conjunto, estos resultados evidenciaron un ajuste adecuado del modelo, lo que permitió proceder con el análisis de las relaciones estructurales planteadas.

Tabla 4.6. Índices de ajuste y eficiencia del modelo estructural de sustentabilidad social.

Índice	β (Valor p)	Criterio
Coefficiente promedio de trayectoria / Average Path Coefficient (APC)	0.475 (p<0.001)	p < 0.05
Coefficiente promedio de determinación / Average R-squared (ARS)	0.568 (p<0.001)	p < 0.05
R ² ajustado promedio / Average Adjusted R-squared (AARS)	0.565 (p<0.001)	p < 0.05
Factor de inflación de la varianza promedio por bloque / Average Block VIF (AVIF)	2.169	≤ 5 (ideal ≤ 3.3)
Factor de inflación de la varianza total / Average Full Collinearity VIF (AFVIF)	2.679	≤ 5 (ideal ≤ 3.3)
Índice de bondad de ajuste de Tenenhaus / Tenenhaus GoF	0.627	>0.36

La Figura 4.2 presentó el modelo estructural estimado para la sustentabilidad social, en el cual se observaron las relaciones entre los constructos, así como los coeficientes estandarizados de trayectoria (β), los niveles de significancia estadística (p-value/valor p) y los coeficientes de determinación (R^2) de las variables endógenas.

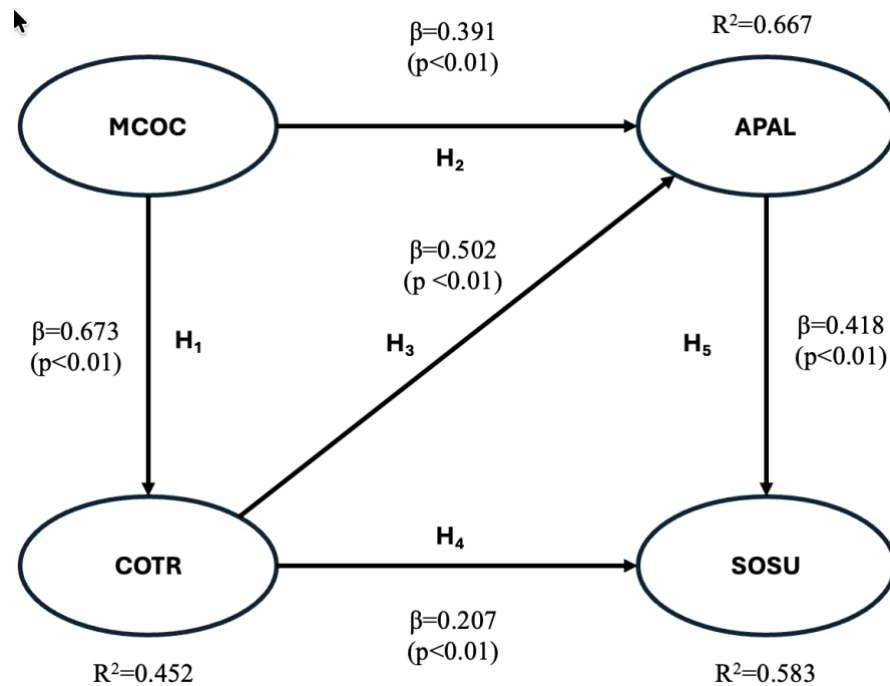


Figura 4.2. Modelo social evaluado

Los resultados indicaron que todas las relaciones propuestas en el modelo fueron estadísticamente significativas ($p < 0.001$), lo que aportó evidencia empírica que respaldó la estructura teórica planteada. En particular, el MCOC ejerció un efecto positivo sobre la APAL ($\beta = 0.391$), así como sobre la capacitación continua (COTR) ($\beta = 0.673$), lo que sugirió que el liderazgo organizacional constituyó un factor clave en la implementación efectiva de prácticas de TPM.

Por su parte, COTR influyó significativamente en la APAL ($\beta = 0.502$), lo que indicó que el desarrollo de habilidades y conocimientos del personal contribuyó a fortalecer su involucramiento en actividades de mejora continua. En relación con la SOSU, se observó que tanto la APAL ($\beta = 0.418$) como COTR ($\beta = 0.392$) presentaron efectos positivos y significativos, lo que evidenció que estos factores actuaron como mecanismos determinantes en la generación de resultados sociales en la organización.

En términos de capacidad explicativa, el modelo presentó valores de R^2 de 0.667 para APAL, 0.452 para COTR y 0.583 para SOSU, lo que indicó una capacidad explicativa moderada a sustancial de las variables endógenas.

En conjunto, los hallazgos permitieron sostener que el modelo estructural presentó un comportamiento consistente, en el que las relaciones entre los constructos no solo resultaron estadísticamente significativas, sino que también se mantuvieron coherentes con los fundamentos teóricos del TPM y con su vínculo con la sustentabilidad social.

4.3.6 Validación de hipótesis

Los coeficientes de trayectoria (β) entre los constructos fueron positivos y estadísticamente significativos ($p < 0.001$), como se mostró en la Figura 4.2. La Tabla 4.7 resumió estos resultados, evidenciando el soporte empírico de las hipótesis planteadas en el modelo conceptual presentado en la Figura 4.1.

En términos generales, se observaron relaciones sólidas entre el compromiso de la dirección y la cultura organizacional, la capacitación continua, la participación activa de todos los niveles y la sustentabilidad social. En consecuencia, las cinco hipótesis planteadas (H1–H5) fueron estadísticamente aceptadas.

Tabla 4.7. Coeficientes de trayectoria y significancia estadística del modelo de sustentabilidad social

Hipótesis	Relación	β (valor p)	Conclusión
H ₁	MCOC $\rightarrow$ COTR	0.673 (<0.001)	Aceptada
H ₂	MCOC $\rightarrow$ APAL	0.391 (<0.001)	Aceptada
H ₃	COTR $\rightarrow$ APAL	0.502 (<0.001)	Aceptada
H ₄	COTR $\rightarrow$ SOSU	0.392(<0.001)	Aceptada
H ₅	APAL $\rightarrow$ SOSU	0.418 (<0.001)	Aceptada

4.3.7 Efectos indirectos y totales

La Tabla 4.8 presentó los efectos indirectos y totales entre las variables del modelo, los cuales resultaron estadísticamente significativos a un nivel de confianza del 99.9%. En particular, se identificaron efectos indirectos significativos del MCOC sobre la SOSU, mediados por la COTR y la APAL.

Específicamente, la trayectoria MCOC $\rightarrow$ COTR $\rightarrow$ APAL $\rightarrow$ SOSU mostró un efecto indirecto de 0.568 ($p < 0.001$), lo que sugirió la presencia de una mediación parcial en cadena. Asimismo, los efectos totales indicaron que la capacitación continua (COTR) (0.602) y el compromiso de la dirección y cultura organizacional (MCOC) (0.568) fueron los factores con mayor influencia sobre la sustentabilidad social.

Tabla 4.8. Efectos indirectos y totales del modelo de sustentabilidad social

	Efectos indirectos		Efectos totales		
	MCOC	COTR	MCOC	COTR	APAL
COTR			0.673		
APAL	0.337		0.728	0.502	
SOSU	0.568	0.21	0.568	0.602	0.418

4.3.8 Análisis de sensibilidad

La Tabla 4.9 presentó el análisis de sensibilidad de las relaciones entre las variables del modelo. Los resultados permitieron identificar diferencias significativas entre escenarios de alta y baja implementación de los factores analizados.

En particular, se observó que niveles elevados de MCOC se asociaron con mayores probabilidades de alcanzar niveles altos en COTR y APAL. En contraste, niveles bajos de compromiso se relacionaron con un mayor riesgo sistémico dentro del modelo.

Estos hallazgos reforzaron la robustez del modelo desde una perspectiva probabilística, así como la relevancia práctica del liderazgo, la capacitación y la participación en la generación de resultados asociados a la sustentabilidad social. Asimismo, los resultados evidenciaron que las variaciones en los niveles de implementación de los factores críticos del TPM tuvieron un impacto directo en el comportamiento de las variables endógenas del modelo.

Table 4.9. Análisis de sensibilidad del modelo de sustentabilidad social

			MCOC		COTR		APAL	
			+	-	+	-	+	-
			0.166	0.0159	0.176	0.176	0.163	0.173
COTR	+	0.176	&=0.103 IF=0.620	&=0.010 IF=0.063				
	-	0.176	&=0.000 IF=0.000	&=0.100 IF=0.625				
APAL	+	0.163	&=0.113 IF=0.680	&=0.003 IF=0.021	&=0.103 IF=0.585	&=0.000 IF=0.000		
	-	0.173	&=0.000 IF=0.000	&=0.106 IF=0.667	&=0.000 IF=0.000	&=0.113 IF=0.642		
SOSU	+	0.189	&=0.106 IF=0.640	&=0.013 IF=0.083	&=0.120 IF=0.679	&=0.003 IF=0.019	&=0.113 IF=0.694	&=0.003 IF=0.019
	-	0.166	&=0.003 IF=0.020	&=0.076 IF=0.479	&=0.000 IF=0.000	&=0.110 IF=0.623	&=0.000 IF=0.000	&=0.100 IF=0.577

Una vez analizado el modelo de sustentabilidad social, se procedió a evaluar el modelo de sustentabilidad económica, con el propósito de ampliar el análisis del impacto de los factores críticos del TPM en distintas dimensiones de la sustentabilidad organizacional.

4.4 Modelo 2 de sustentabilidad económica

4.4.1 Modelo propuesto

El modelo propuesto para la evaluación de la sustentabilidad económica consideró la relación entre la IAMA el Enfoque en la FELO y la SEER como variables explicativas de la ECSU. La estructura del modelo se presentó en la Figura 4.3.

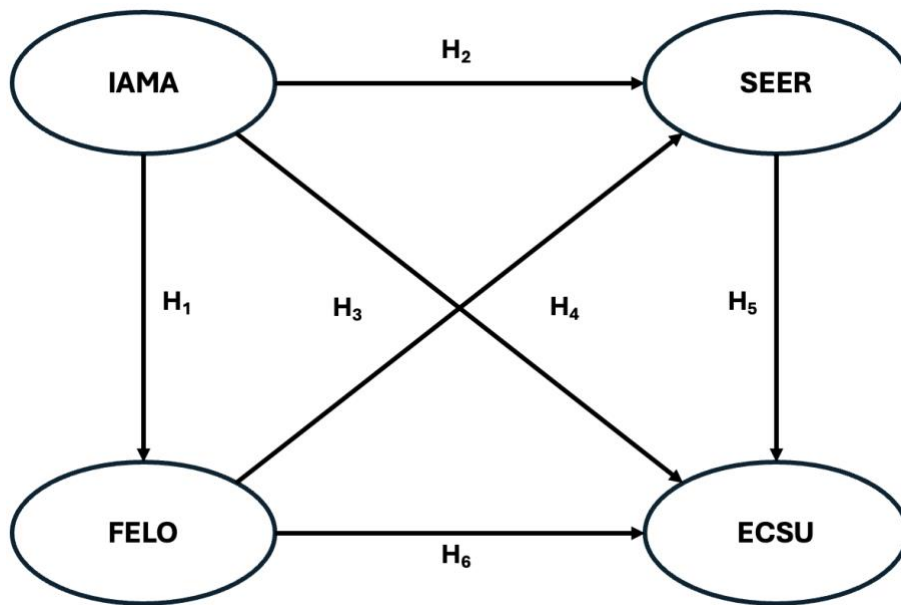


Figura 4.3. Modelo de sustentabilidad económica

4.4.2 Hipótesis del modelo

A partir de las relaciones planteadas en el modelo, se establecieron las siguientes hipótesis:

- **H1:** La Implementación del Mantenimiento Autónomo (IAMA) tuvo un efecto positivo sobre el Enfoque en la Eliminación de Pérdidas (FELO).
- **H2:** La Implementación del Mantenimiento Autónomo (IAMA) tuvo un efecto positivo sobre la Seguridad y Ergonomía (SEER).
- **H3:** El Enfoque en la Eliminación de Pérdidas (FELO) tuvo un efecto positivo sobre la Seguridad y Ergonomía (SEER).
- **H4:** La Implementación del Mantenimiento Autónomo (IAMA) tuvo un efecto positivo sobre la Sustentabilidad Económica (ECSU).
- **H5:** La Seguridad y Ergonomía (SEER) tuvo un efecto positivo sobre la Sustentabilidad Económica (ECSU).
- **H6:** El Enfoque en la Eliminación de Pérdidas (FELO) tuvo un efecto positivo sobre la Sustentabilidad Económica (ECSU).

Con base en las hipótesis planteadas, se procedió a evaluar empíricamente el modelo propuesto mediante el enfoque PLS-SEM, con el objetivo de analizar la validez de los constructos y la significancia de las relaciones establecidas entre las variables.

4.4.3 Evaluación del modelo de medición

La Tabla 4.10 presentó los principales resultados de la validación de las variables utilizadas en el modelo de sustentabilidad económica. Los valores de alfa de Cronbach se situaron entre 0.785 y 0.890, mientras que la confiabilidad compuesta (CR) oscila entre 0.875 y 0.919, superando el umbral recomendado de 0.70, lo que indicó una adecuada consistencia interna de los constructos.

Asimismo, los valores del promedio de varianza extraída (AVE) fueron superiores a 0.66 en todos los casos, lo que confirmó la validez convergente del modelo. En relación con la colinealidad, los valores del factor de inflación de la varianza (VIF), que oscilaron entre 1.98 y 2.87, evidenciaron la ausencia de problemas de multicolinealidad.

Por otra parte, los valores de Q^2 (Stone-Geisser) mostraron una adecuada capacidad predictiva del modelo. En cuanto a la normalidad, la prueba de Jarque-Bera (JB) indicó que únicamente los constructos IAMA y ECSU cumplieron con este supuesto, lo que respaldó el uso del enfoque PLS-SEM frente a métodos basados en covarianzas.

Tabla 4.10. Índices de validación del modelo de sustentabilidad económica

Indicador	IAMA	FELO	SEER	ECSU
R^2		0.544	0.498	0.501
Adjusted R^2		0.543	0.493	0.494
Composite reliability	0.875	0.91	0.915	0.919
Cronbach's alpha	0.785	0.876	0.883	0.89
Average variance extracted (AVE)	0.701	0.669	0.682	0.695
VIF (collinearity)	2.24	2.872	2.424	1.989
Q^2		0.544	0.499	0.503
Normality (JB)	Yes	No	No	Yes

4.4.4 Validez discriminante

La Tabla 4.11 mostró la validez discriminante del modelo mediante el criterio de Fornell-Larcker. Los valores ubicados en la diagonal, correspondientes a la raíz cuadrada del

AVE, fueron superiores a las correlaciones entre constructos, lo que confirmó la independencia conceptual de las variables latentes.

Table 4.11 Matriz de Fornell-Larcker del modelo de sustentabilidad económica

	IAMA	FELO	SEER	ECSU
IAMA	0.837	0.735	0.582	0.516
FELO	0.735	0.818	0.687	0.6
SEER	0.582	0.687	0.826	0.678
ECSU	0.516	0.6	0.678	0.834

4.4.5 Evaluación del modelo estructural

La evaluación del modelo estructural se realizó mediante índices globales de ajuste y de eficiencia, que permitieron evaluar la calidad del modelo estimado. La Tabla 4.12 presentó los valores correspondientes al coeficiente promedio de trayectoria (APC), al coeficiente de determinación promedio (ARS), al R^2 ajustado promedio (AARS), así como a los indicadores de colinealidad (AVIF y AFVIF) y al índice de bondad de ajuste (GoF).

En conjunto, estos resultados evidenciaron un ajuste adecuado del modelo, ya que todos los indicadores cumplieron con los criterios establecidos, lo que confirmó que el modelo pudo ser interpretado, presentó capacidad predictiva y no hubo problemas de colinealidad.

De manera específica, el coeficiente promedio de trayectoria ($APC = 0.377$, $p < 0.001$), el coeficiente promedio de determinación ($ARS = 0.514$, $p < 0.001$) y el R^2 ajustado promedio ($AARS = 0.510$, $p < 0.001$) resultaron estadísticamente significativos. Asimismo, los valores de AVIF (2.242) y AFVIF (2.382) se mantuvieron por debajo del límite recomendado de 3.3, lo que descartó problemas de multicolinealidad. Finalmente, el índice de bondad de ajuste de Tenenhaus ($GoF = 0.594$) superó el valor de referencia (0.36), lo que indica un ajuste global satisfactorio del modelo.

Tabla 4.12. Índices de ajuste y eficiencia del modelo estructural de sustentabilidad económica.

Índice	β (Valor p)	Criterio
Coeficiente promedio de trayectoria / Average Path Coefficient (APC)	0.377 ($p < 0.001$)	$p < 0.05$

Coefficiente promedio de determinación /Average R-squared (ARS)	0.514 (p < 0.001)	p < 0.05
R ² ajustado promedio / Average Adjusted R-squared (AARS)	0.510 (p < 0.001)	p < 0.05
Factor de inflación de la varianza promedio por bloque / Average Block VIF (AVIF)	2.242	≤ 5 (ideal ≤ 3.3)
Factor de inflación de la varianza total / Average Full Collinearity VIF (AFVIF)	2.382	≤ 5 (ideal ≤ 3.3)
Índice de bondad de ajuste de Tenenhaus / Tenenhaus GoF	0.594	>0.36

La Figura 4.4 presentó el modelo estructural estimado para la sustentabilidad económica, en el que se observaron los coeficientes estandarizados de trayectoria (β), los niveles de significancia estadística (valor p) y los coeficientes de determinación (R^2) de las variables endógenas.

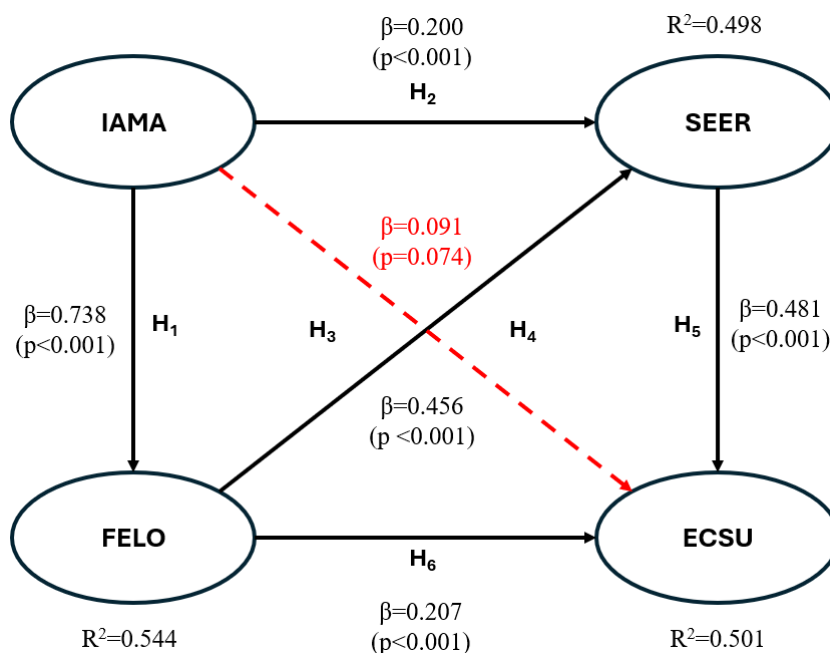


Figura 4.4. Modelo sustentabilidad económica evaluado

Los resultados mostraron que la mayoría de las relaciones propuestas en el modelo fueron positivas y estadísticamente significativas. En particular, la IAMA presentó un efecto positivo y significativo sobre el enfoque en la FELO ($\beta = 0.738$, $p < 0.001$), así como sobre el SEER ($\beta = 0.200$, $p < 0.001$), lo que indicó que este factor constituyó un elemento clave en la mejora de las condiciones operativas y de seguridad.

