

Can RCM contribute to the optimization of asset utilization in the Printing Industry?

Flores Cabezas, Máximo¹, Garcia Gutierrez, Kevin², Cordova Rosales, Antony³, Del Castillo Vera, Alexander⁴, Ochoa Alejo, Matias⁵, Santos Cuba, Enzo⁶, Villanueva Fernandez, Sheyla⁷

^{1,2,3,4,5,6,7} Universidad Privada del Norte, Perú, maximo.flores@upn.edu.pe, n00084888@upn.pe, n00271624@upn.pe, n00261426@upn.pe, n00246032@upn.pe, n00242283@upn.pe, n00259584@upn.pe

Abstract: *This research describes, from a quantitative approach, the implementation of reliability-oriented maintenance methodologies in the printing industry. The results obtained were aimed at identifying and mitigating the main causes of production defects and machinery downtime. This study was carried out due to the constant problems in the machines, which present a high level of wear and obsolescence, frequent failures that generate downtime in production, decreasing operational efficiency and causing delays in product delivery. Key concepts related to maintenance, failure modeling and operational efficiency were analyzed. Quality analysis tools were used, such as Ishikawa and Pareto diagrams, which facilitated the identification and evaluation of the main causes of mechanical and operational failures in the production process, carried out in structured phases. These include from the hierarchization, prioritization of assets, exhaustive analysis of criticality, to the implementation of preventive maintenance programs. The results showed a significant improvement: MTBF increased by 43.8%, from 12.22 to 17.57 hours, and MTTR decreased by 27.5%, from 1.75 to 1.27 hours. In addition, machine availability improved by 5.1%, reaching an average of 93.1%. These improvements reflect increased operational reliability, reduced production defects and a positive impact on the quality of the final product.*

Key words: *Reliability Centered Maintenance, Total Productive Maintenance, Operational Efficiency, Preventive Maintenance, Mean Time Between Failures, Mean Time to Repair.*

¿Puede el RCM contribuir en la optimización en el uso de los activos en la Industria de la Imprenta?

Resumen: En la presente investigación se describe, desde un enfoque cuantitativo, la implementación de metodologías de mantenimiento orientadas a la confiabilidad en la industria de la Imprenta. Los resultados obtenidos tuvieron como objetivo identificar y mitigar las principales causas de defectos en la producción y el tiempo de inactividad de la maquinaria. Este estudio se llevó a cabo debido a los constantes problemas en las máquinas, las cuales presentan un alto nivel de desgaste y obsolescencia, fallas frecuentes que generan tiempos muertos en la producción, disminuyendo la eficiencia operativa y provocando retrasos en la entrega de productos. Para ello se analizaron conceptos claves relacionados con mantenimiento, modelado de fallos y eficiencia operativa. Se utilizaron herramientas de análisis de calidad, como los diagramas de Ishikawa y Pareto, que facilitaron la identificación y evaluación de las causas principales de las fallas mecánicas y operativas en el proceso productivo, se llevó a cabo en fases estructuradas. Estos incluyen desde la jerarquización, priorización de activos, análisis exhaustivo de criticidad, hasta la implementación de programas de mantenimiento preventivo. Los resultados demostraron una mejora significativa: el MTBF aumentó un 43.8%, pasando de 12.22 a 17.57 horas, y el MTTR se redujo un 27.5%, de 1.75 a 1.27 horas. Además, la disponibilidad de las máquinas mejoró en un 5.1%, alcanzando un promedio de 93.1%. Estas mejoras reflejan una mayor confiabilidad operativa, reducción de defectos en la producción y un impacto positivo en la calidad del producto final.

Palabras clave: Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, Mantenimiento Productivo Total, Eficiencia Operativa, Mantenimiento Preventivo, Tiempo Medio entre Fallos, Tiempo Medio de Reparación.

I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la creciente demanda global de productos y servicios obliga a las industrias a estar en buen estado para satisfacer las expectativas de los clientes y aumentar las ganancias. Para lograr esto, necesitan que sus equipos de mantenimiento aseguren que los activos de la empresa funcionen correctamente. Esto resulta en un trabajo de calidad que ayuda a mantener un proceso confiable y eficiente, ofreciendo productos y servicios adecuados [1,2]. El mantenimiento de los sistemas de producción es esencial, ya que no solo se encarga de detectar problemas actuales, sino también de anticipar posibles fallas futuras. Esto permite prevenir interrupciones en los procesos, reducir costos asociados a reparaciones imprevistas y garantizar la continuidad operativa, lo que contribuye directamente a mejorar la eficiencia y la productividad de la empresa [3]. El mantenimiento garantiza que el sistema de producción funcione con la menor interrupción posible. Gracias a los estudios sobre modelos de gestión de mantenimiento, las empresas han demostrado ser más eficientes y efectivas. Dependiendo del tipo de mantenimiento (predictivo, preventivo o correctivo), se han implementado varios modelos que aparecen en la literatura. Un ejemplo es el

Mantenimiento Productivo Total (TPM), que incluye herramientas para gestionar diferentes tipos de mantenimiento [4,5]. Otra estrategia es el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM), un enfoque de mantenimiento correctivo que se centra en asegurar que los equipos funcionen de manera óptima, priorizando su rendimiento y operatividad.

El RCM es un enfoque técnico organizado que ayuda a definir los criterios para el mantenimiento preventivo y mejorar la eficiencia del sistema de mantenimiento [6,7]. Es un "proceso que ayuda a definir qué acciones son necesarias para asegurar que cualquier componente físico siga funcionando adecuadamente en su entorno de operaciones actual". Esto significa que el objetivo principal de esta metodología es garantizar que todo el sistema mantenga sus funciones. Diversos expertos señalan que el análisis RCM se basa en estudiar las funciones del sistema, identificar fallos en esas funciones y priorizar los riesgos [8]. Mediante el análisis, las industrias pueden crear estrategias de mantenimiento preventivo. Hoy en día, el modelo RCM es una herramienta clave para cualquier empresa, ayuda a extender la vida útil de los activos en los que se aplica [9].

