

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Industrial

**“OPTIMIZACIÓN DEL MANTENIMIENTO
BASADO EN CONFIABILIDAD (RCM) PARA
MINIMIZAR EL TIEMPO DE INACTIVIDAD EN
LA EMPRESA PRODUCTOS NATURALES DE
EXPORTACIÓN S.A”**

**Trabajo de suficiencia profesional para optar al título
profesional de:**

Ingeniero Industrial

Autor:

Juan Enrique Quispe Barraza

Asesor:

Mg. Ing. Walter Antenor del Carmen Rosas Quintero

<https://orcid.org/0000-0002-6068-3996>

Lima - Perú

2025

Informe de Similitud

Juan Enrique Quispe Barraza

OPTIMIZACIÓN DEL MANTENIMIENTO BASADO EN CONFIABILIDAD (RCM) PARA MINIMIZAR EL TIEMPO DE IN...

- Quick Submit
- Quick Submit
- Asesores

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::1:3235248219

Fecha de entrega
30 abr 2025, 8:44 p.m. GMT-5

Fecha de descarga
30 abr 2025, 8:47 p.m. GMT-5

Nombre de archivo
Confiabilidad_RCM_para_Minimizar_el_Tiempo_de_Inactividad.docx

Tamaño de archivo
2.3 MB

93 Páginas

18.475 Palabras

108.286 Caracteres



Página 2 of 102 - Integrity Overview

Identificador de la entrega trn:oid:::1:3235248219

16% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Filtered from the Report

- Bibliography

Top Sources

- 15% Internet sources
- 7% Publications
- 6% Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

1 Integrity Flag for Review

- Replaced Characters**
47 suspect characters on 14 pages

Letters are swapped with similar characters from another alphabet.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia, por ser mi motor y mi constante fuente de inspiración. A mis padres, por su amor incondicional, esfuerzo y ejemplo de perseverancia. A todos aquellos que, con palabras de aliento o gestos de apoyo, me impulsaron a seguir adelante en cada etapa de esta formación profesional.

Agradecimiento

Agradezco a Dios por brindarme la fortaleza para culminar esta etapa. A la Universidad y a mis docentes, por compartir sus conocimientos y formar parte esencial de mi crecimiento académico. A mi asesor, por su guía constante y valiosos aportes. Y a la empresa Productos Naturales de Exportación S.A., por permitirme aplicar y enriquecer mis competencias profesionales en un entorno real de trabajo.

Tabla de contenidos

Informe de Similitud.....	2
Dedicatoria.....	3
Agradecimiento.....	4
Índice de tablas	6
Índice de Figuras.....	8
RESUMEN EJECUTIVO.....	9
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	10
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	18
CAPÍTULO III. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA	36
CAPÍTULO IV. RESULTADOS	79
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	84
REFERENCIAS	87

Índice de tablas

Tabla 1. Impacto en indicadores operativos y económicos	41
Tabla 2. Impacto por tipo de equipos afectados	42
Tabla 3. Principales áreas afectadas	43
Tabla 4. Tareas Desarrolladas Durante el Proyecto.....	44
Tabla 5. Fases de implementación del RCM	46
Tabla 6. Análisis de Fallas por Equipo Crítico.....	48
Tabla 7. Matriz de priorización.....	49
Tabla 8. Estrategias de mantenimiento RCM	50
Tabla 9. Análisis Diagnóstico según las 7 Preguntas del RCM.....	50
Tabla 10. Hoja de registro RCM – pregunta 1.....	52
Tabla 11. Hoja de registro RCM – pregunta 2.....	53
Tabla 12. Hoja de registro RCM – pregunta 3.....	54
Tabla 13. <i>Hoja de registro RCM – pregunta 4</i>	55
Tabla 14. Hoja de registro RCM – pregunta 5.....	56
Tabla 15. Hoja de registro RCM – pregunta 6.....	57
Tabla 16. Hoja de registro RCM – pregunta 7.....	58
Tabla 17. Cálculo del Índice de Frecuencia de Fallas (IF)	60
Tabla 18. Cálculo del Índice de Disponibilidad Operativa (IDO).....	61
Tabla 19. Cálculo del Índice de Costo de Mantenimiento (ICM)	62
Tabla 20. Cálculo del Tiempo Medio de Reparación (MTTR)	63