Por su parte, el enfoque en la FELO influyó de manera significativa en la SEER ($\beta = 0.546$, $p < 0.001$), lo que sugiere que la reducción sistemática de pérdidas también impactó positivamente en el entorno de trabajo.

En relación con la ECUS, se observó que la SEER ($\beta = 0.481$, $p < 0.001$) y el enfoque en la FELO ($\beta = 0.207$, $p < 0.001$) presentaron efectos positivos y significativos. Sin embargo, la relación directa entre la IAMA y la ECSU ($\beta = 0.091$, $p = 0.074$) no fue estadísticamente significativa.

Estos resultados sugirieron que el impacto de IAMA sobre la sustentabilidad económica se produjo principalmente de manera indirecta, a través de la mejora en la eliminación de pérdidas y en las condiciones de seguridad y ergonomía.

4.4.6 Validación de hipótesis

Los coeficientes de trayectoria (β) entre los constructos mostraron, en su mayoría, efectos positivos y estadísticamente significativos, como se ilustró en la Figura 4.4. La Tabla 4.13 resume estos resultados y proporciona evidencia empírica para la validación de las hipótesis planteadas en el modelo conceptual.

En términos generales, se observaron relaciones significativas entre la IAMA, el enfoque en la FELO, LA SEER y la ECSU. En este sentido, cinco de las seis hipótesis propuestas (H1, H2, H3, H5 y H6) fueron estadísticamente aceptadas.

Por otra parte, la hipótesis H4 (IAMA $\rightarrow$ ECSU) no resultó estadísticamente significativa ($\beta = 0.091$, $p = 0.074$), por lo que no se encontró evidencia suficiente para su aceptación. Este resultado sugirió que la influencia de la implementación del mantenimiento autónomo sobre la sustentabilidad económica no fue directa, sino que se manifestó a través de variables intermedias como la eliminación de pérdidas y la seguridad y ergonomía.

Tabla 4.13. Coeficientes de trayectoria y significancia estadística del modelo de sustentabilidad social

Hipótesis	Relación	β (valor p)	Conclusión
H ₁	IAMA $\rightarrow$ FELO	0.738 ($p < 0.001$)	Aceptada
H ₂	IAMA $\rightarrow$ SEER	0.200 ($p < 0.001$)	Aceptada

H₃	FELO→SEER	0.546 (p < 0.001)	Aceptada
H₄	IAMA→ECSU	0.091 (p = 0.074)	Rechazada
H₅	SEER→ECSU	0.481 (p < 0.001)	Aceptada
H₆	FELO→ECSU	0.207 (p < 0.001)	Aceptada

4.4.7 Efectos indirectos y totales

La Tabla 4.14 presentó los efectos indirectos y totales entre las variables del modelo, los cuales resultaron estadísticamente significativos a un nivel de confianza del 99.9%.

En particular, se identificaron efectos indirectos relevantes de la IAMA sobre la ECSU mediados por el FELO y SEER. Específicamente, la trayectoria completa IAMA → FELO → SEER → ECSU presentó un efecto indirecto de 0.443 (p < 0.001), lo que indicó la existencia de una mediación parcial en cadena.

Asimismo, los resultados mostraron que IAMA ejerció un efecto total de 0.534 (p < 0.001) sobre ECSU, mientras que FELO (0.470, p < 0.001) y SEER (0.481, p < 0.001) también presentaron efectos totales significativos sobre la sustentabilidad económica.

En conjunto, estos hallazgos permitieron concluir que la implementación del mantenimiento autónomo no impactó directamente en la sustentabilidad económica, sino que su efecto se materializó mediante la reducción de pérdidas y la mejora de las condiciones de seguridad y ergonomía. Esto reforzó la importancia de los mecanismos intermedios en el modelo estructural.

Tabla 4.14. Efectos indirectos y totales del modelo de sustentabilidad económica

	Efectos indirectos		Efectos totales		
	IAMA	FELO	IAMA	FELO	SEER
FELO			0.738 (<0.001) SE=0.544		
SEER	0.403 (<0.001) SE=0.241		0.603 (<0.001) SE=0.361	0.546 (<0.001) SE=0.378	
ECSU	0.443 (<0.001) SE=0.234	0.263 (<0.001) SE=0.160	0.534 (<0.001) SE=0.282	0.47 (<0.001) SE=0.286	0.481 (<0.001) SE=0.327

4.4.8 Análisis de sensibilidad

La Tabla 4.15 presentó el análisis de sensibilidad de las relaciones entre las variables del modelo, el cual permitió identificar cómo variaron las probabilidades de alcanzar niveles altos (+) o bajos (-) en los constructos analizados.

En este contexto, un nivel alto de ocurrencia se definió como $P(Z > 1)$, mientras que un nivel bajo se consideró como $P(Z < -1)$, donde Z representó una variable estandarizada. Asimismo, se reportaron las probabilidades de ocurrencia conjunta entre variables, representadas por el símbolo (&), así como las probabilidades condicionales, indicadas mediante el índice de influencia (IF).

Los resultados evidenciaron que la IAMA ejerció una influencia relevante sobre el comportamiento de las demás variables del modelo. Por ejemplo, la ocurrencia de niveles altos en IAMA incrementó significativamente la probabilidad de que se presentaran niveles altos en el FELO, lo que reflejó la interdependencia entre estos constructos.

De manera similar, se observó que la combinación de altos niveles en FELO y SEER incrementó la probabilidad de alcanzar niveles altos en la ECSU lo que reforzó la importancia de los mecanismos intermedios dentro del modelo estructural.

En conjunto, estos hallazgos confirmaron la robustez del modelo desde una perspectiva probabilística y evidenciaron que las variaciones en los niveles de implementación de los factores críticos del TPM impactaron directamente en el comportamiento de las variables endógenas.

Table 4.15. Análisis de sensibilidad del modelo de sustentabilidad económico

			IAMA		FELO		SEER	
			+	-	+	-	+	-
			0.191	0.150	0.179	0.150	0.179	0.134
FELO	+	0.138	&=0.098 IF=0.511	&=0.000 IF=0.000				
	-	0.150	&=0.000 IF=0.000	&=0.106 IF=0.703				
SEER	+	0.179	&=0.089 IF=0.468	&=0.004 IF=0.027	&=0.077 IF=0.559	&=0.004 IF=0.027		
	-	0.134	&=0.000 IF=0.000	&=0.085 IF=0.865	&=0.004 IF=0.029	&=0.081 IF=0.541		

ECSU	+	0.199	&=0.089 IF=0.468	&=0.004 IF=0.027	&=0.077 IF=0.559	&=0.004 IF=0.027	&=0.122 IF=0.682	&=0.000 IF=0.000
	-	0.154	&=0.12 IF=0.064	&=0.065 IF=0.432	&=0.008 IF=0.059	&=0.081 IF=0.541	&=0.012 IF=0.068	&=0.089 IF=0.667

Una vez analizados los modelos de sustentabilidad social y económica, se procedió a evaluar el modelo reducido propuesto, el cual integró los factores clave identificados en los modelos anteriores, con el objetivo de simplificar la estructura del modelo y analizar su capacidad explicativa en la sustentabilidad desde un enfoque más parsimonioso.

4.5 Modelo reducido de sustentabilidad económica

El modelo reducido de sustentabilidad económica se centró en la relación entre la IAMA, la FELO y la ECSU, con el propósito de analizar de manera parsimoniosa los mecanismos principales mediante los cuales las prácticas del TPM influyeron en el desempeño económico organizacional.

A diferencia del modelo completo, este enfoque simplificó la estructura al eliminar variables intermedias, lo que permitió evaluar con mayor claridad los efectos directos e indirectos entre los constructos clave. La estructura del modelo se presentó en la Figura 4.5.

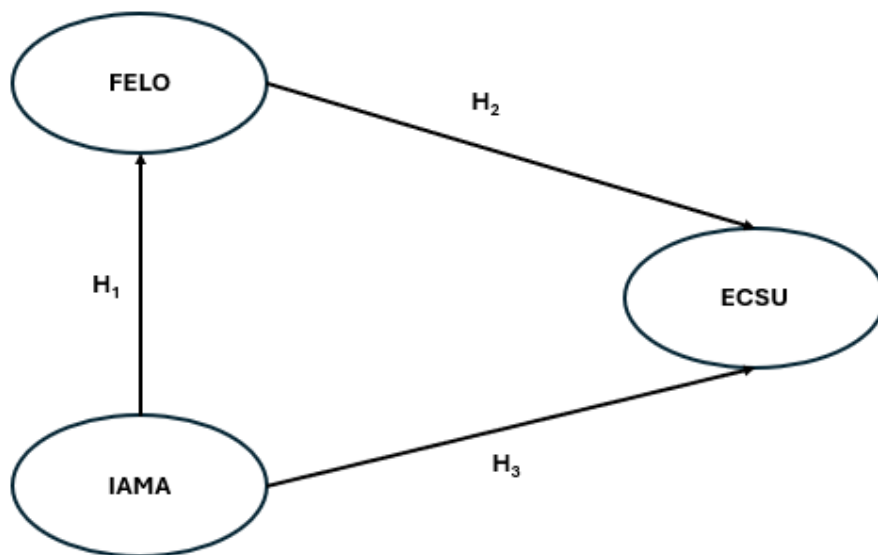


Figura 4.5. Modelo de sustentabilidad económica reducido

4.5.2 Hipótesis del modelo

A partir de la estructura planteada, se establecen las siguientes hipótesis:

- **H1:** La Implementación del Mantenimiento Autónomo (IAMA) tuvo un efecto positivo sobre el Enfoque en la Eliminación de Pérdidas (FELO).
- **H2:** La Implementación del Mantenimiento Autónomo (IAMA) tuvo un efecto positivo sobre la Sustentabilidad Económica (ECSU).
- **H3:** El Enfoque en la Eliminación de Pérdidas (FELO) tuvo un efecto positivo sobre la Sustentabilidad Económica (ECSU).

Con base en las hipótesis planteadas, se evalúa empíricamente el modelo reducido mediante el enfoque PLS-SEM, con el objetivo de analizar la capacidad explicativa de una estructura más parsimoniosa y contrastar sus resultados con los obtenidos en los modelos anteriores.

4.5.3 Evaluación del modelo de medición

Los resultados del modelo de medición evidenciaron niveles adecuados de fiabilidad interna y validez convergente. Los coeficientes de alfa de Cronbach (0.785–0.890) y la confiabilidad compuesta (0.875–0.919) superaron el umbral recomendado de 0.70, lo que indicó consistencia interna en los constructos analizados.

Asimismo, los valores de varianza media extraída (AVE = 0.669–0.701) confirmaron una adecuada validez convergente. En relación con la colinealidad, los valores del factor de inflación de la varianza (VIF < 2.6) descartaron la presencia de problemas de multicolinealidad.

Adicionalmente, las cargas factoriales de los ítems fueron superiores a 0.70 y estadísticamente significativas ($p < 0.001$), lo que respaldó la validez de constructo del modelo.

Tabla 4.16. Índices de validación del modelo reducido de sustentabilidad económica

	IAMA	FELO	ECSU
R^2		0.544	0.384
Adjusted R^2		0.54	0.379
Composite reliability	0.875	0.910	0.919
Cronbach's alpha	0.785	0.876	0.890

Average variance extracted (AVE)	0.701	0.669	0.695
VIF (collinearity)	2.215	2.540	1.594
Q ²		0.544	0.385
Normality (JB)	Yes	No	Yes

4.5.4 Validez discriminante

La validez discriminante fue evaluada mediante el criterio de Fornell-Larcker, observándose que los constructos presentaron una adecuada diferenciación conceptual.

Table 4.17 Matriz de Fornell-Larcker del modelo reducido de sustentabilidad económica

	IAMA	FELO	ECSU
IAMA	0.837	0.735	0.516
FELO	0.735	0.818	0.600
ECSU	0.516	0.600	0.834

4.5.5 Evaluación del modelo estructural

El modelo estructural simplificado se evaluó mediante los índices globales de ajuste y de eficiencia, que permitieron evaluar la calidad del modelo estimado. La Tabla 4.18 presentó los valores del coeficiente promedio de trayectoria (APC), del coeficiente de determinación promedio (ARS), del indicador de colinealidad (AVIF) y del índice de bondad de ajuste (GoF).

En conjunto, estos resultados evidenciaron un ajuste adecuado del modelo, ya que los indicadores cumplieron con los criterios establecidos en la literatura para modelos PLS-SEM, lo que confirmó que el modelo fue interpretable, presentó capacidad predictiva y no hubo problemas de colinealidad.

Tabla 4.18. Índices de ajuste y eficiencia del modelo estructural reducido de sustentabilidad económica

Índice	β (Valor p)	Criterio
Coeficiente promedio de trayectoria / Average Path Coefficient (APC)	0.465 (p < 0.001)	p < 0.05
Coeficiente promedio de determinación / Average R-squared (ARS)	0.464 (p < 0.001)	p < 0.05
R ² ajustado promedio / Average Adjusted R-squared (AARS)	0.461 (p < 0.001)	p < 0.05
Factor de inflación de la varianza promedio por bloque / Average Block VIF (AVIF)	2.142	≤ 5 (ideal ≤ 3.3)

Factor de inflación de la varianza total / Average Full Collinearity VIF (AFVIF)	2.116	≤ 5 (ideal ≤ 3.3)
Índice de bondad de ajuste de Tenenhaus / Tenenhaus GoF	0.565	>0.36

La Figura 4.6 presentó el modelo estructural simplificado, en el cual se observaron las relaciones directas entre los constructos, así como los coeficientes estandarizados de trayectoria (β), los niveles de significancia estadística y los coeficientes de determinación (R^2) de las variables endógenas.

Los resultados indicaron que la IAMA ejerció un efecto positivo y significativo sobre el FELO ($\beta = 0.738$, $p < 0.001$). Asimismo, FELO influyó directamente sobre la ECSU ($\beta = 0.476$, $p < 0.001$).

Por su parte, IAMA presentó un efecto directo menor, aunque significativo, sobre ECSU ($\beta = 0.179$, $p < 0.001$).

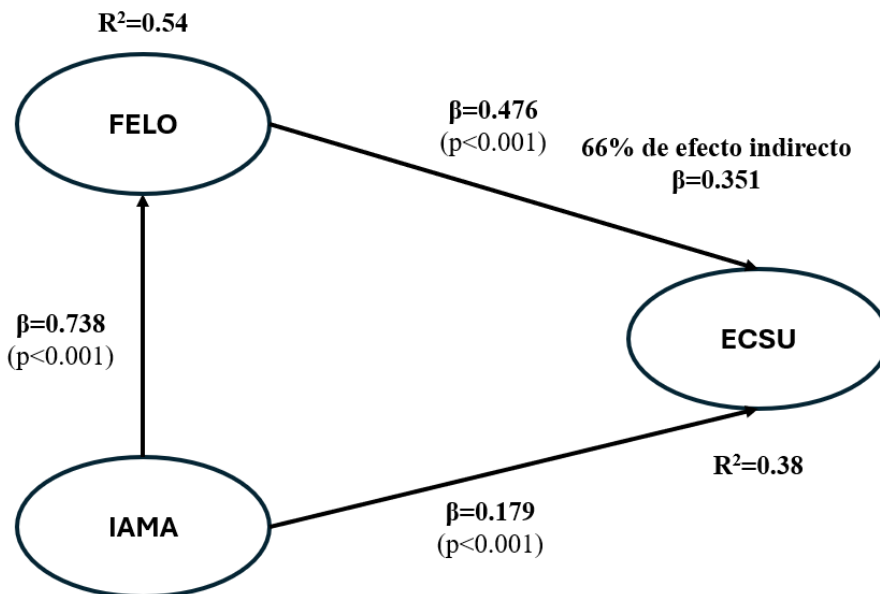


Figura 4.6. Modelo reducido de sustentabilidad económica evaluado

4.5.6 Validación de hipótesis

Los coeficientes de trayectoria (β) entre los constructos del modelo reducido fueron positivos y estadísticamente significativos ($p < 0.01$), como se observó en la Figura 4.6. La Tabla 4.19 resumió estos resultados y proporcionó evidencia empírica que respaldó las hipótesis planteadas en el modelo conceptual.

En términos generales, se identificaron relaciones significativas entre la IAMA, el FELP) y ECSU. En este sentido, las tres hipótesis propuestas (H1, H2 y H3) fueron estadísticamente aceptadas.

En particular, la IAMA presentó un efecto positivo y significativo sobre FELO ($\beta = 0.738$, $p < 0.001$), mientras que FELO influyó de manera directa y significativa sobre la ECSU ($\beta = 0.476$, $p < 0.001$). Asimismo, se observó que IAMA mantuvo un efecto directo positivo, aunque de menor magnitud, sobre ECSU ($\beta = 0.179$, $p < 0.001$).

En conjunto, estos resultados confirmaron la coherencia estructural del modelo reducido y respaldaron las relaciones teóricas propuestas entre los constructos

Tabla 4.19. Coeficientes de trayectoria y significancia estadística del modelo reducido de sustentabilidad económica

Hipótesis	Relación	β (valor p)	Conclusión
H ₁	IAMA→FELO	0.738 ($p < 0.001$)	Aceptada
H ₂	FELO→ECSU	0.476 ($p < 0.001$)	Aceptada
H ₃	IAMA→ECSU	0.179 ($p < 0.001$)	Aceptada

4.5.7 Efectos indirectos y totales

El análisis de efectos indicó que la IAMA influyó en la ECSU tanto de forma directa como indirecta a través de FELO.

El efecto indirecto se obtuvo a partir del producto de las rutas IAMA → FELO y FELO → ECSU ($0.738 \times 0.476 = 0.351$). Por su parte, el efecto total de IAMA sobre ECSU fue de 0.530, resultado de la suma del efecto directo (0.179) y el efecto indirecto (0.351).