Los principios de RCM han demostrado ser efectivos en diversas industrias para preservar las funciones críticas. En particular, se destaca que su aplicación reduce la necesidad de realizar mantenimientos preventivos que no son necesarios, y facilita la creación de planes de mantenimiento eficientes y sistemáticos. Esto se traduce en programas de mantenimiento óptimos para equipos y plantas, enfocados en minimizar los modos de falla y sus efectos. Como parte integral de la implementación de RCM, es crucial realizar una fase de "Planificación", que incluye el uso de herramientas diagnósticas como el análisis de causa y efecto, así como técnicas de análisis como el AMFE (Análisis de Modo y Efecto de Falla) [10]. Con esto, se procede a la fase de "Análisis y diseño", que incluye el mantenimiento programado [1]. Por último, se alcanza la tercera fase, denominada "Ejecución", en la cual se implementa el mantenimiento autónomo, la gestión temprana de equipos y las capacitaciones [11].

Los investigadores Fang et al. [12], implementaron la metodología RCM como parte de la estrategia de mantenimiento para un sistema de puertas de metro. En primer lugar, se identifican los subsistemas y componentes del sistema de puertas. A continuación, se propuso el uso de la metodología AMFE para determinar el nivel de riesgo de 10 modos de falla en 5 componentes con una alta tasa de fallas, con el objetivo de realizar un análisis de confiabilidad. Finalmente, se desarrolló la estrategia del RCM, basada en la selección del tipo de mantenimiento y el cálculo, aplicaron la metodología RCM en una planta de generación eléctrica, utilizando el AMFE permitió identificar y clasificar las fallas

del sistema según las condiciones operativas [10]. A partir de este análisis, se diseñó un flujo de trabajo optimizado con actividades específicas para abordar casos particulares, los investigadores Silva et al. [9] combinaron el mantenimiento centrado en la confiabilidad con la gestión de riesgos (denominado RCM3) para mejorar la gestión del mantenimiento de sistemas de refrigeración en vehículos militares blindados. Tras el estudio, se elaboró un plan de mantenimiento que redujo el riesgo de fallas del sistema. El proceso de implementación del RCM se dividió en tres fases: análisis de fallas, planificación estratégica, e implementación y validación. Estas fases se apoyaron en metodologías de mejora continua, lo que convirtió el proceso en un ciclo de ajustes constantes [13].

Revisión de la Literatura

El RCM se ha consolidado como una estrategia efectiva para mejorar la disponibilidad y el rendimiento de activos en distintas industrias presentando un método que integra RCM con técnicas de decisión, utilizando el AMFE para evaluar la criticidad de los sistemas en aeronaves [14]. Los resultados de su investigación indican que, tras implementar medidas preventivas, la disponibilidad de las aeronaves aumentó un 6,62% y el tiempo de inactividad se redujo en un 15,71%. Este enfoque es aplicable a otros sistemas reparables, lo que sugiere su versatilidad para optimizar la disponibilidad operativa.

La investigación Rakyta et al. [15] analizaron cómo un cambio en la estrategia de mantenimiento puede afectar tanto la eficiencia como la calidad de los sistemas de producción. Los autores destacan la necesidad de desarrollar indicadores de rendimiento en el mantenimiento para monitorear las mejoras en la sostenibilidad del proceso de fabricación. Además, enfatizan la importancia de realizar auditorías en la gestión del mantenimiento y cómo una reevaluación de la criticidad de las máquinas puede mejorar la asignación de recursos y capacidades. Los hallazgos muestran incrementos del 10% en eficiencia, 20% en calidad y una disminución del 35% en los costos de mantenimiento.

En el contexto de las industrias manufactureras en el Perú, se examinaron el uso de las metodologías PDCA y TPM para abordar problemas de baja productividad [16]. Su estudio revela que la implementación de estas estrategias resultó en un incremento del 52,94% en la productividad, destacando el impacto positivo que un enfoque estructurado en la gestión del mantenimiento puede tener en este tipo de empresas.

Además, Marcello et al. [17] desarrollaron un modelo de gestión que combina RCM para optimizar los tiempos y costos durante el ciclo de vida de activos en el sector náutico. Su análisis resalta una reducción del 20,29% en los costos de mantenimiento y un aumento del 47,33% en la vida útil de los activos, subrayando la efectividad de integrar buenas prácticas de ambas metodologías para maximizar el rendimiento operativo.

Planteamiento del Problema

La ineficiencia en la gestión del mantenimiento de

maquinaria en el sector de impresión representa un desafío significativo para las empresas que buscan maximizar su productividad. Las máquinas de impresión, al ser componentes cruciales del proceso operativo, requieren un enfoque sistemático para el mantenimiento. Sin embargo, las prácticas de mantenimiento reactivas pueden dar lugar a fallos imprevistos, tiempo de inactividad elevado y, en consecuencia, pérdidas económicas. Este panorama subraya la necesidad de implementar enfoques de RCM para abordar estos problemas. Así, la gerencia enfrenta las siguientes preguntas:

- ¿De qué manera puede la implementación del RCM, con la medición análisis y evaluación del MTBF y MTTR contribuir a la identificación y priorización de fallos en la maquinaria, mejorando la disponibilidad y reduciendo el tiempo de inactividad?
- ¿Qué medidas prácticas pueden adoptarse para integrar eficazmente RCM en la rutina diaria de mantenimiento y el MTBF y MTTR como indicadores de medición, que garantice una mayor eficiencia operativa, mejorando la calidad del producto?
- ¿Cómo puede el enfoque del RCM y los indicadores MTBF y MTTR optimizar el plan de mantenimiento y ejecución en el rendimiento de las máquinas y fomentar la responsabilidad compartida entre el personal operativo y el equipo de mantenimiento?

Objetivo

El objetivo principal de este estudio es evaluar la efectividad de las estrategias de RCM con el apoyo de los indicadores MTBF y MTTR en la mejora del rendimiento y disponibilidad de la maquinaria de impresión. Se busca identificar los principales problemas que afectan la productividad, y desarrollar un modelo de mantenimiento que promueva la proactividad y la optimización de recursos. Además, se pretende medir el impacto de estas metodologías en la reducción de costos de mantenimiento y en la mejora de la calidad de los productos.