Tabla 21. Cálculo del Cumplimiento de OTs fuera de tiempo	64
Tabla 22. Cálculo del Tiempo de Inactividad.....	65
Tabla 23. Cálculo de Confiabilidad	65
Tabla 24. Detalle de la implementación	67
Tabla 25. Clasificación y Priorización de Repuestos	69
Tabla 26. Fallas registradas por mes en equipos críticos.....	79
Tabla 27. Índice de disponibilidad operativa (IDO).....	80
Tabla 28. Índice de costo de mantenimiento mensual (ICM).....	81
Tabla 29. Tiempo Medio de Reparación (MTTR).....	81

Índice de Figuras

Figura 1. Organigrama.....	13
Figura 2. Diagrama de Ishikawa.....	40
Figura 3. Diagrama de Pareto	43
Figura 4. Gantt.....	45
Figura 5. 7 preguntas del RCM	51
Figura 6. Confiabilidad tendencia	66
Figura 7. Gestión de OTs.....	68
Figura 8. Reducción de compras de emergencia	71
Figura 9. Porcentaje de OTs cumplidas a tiempo	82

RESUMEN EJECUTIVO

La presente experiencia profesional se desarrolló en la empresa Productos Naturales de Exportación S.A., dedicada a la producción y exportación de colorantes naturales. Se identificó una alta frecuencia de fallas en equipos críticos como el Atomizador 6 y la Caldera Cleaver Brooks, generando más de 400 horas de inactividad anual y pérdidas superiores a \$1.8 millones. Ante esta problemática, se implementó un plan de mantenimiento basado en confiabilidad (RCM) con el objetivo de reducir el tiempo de inactividad, mejorar la disponibilidad operativa y optimizar los costos. La metodología incluyó análisis de criticidad, FMEA, monitoreo predictivo y gestión digitalizada mediante un CMMS. Los resultados obtenidos fueron altamente favorables: se logró una reducción del 29% en la frecuencia mensual de fallas, un incremento en la disponibilidad operativa promedio hasta el 98.6%, una disminución del 25% en el índice de costo de mantenimiento, y una mejora en el tiempo medio de reparación (MTTR), el cual se redujo a solo 7 minutos por evento. Asimismo, se fortaleció la planificación de mantenimiento preventivo, se redujeron las compras de emergencia en un 23% y se optimizó la gestión de repuestos críticos. Esta experiencia permitió aplicar competencias clave en ingeniería industrial, como análisis de datos, planificación de mantenimiento y mejora continua. Además, evidenció que el enfoque RCM es técnica y económicamente viable, contribuyendo a la sostenibilidad y competitividad de la empresa en el mercado global.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Conceptualización de la experiencia profesional

Durante mi experiencia profesional, desempeñé funciones en el área de mantenimiento industrial, donde tuve la responsabilidad de supervisar y optimizar los procesos de mantenimiento correctivo y preventivo. A lo largo de mi labor, identifiqué una problemática significativa relacionada con los altos tiempos de inactividad de los equipos críticos, ocasionados por una gestión ineficiente del mantenimiento correctivo. Esta situación afectaba directamente la continuidad operativa, elevaba los costos de mantenimiento y generaba retrasos en la producción, comprometiendo la capacidad de la empresa para cumplir con los plazos de entrega de sus clientes internacionales.