El efecto indirecto representó aproximadamente el 66.2% del efecto total, lo que evidenció que una parte sustancial de la relación entre mantenimiento autónomo y sustentabilidad económica ocurrió a través de la eliminación de pérdidas.

En este sentido, FELO actuó como una variable mediadora relevante dentro del modelo.

Tabla 4.20. Efectos indirectos y totales del modelo de sustentabilidad social

	Efectos indirectos	Efectos totales
--	--------------------	-----------------

	IAMA	FELO	IAMA	FELO
FELO			0.738	
ECSU	0.351		0.530	0.476

4.5.8 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se presentó en la Tabla 4.21, en la que se evaluaron las probabilidades de ocurrencia de niveles altos (+) y bajos (–) en las variables del modelo, así como su comportamiento conjunto.

Los resultados mostraron que, cuando se presentó un nivel alto de implementación del mantenimiento autónomo (IAMA+), la probabilidad de alcanzar niveles altos en el enfoque de eliminación de pérdidas (FELO+) fue de 0.511, mientras que la probabilidad de obtener niveles altos de sustentabilidad económica (ECSU+) fue de 0.468.

En contraste, en escenarios con bajos niveles de implementación de IAMA o FELO, las probabilidades de obtener resultados favorables en la sustentabilidad económica disminuyeron, alcanzando valores de 0.703 y 0.432, respectivamente.

En conjunto, estos resultados sugirieron que niveles bajos de implementación de los factores críticos del TPM se asociaron con un mayor riesgo en términos de desempeño económico, mientras que niveles altos favorecieron la generación de resultados positivos. Asimismo, se observó que el efecto de las variables no fue completamente lineal, lo que reforzó la utilidad del análisis de sensibilidad para comprender el comportamiento probabilístico del modelo en distintos escenarios de implementación.

Table 4.21. Análisis de sensibilidad del modelo reducido de sustentabilidad económico

		IAMA		FELO	
		+	-	+	-
		0.191	0.150	0.138	0.862
FELO	+	0.138	&=0.098; IF=0.511	&=0.000; IF =0.000	
	-	0.150	&=0.000; IF =0.000	&=0.106; IF =0.703	
ECSU	+	0.199	&=0.089; IF =0.468	&=0.077; IF =0.559	&=0.004; IF =0.027

	-	0.154	&=0.012; IF =0.064	&=0.065; IF =0.432	&=0.008; IF =0.059	&=0.081; IF =0.541
--	---	--------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------

En conjunto, los resultados de los tres modelos analizados evidenciaron la relevancia de los factores críticos del TPM para explicar las distintas dimensiones de la sustentabilidad organizacional. De manera consistente, se observó que variables como el mantenimiento autónomo, la capacitación continua, la participación activa y el enfoque en la eliminación de pérdidas presentaron efectos significativos, tanto directos como indirectos, sobre los resultados sociales y económicos.

Asimismo, la identificación de mecanismos de mediación y comportamientos no lineales reforzó la complejidad de las relaciones entre los constructos, así como la pertinencia del enfoque PLS-SEM para su análisis.

A partir de estos hallazgos, en la siguiente sección se procedió a discutir los resultados a la luz de la literatura existente, con el propósito de contrastar la evidencia empírica obtenida y profundizar en sus implicaciones teóricas y práctica

Discusión

El presente capítulo tuvo como objetivo interpretar los resultados de los modelos estructurales estimados y analizar las relaciones entre los constructos desde una perspectiva teórica, metodológica y práctica.

En particular, se examinaron los efectos directos, indirectos y no lineales identificados mediante WarpPLS en el modelo de sustentabilidad social, en el de sustentabilidad económica y en el modelo reducido de sustentabilidad económica. Asimismo, los hallazgos se contrastaron con la literatura existente y se discutieron sus implicaciones en el contexto del TPM.

5.1 Discusión de resultados modelo social

5.1.1 Relación entre MCOC y COTR – H_1

Los resultados del modelo estructural confirmaron la existencia de una relación directa y estadísticamente significativa entre el MCOC y COTR. con un coeficiente de trayectoria $\beta = 0.673$ ($p < 0.001$) y un poder explicativo de $R^2 = 0.452$. Este resultado indicó que el liderazgo directivo y la cultura organizacional explicaron el 45.2% de la variabilidad en la efectividad de los programas de capacitación, lo que resaltó su papel como factores clave en la implementación del TPM. Estos hallazgos fueron consistentes con (Shannon et al., 2023), quienes destacaron que el compromiso de la alta dirección, la asignación de recursos y la estructuración de programas formativos constituyeron factores críticos para el éxito del TPM.

Desde una perspectiva organizacional, los resultados sugirieron que cuando la alta dirección comunicó una visión clara del TPM, estableció mecanismos sistemáticos de seguimiento y promovió indicadores de liderazgo, se generó un entorno favorable para la identificación de pérdidas y el desarrollo de competencias mediante programas de capacitación más estructurados.

En este sentido, las organizaciones manufactureras difícilmente pudieron alcanzar niveles elevados de efectividad en la formación sin un compromiso directivo genuino y sostenido. Esto validó el papel del liderazgo como promotor del desarrollo del capital humano, en concordancia con estudios recientes que vincularon el compromiso

organizacional con el aprendizaje continuo y la participación del personal en contextos TPM (Au-Yong et al., 2022).

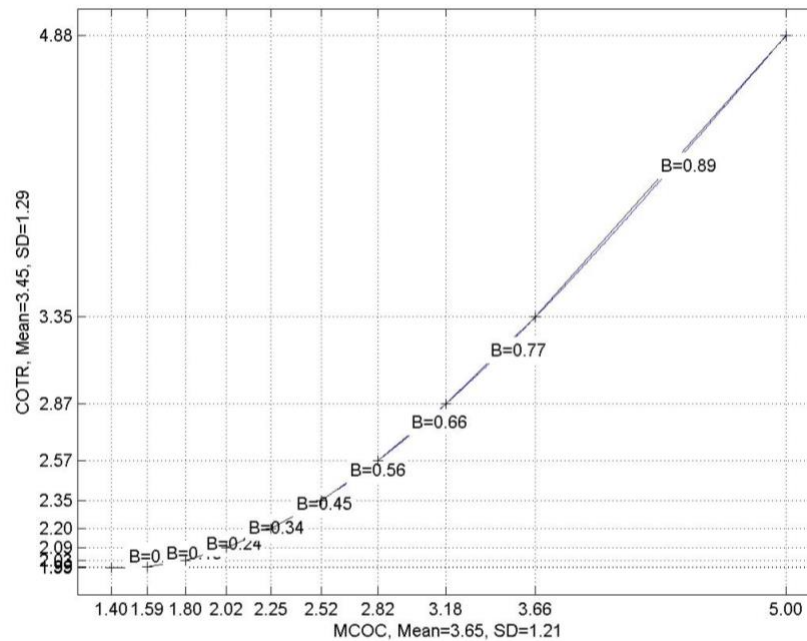


Figura 5.1. Relación MCOC→COTR

El análisis no lineal, presentado en la Figura 5.1, reveló un patrón de rendimientos marginales crecientes. Los coeficientes evolucionaron de valores cercanos a cero en niveles iniciales de MCOC a valores más altos en contextos de mayor madurez organizacional.

En particular, se identificaron dos umbrales relevantes: un punto de activación en niveles intermedios de compromiso (MCOC $\approx$ 2.25), donde comenzó una aceleración en los resultados organizacionales, y un umbral de optimización (MCOC $\approx$ 3.18), asociado con una mayor eficiencia en los procesos de capacitación.

Este comportamiento fue consistente con la Teoría de Recursos y Capacidades y con los modelos de madurez organizacional, que plantearon que el desarrollo sostenido del liderazgo generó efectos acumulativos sobre las capacidades internas (Deng et al., 2023).

En el análisis de sensibilidad, la probabilidad de alcanzar altos niveles de capacitación bajo condiciones de alto compromiso gerencial ($P(\text{COTR}+|\text{MCOC}+) = 0.620$) contrastó significativamente con la de escenarios de bajo compromiso

($P(\text{COTR+|MCOC-}) = 0.063$), lo que evidenció una diferencia sustancial en el desempeño organizacional. Asimismo, la probabilidad nula de resultados negativos bajo condiciones favorables sugirió que el liderazgo actuó como un mecanismo de protección frente a fallas en los procesos de capacitación.

En conjunto, estos resultados permitieron sostener que el compromiso de la dirección no solo actuó como un facilitador, sino como un elemento estructurante del sistema de formación dentro del TPM. Su influencia trascendió la implementación de programas aislados, al contribuir a la consolidación de condiciones organizacionales que favorecieron el aprendizaje continuo, la prevención de fallas y el desarrollo sostenido del capital humano.

5.1.2 Relación entre MCOC y APAL – H₂

Los resultados del modelo estructural evidenciaron una relación directa y significativa entre el MCOC y APAL, con un coeficiente de trayectoria $\beta = 0.391$ ($p < 0.001$), así como un efecto indirecto de $\beta = 0.337$, lo que configuró un efecto total de $\beta = 0.728$, siendo uno de los más relevantes del modelo.

Asimismo, el coeficiente de determinación ($R^2 = 0.667$) indicó que el 66.7% de la variabilidad en la participación activa fue explicada por MCOC y COTR, lo que posicionó a estos factores como elementos clave para la movilización del capital humano en iniciativas de mejora continua.

Estos resultados fueron consistentes con (Singh y Gurtu, 2021), quienes destacaron que el compromiso de la alta dirección, la capacitación del personal y la cultura organizacional constituyeron factores determinantes para la participación en programas TPM. En este sentido, cuando la dirección comunicó una visión clara, estableció mecanismos de seguimiento, promovió espacios de diálogo y reconoció el desempeño del personal, se generaron condiciones organizacionales que favorecieron la participación activa, el intercambio de ideas y la resolución colaborativa de problemas.

El análisis no lineal, presentado en la Figura 5.2, mostró un comportamiento escalonado en el desarrollo organizacional, donde los coeficientes de regresión evolucionaron desde $\beta = 0.36$ en organizaciones con niveles básicos de liderazgo (MCOC ≈ 1.40) hasta $\beta = 0.60$ en contextos de mayor madurez organizacional (MCOC ≈ 5.00).

En particular, se identificó un punto crítico de inflexión en $\text{MCOC} \approx 3.71$ ($\beta = 0.49$), a partir del cual la organización experimentó un cambio significativo en su capacidad de movilización del capital humano.

Figura 5.2. Relación $\text{MCOC} \rightarrow \text{APAL}$

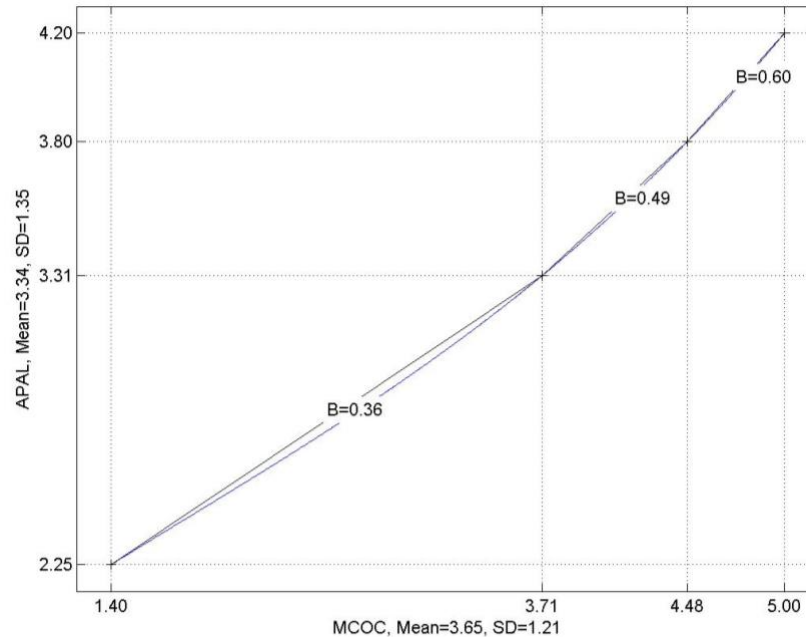


Figura 5.2. Relación $\text{MCOC} \rightarrow \text{APAL}$

Este comportamiento permitió identificar tres etapas en el desarrollo organizacional: una fase inicial participativa, en la que niveles bajos de MCOC generaron respuestas limitadas; una fase de transformación acelerada, donde la organización incrementó su capacidad de involucramiento; y una fase de eficiencia participativa, en la que el liderazgo consolidado permitió canalizar el esfuerzo colectivo de manera más efectiva hacia objetivos organizacionales.

Desde el análisis de sensibilidad, se observó que la probabilidad de alcanzar altos niveles de participación bajo condiciones de alto compromiso gerencial ($P(\text{APAL}+|\text{MCOC}+) = 0.680$) contrastó significativamente con escenarios de bajo compromiso ($P(\text{APAL}+|\text{MCOC}-) = 0.021$), lo que evidenció una diferencia sustancial en el desempeño organizacional. Asimismo, la probabilidad nula de escenarios negativos bajo condiciones favorables sugirió que el liderazgo efectivo redujo el riesgo de apatía organizacional.

En conjunto, estos resultados permitieron sostener que el compromiso de la dirección no actuó únicamente como un facilitador, sino como un detonante del comportamiento participativo dentro del TPM. Su influencia se tradujo en la creación de entornos organizacionales donde la participación se convirtió en un mecanismo estructural para la mejora continua y la generación de valor sostenible.

5.1.3 Relación entre COTR y APAL – H_3

Los resultados del modelo estructural confirmaron una relación directa y significativa entre COTR y APAL, con un coeficiente de trayectoria $\beta = 0.502$ ($p < 0.001$). Este resultado indicó que la implementación de programas de capacitación —orientados a la identificación de desperdicios, el desarrollo sistemático de habilidades, el acceso a materiales actualizados y la formación especializada del personal— favoreció la activación de procesos participativos dentro de la organización.

En este sentido, los programas de capacitación no solo transmitieron conocimiento técnico, sino que generaron condiciones organizacionales que promovieron la participación del personal en iniciativas de mejora continua, el intercambio de ideas y la resolución colaborativa de problemas. Estos hallazgos fueron consistentes con (Aldave-Vasquez, 2024; Au-Yong et al., 2022), quienes señalaron que la capacitación continua bajo el enfoque TPM constituyó un factor determinante para el involucramiento del personal, ya que el conocimiento adquirido fortaleció el empoderamiento y el compromiso organizacional.

El análisis no lineal, presentado en la Figura 5.3, mostró un patrón de rendimientos marginales decrecientes, donde los coeficientes de regresión evolucionaron desde $\beta = 0.93$ en niveles iniciales de capacitación ($\text{COTR} \approx 1.29$) hasta $\beta = 0.61$ en niveles más avanzados ($\text{COTR} \approx 5.00$).

Este comportamiento permitió identificar tres etapas diferenciadas. La primera correspondió a una fase inicial de alta receptividad, en la que la capacitación generó un impacto significativo en la participación. Posteriormente, se observó una fase de estabilización, donde se alcanzó un equilibrio entre competencia técnica y participación organizacional. Finalmente, se identificó una fase de consolidación, en la que los beneficios participativos se mantuvieron, aunque con menores incrementos marginales.

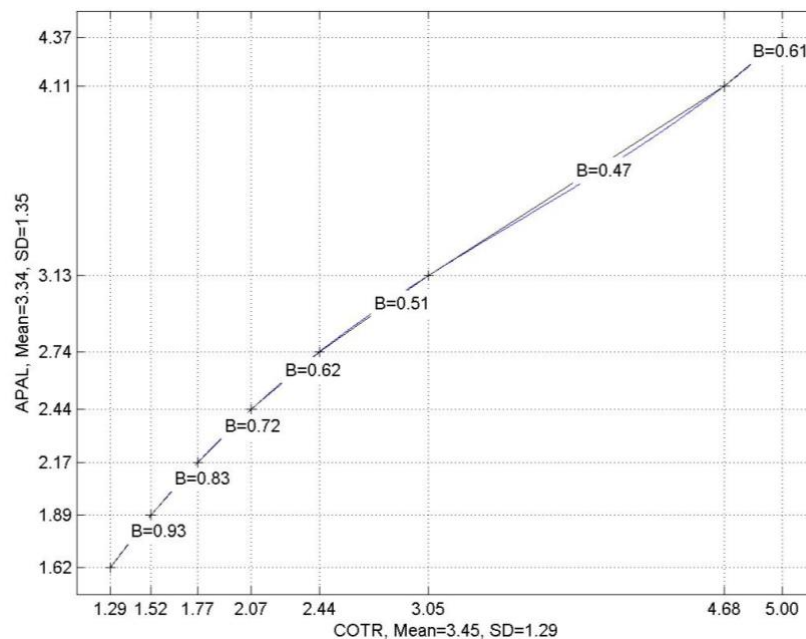


Figura 5.3. Relación COTR→APAL

Este comportamiento sugirió que las inversiones iniciales en capacitación generaron los mayores beneficios en términos de participación activa, mientras que en etapas más avanzadas fue necesario diversificar las estrategias de formación para mantener el dinamismo organizacional. En este sentido, las organizaciones debieron priorizar el acceso generalizado al conocimiento técnico antes de avanzar hacia esquemas de especialización más profundos, favoreciendo estrategias inclusivas que reconocieran el potencial participativo de todo el personal.

Desde el análisis de sensibilidad, se observó que la probabilidad de alcanzar altos niveles de participación bajo condiciones de alta capacitación ($P(APAL+|COTR+) = 0.585$) contrastó significativamente con escenarios de baja capacitación ($P(APAL+|COTR-) = 0.000$), lo que evidenció la incompatibilidad entre bajos niveles de formación y altos niveles de participación. Asimismo, las probabilidades nulas de escenarios negativos bajo condiciones favorables sugirieron que la capacitación actuó como un mecanismo que eliminó el riesgo de des involucramiento organizacional.

En contraste, organizaciones con bajos niveles de inversión en capacitación enfrentaron condiciones de bajo desempeño caracterizadas por una mayor probabilidad de apatía organizacional. En este sentido, la capacitación continua no debió interpretarse

como un costo operativo, sino como una inversión estratégica orientada a crear condiciones donde el talento humano pudiera desarrollarse y contribuir activamente a la mejora de los procesos. Estos resultados fueron consistentes con estudios que destacaron que la integración de prácticas TPM con herramientas como 5S y Poka-Yoke fortaleció la participación y el desempeño operativo (Sharma et al., 2020).

5.1.4 Relación entre COTR y SOSU – H_4

Los resultados del modelo estructural confirmaron la existencia de una relación directa y estadísticamente significativa entre COTR y SOSU, con un coeficiente de trayectoria $\beta = 0.392$ ($p < 0.001$). Este resultado indicó que la implementación de programas de formación no solo contribuyó al desarrollo de habilidades técnicas, sino que también influyó positivamente en el bienestar organizacional.