Hipótesis

La integración de las metodologías del RCM y los indicadores MTBF y MTTR en la gestión de la maquinaria de impresión genera mejoras significativas en la eficiencia operativa. Esta implementación incrementa la disponibilidad de las máquinas, reduce los tiempos de inactividad y optimiza los procesos productivos. Además, minimiza los costos de mantenimiento mediante un enfoque preventivo y proactivo, al tiempo que mejora la calidad del producto final. Estas mejoras se reflejan en un mayor rendimiento de los equipos y una elevada satisfacción del cliente, gracias a entregas más rápidas, confiables y de alta calidad.

II. METODOLOGÍA

El método utilizado en el presente estudio es empírico-analítico, ya que, a través de las etapas de medición y evaluación de los datos recopilados, se recolectó evidencia del

problema detectado. Se utilizó un enfoque cuantitativo, ya que implicó la recolección y el análisis de datos numéricos para responder a preguntas específicas y validar hipótesis relacionadas con las mejoras de las maquinarias [18,19]. Es crucial realizar un análisis exhaustivo de los datos recolectados y observados para obtener una comprensión completa del impacto de las estrategias implementadas. Esta metodología es aplicada, ya que busca poner en práctica los principios y técnicas de RCM, con el propósito de mejorar tanto la eficiencia operativa como la calidad en los procesos de impresión industrial [17]. La investigación es de tipo descriptiva, lo que implica una descripción detallada de los procesos y la conceptualización de los factores además de considerar el desarrollo de prácticas y desafíos existentes durante el proceso [20].

Al permitir la medición de resultados concretos y el análisis de observación y recolección de datos, este método proporciona una base sólida para entender cómo las acciones tomadas dentro de las estrategias de RCM influyen en indicadores clave como la reducción de tiempos de inactividad, la mejora en la productividad y la optimización de los recursos de mantenimiento [21,22]. Esta aproximación no solo ofrece una evaluación rigurosa de la efectividad de las mejoras implementadas, sino que también facilita la toma de decisiones informadas para la continua optimización de la eficiencia operativa de la maquinaria en el entorno de la imprenta [23].

A continuación, se presentan los principales conceptos de las variables de estudio o factores relevantes:

Fallas Mecánicas: Las fallas mecánicas son una causa principal de ineficiencias en las operaciones de impresión, provocadas por el desgaste de piezas, lubricación inadecuada, o mal mantenimiento preventivo [24]. La implementación de RCM permite analizar las fallas potenciales de cada componente, lo que ayuda a optimizar el mantenimiento programado para reducir la ocurrencia de fallas mecánicas.

Disponibilidad del Equipo: La disponibilidad del equipo depende del tiempo que las máquinas están operativas y productivas. El RCM se centra en la maximización de la disponibilidad de los equipos mediante el mantenimiento autónomo y el monitoreo constante de su estado [25,26].

Capacitación del Personal: La formación continua y especializada de los operarios es fundamental, ya que una fuerza laboral capacitada puede adquirir conocimientos y habilidades para identificar problemas, realizar tareas de mantenimiento básico y seguir procedimientos operativos. Esto contribuye a mejorar la eficiencia del sistema al reducir los tiempos de inactividad y prevenir fallas [27].

Estandarización de Procedimientos: La falta de procedimientos estandarizados puede llevar a ineficiencias y errores operativos. La estandarización permite establecer

prácticas uniformes que reducen la variabilidad en las operaciones, aseguran la consistencia en la calidad de los resultados y facilitan la mejora continua en los procesos [28].

Gestión del Inventario de Repuestos: La falta de un inventario adecuado de repuestos puede generar demoras y afectar la eficiencia operativa. La gestión de inventario asegura la disponibilidad de los repuestos necesarios en el momento oportuno, optimizando la continuidad y la eficacia de las operaciones [29].

Mantenimiento Preventivo: Un programa de mantenimiento preventivo bien estructurado es fundamental para minimizar las interrupciones no planificadas y prolongar la vida útil de los equipos. La ejecución regular de tareas preventivas permite anticipar y corregir posibles fallas, evitando así interrupciones costosas en la operación [30].

Evaluación del Desempeño de los Equipos: Medir y monitorear el desempeño de los equipos es fundamental para identificar áreas de mejora. Esta evaluación permite el seguimiento de indicadores clave, como el tiempo medio entre fallas (MTBF) y el tiempo medio de reparación (MTTR), lo que contribuye a optimizar la eficiencia y confiabilidad operativa [25].

Rendimiento de Máquinas: El rendimiento de las máquinas es un indicador clave en la eficiencia operativa de la industria de la imprenta. La implementación de RCM permite identificar las condiciones y prácticas óptimas para maximizar el rendimiento, detectando patrones de falla y configurando las máquinas para trabajar de manera más eficiente [31,32]. Por su parte, TPM contribuye a mantener y mejorar continuamente el rendimiento, al reducir el tiempo de inactividad y maximizar el uso de los equipos. El enfoque proactivo de TPM asegura que las máquinas operen a su capacidad ideal mediante actividades de mantenimiento preventivo y predictivo [33].

Materiales: Para la implementación de RCM, se realizaron encuestas y entrevistas a los operadores y técnicos para recopilar datos sobre fallas y tiempos de reparación. Estos datos se analizaron con Excel para identificar patrones y calcular métricas como el tiempo entre fallas y el tiempo de reparación promedio. Además, se revisaron los manuales de procedimientos actuales para encontrar oportunidades de mejora en el mantenimiento preventivo.

Métodos: En la Figura 1 se realizó el diagrama de Ishikawa, también conocido como diagrama de causa y efecto o diagrama de espina de pescado, se utilizó principalmente para identificar y analizar las causas de un problema específico en la empresa.



Figura 1. Diagrama actual de Ishikawa

En la Tabla 1 se desarrolló el diagrama de Pareto ya que es una herramienta gráfica que organiza datos de manera que se priorizan las causas de un problema, representando visualmente el principio de Pareto, que establece que el 80% de los efectos provienen del 20% de las causas [34].