Contextualización del tema (Descripción de la problemática)

El mantenimiento industrial es un factor clave en empresas manufactureras, pues garantiza la disponibilidad operativa y la eficiencia de los procesos productivos. En Pronex S.A., dedicada a la exportación de colorantes naturales como el carmín de cochinilla, la operatividad de los equipos es fundamental para alcanzar los estándares de calidad exigidos en los mercados internacionales. Sin embargo, la falta de un plan de mantenimiento preventivo formalizado en el 43% de los equipos críticos generaba fallas recurrentes. Equipos esenciales como el Atomizador 6 AT6-2F y la Caldera Cleaver Brooks CA1-5A presentaban más de 60 fallas anuales cada uno, lo que incrementaba el tiempo de inactividad en 404.3 horas al año y generaba pérdidas económicas que ascendían a

\$1.866.327,23 anuales. Además, la baja disponibilidad operativa del 91.39%, cuando el estándar del sector supera el 95%, evidenciaba la necesidad de una estrategia de mantenimiento más eficiente.

Importancia y justificación

Optimizar el mantenimiento correctivo no solo permitiría reducir los tiempos de inactividad y los costos operativos, sino que también aseguraría la calidad del producto final, evitaría el incumplimiento de entregas y fortalecería la posición competitiva de la empresa en el mercado global. En la actualidad, las mejores prácticas en la industria manufacturera se enfocan en la implementación de mantenimiento predictivo y basado en confiabilidad (RCM), lo que permite anticiparse a las fallas mediante el uso de tecnología avanzada. Empresas líderes en el sector han demostrado que la adopción de estas estrategias reduce los costos de mantenimiento hasta en un 30% y mejora la disponibilidad de los equipos en un 20%, lo que respalda la pertinencia de este proyecto.

Para abordar esta problemática, utilicé una metodología cuantitativa, basada en el análisis de datos operativos de los equipos críticos y en la aplicación de herramientas de gestión de mantenimiento. En primer lugar, realicé un Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) para identificar los puntos críticos de los equipos y sus principales causas de falla. Luego, evalué los índices de gestión de mantenimiento, como el Índice de Disponibilidad Operativa (IDO), el Índice de Frecuencia de Fallas (IF), el Índice de Costo de Mantenimiento (ICM) y el MTTR (Mean Time to Repair), con el fin de medir el impacto de las fallas en la operatividad de la empresa. También implementé monitoreo basado en condición (CBM) mediante el uso de sensores de vibración, termografía infrarroja y análisis

de lubricación, lo que permitió detectar anomalías antes de que se convirtieran en fallas críticas. Finalmente, optimicé la gestión de órdenes de trabajo mediante un sistema CMMS (Computerized Maintenance Management System), lo que mejoró la planificación y ejecución de las tareas de mantenimiento.

1.2 Descripción de la empresa.

1.2.1. Información General de la empresa

La empresa Productos Naturales de Exportación S.A. (Pronex S.A.) tuvo sus inicios como un proyecto universitario con la visión de innovar en la producción y comercialización de colorantes naturales. Con el paso del tiempo, este emprendimiento se consolidó como una de las principales compañías exportadoras en su rubro, destacando por la calidad y pureza de sus productos. Su crecimiento sostenido le permitió expandir su cartera de exportación, alcanzando mercados internacionales con su producto estrella: el carmín de cochinilla, un colorante natural ampliamente utilizado en las industrias alimentaria, cosmética y farmacéutica.

Actualmente, cuenta con más de 36 años de trayectoria y una presencia consolidada en los cinco continentes, siendo los mercados asiático y europeo sus principales destinos comerciales. Además del carmín de cochinilla, la empresa ha diversificado su producción, incorporando otros derivados naturales como la norbixina y la tara, fortaleciendo su liderazgo en el sector de colorantes naturales. Su éxito se basa en la innovación, el cumplimiento de estándares de calidad y su compromiso con la sostenibilidad, convirtiéndola en un referente dentro de la industria de exportación de productos naturales en el Perú.