En este sentido, la capacitación continua favoreció la generación de entornos laborales más estables, al mejorar la comunicación interna, reducir errores operativos y fortalecer la confianza del personal en sus capacidades. Estos elementos se reflejaron en una mejor percepción del clima organizacional, una disminución de inconformidades relacionadas con las condiciones de trabajo y un mayor sentido de pertenencia dentro de la organización. Estos hallazgos fueron consistentes con estudios previos que señalaron que la capacitación y el conocimiento orientado a la sustentabilidad influyeron positivamente en el bienestar de los empleados y en el desempeño organizacional (Birou et al., 2019; Samadhiya y Agrawal, 2023).

El análisis no lineal, presentado en la Figura 5.4, mostró un comportamiento con rendimientos marginales decrecientes, donde los efectos de la capacitación sobre la sustentabilidad social fueron más intensos en las etapas iniciales y tendieron a estabilizarse conforme aumentó el nivel de madurez organizacional.

Este comportamiento permitió identificar tres etapas. La primera correspondió a una fase inicial de alta sensibilidad, donde la capacitación generó impactos sociales significativos. Posteriormente, se observó una fase de estabilización, en la que los efectos disminuyeron. Finalmente, se identificó una fase de recuperación, donde estrategias de capacitación más avanzadas reactivaron los beneficios sociales.

Estos resultados fueron consistentes con investigaciones recientes que señalaron que la integración del TPM con estrategias de sustentabilidad e Industria 4.0 fortaleció la resiliencia organizacional y los resultados sociales (Samadhiya y Agrawal, 2023).

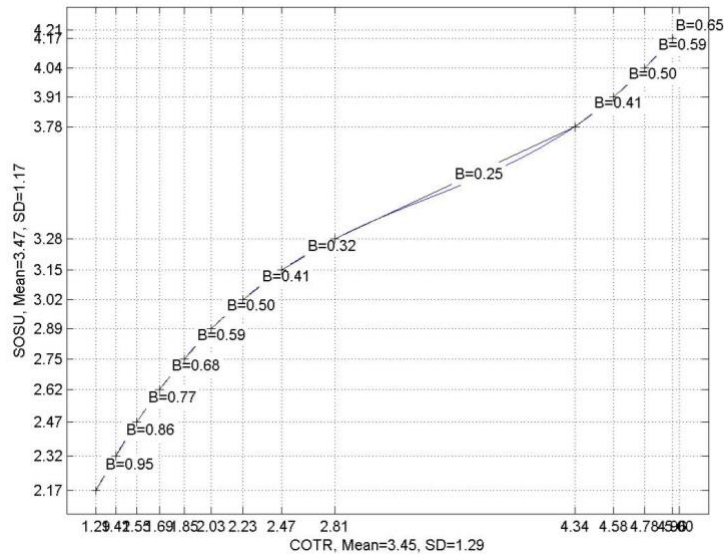


Figura 5.4. Relación entre COTR y SOSU

Desde el análisis de sensibilidad, se observó que la probabilidad de alcanzar altos niveles de sustentabilidad social bajo condiciones de alta capacitación ($P(\text{SOSU}+|\text{COTR}+) = 0.679$) fue considerablemente mayor en comparación con escenarios de baja capacitación ($P(\text{SOSU}+|\text{COTR}-) = 0.019$). Asimismo, la probabilidad nula de resultados negativos bajo condiciones favorables ($P(\text{SOSU}-|\text{COTR}+) = 0.000$) evidenció que la capacitación actuó como un mecanismo que redujo significativamente el riesgo de deterioro en el bienestar organizacional, lo cual coincidió con estudios que destacaron el impacto de la capacitación en la retención del personal y en la mejora del clima laboral (Birou et al., 2019).

En contraste, niveles bajos de inversión en capacitación se asociaron con una mayor probabilidad de resultados desfavorables en la sustentabilidad social, lo que sugirió la existencia de condiciones organizacionales menos favorables para el desarrollo del personal. Desde la perspectiva de la teoría basada en recursos, estos resultados permitieron interpretar la capacitación como un recurso estratégico que contribuyó a la

generación de ventajas competitivas sostenibles mediante el fortalecimiento del capital humano (Cua et al., 2001; Samadhiya y Agrawal, 2023).

En conjunto, estos resultados permitieron sostener que la capacitación continua constituyó un factor clave dentro del TPM, al vincular el desarrollo de competencias con la mejora del bienestar laboral y la consolidación de entornos organizacionales más sostenibles.

5.1.5 Relación entre APAL y SOSU - H₅

Los resultados del modelo estructural confirmaron una relación directa y significativa entre APAL y la SOSU, con un coeficiente de trayectoria $\beta = 0.418$ ($p < 0.001$). Este resultado evidenció que la participación del personal constituyó un elemento central en la generación de resultados asociados al bienestar organizacional dentro del enfoque TPM.

En este sentido, cuando las organizaciones implementaron mecanismos que promovieron la participación —como incentivos para reportar mejoras, programas de reconocimiento, círculos de calidad y espacios colaborativos para la resolución de problemas— se generaron efectos positivos en el entorno laboral, tales como una mejor percepción del clima organizacional, la reducción de quejas relacionadas con las condiciones de trabajo, el fortalecimiento de la retención del talento y el desarrollo de capacidades de liderazgo a nivel operativo. Estos hallazgos fueron consistentes con Au-Yong et al. (2022) quienes señalaron que la participación activa del personal constituyó un factor determinante para la sustentabilidad social en contextos TPM.

Desde una perspectiva organizacional, estos resultados sugirieron que la participación no debió entenderse como una práctica aislada, sino como un mecanismo estructural mediante el cual las organizaciones lograron traducir las prácticas TPM en beneficios sociales tangibles. En este sentido, el TPM trascendió su dimensión técnica y se consolidó como un enfoque que integró el desarrollo humano con la mejora de los procesos productivos.

El análisis no lineal, presentado en la Figura 5.5, mostró un comportamiento no monótono en forma de “U”, donde los coeficientes de regresión evolucionaron desde $\beta = 0.76$ en niveles iniciales de participación ($APAL \approx 1.00$), descendieron hasta un punto

mínimo de $\beta = 0.29$ en niveles intermedios (APAL ≈ 2.62), y posteriormente se incrementaron nuevamente hasta $\beta = 0.64$ en niveles avanzados (APAL ≈ 4.98).

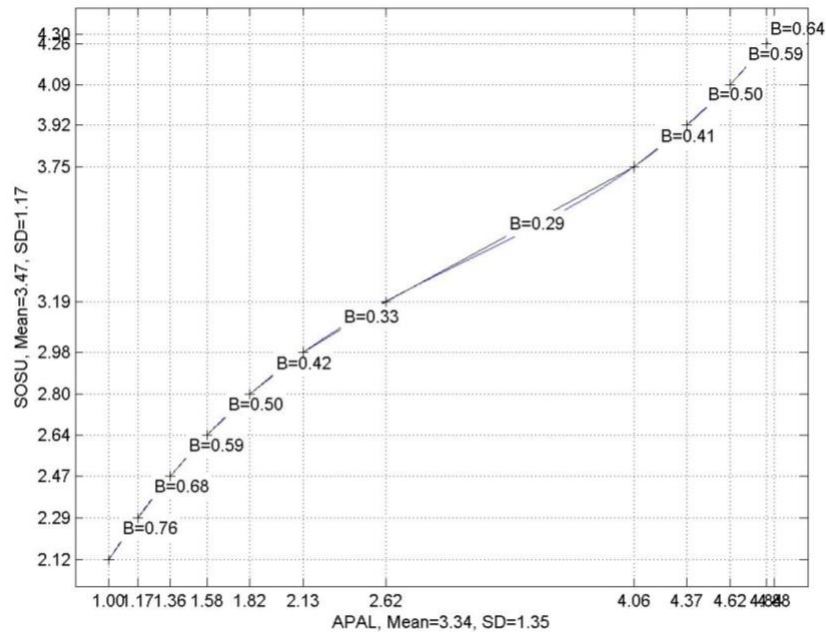


Figura 5.5. Relación entre APAL y SOSU

Este comportamiento permitió identificar tres etapas en el desarrollo organizacional: una fase inicial de alta sensibilidad, donde la participación generó impactos sociales significativos; una fase de estabilización, en la que los efectos tendieron a disminuir; y una fase de recuperación, en la que la participación madura reactivó los beneficios sociales mediante nuevas formas de involucramiento. Este patrón sugirió que la participación requirió procesos de renovación continua para mantener su efectividad, evitando su rutinización y promoviendo estrategias dinámicas que mantuvieran el compromiso del personal (Aldave-Vásquez et al., 2024).

Desde el análisis de sensibilidad, se observó que la probabilidad de alcanzar altos niveles de sustentabilidad social bajo condiciones de alta participación ($P(\text{SOSU}+|\text{APAL}+) = 0.694$) contrastó significativamente con escenarios de baja participación ($P(\text{SOSU}+|\text{APAL}-) = 0.019$), lo que evidenció una diferencia sustancial en el desempeño organizacional. Asimismo, la probabilidad nula de escenarios negativos bajo condiciones favorables sugirió que la participación actuó como un mecanismo de protección frente al deterioro del clima laboral.

En conjunto, estos resultados indicaron que la participación activa del personal constituyó un factor estratégico para la sustentabilidad social, al integrar el desarrollo humano con la mejora continua de los procesos. Desde esta perspectiva, fomentar la participación no solo contribuyó al desempeño organizacional, sino que también permitió construir entornos de trabajo más sostenibles y orientados a la generación de valor a largo plazo.

En conjunto, los resultados del modelo de sustentabilidad social evidenciaron que los factores críticos del TPM, particularmente el compromiso de la dirección, la capacitación continua y la participación activa del personal, constituyeron mecanismos fundamentales para la generación de bienestar organizacional. La interacción entre estos elementos permitió explicar cómo las prácticas TPM trascendieron su dimensión operativa para impactar directamente en la experiencia laboral, el clima organizacional y el desarrollo del capital humano.

A partir de estos hallazgos, se procedió a analizar el modelo de sustentabilidad económica, con el objetivo de evaluar cómo estos mismos factores, desde una perspectiva operativa, influyeron en el desempeño económico de las organizaciones.

5.2 Discusión de resultados modelo económico

5.2.1 Relación entre IAMA y FELO – H₁

Los resultados del modelo estructural evidenciaron que la IAMA ejerció un efecto directo, positivo y significativo sobre FELO, con un coeficiente de trayectoria $\beta = 0.738$ ($p < 0.001$) y un poder explicativo de $R^2 = 0.544$. Este resultado indicó que el 54.4% de la variabilidad en FELO pudo atribuirse al nivel de implementación de prácticas de mantenimiento autónomo.

Desde el análisis de sensibilidad, se observó una relación robusta entre ambas variables. En particular, la probabilidad de alcanzar altos niveles de eliminación de pérdidas bajo condiciones de alta implementación de IAMA ($P(\text{FELO}+|\text{IAMA}+) = 0.511$) evidenció la relevancia de esta práctica para garantizar resultados operativos favorables.

Asimismo, la probabilidad nula de escenarios negativos bajo condiciones de alto IAMA ($P(\text{FELO}-|\text{IAMA}+) = 0.000$) sugirió que el mantenimiento autónomo actuó como un mecanismo de control orientado a prevenir pérdidas operativas.

En contraste, la probabilidad de obtener resultados desfavorables cuando IAMA fue bajo ($P(\text{FELO}-|\text{IAMA}-) = 0.703$) reflejó un riesgo significativo en contextos donde estas prácticas no fueron implementadas.

El análisis no lineal, presentado en la Figura 5.6, mostró que cuando IAMA aumentó de 1.07 a 5.00, FELO se incrementó de 1.43 a 4.96, respectivamente. Este comportamiento evidenció una relación positiva entre ambas variables, donde niveles más altos de mantenimiento autónomo se asociaron con una mayor capacidad para eliminar pérdidas operativas.

Asimismo, se observó que los coeficientes β variaron a lo largo de la curva de regresión (de $\beta = 1.15$ a $\beta = 0.61$). Esto indicó que la relación fue más intensa en niveles bajos de IAMA y tendió a estabilizarse en etapas más avanzadas, evidenciando rendimientos marginales decrecientes.

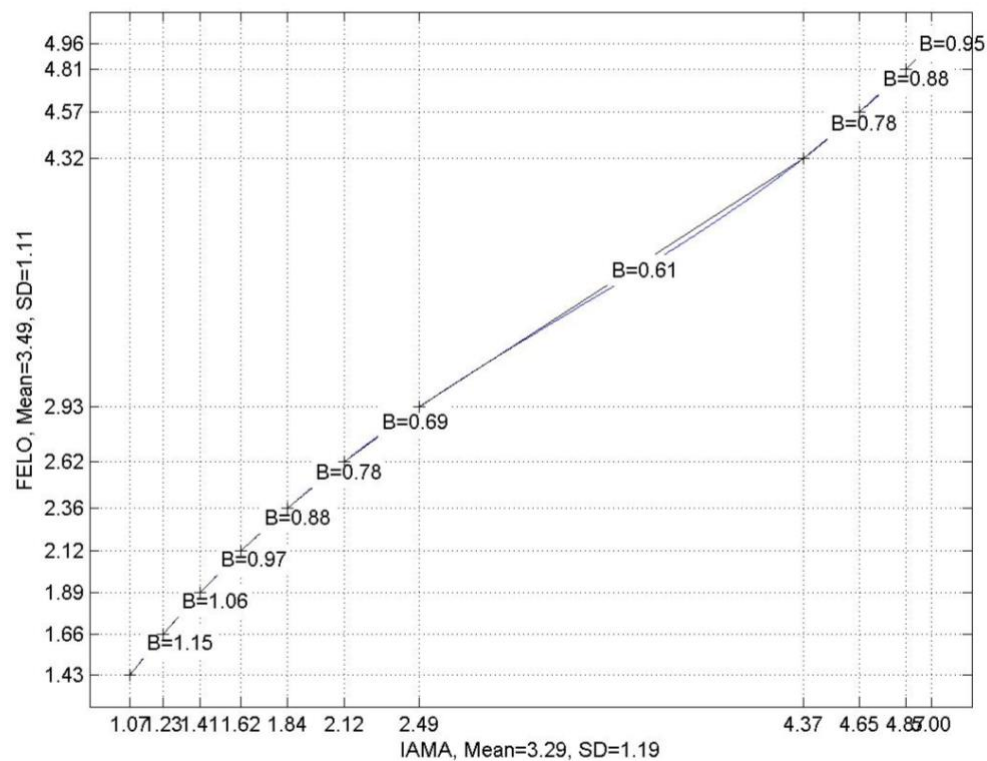


Figura 5.6. Relación entre IAMA y FELO

En términos prácticos, estos resultados sugirieron que el desarrollo de capacidades de mantenimiento autónomo en el personal operativo permitió la detección temprana de fallas, la reducción de pérdidas y la mejora en el control de los procesos productivos. En

este sentido, las organizaciones debieron priorizar la implementación de programas de mantenimiento autónomo como una estrategia inicial para mejorar la eficiencia operativa, lo que implicó invertir en capacitación técnica y en herramientas que facilitaron la inspección, el monitoreo y la toma de decisiones en el nivel operativo.

Estos hallazgos fueron consistentes con Singh y Awoke (2023), quienes demostraron una relación positiva entre el mantenimiento autónomo y el desempeño operativo, así como con Marta Wolska et al. (2023), quienes reportaron mejoras significativas en la eficiencia productiva tras la implementación del TPM. En conjunto, estos estudios reforzaron la idea de que el mantenimiento autónomo constituyó un pilar estratégico para la identificación y eliminación de pérdidas en entornos manufactureros.

5.2.2 Relación entre IAMA y SEER – H₂

Los resultados del modelo estructural evidenciaron que la IAMA ejerció un efecto directo, positivo y significativo sobre SEER con un coeficiente de trayectoria $\beta = 0.200$ ($p < 0.001$), explicando el 12% de su variabilidad.

Asimismo, se identificó un efecto indirecto de $\beta = 0.403$ a través del Enfoque en la Eliminación de Pérdidas (FELO), lo que configuró un efecto total de $\beta = 0.603$ y permitió explicar en conjunto el 36.1% de la variabilidad de SEER.

Este resultado sugirió que el impacto del mantenimiento autónomo sobre la seguridad y ergonomía no solo se produjo de forma directa, sino también mediante la mejora de las condiciones operativas.

Desde el análisis de sensibilidad, se observó que la probabilidad de alcanzar altos niveles de seguridad y ergonomía bajo condiciones de alta implementación de IAMA ($P(\text{SEER}+|\text{IAMA}+) = 0.468$) evidenció la relevancia de esta práctica para generar entornos de trabajo más seguros.

Asimismo, la probabilidad nula de escenarios negativos bajo condiciones favorables ($P(\text{SEER}-|\text{IAMA}+) = 0.000$) indicó que el mantenimiento autónomo actuó como un mecanismo preventivo frente a riesgos laborales.

En contraste, la probabilidad de resultados desfavorables cuando IAMA fue bajo ($P(\text{SEER}-|\text{IAMA}-) = 0.865$) reflejó un alto riesgo asociado a la falta de implementación

de estas prácticas. Por otra parte, la probabilidad de obtener resultados positivos bajo condiciones desfavorables ($P(\text{SEER}+|\text{IAMA}-) = 0.004$) fue prácticamente nula.

El análisis no lineal, presentado en la Figura 5.7, mostró una relación positiva entre IAMA y SEER, donde al incrementarse el nivel de implementación del mantenimiento autónomo de 1.07 a 5.00, los indicadores de seguridad y ergonomía aumentaron de 2.84 a 4.02, respectivamente. Asimismo, se observó que los coeficientes β disminuyeron a lo largo de la curva (de $\beta = 0.53$ a $\beta = 0.17$), lo que indicó que el impacto de IAMA fue más intenso en las etapas iniciales de implementación y tendió a estabilizarse en niveles más avanzados, evidenciando rendimientos marginales decrecientes.