Tabla 1. Diagrama de Pareto

CATEGORIA	FRECUENCIA	Porcentaje %	Acumulado
No se registran las fallas ni se miden los tiempos de inactividad de las máquinas.	94	7%	7%
Espacios mal distribuidos.	91	7%	14%
Ausencia indicadores para evaluar la necesidad de mantenimiento.	88	7%	21%
Falta de repuestos críticos disponibles.	85	7%	28%
Clima que influye en el deterioro de las máquinas (la humedad en los cabezales de las impresoras)	84	6%	34%
Uso excesivo de materiales que aceleran el desgaste de las máquinas. (las tintas)	80	6%	40%
Polvo o suciedad en el ambiente que acelera el desgaste de las máquinas.	76	6%	46%
Falta de calibración	75	6%	52%
Sobrecarga de trabajo en maquinaria clave (impresoras).	70	5%	57%
Mala ventilación inadecuadas que afectan la maquinaria.	64	5%	62%
Desgaste de piezas por uso continuo.	60	5%	67%
Falta de un cronograma de mantenimiento.	60	5%	71%
Procesos de mantenimiento no documentados.	55	4%	76%
Mala gestión del inventario de materiales necesarios para el mantenimiento.	45	3%	79%
Falta de herramientas de monitoreo de rendimiento.	43	3%	82%
Poca capacitación en procedimientos de mantenimiento.	40	3%	85%
Personal insuficiente para llevar a cabo las tareas de mantenimiento.	40	3%	88%
Falta de capacitación en el uso correcto de las máquinas.	33	3%	91%
Máquinas que requieren mayor frecuencia de revisiones.	31	2%	93%
Falta de estandarización en los repuestos utilizados.	28	2%	96%
Sobrecarga de tareas en otras áreas que limita el tiempo para el mantenimiento.	22	2%	97%
Falta de lubricación máquinas.	20	2%	99%
No registra adecuadamente las tasas de incidentes de fallas mecánicas	16	1%	100%

Total	1300	100%	
-------	------	------	--

En la figura 2 este diagrama permite identificar y clasificar problemas o defectos en orden descendente, facilitando la toma de decisiones al enfocarse en los aspectos más significativos que requieren atención.



Figura 2. Diagrama de Pareto

Fase inicial del equipo:

Fase 1: Jerarquización de los activos. En la Figura N° 3 se lleva a cabo la jerarquización de activos, un paso crucial en el proceso del RCM, que permite priorizar los recursos y esfuerzos de mantenimiento según el riesgo asociado a cada activo. Esta práctica se fundamenta en un análisis sistemático que evalúa tanto la probabilidad de fallos como sus posibles consecuencias [20].



Figura 3. Matriz de Criticidad

Fase 2: Contexto operacional. En esta fase, se seleccionan los sistemas a los que se aplica el RCM, estableciendo sus límites, estructura y condiciones de operación. Es fundamental entender las funciones y los estándares de desempeño asociados con los activos en su contexto operativo actual, para llevar a cabo un análisis eficiente [35].

Fase de implantación del RCM:

Etapas 1: Determinar fallas funcionales. La identificación de fallas dentro del RCM es un proceso fundamental que permite reconocer y analizar los modos de falla de los activos, junto con sus efectos y consecuencias. Este

análisis se realiza mediante una serie de pasos estructurados que aseguran una comprensión exhaustiva de las causas y mecanismos detrás de cada falla [36].

Etapas 2: Implantación Final. La fase final de la implementación del RCM es esencial para asegurar que las estrategias y procedimientos desarrollados se integren de manera efectiva en la operación diaria. Esta etapa se enfoca en la ejecución y el seguimiento de las acordadas, garantizando que se alcancen los beneficios previstos. Este enfoque estructurado permite a los equipos de mantenimiento tomar decisiones informadas sobre la gestión de los activos y sus fallas [37].

Modelo matemático

Los indicadores evaluados fueron el MTBF como se observa en la referencia [38], el indicador MTTR y la disponibilidad [39]. Dichos indicadores se visualizan en las Ec. (1), Ec. (2) y Ec. (3) respectivamente.

$$MTBF = \frac{TTD - TTM}{NF} \quad (1)$$

Donde:

MTBF; es el tiempo medio entre fallas (horas-maquinas).

TTD; tiempo total disponible (horas-maquinas).

TTM; tiempo total de mantenimiento (horas-maquinas).

NF; número de fallas (n° de fallas/mes).

$$MTTR = \frac{TTM}{NF} \quad (2)$$

MTTR; es el tiempo medio de reparación (horas-maquinas).

$$Disponibilidad = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100\% \quad (3)$$

Disponibilidad; es el tiempo que se le asigna a una maquina en realizar su actividad en condiciones normales y su unidad de medida es el porcentaje (%).

El MTBF es un indicador clave de confiabilidad, ya que su cálculo requiere un historial de fallas registradas durante un período específico, lo que permite determinar el nivel de confiabilidad de un sistema. Este indicador mide el tiempo promedio entre fallos de un sistema, lo cual facilita su estimación. Por su parte, el MTTR es un indicador de mantenibilidad, cuyo cálculo también se basa en un registro histórico detallado que incluye los tiempos y períodos en los que ocurren las fallas [40]. Además, la disponibilidad de un equipo está estrechamente relacionada con la seguridad, ya que es fundamental mantener los equipos en óptimas condiciones operativas, garantizando su confiabilidad y asegurando que permanecerán en funcionamiento.

III. RESULTADOS

Se realizó un análisis de la situación del área de mantenimiento antes de implementar RCM, el cual incluyó el estudio de los datos de las máquinas de impresión durante 2023. Estos datos, presentados en la Tabla 2.

Tabla 2. Análisis inicial de horas de operación y horas de mantenimiento en el periodo inicial 2023

Meses	Horas en operación	Horas en mantenimiento	N° Paradas
Enero	227	26	16
Febrero	230	28	20
Marzo	247	30	19
Abril	256	31	17
Mayo	250	27	15
Junio	200	22	10
Julio	238	24	13
Agosto	240	24	19
Setiembre	300	36	24
Octubre	295	33	30
Noviembre	310	36	29
Diciembre	242	30	22

En la Figura 4 se muestra el análisis del MTBF del periodo 2023.



Figura 4. Variación de los valores de MTBF

En la Figura 5 se muestra el análisis del MTTR del periodo 2023.



Figura 5. Variación de los valores de MTTR

En la Figura 6 se muestra la disponibilidad de los equipos que refleja el tiempo durante el cual las máquinas están operativas y productivas en el periodo 2023.