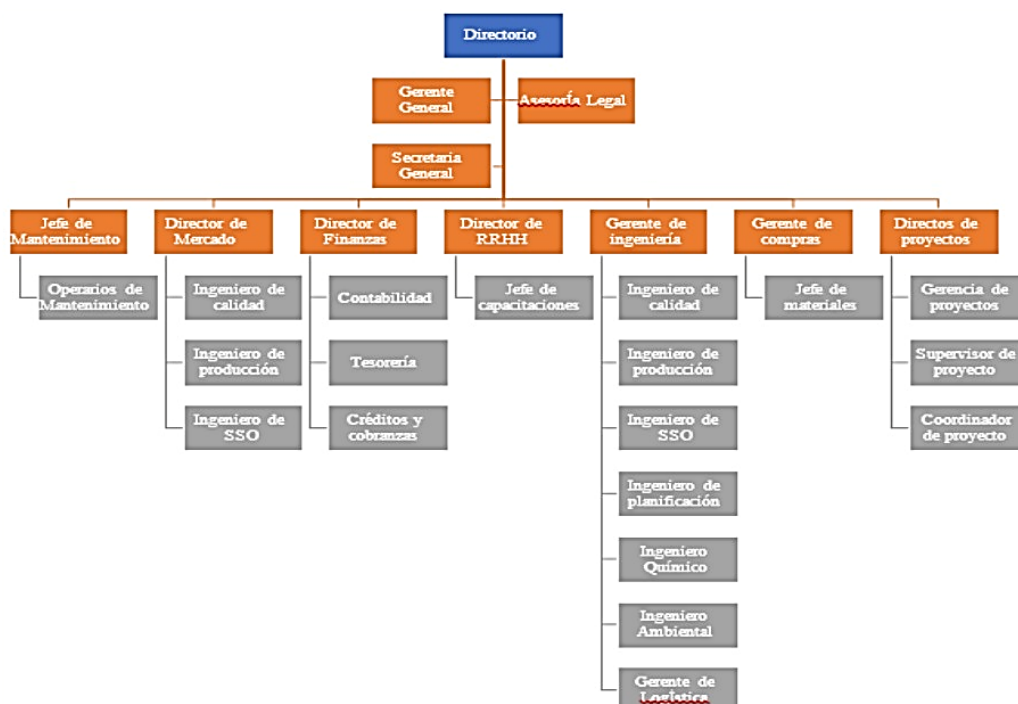
Además de su especialización en colorantes naturales, Pronex S.A. ofrece una amplia gama de productos y servicios orientados a la industria alimentaria, cosmética y textil. Entre sus productos más destacados se encuentran el carmín de cochinilla, la norbixina y la tara, utilizados como colorantes y aditivos naturales en la fabricación de alimentos, bebidas, productos cosméticos y textiles. La empresa también brinda servicios de asesoría técnica y control de calidad, asegurando que sus clientes reciban productos con los más altos estándares de pureza y certificaciones internacionales. Su cartera de clientes incluye grandes compañías del sector alimentario y cosmético en Asia, Europa y América, mientras que sus proveedores son principalmente productores locales que trabajan bajo estrictos criterios de sostenibilidad y comercio justo.

1.2.2. Estructura Organizativa

El organigrama, representa la estructura organizativa de la empresa, tal como se muestra en la Figura 1 la distribución de cargos y funciones. Permite coordinar las distintas áreas para optimizar la gestión y el cumplimiento de sus objetivos.

Figura 1.

Organigrama



Misión

Brindar soluciones naturales y sostenibles a la industria global a través de la producción y exportación de colorantes naturales de alta calidad, garantizando la satisfacción de nuestros clientes mediante innovación, certificaciones internacionales y un compromiso con la sostenibilidad ambiental y social.

Visión

Ser la empresa líder en exportación de colorantes naturales a nivel mundial, expandiendo nuestra presencia en mercados estratégicos y consolidándonos como referentes en calidad, sostenibilidad e innovación en la industria de insumos naturales.