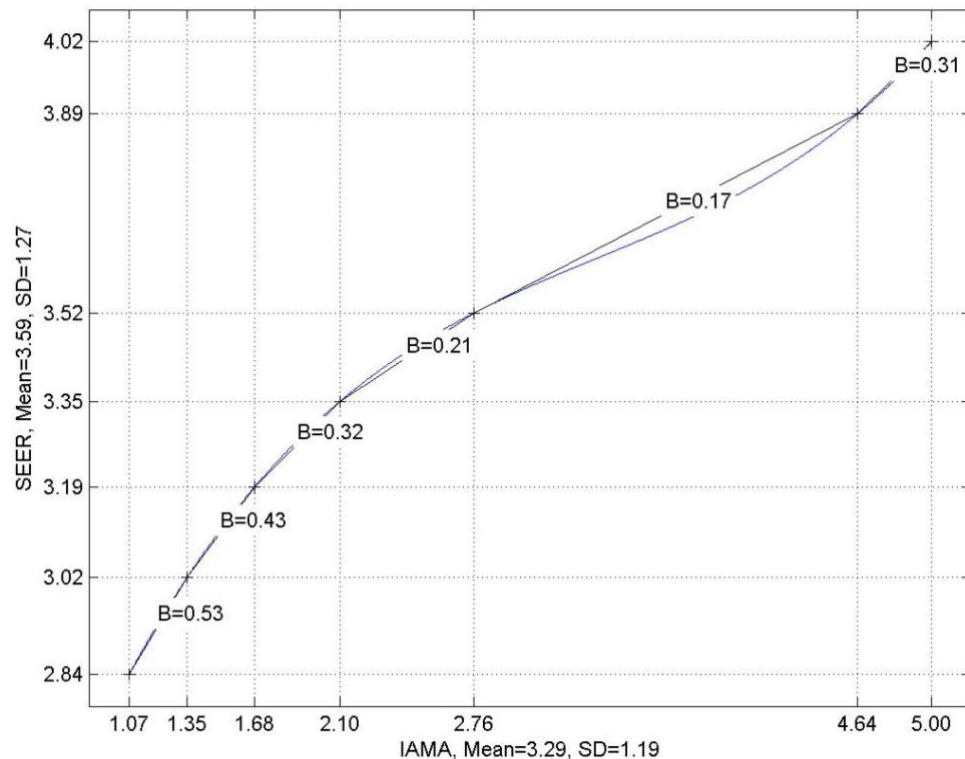


Figura 5.7. Relación entre IAMA y SEER

En términos prácticos, estos resultados sugirieron que la implementación de programas de mantenimiento autónomo contribuyó a la reducción de riesgos laborales mediante la detección temprana de anomalías y la mejora en las condiciones de operación de los equipos. En este sentido, las organizaciones debieron desarrollar estrategias de implementación progresiva, priorizando las etapas iniciales donde se observó un mayor impacto, así como fortalecer la capacitación del personal operativo, la estandarización de

procedimientos y la realización de auditorías periódicas que permitieron prevenir incidentes.

Estos hallazgos fueron consistentes y evidenciaron mejoras en condiciones de seguridad mediante la participación del personal en tareas de mantenimiento, así como con Fernández Torres (2024), quien reportó incrementos en la disponibilidad operativa tras la implementación de TPM y herramientas complementarias. En conjunto, estos estudios reforzaron la idea de que el empoderamiento del personal en actividades de mantenimiento contribuyó de manera significativa a mejorar las condiciones de seguridad y ergonomía en entornos industriales.

5.2.3 Relación entre FELO y SEER – H₃

Los resultados del modelo estructural evidenciaron que el Enfoque en la Eliminación de Pérdidas (FELO) ejerció un efecto directo, positivo y significativo sobre la Seguridad y Ergonomía (SEER), con un coeficiente de trayectoria $\beta = 0.546$ ($p < 0.001$), siendo uno de los efectos más relevantes del modelo. Este resultado indicó que la reducción de las pérdidas operativas contribuyó de manera significativa a mejorar las condiciones de seguridad y ergonomía en las organizaciones.

Desde el análisis de sensibilidad, se confirmó la fortaleza de esta relación, ya que la probabilidad de alcanzar altos niveles de seguridad y ergonomía bajo condiciones de alta eliminación de pérdidas ($P(\text{SEER+}|\text{FELO+}) = 0.559$) evidenció una dependencia significativa entre ambas variables. Asimismo, la probabilidad de escenarios negativos bajo condiciones favorables ($P(\text{SEER-}|\text{FELO+}) = 0.029$) fue baja, lo que sugirió que la eliminación de pérdidas redujo la ocurrencia de condiciones laborales desfavorables.

En contraste, la probabilidad de obtener resultados negativos en seguridad y ergonomía bajo condiciones de baja eliminación de pérdidas ($P(\text{SEER-}|\text{FELO-}) = 0.541$) indicó que la ausencia de estrategias orientadas a la reducción de pérdidas pudo generar entornos laborales con mayores riesgos, caracterizados por incidentes, desorden operativo y menor compromiso del personal.

Por otro lado, la probabilidad de obtener resultados positivos bajo condiciones desfavorables ($P(\text{SEER+}|\text{FELO-}) = 0.027$) fue mínima, lo que reforzó la importancia de FELO como factor determinante en la mejora de SEER.

El análisis no lineal, presentado en la Figura 5.8, mostró una relación positiva entre FELO y SEER, donde al incrementarse el nivel de implementación de estrategias de eliminación de pérdidas de 1.01 a 5.00, los indicadores de seguridad y ergonomía aumentaron de 1.64 a 4.51, respectivamente. Asimismo, se observó que los coeficientes β disminuyeron a lo largo de la curva (de $\beta = 0.62$ a $\beta = 0.29$), lo que indicó que el impacto de FELO fue mayor en las etapas iniciales de la implementación y tendió a estabilizarse en etapas más avanzadas, evidenciando rendimientos marginales decrecientes.

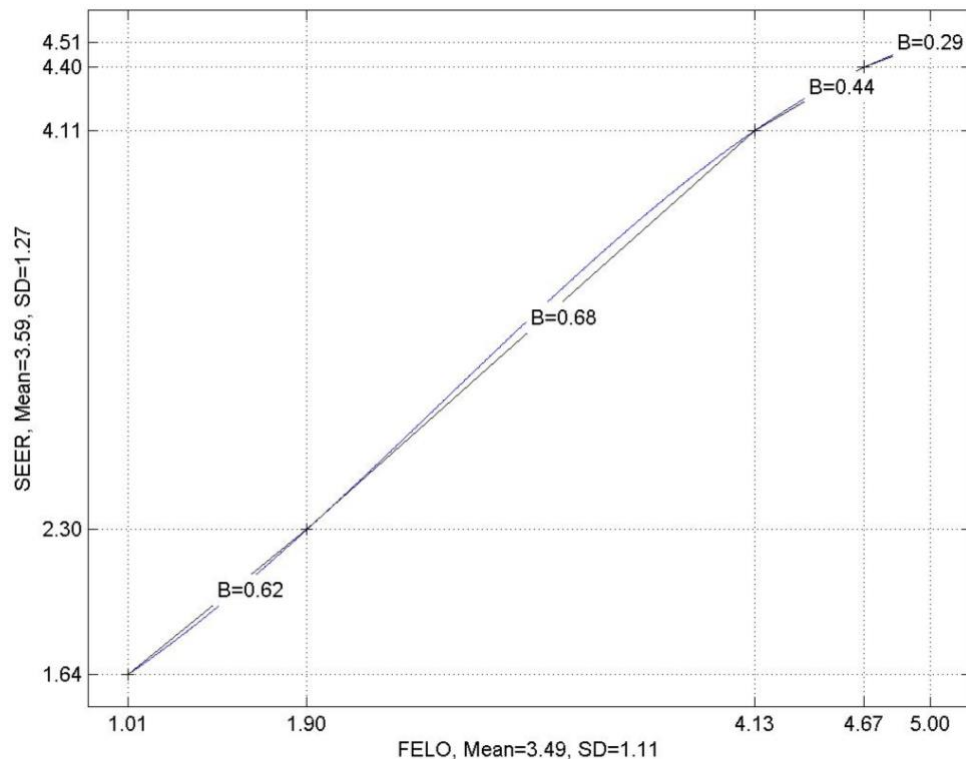


Figura 5.8. Relación entre FELO y SEER

En términos prácticos, estos resultados sugirieron que las organizaciones debían implementar programas integrales que combinaran la eliminación de pérdidas con estrategias de seguridad y ergonomía. En este sentido, se recomendó priorizar las inversiones en las etapas iniciales de implementación de FELO, donde se observó un mayor impacto, así como fortalecer los sistemas de análisis de causa raíz, la comunicación interdepartamental y los equipos de mejora continua que integraron aspectos productivos y de seguridad.

Estos hallazgos fueron consistentes con Santos (2012), quien reportó mejoras en condiciones ergonómicas y reducción de ausentismo tras la implementación de TPM, así como con Anusha Chintada (2022), quien evidenció incrementos en la disponibilidad operativa al integrar prácticas TPM con un enfoque en el entorno laboral. En conjunto, estos estudios reforzaron la idea de que la eliminación de pérdidas y la mejora de las condiciones de seguridad constituyeron procesos interdependientes dentro del sistema TPM.

5.2.4 Relación entre IAMA y ECSU – H₄

Los resultados del modelo estructural mostraron que la IAMA no presentó un efecto directo significativo sobre la ECSU, con un coeficiente de trayectoria $\beta = 0.091$ ($p = 0.074$).

No obstante, se identificó un efecto indirecto significativo de $\beta = 0.443$ ($p < 0.001$) a través FELO y SEER lo que configuró un efecto total de $\beta = 0.534$ ($p < 0.001$) y permitió explicar en conjunto el 28.2% de la variabilidad de ECSU.

Este resultado indicó que el impacto del mantenimiento autónomo sobre el desempeño económico no se manifestó de manera directa, sino mediante mecanismos operativos intermedios.

Desde el análisis de sensibilidad, se observó que la probabilidad de alcanzar altos niveles de sustentabilidad económica bajo condiciones de alta implementación de IAMA ($P(\text{ECSU}+|\text{IAMA}+) = 0.468$) evidenció la relevancia de esta práctica en la generación de resultados económicos favorables. Sin embargo, la presencia de una probabilidad baja de escenarios negativos ($P(\text{ECSU}-|\text{IAMA}+) = 0.064$) sugirió que factores adicionales, como la planeación de la producción o el balanceo de líneas, también influyeron en el desempeño económico. Por otro lado, la probabilidad de resultados desfavorables cuando IAMA fue bajo ($P(\text{ECSU}-|\text{IAMA}-) = 0.432$) reflejó el riesgo asociado a la falta de implementación de prácticas de mantenimiento autónomo.

El análisis no lineal, presentado en la Figura 5.9, mostró una relación positiva entre IAMA y ECSU, donde al incrementarse el nivel de implementación de mantenimiento autónomo de 1.07 a 5.00, los indicadores de sustentabilidad económica aumentaron de 3.04 a 3.44, respectivamente. Asimismo, se observó que los coeficientes β disminuyeron

a lo largo de la curva (de $\beta = 0.10$ a $\beta = 0.04$), lo que indicó que el impacto de IAMA fue mayor en las etapas iniciales de implementación y tendió a estabilizarse en niveles más avanzados, evidenciando rendimientos marginales decrecientes.

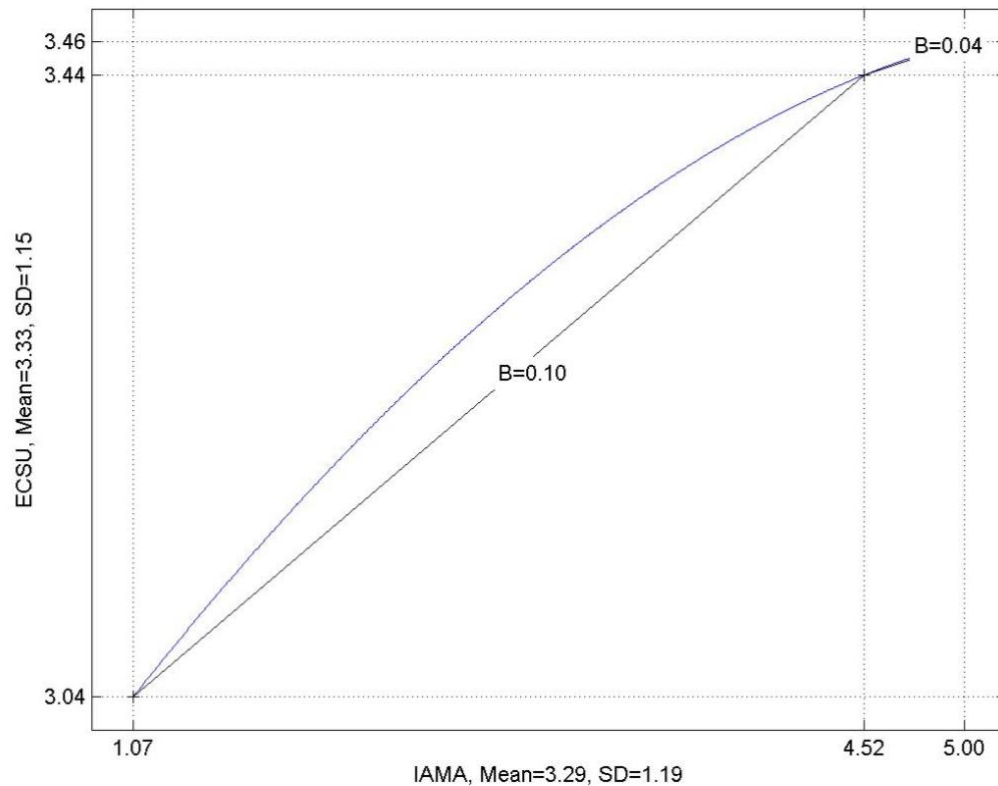


Figura 5.9. Relación entre IAMA y ECSU

En términos prácticos, estos resultados sugirieron que el mantenimiento autónomo debió considerarse una estrategia base que, aunque no generó por sí sola resultados económicos directos significativos, permitió activar mecanismos operativos que sí impactaron en el desempeño financiero. En este sentido, las organizaciones debieron priorizar la implementación de programas de IAMA en etapas iniciales, acompañados de capacitación técnica y herramientas de monitoreo que permitieron a los operadores identificar anomalías y contribuir a la toma de decisiones.

Estos hallazgos fueron consistentes con (Chen Shin Min, 2011), quienes reportaron mejoras en disponibilidad, eficiencia y calidad asociadas a la implementación de mantenimiento autónomo, así como con (Marta Wolska et al., 2023), quienes evidenciaron incrementos en el rendimiento productivo bajo el enfoque TPM. En

conjunto, estos estudios reforzaron la idea de que el mantenimiento autónomo generó beneficios económicos principalmente mediante la mejora de la eficiencia operativa y la reducción de costos asociados al mantenimiento.

5.2.5 Relación entre SEER y ECSU – H₅

Los resultados del modelo estructural evidenciaron una relación directa, positiva y significativa entre SEER y la ECSU, con un coeficiente de trayectoria $\beta = 0.481$ ($p < 0.001$), explicando hasta el 32.7% de la variabilidad de la ECSU. Este resultado indicó que las mejoras en las condiciones de seguridad y ergonomía tuvieron un impacto directo en el desempeño económico de las organizaciones.

En el análisis de sensibilidad se observó que la probabilidad de alcanzar altos niveles de sustentabilidad económica bajo condiciones favorables de seguridad y ergonomía ($P(ECSU+|SEER+) = 0.682$) evidenció la relevancia de esta variable para la generación de resultados económicos positivos. Este comportamiento pudo explicarse por la reducción de costos asociados a accidentes laborales, incapacidades, gastos médicos y paros no programados. Sin embargo, la presencia de una probabilidad baja de escenarios negativos bajo condiciones favorables ($P(ECSU-|SEER+) = 0.068$) sugirió que otros factores del sistema productivo también influyeron en el desempeño económico.

Por otro lado, la probabilidad de resultados desfavorables cuando las condiciones de seguridad y ergonomía fueron deficientes ($P(ECSU-|SEER-) = 0.667$) reflejó un riesgo importante para las organizaciones, ya que niveles elevados de accidentes, ausentismo y fallas operativas generaron costos adicionales que impactaron negativamente la sustentabilidad económica.

Asimismo, la probabilidad nula de obtener resultados positivos bajo condiciones desfavorables ($P(ECSU+|SEER-) = 0.000$) confirmó que un entorno inseguro limitó considerablemente la posibilidad de alcanzar un desempeño económico favorable.

El análisis no lineal, presentado en la Figura 5.10, mostró una relación positiva entre SEER y ECSU, donde al incrementarse los niveles de seguridad y ergonomía de 1.00 a 4.97, los indicadores de sustentabilidad económica aumentaron de 1.82 a 4.08, respectivamente. Asimismo, se observó que los coeficientes β disminuyeron a lo largo de la curva (de $\beta = 0.51$ a $\beta = 0.43$), lo que indicó que el impacto fue mayor en las etapas

iniciales de implementación y tendió a estabilizarse en niveles más avanzados, evidenciando rendimientos marginales decrecientes.

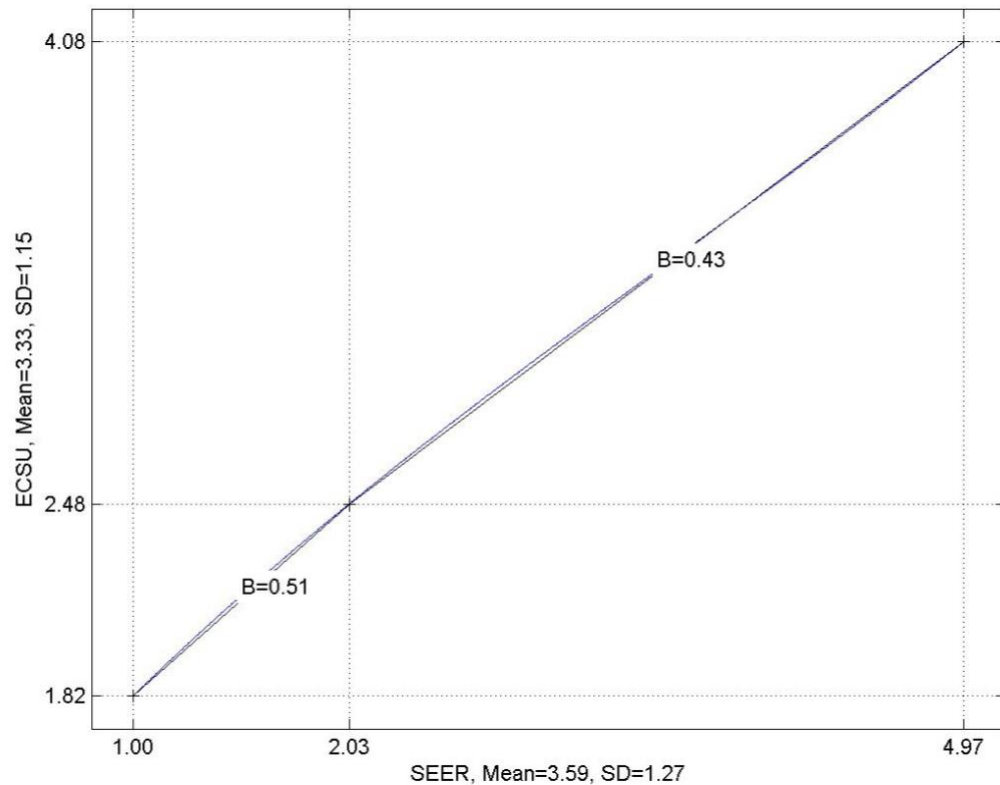


Figura 5.10. Relación entre SEER y ECSU

En términos prácticos, estos resultados sugirieron que las organizaciones debían considerar la seguridad y la ergonomía como una inversión estratégica, más que como un costo operativo. En este sentido, se recomendó priorizar mejoras básicas en las condiciones de seguridad, donde se observaron los mayores beneficios económicos, y posteriormente avanzar hacia esquemas de optimización más complejos. Asimismo, resultó necesario implementar sistemas de monitoreo que integraron indicadores de seguridad y de desempeño económico, lo que permitió identificar la relación entre ambas dimensiones y facilitar la toma de decisiones.