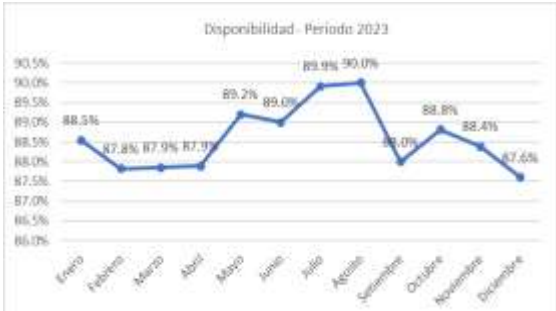


Figura 6. Disponibilidad durante los meses del año 2023

En la Figura 7 se procedió con la jerarquización de activos ya que es un paso crítico en el proceso de RCM.

Activo	Frecuencia de fallas	Consecuencia o Severidad				Críticidad	
		Impacto Operacional	Flexibilidad Operacional	Costos de Mto.	Impacto de Seguridad y Medio Ambiente	Total	Valor
Polaris Ultra4000 3308	4	9	5	3	7	55	220
Polaris Ultra4000 3304	2	5	4	2	5	27	54
WIT-ULTRA 9200 2302S	2	4	5	2	5	27	54
WIT-ULTRA 9200 2301S	1	8	4	3	4	39	39

Figura 7. Análisis de criticidad

En la Figura 8 se procedió con el análisis del AMFE y nos permitió identificar y evaluar los modos de fallo de los activos.

Línea/Parte a analizar	Descripción de la función principal	Modo potencial de falla	Efecto de falla potencial	Severidad (S)	Causa potencial de falla	Ocurrencia (O)	Controles Propuestos de detección	Detección (D)	NPR	Controles Propuestos de prevención
Cabezal de Impresión Ultra 4000 3308	Ejecuta la impresión en la superficie del medio con alta precisión	Cabezal dañado	Pérdida de calidad en la impresión, atascos en el proceso de impresión	9 (Muy Alta)	Desgaste por uso prolongado, falta de mantenimiento adecuado	7 (Alta)	Inspección visual del estado del cabezal, pruebas de impresión periódicas	6 (Moderada)	378	Mantenimiento preventivo regular, limpieza adecuada del cabezal
		Atasco de tinta	Interrupción en el flujo de tinta, impresión incompleta o irregular	8 (Alta)	Bloqueo en los canales de tinta, tinta de baja calidad	6 (Moderada)	Monitoreo de flujo de tinta y limpieza de los canales	5 (Moderada)	240	Uso de tinta de alta calidad, limpieza regular de los canales
		Problemas de calibración	Imágenes y textos desalineados, reducción de precisión en la impresión	7 (Alta)	Ajustes incorrectos o desajustes durante el uso	5 (Moderada)	Pruebas de impresión para verificar la alineación y calidad	4 (Moderado)	140	Calibración periódica del cabezal, ajustes de configuración
		Sobrecalentamiento	Daño al cabezal y reducción en la vida útil, posible interrupción en la impresión	8 (Alta)	Operación a temperaturas elevadas, ventilación inadecuada	4 (Moderada)	Control de temperatura y ventilación	7 (Alta)	224	Sistema de enfriamiento adecuado, monitoreo de temperatura

Figura 8. AMFE

En la Figura 9 se procedió a utilizar la hoja de decisión ya que es una herramienta clave en el proceso de RCM, que ayudo a determinar las acciones de mantenimiento más adecuadas.

En la Figura 10 se desarrolló un plan de mantenimiento adecuado en RCM donde también se desarrolla a través de varias etapas.

HOJA DE DECISIÓN RCM															
Elemento: Impresora Polaris 3308								Realizado por: Filcamgraf - Fabrica				Fecha de realización: 2024			
Componente: Cabezal								Revisado por: Filcamgraf							
Referencia Información			Evaluación de consistencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Tareas "a falta de"		Tareas propuestas	Frecuencia inicial	Realiza tarea	
F	FF	MF	H	S	E	O				H4	H5				S4
1	A	3	S	N	N	S	S						Mantenimiento preventivo regular, limpieza adecuada del cabezal	Semestral	Mecánico de mantenimiento
1	B	1	S	N	N	N	S						Calibración periódica del cabezal, ajustes de configuración	Mensual	Mecánico de mantenimiento
1	E	1	S	N	N	S	S						Verificar el sistema de enfriamiento y hacer un monitoreo de temperatura	Mensual	Mecánico de mantenimiento

Figura 9. Hoja de decisión

PLAN DE MANTENIMIENTO															
Elemento: Impresora Polarix 3308										Fecha realización: 2024		Realizar: Equipo de mantenimiento			
Componente: Cabezal															
Item	Tareas a realizar	Frecuencia	Realiza tarea	Mes											
				Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ag	Sept	Oct	Nov	Dic
1	Mantenimiento preventivo regular, limpieza adecuada del cabezal	C	Mecánico de mantenimiento				*							*	
2	Calibración periódica del cabezal, ajustes de configuración	M	Mecánico de mantenimiento	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
3	Verificar el sistema de enfriamiento y hacer un monitoreo de temperatura	M	Mecánico de mantenimiento	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
Novidades encontradas:		Estado tarea		Frecuencia tareas											
		Programado ☐		D: Diario				S: Semanal				M: Mensual			
		Cumplido ●		T: Trimestral				C: semestral				A: Anual			

Figura 10. Mantenimiento adecuado

En la Figura 11 se muestra un aumento del MTBF en el periodo 2024 tras la aplicación del plan de mantenimiento.



Figura 11. Variación de los valores de MTBF

En la Figura 12 se muestra una disminución del MTTR en el periodo 2024.

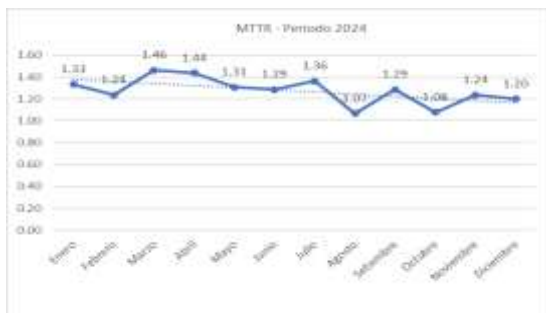


Figura 12. Variación de los valores de MTTR

En la Figura 13 se muestra el aumento de disponibilidad de los equipos en el periodo 2024.