Valores

1. **Calidad:** Nos comprometemos a ofrecer productos con los más altos estándares y certificaciones internacionales.
2. **Innovación:** Buscamos constantemente mejorar nuestros procesos y ampliar

nuestra oferta con nuevas soluciones naturales.

3. **Sostenibilidad:** Promovemos prácticas responsables con el medio ambiente y el comercio justo con nuestros proveedores.
4. **Compromiso:** Nos enfocamos en la satisfacción de nuestros clientes y en el desarrollo de nuestros colaboradores.
5. **Ética:** Actuamos con transparencia, responsabilidad y respeto en todas nuestras operaciones comerciales.

1.2.3. Productos o Servicios

La empresa se especializa en la producción y exportación de colorantes naturales de alta calidad, utilizados en diversas industrias. Su principal producto es el carmín de cochinilla, un colorante natural ampliamente demandado en los sectores alimentario, cosmético y farmacéutico debido a su pureza y estabilidad. Con el tiempo, ha ampliado su portafolio para incluir otros insumos naturales como la norbixina y la tara, fortaleciendo su presencia en el mercado global de aditivos y colorantes naturales. Además de su línea de productos, ofrece servicios de asesoría técnica y control de calidad, garantizando que sus clientes reciban insumos con certificaciones internacionales y procesos optimizados.

Su mercado principal se encuentra en Asia y Europa, regiones donde la demanda de colorantes naturales ha experimentado un crecimiento sostenido. Además, atiende clientes en América y otros continentes, consolidándose como un referente en la exportación de insumos naturales. Su cartera de clientes está conformada por empresas de los sectores alimentario, cosmético y textil, las cuales requieren ingredientes naturales en la fabricación de bebidas, alimentos procesados, cosméticos y tintes para textiles. La calidad y sostenibilidad de sus

productos han permitido que grandes compañías confíen en su capacidad de producción y cumplimiento de normativas internacionales.

1.2.4. Aspectos Relevantes de la empresa Productos Naturales de Exportación S.A.

En términos de tecnología, ha apostado por la innovación para optimizar sus procesos y garantizar la calidad en cada etapa de producción. Ha implementado sistemas de monitoreo basado en condición (CBM), los cuales incluyen sensores de vibración y termografía infrarroja para anticipar fallas en equipos críticos, reduciendo tiempos de inactividad. También ha incorporado software de gestión de mantenimiento (CMMS), lo que permite una mejor planificación de las órdenes de trabajo y una reducción de costos en mantenimiento correctivo. Además, sus procesos cuentan con sistemas automatizados de control de temperatura y humedad, asegurando la estabilidad del carmín de cochinilla y otros colorantes. La digitalización de la trazabilidad ha sido otro de los avances clave, permitiendo un mejor control y seguimiento de la producción para garantizar la transparencia y calidad de cada lote exportado.

El cumplimiento de normativas internacionales es un pilar fundamental en su operación, lo que le ha permitido obtener certificaciones como la ISO 9001:2015, que avala un sistema de gestión de calidad eficiente, y la ISO 55001:2014, enfocada en la gestión de activos para optimizar el mantenimiento de equipos. Asimismo, se rige por la normativa NTC 4595, que establece estándares específicos para la gestión del mantenimiento industrial. En el ámbito laboral, cumple con la Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo (Ley N° 29783, Perú) y el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería (DS N° 024-2016-

EM), asegurando un entorno seguro para su personal y operaciones alineadas con las regulaciones del sector.