Estos hallazgos fueron consistentes con (Abbas Al-Refaie, 2020), quien destacó la importancia de incorporar la gestión de riesgos dentro de la implementación del TPM, así como con (Crosby, 2022), quienes evidenciaron que los pilares de seguridad dentro del TPM generaron beneficios económicos al prevenir incidentes costosos. En conjunto, estos

estudios reforzaron la idea de que las mejoras en seguridad y ergonomía contribuyeron directamente a la sustentabilidad económica en entornos manufactureros.

5.2.6 Relación entre FELO y ECSU – H₆

Los resultados del modelo estructural evidenciaron que el FELO ejerció un efecto directo, positivo y significativo sobre la ECSU con un coeficiente de trayectoria $\beta = 0.207$, explicando el 12.6% de su variabilidad. Asimismo, se identificó un efecto indirecto de $\beta = 0.263$ a través SEER, el cual explicó el 16% de la variabilidad, siendo este mayor que el efecto directo. En conjunto, se obtuvo un efecto total de $\beta = 0.470$, explicando el 28.2% de la variabilidad de ECSU. Este resultado indicó que la eliminación de pérdidas no solo impactó directamente el desempeño económico, sino también indirectamente mediante la mejora de las condiciones de seguridad y ergonomía.

En el análisis de sensibilidad se observó que la probabilidad de alcanzar altos niveles de sustentabilidad económica bajo condiciones de alta eliminación de pérdidas ($P(\text{ECSU}+|\text{FELO}+) = 0.559$) evidenció la relevancia de esta práctica para la generación de beneficios económicos. Sin embargo, la baja probabilidad de escenarios negativos ($P(\text{ECSU}-|\text{FELO}+) = 0.059$) sugirió que factores externos al ámbito operativo, como aspectos administrativos o de planeación, también pudieron influir en el desempeño económico. Por otro lado, la probabilidad de obtener resultados desfavorables cuando FELO fue bajo ($P(\text{ECSU}-|\text{FELO}-) = 0.541$) reflejó un riesgo significativo, mientras que la probabilidad de obtener resultados positivos bajo estas condiciones ($P(\text{ECSU}+|\text{FELO}-) = 0.004$) fue prácticamente nula.

El análisis no lineal, presentado en la Figura 5.11, mostró una relación positiva entre FELO y ECSU, donde al incrementarse el nivel de implementación de estrategias de eliminación de pérdidas de 1.01 a 5.00, los indicadores de sustentabilidad económica aumentaron de 2.70 a 3.60, respectivamente. Asimismo, se observó que los coeficientes β disminuyeron a lo largo de la curva (de $\beta = 0.14$ a $\beta = 0.05$), lo que indicó que el impacto fue mayor en las etapas iniciales de implementación y tendió a estabilizarse en niveles más avanzados, evidenciando rendimientos marginales decrecientes.

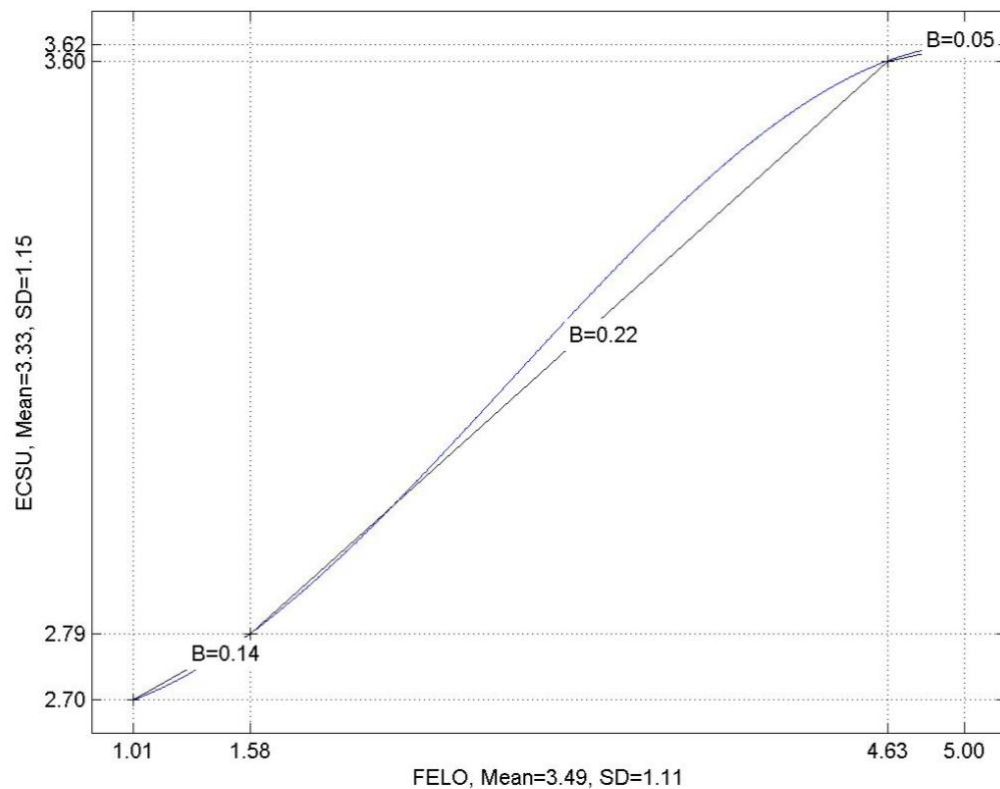


Figura 5.11. Relación entre FELO y ECSU

En términos prácticos, estos resultados sugirieron que las organizaciones debían implementar sistemas estructurados orientados a la eliminación de pérdidas, especialmente en las etapas iniciales, donde se observaron mayores beneficios económicos. Para ello, se recomendó desarrollar estrategias por fases que incluyeron la identificación de las principales fuentes de pérdida, la implementación de métricas económicas y la formación de equipos multidisciplinarios capacitados en análisis de causa raíz y evaluación de beneficios.

Asimismo, resultó necesario fortalecer los sistemas de registro y digitalización de pérdidas operativas, con el fin de facilitar el análisis de su relación con indicadores financieros y mejorar la toma de decisiones. En este sentido, las organizaciones debieron evolucionar sus sistemas de evaluación del desempeño para reconocer aquellas iniciativas que generaron impactos económicos medibles, promoviendo un ciclo de mejora continua en el que la eliminación de pérdidas y la sustentabilidad económica se reforzaron mutuamente.

Estos hallazgos fueron consistentes con Mohan (2023), quien reportó mejoras en indicadores asociados a pérdidas de recursos mediante la implementación de TPM, así como con Travi-Magener et al. (2023), quienes evidenciaron reducciones significativas en pérdidas operativas que se tradujeron en beneficios económicos cuantificables. En conjunto, estos estudios reforzaron la idea de que la eliminación de pérdidas constituyó un mecanismo fundamental para la generación de valor económico en entornos manufactureros.

En conjunto, los resultados del modelo de sustentabilidad económica evidenciaron que los factores críticos del TPM, en particular el mantenimiento autónomo, la eliminación de pérdidas y las condiciones de seguridad y ergonomía, influyeron de manera significativa en el desempeño económico de las organizaciones.

Los hallazgos mostraron que, aunque algunas relaciones no se manifestaron de forma directa, su impacto se materializó a través de efectos indirectos y mecanismos intermedios. Esto resaltó la naturaleza sistémica del modelo y la interdependencia entre sus constructos.

No obstante, la complejidad del modelo completo sugirió la necesidad de explorar una representación más parsimoniosa que permitiera identificar los mecanismos fundamentales que explicaron la sustentabilidad económica. En este sentido, se propuso un modelo reducido de sustentabilidad económica, en el que se consideraron únicamente los constructos de mayor relevancia estructural, con el objetivo de analizar de manera más clara las relaciones directas, los efectos de mediación y la capacidad explicativa del modelo en términos operativos y gerenciales.

5.3 Discusión de resultados modelo económico simple

5.3.1 Relación entre IAMA y FELO– H_1

Los resultados indicaron que la relación entre la IAMA y la FELO presentó un comportamiento no lineal, con rendimientos decrecientes a medida que aumentaba el nivel de implementación.

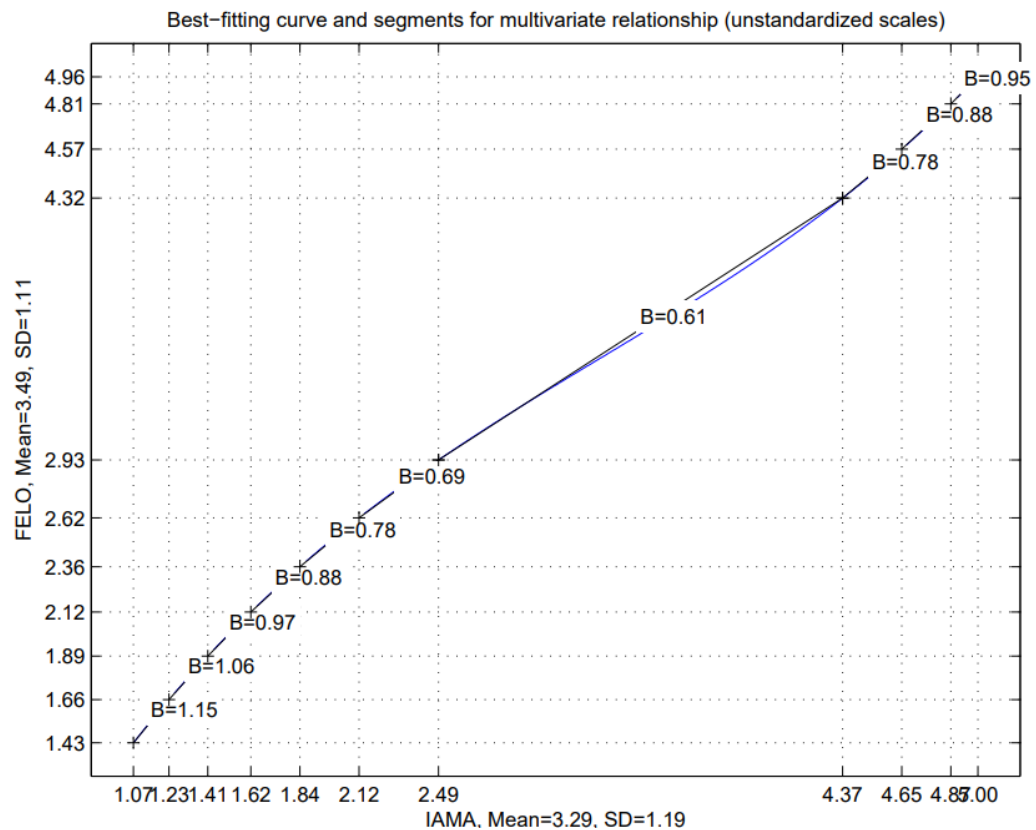


Figura 5.12. Relación entre IAMA y FELO

Como se observó en la Figura 5.12, los coeficientes β variaron de valores elevados en etapas iniciales ($\beta \approx 1.15$) a valores moderados en niveles avanzados ($\beta \approx 0.61$), lo que indica que el impacto de IAMA sobre FELO fue más intenso en las primeras fases de adopción.

Este comportamiento sugirió que, en etapas tempranas, la incorporación de prácticas de mantenimiento autónomo permitió identificar y corregir rápidamente ineficiencias operativas, lo que generó mejoras importantes en la eliminación de pérdidas.

Sin embargo, conforme la organización alcanzó niveles más altos de madurez, el efecto incremental del mantenimiento autónomo tendió a disminuir, lo que evidencia un proceso de estabilización operativa.

5.3.2 Relación entre IAMA y ECSU – H_2

En la relación entre IAMA y la ECSU se observó un patrón no lineal caracterizado por rendimientos marginales decrecientes.

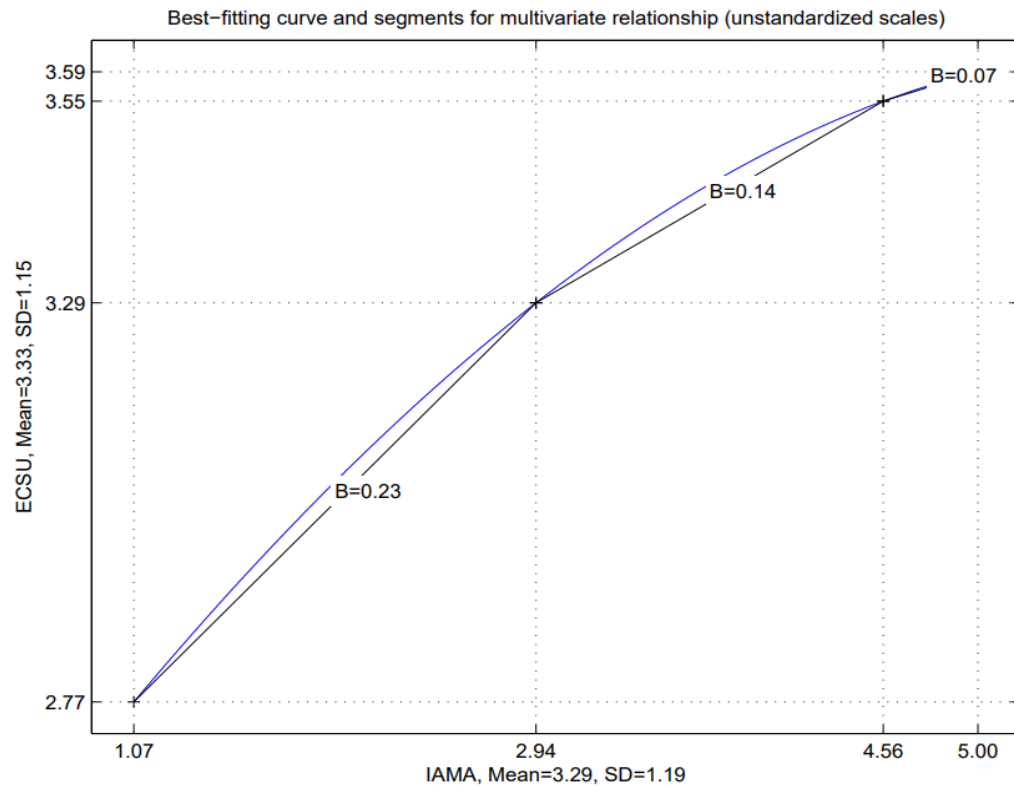


Figura 5.13. Relación entre IAMA y ECSU

De acuerdo con la Figura 5.13, los coeficientes β disminuyeron conforme aumentó el nivel de implementación, pasando de $\beta \approx 0.23$ en niveles bajos a $\beta \approx 0.14$ y posteriormente a $\beta \approx 0.07$ en niveles más altos.

Este comportamiento indicó que los mayores beneficios económicos derivados del mantenimiento autónomo se concentraron en las etapas iniciales e intermedias. En estas fases, la reducción de fallas, tiempos muertos y costos operativos generó un impacto más significativo sobre el desempeño económico.

A medida que el sistema productivo alcanzó mayores niveles de eficiencia, los beneficios adicionales tendieron a ser menores, reflejando una saturación progresiva del efecto.

5.3.3 Relación entre FELO y ECSU – H_3

La relación entre FELO y la ECSU también presentó un comportamiento no lineal, aunque con una intensidad más estable en comparación con las otras relaciones.

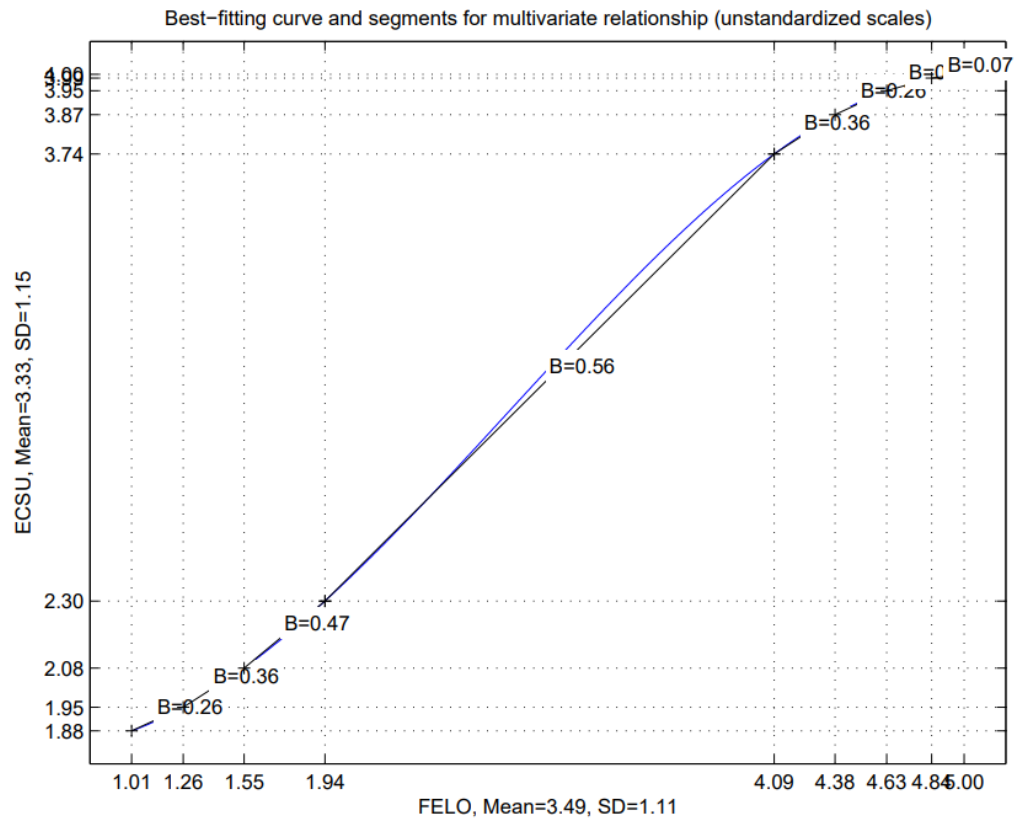


Figura 5.14. Relación entre FELO y ECSU

Como se mostró en la Figura 5.14, los coeficientes β oscilaron entre $\beta \approx 0.26$ en niveles bajos, alcanzaron valores cercanos a $\beta \approx 0.56$ en niveles intermedios, y posteriormente se estabilizaron en valores alrededor de $\beta \approx 0.36$ en niveles altos.