Figura 13. Disponibilidad del año 2024 tras la implementación del plan de mantenimiento

IV. DISCUSIÓN

El presente estudio evalúa la efectividad de la implementación de las metodologías RCM en el mantenimiento de maquinaria en la industria de impresión. Se centra en analizar cómo estas metodologías mejoran la disponibilidad y el rendimiento de los equipos, optimizando así la productividad y reduciendo costos. El análisis de los datos operativos de la impresora Polarix 3308 durante 2023 revela fluctuaciones significativas en los indicadores clave, que reflejan la variabilidad en la confiabilidad y eficiencia del equipo. Según la Figura 4, el MTBF en el periodo inicial de 2023 promedió 12.22 horas, mostrando una tendencia a la baja. Y en la Figura 5 refleja una evolución significativa a lo largo del año 2023. El tiempo promedio de reparación comenzó en enero con 1.63 horas, mejorando levemente en febrero a 1.40 horas. Sin embargo, a partir de marzo, se observó un aumento progresivo que alcanzó su punto máximo en junio con 2.20 horas, lo que evidencia dificultades operativas en la primera mitad del año. Durante la segunda mitad, se logró una mejora notable, alcanzando un mínimo de 1.10 horas en agosto.

En 2024, las mejoras implementadas en la impresora Polarix Ultra4000 3308 generaron cambios notables en sus indicadores de desempeño, reflejando un impacto positivo en su confiabilidad y eficiencia operativa. Según la Figura 11, el MTBF mostró un aumento sostenido a lo largo del año tras la implementación de un plan de mantenimiento. Aunque se observaron fluctuaciones intermedias, como en febrero (12.53 horas) y agosto (16.60 horas), el MTBF alcanzó picos significativos en julio (21.18 horas) y octubre (21.69 horas), evidenciando una reducción en la frecuencia de fallas. Esta tendencia positiva destaca el impacto de las estrategias de mantenimiento preventivo, que optimizaron la operatividad, redujeron costos por interrupciones y mejoraron la productividad. Por su parte, la Figura 12 muestra una disminución progresiva del MTTR en 2024, lo que indica mejoras en la capacidad de respuesta y eficiencia en las reparaciones. Finalmente, la Figura 13 evidencia un aumento gradual en la disponibilidad de los equipos, alcanzando un

máximo de 95.3% en septiembre, estos resultados indican que la implementación de un modelo de mantenimiento basado en RCM permite identificar las fallas críticas y priorizar las actividades de mantenimiento reduciendo del MTBF y el MTTR, lo cual incrementa la disponibilidad de los equipos [38,39,40,41]. En línea con esta perspectiva, los investigadores de la referencia [42,43] proponen un enfoque operativo que integra RCM para diseñar o mejorar planes de mantenimiento en sistemas industriales. Una limitación importante del estudio es la poca disponibilidad de datos históricos detallados sobre el rendimiento y la disponibilidad de las máquinas el cual afecta la precisión en la evaluación de su impacto en la mejora continua de los equipos.

V. CONCLUSIÓN

Estos resultados destacan cómo un enfoque sistemático y proactivo hacia el mantenimiento no solo minimiza los costos asociados al mantenimiento correctivo, sino que también contribuye a la mejora de la calidad del producto final. Este hallazgo está respaldado por Setiawan et al. [44], quienes destacan que la adopción de prácticas de RCM puede conducir a mejoras sustanciales en el rendimiento del mantenimiento en la industria manufacturera.

La integración de RCM en las rutinas diarias de mantenimiento no solo optimiza el rendimiento de las máquinas, sino que también fomenta una cultura de responsabilidad esto se alinea con los hallazgos de Singh et al. [45], quienes resaltan la complementariedad entre RCM como un factor clave para mejorar los planes de mantenimiento. La estandarización de procedimientos y la capacitación del personal son fundamentales para asegurar una gestión efectiva del mantenimiento, lo que se traduce en menores tiempos de inactividad y una mayor consistencia en la calidad del producto [46]. Los resultados respaldan la importancia de ajustar los programas de mantenimiento a las condiciones específicas del entorno de impresión, como el control del polvo y la calibración de los equipos, elementos clave que inciden en la eficiencia operativa.

Para investigaciones futuras se desarrollará el SMED (Single minute exchange of die) y el balance de línea en el área de producción, para la optimización de los recursos productivos y en los tiempos de cambios y configuraciones de máquinas y equipos en empresas industriales, analizando y evaluando el impacto de los costos operativos y como este afecta a la utilizada económica.