El impacto de la empresa en la industria es significativo, consolidándose como un líder en la exportación de colorantes naturales gracias a su enfoque en la innovación y sostenibilidad. Su capacidad de adaptación a las exigencias del mercado le ha permitido expandir su presencia en mercados estratégicos de Asia y Europa, estableciendo relaciones comerciales con clientes de alto nivel. Además, ha recibido reconocimientos en el sector por la implementación de prácticas sostenibles y su compromiso con la mejora continua. Su participación en asociaciones internacionales de la industria alimentaria y cosmética refuerza su posición como un actor clave en el desarrollo de soluciones naturales para diversas aplicaciones industriales. Más allá de su crecimiento comercial, su impacto se refleja en la promoción de prácticas industriales responsables, alineadas con la creciente demanda de insumos naturales y sostenibles a nivel mundial.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

El Capítulo desarrolla el marco teórico que sustenta la propuesta de optimización del mantenimiento basada en confiabilidad (RCM) en la empresa Productos Naturales de Exportación S.A. Este apartado tiene como propósito establecer los fundamentos conceptuales y normativos que orientan el análisis de la problemática identificada y la implementación de soluciones técnicas. Para ello, se revisan antecedentes de investigaciones previas relacionadas con la gestión del mantenimiento industrial, se presentan los principales enfoques teóricos sobre mantenimiento correctivo, preventivo, predictivo y basado en confiabilidad, así como las herramientas metodológicas aplicables al diagnóstico y mejora de sistemas productivos. Además, se incluye el marco normativo relevante que regula las actividades de mantenimiento en el sector industrial, con el fin de garantizar la coherencia de la propuesta con los estándares técnicos y legales vigentes. Este capítulo proporciona así el sustento necesario para comprender la importancia de una gestión eficiente del mantenimiento como estrategia clave para la mejora de la disponibilidad operativa, la reducción de costos y el incremento de la productividad.

2.1 Antecedentes de la investigación

Flores (2024): En su estudio, diseñó e implementó un plan de mantenimiento basado en RCM para mejorar la disponibilidad de las perforadoras Everdigm modelo T450. La metodología utilizada fue de tipo aplicada con enfoque cuantitativo, empleando herramientas como el análisis de criticidad y el Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF). Los resultados mostraron que, tras la implementación del plan, la disponibilidad de las perforadoras aumentó

significativamente, reduciendo los tiempos de inactividad y mejorando la eficiencia operativa. Además, se realizó una evaluación económica que evidenció la viabilidad financiera del plan, con un Valor Actual Neto (VAN) positivo y una Tasa Interna de Retorno (TIR) favorable.

Puma (2023): Esta investigación tuvo como objetivo elaborar un plan de mantenimiento preventivo basado en RCM para optimizar el rendimiento de la excavadora 350G LC John Deere de la empresa CGM Rental. Se realizó un análisis exhaustivo de las fallas y averías de la maquinaria, utilizando herramientas como el diagrama de Pareto y la matriz AMEF. Los resultados indicaron que la implementación del plan permitió reducir las fallas mecánicas y aumentar la disponibilidad de la excavadora, lo que se tradujo en una mejora en la productividad y una reducción de los costos operativos.

Chavez (2024): propuso una mejora en el plan de mantenimiento aplicando la metodología RCM para aumentar la disponibilidad de las perforadoras Everdigm modelo T450. La investigación identificó los indicadores de MTTR, MTBF y disponibilidad de las perforadoras, elaboró una propuesta de mejora y realizó una evaluación económica del plan. Los resultados mostraron que la implementación de la metodología RCM permitió identificar y mitigar riesgos de fallas, mejorando la confiabilidad y disponibilidad de las perforadoras. La evaluación económica demostró la viabilidad de la propuesta, con un VAN positivo y una TIR del 66.84%.

Tamayo y Quiceno (2024): En su trabajo, diseñaron un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) para el equipo termoformador de una empresa dedicada a la prestación de servicios de beneficio, desposte y empaque de ganado. Utilizaron la metodología RCM de John Moubrey,

apoyándose en el Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF) para identificar fallas funcionales y modos de falla. Los resultados permitieron evidenciar las fallas más significativas y desarrollar un plan de mantenimiento orientado a prevenirlas, aumentando la disponibilidad y confiabilidad del equipo termoformador.