Este patrón sugirió que la eliminación de pérdidas tuvo un impacto creciente en el desempeño económico durante las etapas iniciales e intermedias, donde la reducción de desperdicios y reprocesos generó mejoras significativas en la eficiencia operativa. Sin embargo, en niveles avanzados, el efecto tendió a moderarse, lo que indicó que los beneficios económicos adicionales fueron más limitados conforme el sistema se optimizó.

5.3.4 Comparación entre modelos

En términos integrales, la comparación entre los modelos analizados permitió identificar diferencias relevantes en la manera en que los factores críticos del TPM influyeron en las distintas dimensiones de la sustentabilidad.

Mientras que el modelo de sustentabilidad social evidenció una mayor dependencia de factores organizacionales, como el compromiso directivo, la participación y la capacitación, el modelo de sustentabilidad económica resaltó la importancia de los mecanismos operativos, en particular la eliminación de pérdidas y las condiciones de seguridad y ergonomía.

Por su parte, el modelo reducido de sustentabilidad económica confirmó que el mantenimiento autónomo influyó en el desempeño económico principalmente de manera indirecta, mediante la eliminación de pérdidas. Esto permitió simplificar la estructura del modelo sin perder capacidad explicativa.

Esta comparación sugirió que, aunque los modelos completos ofrecieron una visión más amplia del sistema, las versiones reducidas permitieron identificar con mayor claridad los mecanismos clave de generación de valor en el TPM.

5.3.5 Discusión teórica e implicaciones

Desde el punto de vista teórico, los resultados permitieron interpretar las relaciones entre IAMA, FELO y ECSU desde el enfoque de la Teoría de los Recursos y Capacidades.

En este marco, la autonomía operativa, las prácticas de mantenimiento y la integración del capital humano pudieron considerarse capacidades internas difíciles de imitar, que contribuyeron a la generación de ventajas competitivas (Barney, 1991).

Estos hallazgos coincidieron con estudios recientes que analizaron el TPM desde la perspectiva de la Visión Basada en Recursos, en los que se reconoció que las prácticas de mantenimiento constituyeron activos estratégicos que incidieron en el desempeño organizacional (Samadhiya y Agrawal, 2023). En este sentido, el mantenimiento autónomo trascendió su dimensión operativa y se consolidó como un recurso estratégico en el sistema productivo.

5.3.6 Implicaciones prácticas

En el plano práctico, los resultados sugirieron que el fortalecimiento del mantenimiento autónomo debió considerarse una etapa previa a la implementación de estrategias de mejora enfocadas más avanzadas. Consolidar este pilar permitió crear las condiciones necesarias para maximizar los beneficios del TPM.

Asimismo, el análisis de sensibilidad y la consideración de efectos no lineales aportaron elementos adicionales para la toma de decisiones, al permitir identificar los niveles de implementación en los que se obtuvieron los mayores beneficios.

Este enfoque fue consistente con investigaciones que destacaron la importancia de adaptar las estrategias de TPM al nivel de madurez organizacional (Ahuja, 2007; Singh y Awoke, 2023).

Tras contrastar los resultados con la teoría, el siguiente apartado consolida las conclusiones de la investigación, aterrizando los hallazgos en propuestas concretas para futuras líneas de trabajo

Conclusiones

El presente estudio tuvo como objetivo analizar el impacto del mantenimiento productivo total desde una perspectiva integral, considerando sus dimensiones sociales y económicas mediante modelos de ecuaciones estructurales. Los resultados obtenidos permitieron establecer que el TPM no solo constituyó una herramienta para la optimización técnica de los sistemas productivos, sino que también se configuró como un sistema organizacional que integró factores humanos, operativos y estratégicos para la generación de valor sostenible.

En conjunto, los modelos analizados evidenciaron que las prácticas de TPM operaron bajo una lógica estructurada, en la que los efectos se originaron a partir de la interacción entre sus componentes. En particular, los resultados mostraron niveles de capacidad explicativa relevantes, con valores de R^2 superiores al 50% en constructos clave, lo que confirmó la solidez del modelo propuesto y su capacidad para explicar fenómenos organizacionales complejos.

Asimismo, los hallazgos mostraron que la generación de valor en el TPM se construyó a partir de la interacción entre el desarrollo del capital humano, la eliminación de pérdidas operativas y la consolidación de condiciones organizacionales favorables. En este sentido, el liderazgo, la capacitación, la participación y la seguridad no solo constituyeron componentes del sistema, sino también elementos estratégicos que determinaron el desempeño global de la organización.

Desde una perspectiva metodológica, la aplicación de modelos PLS-SEM permitió captar la complejidad de las relaciones analizadas, identificando efectos directos, indirectos y patrones no lineales, lo que aportó una comprensión más profunda del fenómeno.

Asimismo, si bien el estudio no cuantificó directamente los ahorros económicos derivados de la implementación del TPM, los resultados sugirieron que la reducción de pérdidas operativas, la mejora de la eficiencia productiva y la disminución de fallas pueden traducirse en beneficios económicos significativos a mediano y largo plazo. En este sentido, los hallazgos orientaron la toma de decisiones organizacionales, destacando

la importancia de priorizar el mantenimiento autónomo, la capacitación del personal y la eliminación sistemática de pérdidas como ejes estratégicos para la generación de valor sostenible.

6.1 Conclusiones del modelo social

El análisis del modelo social permitió concluir que el éxito del TPM dependió en gran medida de factores organizacionales vinculados al liderazgo, a la cultura y al desarrollo del capital humano. En particular, MCOC se identificó como el eje estructural que desencadenó los procesos COTR de APAL y, en última instancia, de SOSU.

Los resultados evidenciaron que MCOC no solo influyó directamente en los procesos formativos y participativos, sino que también generó efectos indirectos significativos en la sustentabilidad social. La mediación en cadena observada (MCOC → COTR → APAL → SOSU) confirmó la existencia de una dinámica sistémica en la que la capacitación y la participación actuaron como mecanismos clave para la materialización de los beneficios sociales del TPM.

Este resultado confirmó que la capacitación y la participación no debieron interpretarse como prácticas independientes, sino como mecanismos interrelacionados que mediaron la relación entre el liderazgo organizacional y la sustentabilidad social.

Asimismo, se demostró que la capacitación continua y la participación activa del personal fueron factores determinantes para mejorar el bienestar organizacional. Los resultados sugirieron que el desarrollo de competencias técnicas se tradujo en una mayor implicación del personal, lo que, a su vez, favoreció condiciones laborales más estables, la reducción de conflictos y el fortalecimiento del sentido de pertenencia.

El análisis de sensibilidad reforzó estos hallazgos al evidenciar diferencias probabilísticas significativas entre escenarios favorables y desfavorables. En particular, altos niveles de compromiso directivo incrementaron considerablemente la probabilidad de participación activa, mientras que la capacitación estructurada redujo el riesgo de deterioro social, lo que resaltó la importancia de superar los umbrales críticos de implementación.

Por otra parte, los patrones no lineales identificados sugirieron que los efectos del TPM en su dimensión social no fueron uniformes, sino que variaron según el nivel de

madurez organizacional. En etapas iniciales, los impactos tendieron a ser limitados; sin embargo, una vez alcanzados ciertos niveles de desarrollo, se produjeron efectos acumulativos que potenciaron el desempeño organizacional.

En conjunto, estos resultados permitieron afirmar que el TPM, cuando se implementó considerando sus dimensiones humanas, actuó como un mecanismo de transformación organizacional que no solo mejoró los procesos productivos, sino que también fortaleció la sustentabilidad social de las empresas.

Desde una perspectiva industrial, estos hallazgos indicaron que las organizaciones manufactureras que priorizaron el compromiso directivo, la capacitación continua y la participación activa del personal lograron consolidar entornos laborales más estables, colaborativos y resilientes. En este sentido, el TPM se posicionó como una estrategia que permitió no solo optimizar la eficiencia operativa, sino también reducir conflictos laborales, mejorar la retención del talento y fortalecer la cultura organizacional, aspectos clave para la competitividad en contextos industriales altamente dinámicos.

6.2 Conclusiones del modelo económico

El presente modelo aportó evidencia empírica sobre los mecanismos causales que vincularon a IAMA con ECSU en entornos TPM, mostrando que dicha relación fue significativamente mediada por FELO y SEER.

Los resultados indicaron que IAMA actuó como un catalizador de la generación de valor económico, no a través de un efecto directo, sino mediante una cadena de efectos que inicialmente fortalecieron FELO ($\beta = 0.738$) y SEER ($\beta = 0.200$), los cuales, a su vez, impactaron en ECSU ($\beta = 0.207$ y $\beta = 0.481$, respectivamente). Este comportamiento respaldó la conceptualización del TPM como un sistema sociotécnico integral, en el que los componentes operaban de manera interdependiente.

Este hallazgo evidenció que el mantenimiento autónomo no generó valor económico por sí mismo, sino en la medida en que fortaleció capacidades operativas intermedias que permitieron reducir pérdidas y mejorar el entorno de trabajo.

El análisis de sensibilidad permitió identificar patrones relevantes para la gestión del TPM. En particular, la implementación de altos niveles de IAMA garantizó la ocurrencia de escenarios favorables en FELO en el 51.1% de los casos, sin asociación con

resultados negativos en FELO o SEER. En contraste, niveles bajos de IAMA representaron un riesgo significativo, al asociarse con una probabilidad del 70.3% de generar escenarios desfavorables en FELO. Asimismo, la relación SEER → ECSU mostró un comportamiento determinante, donde condiciones favorables en seguridad y ergonomía incrementaron la probabilidad de resultados económicos positivos en un 68.2%, mientras que escenarios desfavorables en SEER no generaron condiciones positivas en ECSU. Estos patrones probabilísticos permitieron orientar la priorización de inversiones dentro del TPM.

Por otra parte, los coeficientes no lineales observados en las relaciones analizadas —caracterizados por una mayor intensidad en niveles bajos de implementación y una disminución progresiva en niveles altos— indicaron que los retornos de inversión en TPM fueron más elevados en las etapas iniciales. Este hallazgo tuvo implicaciones directas en la secuenciación de las estrategias de implementación, lo que sugirió que las organizaciones debieron priorizar el desarrollo de capacidades básicas de mantenimiento autónomo antes de avanzar hacia esquemas más complejos.

Desde el punto de vista teórico, el modelo desarrollado validó los principios de la Teoría de Sistemas Sociotécnicos en el contexto del TPM, evidenciando que la integración entre operadores empoderados mediante IAMA y procesos orientados a la eliminación sistemática de pérdidas generó resultados económicos favorables. Asimismo, el estudio contribuyó a la literatura al cuantificar los efectos mediadores de factores críticos del TPM y al incorporar un enfoque probabilístico para el análisis de escenarios, aspectos poco explorados en investigaciones previas.

Desde una perspectiva industrial, estos resultados indicaron que las organizaciones manufactureras que implementaron el TPM de manera estructurada pudieron mejorar su desempeño económico al reducir las pérdidas operativas, optimizar el uso de recursos y fortalecer las condiciones de seguridad y ergonomía. En este sentido, el mantenimiento autónomo se posicionó como una práctica estratégica que permitió activar capacidades operativas clave, mientras que la eliminación de pérdidas y la mejora del entorno laboral actuaron como mecanismos que tradujeron dichas capacidades en resultados financieros tangibles. Esto resultó especialmente relevante en entornos industriales competitivos,

donde la eficiencia operativa, la reducción de costos y la estabilidad del sistema productivo constituyeron factores determinantes para la sustentabilidad económica.

Finalmente, el estudio presentó ciertas limitaciones asociadas a su carácter transversal, lo que impidió analizar la evolución temporal de las relaciones causales identificadas, así como a su enfoque en el contexto específico de la industria manufacturera mexicana. En este sentido, futuras investigaciones podrían desarrollar estudios longitudinales que permitieran evaluar la dinámica del TPM a lo largo del tiempo, incorporar variables relacionadas con la cultura organizacional y la transformación digital, y contrastar los resultados en distintos contextos industriales y geográficos para evaluar su generalización. No obstante, la significancia estadística de los intervalos de confianza obtenidos respaldó la validez de los resultados y su aplicabilidad en entornos manufactureros similares.

6.3 Conclusiones del modelo económico simplificado

Los resultados del modelo de ecuaciones estructurales permitieron evaluar de manera integrada la relación entre IAMA, FELO y la ECSU en el contexto del TPM del sector manufacturero. En términos generales, se observó que la participación del personal operativo en actividades básicas de mantenimiento se asoció con una gestión más eficiente de las pérdidas, lo que se tradujo en mejoras en el desempeño económico de las organizaciones.

Asimismo, se identificaron comportamientos no lineales en las relaciones analizadas, caracterizados por una mayor intensidad en las etapas iniciales e intermedias de implementación, seguidos de una tendencia a la estabilización conforme el sistema alcanzaba niveles más altos de madurez. Este patrón sugirió la presencia de rendimientos marginales decrecientes, lo que tuvo implicaciones relevantes para la planeación estratégica de iniciativas de TPM.

Desde una perspectiva teórica, los resultados respaldaron la concepción del TPM como una herramienta de manufactura esbelta que integró dimensiones técnicas y sociales. En este sentido, y bajo el enfoque de la Teoría de los Recursos y Capacidades, la autonomía operativa, las prácticas sistemáticas de mantenimiento y el aprendizaje orientado a la eliminación de pérdidas pudieron entenderse como capacidades internas

que, al fortalecerse, contribuyeron a mejorar la estabilidad del proceso productivo y el uso eficiente de los recursos, lo que se tradujo en un impacto positivo en el desempeño económico.

En el ámbito práctico, los hallazgos sugirieron que el fortalecimiento del mantenimiento autónomo constituyó una base fundamental para el desarrollo de estrategias de mejora más avanzadas. La implementación progresiva de estas prácticas permitió reducir errores, tiempos improductivos y costos operativos, sin requerir necesariamente inversiones tecnológicas inmediatas. Este aspecto resultó especialmente relevante en entornos industriales con restricciones de recursos y una alta presión para mantener niveles de productividad constantes.

Este resultado aportó valor práctico, ya que permitió a las organizaciones identificar de manera más directa los factores clave que debían priorizarse para mejorar el desempeño económico, sin necesidad de implementar modelos complejos.

Desde una perspectiva industrial, estos hallazgos implicaron que las empresas manufactureras pudieron utilizar el modelo simplificado como una herramienta operativa para enfocar sus esfuerzos en prácticas de alto impacto, en particular en el fortalecimiento del mantenimiento autónomo y la eliminación de pérdidas. En este sentido, el TPM se consolidó como una estrategia accesible y escalable que permitió mejorar la eficiencia productiva y la sustentabilidad económica, incluso en contextos con limitaciones de recursos, y facilitó una implementación progresiva alineada con las capacidades reales de las organizaciones.

No obstante, los resultados debieron interpretarse teniendo en cuenta las limitaciones metodológicas del estudio. Al tratarse de un diseño transversal, no fue posible analizar la evolución temporal de las relaciones identificadas ni capturar con precisión los efectos acumulativos ni las dinámicas de madurez del TPM. En este sentido, futuras investigaciones podrían emplear enfoques longitudinales para evaluar la evolución de estas relaciones a lo largo del tiempo y su impacto en el desempeño económico.

Adicionalmente, dado que el análisis se centró en empresas manufactureras de Ciudad Juárez, México, los resultados se vieron condicionados por las características del contexto regional. Por ello, se sugirió ampliar el alcance geográfico y sectorial en estudios

posteriores, a fin de evaluar la estabilidad del modelo en distintos entornos productivos y fortalecer su validez externa.

Por otra parte, el uso de datos perceptuales resultó coherente con la naturaleza latente de los constructos analizados y fue respaldado por los indicadores estadísticos del modelo. Sin embargo, futuras investigaciones podrían complementar estos resultados incorporando indicadores operativos directos, como tasas de fallo, la eficiencia global de los equipos (OEE) u otros indicadores de desempeño, con el objetivo de fortalecer la evidencia empírica.

Finalmente, el modelo se centró en la dimensión económica de la sustentabilidad, lo que permitió una mayor parsimonia en su estimación, pero limitó la comprensión integral del impacto del TPM. En este sentido, futuras líneas de investigación podrían ampliar el modelo incorporando otros pilares del TPM —como el mantenimiento planificado, la mejora enfocada o las prácticas 5S—, así como dimensiones adicionales de la sustentabilidad, que incluyan aspectos sociales, ambientales y tecnológicos. Esta ampliación permitiría profundizar en la comprensión de los mecanismos mediante los cuales el TPM contribuyó al desarrollo de sistemas productivos sostenibles a largo plazo.

6.4 Conclusión general de la investigación

Los resultados obtenidos a partir de los tres modelos analizados permitieron establecer que el TPM operó como un sistema sociotécnico integral, en el que la generación de valor no dependió de acciones aisladas, sino de la interacción estructurada entre factores humanos, operativos y organizacionales.

En este sentido, la evidencia empírica confirmó que tanto la sustentabilidad social como la económica surgieron de dinámicas interdependientes que articularon liderazgo, capacitación, participación, mantenimiento autónomo y eliminación de pérdidas.

En particular, el modelo social demostró que el compromiso de la dirección y la cultura organizacional constituyeron el punto de partida para activar procesos de capacitación y participación, que se tradujeron en mejoras del bienestar organizacional. Por su parte, el modelo económico evidenció que el mantenimiento autónomo no incidió directamente en el desempeño económico, sino a través de mecanismos intermedios, como la reducción de pérdidas y la mejora de las condiciones de seguridad y ergonomía.

Finalmente, el modelo económico simplificado validó la robustez de estas relaciones bajo un enfoque más parsimonioso, lo que confirmó la relevancia de las variables clave del sistema.

En conjunto, estos hallazgos permitieron afirmar que el TPM debió entenderse como una filosofía de gestión que integraba dimensiones técnicas y humanas. Bajo este enfoque, la eficiencia operativa y la sustentabilidad organizacional no se comportaron como objetivos independientes, sino como resultados complementarios.

Esta visión contrastó con enfoques tradicionales que limitaron el TPM únicamente a prácticas de mantenimiento. Los resultados sugirieron que su verdadero potencial radicaba en su capacidad para transformar tanto la estructura organizacional como el comportamiento del capital humano.

Asimismo, la identificación de efectos indirectos y patrones no lineales permitió comprender con mayor profundidad el comportamiento del TPM en las organizaciones. Los resultados mostraron que los beneficios no se distribuyeron de manera uniforme, sino que dependieron del nivel de madurez organizacional y de la consolidación de capacidades internas.

En particular, los mayores impactos se observaron en las etapas iniciales de implementación. Esto sugirió la existencia de umbrales críticos que condicionaron la efectividad de las estrategias adoptadas.

Desde el punto de vista teórico, la investigación contribuyó a fortalecer la literatura al integrar el enfoque de sistemas sociotécnicos y la teoría de los recursos y capacidades en el análisis del TPM. Además, proporcionó evidencia empírica de los mecanismos mediante los cuales las prácticas de mantenimiento se tradujeron en resultados sostenibles.