REFERENCIAS

- [1] Supriyanto, H., Kurniati, N. y Supriyanto, MFR (2021). Evaluación del desempeño de mantenimiento de una implementación de RCM: un estudio de caso orientado a la funcionalidad. *Revista internacional de investigación en ingeniería mecánica y robótica*, 10(12), pp.702–709. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.10.12.702-709>
- [2] Nasri, M. H., Derakhshandeh, S. Y., y Kargar, A. (2020). A Novel Method to Apply Reliability-Centered Maintenance on Over-Current Protection Systems. *Electric Power Components and Systems*, 48(9–10), pp.1021–1035. <https://doi.org/10.1080/15325008.2020.1825553>
- [3] Palomino-Valles, A., Tokumori-Wong, M., Castro-Rangel, P., Raymundo-Ibañez, C., y Dominguez, F. (2020). TPM Maintenance Management Model Focused on Reliability that Enables the Increase of the Availability of Heavy Equipment in the Construction Sector. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 796(1), pp. 1-10. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/796/1/012008>
- [4] Kurylo, P., Wysoczański, A., Cyganiuk, J., Dzikuc, M., Szufa, S., Bonarski, P., Burduk, A., Frankovský, P., Motyka, P., y Medynski, D. (2022). Selected Determinants of Machines and Devices Standardization in Designing Automated Production Processes in Industry 4.0. *Materials*, 16(1), pp. 2-18. <https://doi.org/10.3390/ma16010312>
- [5] Guillen-Sanchez, J. S., y Paucar, A. M. D.-. (2024). Mantenimiento productivo total en la eficiencia productiva de las empresas industriales: una breve revisión de literatura. *Signos*, 16(1). pp. 1-18. <https://doi.org/10.15332/24631140.8807>
- [6] Moscoso, C., Fernandez, A., Viacava, G., y Raymundo, C. (2019). Integral Model of Maintenance Management Based on TPM and RCM Principles to Increase Machine Availability in a Manufacturing Company. *In Advances in intelligent systems and computing*, 1018, pp. 878–884. https://doi.org/10.1007/978-3-030-25629-6_137
- [7] Huo, T., Yu, J., Zhao, H., Wu, H., y Zhang, Y. (2020). A family of novel RCM rotational compliant mechanisms based on parasitic motion compensation. *Mechanism and Machine Theory*, 156, pp. 104168. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.104168>
- [8] Da Silva, R. F., De Andrade Melani, A. H., De Carvalho Michalski, M. A., y De Souza, G. F. M. (2023). Reliability and Risk Centered Maintenance: A Novel Method for Supporting Maintenance Management. *Applied Sciences*, 13(19), pp. 2-23. <https://doi.org/10.3390/app131910605>
- [9] Silva, F., Chambel, É., Infante, V., y Ferreira, L. A. (2021). RCM 3 Methodology Application to Armored Military Vehicle Cooling System. *U Porto Journal of Engineering*, 7(4), pp. 46–60. https://doi.org/10.24840/2183-6493_007.004_0004
- [10] Singgih, M. L., Prasetyawan, Y., Sutikno, N., Hartanto, D., Kurniawan, F. R., y Wicaksana, W. T. (2019). Maintenance management improvement based on reliability centered maintenance II in energy generating industries. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 528(1), pp. 2-7. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/528/1/012054>
- [11] Endo, T., y Hozumi, N. (2021). Fault Analysis for Reliability Centered Maintenance (RCM) in Machining. *Journal of Machine and Computing*, 1(1), pp.29–38. <https://doi.org/10.53759/7669/jmc202101004>
- [12] Fang, F., Zhao, Z., Huang, C., Zhang, X., Wang, H., y Yang, Y. (2019). Application of Reliability-Centered Maintenance in Metro Door System. *IEEE Access*, 7, pp.186167–186174. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2960521>
- [13] Katreddi, S., Thiruvengadam, A., Thompson, G., Schmid, N., y Padmanaban, V. (2023). Machine learning models for maintenance cost estimation in delivery trucks using diesel and natural gas fuels. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 9, pp. 1-12. <https://doi.org/10.3389/fmech.2023.1201068>
- [14] Bohrey, N. O. P., y Chatpalliwar, N. a. S. (2024). Application of Reliability Centred Maintenance in Improving Aircraft Availability with Preventive Maintenance Intervention. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 42(1), pp.115–129. <https://doi.org/10.37934/araset.42.1.115129>
- [15] Rakytá, M., Bubenik, P., Binasova, V., Gabajova, G., y Staffenova, K. (2024). The Change in Maintenance Strategy on the Efficiency and Quality of the Production System. *Electronics*, 13(17), pp. 2-27. <https://doi.org/10.3390/electronics13173449>
- [16] Pinto, G., Silva, F., Baptista, A., Fernandes, N. O., Casais, R., y Carvalho, C. (2020). TPM implementation and maintenance strategic plan – a case study. *Procedia Manufacturing*, 51, pp. 1423–1430. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.198>
- [17] Marcello, B., Davide, C., Marco, F., Roberto, G., Leonardo, M., y Luca, P. (2020). An ensemble-learning model for failure rate prediction. *Procedia Manufacturing*, 42, pp. 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.022>
- [18] Luo, D., Xu, L., Jia, L., Cheng, L., Tang, P., y Zhou, J. (2024). Highly