Castañeda (2023): En su investigación, Castañeda propuso un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) para mejorar la disponibilidad de los equipos en la empresa Virú S.A. Se enfocó en equipos críticos dentro de la línea de producción de alcachofas, identificando fallas y proponiendo tareas de mantenimiento adecuadas. La implementación del plan permitió aumentar la disponibilidad de los equipos, reducir los tiempos de inactividad y mejorar la eficiencia operativa de la empresa.

2.2. Fundamentos Teóricos

2.2.1. Gestión de Mantenimiento

Mobley (2021) describe el mantenimiento como un conjunto de acciones técnicas y administrativas diseñadas para garantizar que un activo cumpla con la función esperada a lo largo de su ciclo de vida. En este sentido, el mantenimiento no solo involucra tareas correctivas, sino también estrategias preventivas y predictivas para optimizar la eficiencia operativa. Así mismo, según Wireman (2019), la gestión del mantenimiento implica una planificación estratégica que permite organizar, supervisar y ejecutar intervenciones en los equipos con el objetivo de mejorar su desempeño, reducir fallos y extender su vida útil. Este enfoque combina aspectos técnicos con la administración eficiente de recursos.

Clasificación del Mantenimiento

El mantenimiento se ha diversificado con el tiempo, adoptando diferentes

enfoques para mejorar la disponibilidad de los activos. Entre las principales categorías, destacan:

Mantenimiento Correctivo: Esta estrategia consiste en reparar los equipos una vez que han fallado. Puede dividirse en:

- **No planificado:** Se ejecuta de manera reactiva, sin una planificación previa.
- **Planificado:** Se detectan signos de deterioro y se programan las acciones correctivas antes de que el fallo sea crítico.

Smith (2020) señala que el mantenimiento correctivo es menos eficiente en términos de costos, ya que genera interrupciones imprevistas en la operación y, en algunos casos, fallos irreversibles en los equipos.

Mantenimiento Preventivo: Consiste en aplicar inspecciones y reemplazos programados para reducir la probabilidad de averías. Estas tareas incluyen revisiones periódicas, lubricaciones y calibraciones. El mantenimiento preventivo es una estrategia clave para prolongar la vida útil de los activos y evitar interrupciones en la producción (Moubrey, 2018).

Mantenimiento Predictivo: Este enfoque se basa en el monitoreo de las condiciones operativas de los equipos mediante herramientas como análisis de vibraciones, termografía y ultrasonido. Su propósito es detectar señales de fallas antes de que ocurran. El mantenimiento predictivo permite reducir costos al intervenir los activos solo cuando presentan indicios de deterioro, lo que optimiza su rendimiento y minimiza el riesgo de fallos inesperados (Nowlan & Heap, 2019).

Historia del Mantenimiento

La evolución del mantenimiento ha estado directamente relacionada con los avances tecnológicos y la industrialización. A lo largo del tiempo, ha

experimentado diversas transformaciones:

Periodo de Mantenimiento Correctivo (Hasta 1950): Durante la Revolución Industrial, el mantenimiento no era una prioridad dentro de la gestión de activos. Los equipos eran utilizados hasta que fallaban y, en ese momento, se procedía a su reparación o reemplazo. Este modelo reactivo generaba altos costos de producción y frecuentes interrupciones. afirman que, antes de la Segunda Guerra Mundial, la falta de estrategias de mantenimiento provocaba deficiencias operativas significativas, afectando la productividad de las industrias (Campbell & Reyes, 2020).

Surgimiento del Mantenimiento Preventivo (1950-1970): Después de la Segunda Guerra Mundial, las industrias comenzaron a priorizar la confiabilidad de los equipos, implementando programas de mantenimiento planificado. Se establecieron inspecciones periódicas y cronogramas de reemplazo de componentes. En esta etapa, el mantenimiento preventivo adquirió relevancia, especialmente en la aviación y la manufactura, como una medida para evitar fallas que pudieran comprometer la seguridad y la eficiencia de los procesos (Nowlan & Heap, 2019).