En el ámbito práctico, los resultados ofrecieron orientación para la toma de decisiones y destacaron la necesidad de priorizar el desarrollo del liderazgo, la capacitación del personal y la implementación progresiva del mantenimiento autónomo como base para la mejora continua.

Desde una perspectiva industrial, estos resultados indicaron que las organizaciones manufactureras que adoptaron el TPM con un enfoque sistémico no solo mejoraron su

desempeño operativo, sino que también consolidaron estructuras organizacionales más resilientes y eficientes. En este sentido, la integración del capital humano con las prácticas operativas permitió reducir pérdidas, optimizar recursos y fortalecer la estabilidad del sistema productivo, lo que se tradujo en ventajas competitivas sostenibles en entornos industriales altamente dinámicos.

En síntesis, esta investigación permitió concluir que el TPM, en el contexto actual de la manufactura, representó una estrategia integral de desarrollo organizacional que generó valor económico a partir de la creación de valor social. Bajo este enfoque, las organizaciones que adoptaron una visión sistémica del TPM estuvieron en mejores condiciones de alcanzar niveles superiores de desempeño, así como de consolidar estructuras más resilientes, eficientes y sostenibles a largo plazo.

Adicionalmente, si bien el presente estudio proporcionó evidencia empírica sólida sobre las relaciones entre los factores organizacionales y la sustentabilidad en el contexto del TPM, fue necesario considerar ciertas limitaciones que abrieron oportunidades para futuras líneas de investigación. En primer lugar, el diseño transversal utilizado limitó la posibilidad de establecer relaciones causales en el tiempo, por lo que se sugirió desarrollar estudios longitudinales que permitieran analizar la evolución de dichas relaciones a lo largo de las distintas etapas de madurez del TPM.

Por otra parte, el enfoque geográfico, centrado en organizaciones manufactureras ubicadas en la región norte de México, aportó profundidad contextual, pero pudo limitar la generalización de los resultados a otros entornos culturales e industriales. En este sentido, futuras investigaciones podrían replicar el modelo en distintos contextos internacionales para contrastar su estabilidad y validez externa.

Desde el punto de vista metodológico, el uso de datos perceptuales resultó adecuado para el análisis de constructos latentes. Sin embargo, futuras investigaciones podrían complementar estos resultados con indicadores objetivos de desempeño, como métricas financieras, índices de rotación de personal, tasas de accidentes laborales o indicadores de eficiencia operativa.

La incorporación de este tipo de indicadores permitiría fortalecer los hallazgos y ampliar la evidencia empírica del modelo.

Asimismo, futuras investigaciones podrían incorporar variables moderadoras, como el tamaño organizacional, el sector industrial o las características culturales, con el objetivo de analizar su influencia sobre la efectividad de las relaciones identificadas. De igual forma, resultó pertinente profundizar en los mecanismos específicos mediante los cuales la capacitación y la participación generaron beneficios organizacionales, así como explorar la existencia de efectos no lineales y de umbrales críticos en distintos niveles de madurez organizacional.

Finalmente, fue importante señalar que el presente estudio se centró en las dimensiones social y económica de la sustentabilidad, por lo que no se incorporaron variables relacionadas con la sustentabilidad ambiental ni con la transformación digital.

En este sentido, futuras líneas de investigación podrían ampliar el modelo integrando aspectos como la eficiencia energética, la reducción de emisiones, el uso de tecnologías digitales y el análisis de datos en tiempo real. Esto permitiría avanzar hacia modelos más integrales para comprender el papel del TPM en el contexto de la industria 4.0 y de la sustentabilidad industrial.

Limitaciones e investigaciones futuras

El presente estudio contribuyó a comprender el impacto del Mantenimiento Productivo Total en la sustentabilidad industrial, en particular en sus dimensiones social y económica, mediante la evaluación de relaciones estructurales entre factores críticos de éxito y variables de desempeño organizacional. No obstante, los resultados debieron interpretarse considerando ciertas limitaciones metodológicas y contextuales, las cuales, a su vez, abrieron oportunidades para el desarrollo de futuras investigaciones.

En primer lugar, el diseño transversal adoptado limitó la posibilidad de establecer relaciones causales definitivas entre las variables analizadas. Si bien el uso de modelos de ecuaciones estructurales permitió identificar asociaciones significativas y efectos de mediación, no capturó la evolución temporal de la implementación del TPM ni sus efectos a lo largo de diferentes etapas de madurez organizacional. En este sentido, futuras investigaciones podrían emplear diseños longitudinales que permitieran analizar cómo las

relaciones entre los factores críticos del TPM y las distintas dimensiones de la sustentabilidad industrial se desarrollaron y consolidaron en el tiempo.

En segundo lugar, la información utilizada se basó en percepciones de profesionales del sector manufacturero, recopiladas mediante un cuestionario estructurado. Aunque este enfoque resultó adecuado para evaluar constructos organizacionales y variables latentes, pudo estar sujeto a sesgos de respuesta. Por ello, se recomendó que estudios futuros integraran indicadores objetivos de desempeño, tales como métricas de productividad, tasas de fallas, costos operativos, condiciones de seguridad laboral o indicadores financieros, con el fin de fortalecer la validez de los resultados y su aplicabilidad en contextos reales.

Asimismo, el estudio se desarrolló en el contexto de la industria manufacturera de Ciudad Juárez, caracterizada principalmente por el modelo maquilador. Si bien esto aportó relevancia práctica al análisis, también limitó la generalización de los resultados a otros sectores industriales o regiones con condiciones organizacionales, tecnológicas o culturales distintas. En consecuencia, se sugirió replicar el modelo en distintos entornos productivos y contextos geográficos para evaluar su consistencia y robustez.

Desde una perspectiva teórica y metodológica, el instrumento desarrollado contempló un total de 74 ítems agrupados en 14 dimensiones que integraron tanto factores críticos de éxito del TPM como diversas dimensiones de la sustentabilidad industrial. Sin embargo, el modelo estructural evaluado en esta investigación se centró en un subconjunto de dichas variables, en particular en aquellas vinculadas con la sustentabilidad social y económica, así como con factores operativos clave, como la implementación del mantenimiento autónomo y el enfoque en la eliminación de pérdidas. Esta decisión respondió a criterios de parsimonia y estabilidad estadística del modelo, pero implicó una simplificación del fenómeno analizado.

En este sentido, futuras investigaciones podrían ampliar el alcance del modelo incorporando simultáneamente un mayor número de factores críticos de éxito del TPM, tales como el compromiso de la dirección y la cultura organizacional (MCOC), la participación activa en todos los niveles (APAL), la capacitación continua (COTR), la colaboración interdepartamental (CID), los estándares claros de mantenimiento (ECM) y

la gestión de datos y retroalimentación (GDR). La inclusión de estos factores permitiría construir modelos más integrales que explicaran de manera más completa la relación entre el TPM y la generación de valor organizacional.

Adicionalmente, aunque el análisis realizado se centró en las dimensiones social y económica de la sustentabilidad, el instrumento desarrollado ya contempló variables específicas de sustentabilidad ambiental (SAM) y sustentabilidad digital (SDI). En consecuencia, una línea de investigación futura consistió en el desarrollo y validación de modelos estructurales orientados a estas dimensiones, analizando la influencia de los factores críticos del TPM en aspectos como la eficiencia en el uso de recursos, la reducción de residuos y el consumo energético, así como en la digitalización de los procesos de mantenimiento mediante sensores, monitoreo en tiempo real y tecnologías asociadas a la Industria 4.0. Este enfoque permitiría avanzar hacia una comprensión más integral del papel del TPM en la sustentabilidad industrial.

Finalmente, el uso de WarpPLS permitió identificar relaciones no lineales entre algunas variables del modelo, lo que sugiere que los efectos del TPM no se manifestaron de manera uniforme durante su implementación. No obstante, el análisis de estos comportamientos se realizó de manera exploratoria, por lo que futuras investigaciones podrían profundizar en el estudio de dichas relaciones, evaluando la existencia de umbrales, efectos decrecientes o puntos críticos en función del nivel de madurez organizacional. Este tipo de análisis contribuiría a una mejor comprensión de los mecanismos mediante los cuales el TPM generó impactos diferenciados en la sustentabilidad industrial.

Bibliografia

- Abbas Al-Refaie, N. L., Mehmet Emre Camlibel (2020). Integrating risk management with total productive maintenance. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 13(4), 338-352. <https://doi.org/10.3390/su14031497>
- Agustiady Tina, C. E. (2024). *Total Productive Maintenance: Strategies and Implementation Guide* (2nd ed.). <https://doi.org/10.1201/9781003272168>
- Ahuja, I. P. S., & Khamba, J. S. (2007). An evaluation of TPM implementation initiatives in an Indian manufacturing enterprise *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 13(4), 338-352. . <https://doi.org/10.1108/13552510710829443>.
- Al-refaie, A., Lepkova, N., & Camlibel, M. E. (2022). The Relationships between the Pillars of TPM and TQM and Manufacturing Performance Using Structural Equation Modeling [Article]. *Sustainability (Switzerland)*, 14(3), Article 1497. <https://doi.org/10.3390/su14031497>
- Aldave-Vasquez, Y. N., Morales-Vargas, S., & Corzo-Chavez, J. A. (2024). Production management model for waste reduction using 5S, TPM and Poka Yoke tools in a peanut snack manufacturing company. <https://doi.org/10.11159/icmie24.109>
- Anusha Chintada, U. V. (2022). Improvement of productivity by implementing occupational ergonomics. *Journal of Industrial and Production Engineering* 33(1). <https://doi.org/10.1080/21681015.2021.1958936>
- 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 [Article]. *Journal of Cleaner Production*, 352, Article 131608. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131608>
- Barney, J. (1991). Firm resources and sustained competitive advantage. *Journal of management*, 17(1), 99-120. <https://doi.org/10.1177/014920639101700108>
- Birou, L. M., Green, K. W., & Inman, R. A. (2019). Sustainability knowledge and training: outcomes and firm performance. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 30(2), 294-311. <https://doi.org/10.1108/jmtm-05-2018-0148>

- Chan, F. T. S., Lau, H. C. W., Ip, R. W. L., Chan, H. K., & Kong, S. (2005). Implementation of total productive maintenance: A case study. *International Journal of Production Economics*, 95(1). <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2003.10.021>
- Chen Shin Min, R. A., Shahrul Kamaruddin and Ishak Abdul Azid. (2011). Development of autonomous maintenance implementation framework for semiconductor industries. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 9(3). <https://doi.org/10.1504/IJISE.2011.043139>
- 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>
- Crosby, B. (2022). Integrating Lean and Sustainable Manufacturing Principles for Sustainable Total Productive Maintenance (Sus-TPM). *Smart Sustain. Manuf. Syst.* <https://doi.org/10.1520/SSMS20210025>
- Cua, K. O., McKone, K. E., & Schroeder, R. G. (2001). Relationships between implementation of TQM, JIT, and TPM and manufacturing performance. *Journal of Operations Management*, 19(6), 675-694. [https://doi.org/10.1016/S0272-6963\(01\)00066-3](https://doi.org/10.1016/S0272-6963(01)00066-3)
- Deng, C., Gulseren, D., Isola, C., Grocutt, K., & Turner, N. (2023). Transformational leadership effectiveness: an evidence-based primer. *Human Resource Development International*, 26(5), 627-641. <https://doi.org/10.1080/13678868.2022.2135938>
- DeVellis, R. F. (2017). *Scale Development: Theory and Applications* (4th edition ed.). SAGE Publications.
- Díaz-Reza, J. R., García-Alcaraz, J. L., Avelar-Sosa, L., Mendoza-Fong, J. R., Sáenz-Díez, J. C. S., & Blanco-Fernández, J. (2018). The role of managerial commitment and tpm implementation strategies in productivity benefits [Article]. *Applied Sciences (Switzerland)*, 8(7), Article 1153. <https://doi.org/10.3390/app8071153>

- Fernández Torres, M. A. C. P., F. E.; Loja Herrera, P. M. (2024). *Application of Total Productive Maintenance (TPM) and 5'S to increase the availability of a ham packaging line of a food company* https://laccei.org/LEIRD2024-VirtualEdition/papers/Contribution_521_a.pdf
- Fornell, C., & Larcker, D. F. (1981). Evaluating Structural Equation Models with Unobservable Variables and Measurement Error. *Journal of Marketing Research*, 39-50.
- García Alcaraz, J. L., Reza, R. D., Macias, E. J., Vidal, R. P. I., Montalvo, F. J. F., & Ledesma, A. S.-T. (2022). Effect of the Sustainable Supply Chain on Business Performance— The Maquiladora Experience. *IEEE Access*, 10, 40829-40842. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3166193>
- Gelaw, M. T., Azene, D. K., & Berhan, E. (2024). Assessment of critical success factors, barriers and initiatives of total productive maintenance (TPM) in selected Ethiopian manufacturing industries [Article]. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 30(1), 51-80. <https://doi.org/10.1108/JQME-11-2022-0073>
- Hair, J. F., Hult, G. T. M., Ringle, C. M., & Sarstedt, M. (2022). *A Primer on Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM)*.
- Hallioui, A., Herrou, B., Katina, P. F., Santos, R. S., Egbue, O., Jasiulewicz-Kaczmarek, M., Soares, J. M., & Marques, P. C. (2023). A Review of Sustainable Total Productive Maintenance (STPM). *Sustainability (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/su151612362>
- Henseler, J., Ringle, C. M., & Sarstedt, M. (2015). A new criterion for assessing discriminant validity in variance-based structural equation modeling. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 43(1), 115-135. <https://doi.org/10.1007/s11747-014-0403-8>
- Juan A. Marín-García, R. M. M. (2013). Barreras y facilitadores de la implantación del TPM. *Intangible Capital*. <https://doi.org/10.3926/ic.360>
- Kaur, M., Singh, K., & Ahuja, I. S. (2013). An evaluation of the synergic implementation of TQM and TPM paradigms on business performance [Article]. *International*

- Journal of Productivity and Performance Management*, 62(1), 66-84.
<https://doi.org/10.1108/17410401311285309>
- Kline, R. B. (2016). *Principles and Practice of Structural Equation Modeling* (4th ed.). The Guilford Press.
- Kock, N. (2023). *WarpPLS User Manual: Version 8.0*. ScriptWarp Systems.
https://scriptwarp.com/warppls/UserManual_v_8_0.pdf
- Kumar Sharma, R., & Gopal Sharma, R. (2014). Integrating Six Sigma Culture and TPM Framework to Improve Manufacturing Performance in SMEs. *Quality and Reliability Engineering International*, 30(5), 745-765.
<https://doi.org/10.1002/qre.1525>
- Lawshe, C. H. (1975). A quantitative approach to content validity. *Personnel Psychology*.
<https://doi.org/10.1111/j.1744-6570.1975.tb01393.x>
- Marta Wolska, Tadeusz Gorewoda, Roszak, M., & Gajda, L. (2023). Implementation and Improvement of the Total Productive Maintenance Concept in an Organization. *Journal Encyclopedia*, 3, 1537–1564.
<https://doi.org/10.3390/encyclopedia3040110>
- Mendes, D., Gaspar, P. D., Charrua-Santos, F., & Navas, H. V. G. (2023). Integrating TPM and Industry 4.0 to Increase the Availability of Industrial Assets: A Case Study on a Conveyor Belt. *Processes*, 11(7), 1956.
<https://doi.org/10.3390/pr11071956>
- Mohan, R. (2023). LSTM based artificial intelligence predictive maintenance technique for availability rate and OEE improvement in a TPM implementing plant through Industry 4.0 transformation *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 29(4), 763–798. <https://doi.org/10.1108/JQME-07-2022-0041>
- 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. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0052-4>
- Muchiri, P., Pintelon, L., Gelders, L., & Martin, H. (2011). Development of maintenance function performance measurement framework and indicators. . *International*

- Journal of Production Economics*, 131(131), 295-302.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.04.039>
- Nakajima, S. (1988). *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*. Productivity Press.
- Pinto, G. F. C. S., F. J. G. da; Fernandes, N. O. G.; Casais, R. C. B.; Baptista da Silva, A.; y Carvalho, C. J. V. (2020). Implementing a maintenance strategic plan using TPM methodology. *International Journal of Industrial Engineering and Management* 192-204. <https://doi.org/10.24867/IJIE-2020-3-264>
- Samadhiya, A., & Agrawal, R. (2023). Total productive maintenance and sustainability performance: resource-based view perspective. *Benchmarking*, 31(7), 2177-2196.
<https://doi.org/10.1108/BIJ-10-2022-0635>
- Santos, R. C. (2012). Ergonomics program management in Tucuruí Hydropower Plant using TPM methodology. *Work* (Reading, Mass.).
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22317147/>
- Schindlerová, V. Š., I.; Michalčík, V.; Nevima, J.; Krejčí, L. (2020). Potential of using TPM to increase the efficiency of production processes. *Tehnicki Vjesnik*, 27.
<https://doi.org/10.17559/TV-20190328130749>
- Shaaban, M. S., & Awni, A. H. (2014). Critical success factors for total productive manufacturing (TPM) deployment at Egyptian FMCG companies [Article]. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 25(3), 393-414, Article 17108000. <https://doi.org/10.1108/JMTM-09-2012-0088>
- Shannon, N., Trubetskaya, A., Iqbal, J., & McDermott, O. (2023). A total productive maintenance & 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>
- Sharma, A. K., Joshi, A., & Jurwall, V. (2020). Performance measurement metrics in TPM: A contextual view to training and development. *Springer, Singapore.*, 28, 2476-2480. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.796>
- 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, K., & Ahuja, I. S. (2013). Implementing TQM and TPM paradigms in Indian context: Critical success factors and barriers [Article]. *International Journal of Technology, Policy and Management*, 13(3), 226-244. <https://doi.org/10.1504/IJTPM.2013.054880>
- Singh, R. K., & Gurtu, A. (2021). 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>
- Socconini, L. (2019). *Lean Manufacturing: paso a paso* (1ª edición ed.). Alfaomega / Grupo Editorial Patria. <https://alfaomega.com.mx/producto/lean-manufacturing-paso-a-paso/>
- Tortorella, G. L., Fogliatto, F. S., Cauchick-Miguel, P. A., Kurnia, S., & Jurburg, D. (2021). Integration of Industry 4.0 technologies into Total Productive Maintenance practices. *International Journal of Production Economics*. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108224>
- Travi-Magener, V., Vilcapoma-Moya, C. A., & Flores-Perez, A. (2023). *Improvement model applying Time Series, TPM and SMED to reduce waste in a timber company in the Peruvian jungle* [Conference paper]. 9th International Conference on Innovation and Trends in Engineering, CONIITI 2023., Bogota, Colombia. <https://doi.org/10.1109/CONIITI61170.2023.10324062>
- Zubair, M. (2021). Manufacturing productivity analysis by applying overall equipment effectiveness metric in a pharmaceutical industry. *Cogent Engineering*, 8(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2021.1953681>