- Sensitive Qualitative and Quantitative Identification of Cashmere and Wool Based on Terahertz Electromagnetically Induced Transparent Metasurface Biosensor. *Biosensors*, 14(5), pp. 2-12. <https://doi.org/10.3390/bios14050240>
- [19] Castañeda, S., Rodriguez, S., Yildiz, O., Aranda, D., y Alvarez, J. C. (2024). Increase of the Availability of Machinery in a Food Company Applying the TPM, SMED and RCM Methodologies. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 72(8), pp. 128–138. <https://doi.org/10.14445/22315381/ijett-v72i8p114>
- [20] Hidalgo, P. J. B., Romero, Z. B. C., y Mirez, K. F. T. (2023). Mantenimiento productivo total en el sector manufacturero. Una revisión sistemática de literatura. *LACCEI-LEIRD 2023*. pp. 1-8. <https://doi.org/10.18687/leird2023.1.1.487>
- [21] Mami, E. F., Cheikh, A., Kadi, M., y Labadi, K. (2019). Maintenance optimisation through quality management: a case study in “Alzinc” Plant in Algeria. *International Journal of Productivity and Quality Management*, 27(1), pp. 1-13. <https://doi.org/10.1504/ijpqm.2019.099629>
- [22] Sahoo, S., y Yadav, S. (2020). Influences of TPM and TQM Practices on Performance of Engineering Product and Component Manufacturers. *Procedia Manufacturing*, 43, pp. 728–735. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.111>
- [23] Azid, N. a. A., Shamsudin, S. N. A., Yusoff, M. S., y Samat, H. A. (2019). Conceptual Analysis and Survey of Total Productive Maintenance (TPM) and Reliability Centered Maintenance (RCM) Relationship. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 530(1), pp. 1-13. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/530/1/012050>
- [24] Arrieta, E., Romero, N., Torregroza, M., y Fuly, I. (2022). Finite element method applied to magnetic flux analysis in large synchronous machines with short circuit faults in the rotor. *Ingeniare. Revista Chilena De Ingeniería*, 30(4), pp. 760–768. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052022000400760>
- [25] Palomino, R. a. C., Barreto, L. R. C., y Quiroz, J. C. (2022). Increased equipment performance in agro-industrial companies through a maintenance model based on the TPM approach. *Proceedings of the 20th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology: “Education, Research and Leadership in Post-pandemic Engineering: Resilient, Inclusive and Sustainable Actions.”* pp. 1-10. <https://doi.org/10.18687/laccei2022.1.1.77>
- [26] Elhalim, E. K. A., Abdel-Magied, R. K., Afefy, I. H., y Aly, M. F. (2019). An Efficient Maintenance Plan Using Proposed Framework of RCM Made Simple Approach. *Industrial Engineering & Management Systems*, 18(2), 222–233. <https://doi.org/10.7232/iems.2019.18.2.222>
- [27] Drewniak, R., y Drewniak, Z. (2022). Improving business performance through TPM method: The evidence from the production and processing of crude oil. *PLoS ONE*, 17(9), pp. 1-15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0274393>
- [28] Medyński, D., Bonarski, P., Motyka, P., Wysoczański, A., Gnitecka, R., Kolbusz, K., Dąbrowska, M., Burduk, A., Pawelec, Z., y Machado, J. (2023). Digital Standardization of Lean Manufacturing Tools According to Industry 4.0 Concept. *Applied Sciences*, 13(10) pp. 1-16. <https://doi.org/10.3390/app13106259>
- [29] Soto, J. J. S., Pérez, S. E. C., Olivos, G. S. M., y Puscan, M. W. V. (2023). Implementación de la Gestión de Inventarios para la Reducción de los Costos en una Empresa Agroindustrial, Olmos – Perú. *Memorias*. pp. 216-221. <https://doi.org/10.54808/cicic2023.01.216>
- [30] González-López, D. A., y Mago-Ramos, M. G. (2024). Preventive maintenance plan for SKF Latin Trade SAS equipment. *DYNA*, 91(233), pp. 28–34. <https://doi.org/10.15446/dyna.v91n233.112527>
- [31] Maldonado-Guzmán, G., Molina-Morejón, V. M., y Del Toro, R. J. (2024). Environmental regulations in eco-innovation and sustainable performance in Mexican Automotive Industry. *La Granja*, 39(1), pp. 78–91. <https://doi.org/10.17163/igr.n39.2024.05>
- [32] Ribeiro, I., Godina, R., Pimentel, C., Silva, F., y Matias, J. (2019). Implementing TPM supported by 5S to improve the availability of an automotive production line. *Procedia Manufacturing*, 3(8), pp. 1574–1581. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.128>
- [33] Mendes, D., Gaspar, P. D., Charrua-Santos, F., y Navas, H. (2023). Integrating TPM and Industry 4.0 to Increase the Availability of Industrial Assets: A Case Study on a Conveyor Belt. *Processes*, 11(7), pp. 1-21. <https://doi.org/10.3390/pr11071956>
- [34] Jagusiak-Kocik, M. (2023). Análisis y evaluación de amenazas existentes en pequeñas instalaciones seleccionadas de infraestructura deportiva y recreativa mediante herramientas de gestión de calidad. *Sistema de seguridad humano-técnico-instalación-medioambiente*, 5 (1), pp. 103–111. <https://doi.org/10.2478/czoto-2023-0012>
- [35] Valdivia, J. L. C., Caceres, C. C., y Ollachica, D. C. (2022). Application of Reliability Centered Maintenance Tools to Standardize Processes Required by ISO/IEC 17025. *Proceedings of the 20th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology: “Education, Research and Leadership in Post-pandemic Engineering: Resilient, Inclusive and Sustainable Actions.”* pp. 1-8. <https://doi.org/10.18687/laccei2022.1.1.704>
- [36] Kumar, D., & Suresh, D. (2019). Implementation of Total Productive Maintenance for Overall Equipment Effectiveness Improvement in Machine Shop. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8(3), pp. 7686–7691. <https://doi.org/10.35940/ijrte.c6212.098319>
- [37] Xiang, Z. T., y Feng, C. J. (2021). Implementing total productive maintenance in a manufacturing small or medium-sized enterprise. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 14(2), pp. 152-175. <https://doi.org/10.3926/jiem.3286>
- [38] Michlowicz, E. (2022). Assessment of the modernized production system through selected TPM method indicators. *Eksplotacja I Niezawodnosc - Maintenance and Reliability*, 24(4), pp. 677–686. <https://doi.org/10.17531/ein.2022.4.8>
- [39] Sari, R. M., Syahputri, K., Rizkya, I., y Nadhirah, N. (2020). Analysis of Raw Mill Machines Maintenance in Cement Industry. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 851(1), pp. 1-8. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/851/1/012051>
- [40] Guedes, M., Figueiredo, P. S., Pereira-Guizzo, C. S., y Loiola, E. (2021). The role of motivation in the results of total productive maintenance. *Production*, 31. pp.1-14. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20200057>
- [41] Solís-Meza, M., & Torres-Rodríguez, R. (2021). Contribuciones del TPM en la mejora de la gestión del mantenimiento. *Revista Científica “INGENIAR”*, 4 (8), pp. 58–78. <https://doi.org/10.46296/ig.v4i8edespdic.0051>
- [42] Giuria-Farías, A., Noriega-Revoredo, C., y Flores, E. A. (2022). Maintenance management model based on RCM and TPM to optimize times and costs within the useful life cycle of nautical assets. *Proceedings of the 20th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology: “Education, Research and Leadership in Post-pandemic Engineering: Resilient, Inclusive and Sustainable Actions.”* pp. 1-13. <https://doi.org/10.18687/laccei2022.1.1.747>
- [43] Bataineh, O., Al-Hawari, T., Alshraideh, H., y Dalalah, D. (2019). A sequential TPM-based scheme for improving production effectiveness presented with a case study. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 25(1), pp. 144–161. <https://doi.org/10.1108/jqme-07-2017-0045>
- [44] Setiawan, D., Jusolihun, N., y Cahyo, W. N. (2019). Maintenance system design on air jet loom (AJL) machine using reliability centered maintenance (RCM) method. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 673(1), pp. 1-7. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/673/1/012102>
- [45] Singh, S., Agrawal, A., Sharma, D., Saini, V., Kumar, A., y Praveenkumar, S. (2022). Implementation of Total Productive Maintenance Approach: Improving Overall Equipment Efficiency of a Metal Industry. *Inventions*, 7(4), pp. 1-14. <https://doi.org/10.3390/inventions7040119>
- [46] Vega-Alvites, M., y Quiroz-Flores, J. (2022). Aumento de la disponibilidad de la maquinaria en una planta de moldeo por inyección de plástico mediante la implementación de herramientas TPM y Lean Manufacturing: Una investigación empírica en Perú. *En 20th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: Education, Research and Leadership in Post-pandemic Engineering: Resilient, Inclusive and Sustainable Actions* pp. 1-10. <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.185>