Desarrollo del Mantenimiento Predictivo y RCM (1970-1990): A partir de los años 70, la evolución tecnológica permitió la adopción del mantenimiento predictivo, basado en el monitoreo de las condiciones de los equipos. Al mismo tiempo, la industria aeronáutica desarrolló el concepto de Mantenimiento Basado en Confiabilidad (RCM), un enfoque estructurado que analiza los modos de falla y sus consecuencias en la operación. El RCM surgió como una respuesta a la necesidad de optimizar las estrategias de mantenimiento, asegurando que las acciones preventivas y correctivas sean aplicadas solo cuando realmente se

justifiquen desde el punto de vista técnico y económico (Moubray, 2018).

Era del Mantenimiento Inteligente (1990 - Actualidad): Con la llegada de la Industria 4.0, el mantenimiento ha evolucionado hacia un modelo basado en análisis de datos, inteligencia artificial e Internet de las Cosas (IoT). Estas tecnologías permiten predecir fallos con mayor precisión y mejorar la toma de decisiones en tiempo real. El mantenimiento inteligente, basado en el uso de sensores y algoritmos avanzados, ha revolucionado la gestión de activos al permitir intervenciones oportunas antes de que se produzcan fallas críticas, optimizando la disponibilidad de los equipos (Lee et al., 2022).

2.1.1. Teoría de Confiabilidad y Mantenimiento Basado en la Confiabilidad (RCM)

La teoría del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés) fue popularizada por John Moubray en su obra *Reliability-Centered Maintenance* (1997). Esta metodología se basa en la premisa de que no todos los activos requieren el mismo nivel de mantenimiento, y que las estrategias deben ser determinadas en función del riesgo que representa su falla y el impacto que generan en la operación general del sistema. El enfoque del RCM parte del concepto de confiabilidad como la capacidad de un equipo o sistema de realizar una función deseada durante un período de tiempo determinado bajo condiciones específicas.

Origen y evolución del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)

El concepto de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) no nació directamente en el sector industrial, sino en la industria aeronáutica militar de Estados Unidos, a finales de la década de 1960. En ese contexto, la Federal

Aviation Administration (FAA) y las principales aerolíneas estadounidenses (como United Airlines y American Airlines) enfrentaban desafíos cada vez más complejos para mantener en servicio aeronaves modernas, como el Boeing 747, que integraban sistemas más avanzados, pero también más propensos a fallos impredecibles.

En 1968, la FAA encargó un estudio exhaustivo para encontrar una manera más eficaz de gestionar el mantenimiento de aeronaves. El resultado fue un enfoque revolucionario que se alejaba del mantenimiento basado únicamente en horas de operación (mantenimiento preventivo calendarizado) y comenzaba a considerar el análisis funcional, la probabilidad de falla y las consecuencias operativas y de seguridad.

Este nuevo enfoque fue formalizado por primera vez en el documento MSG-1 (Maintenance Steering Group-1), y más adelante en las guías MSG-2 y MSG-3, que se convirtieron en estándares para la industria aeronáutica y más tarde inspirarían las bases del RCM moderno.

Fue John Moubray, ingeniero británico con amplia experiencia en mantenimiento industrial, quien en 1997 popularizó y estandarizó el RCM para ser aplicado fuera del ámbito aeronáutico, especialmente en sectores como la minería, energía, manufactura y transporte. En su libro *Reliability-Centered Maintenance*, Moubray estructuró esta metodología de forma clara, práctica y replicable, integrando conceptos de confiabilidad operacional, gestión de riesgos, análisis de modos de falla (FMEA) y gestión de activos.

Moubray no solo sistematizó las siete preguntas clave del RCM, sino que promovió una cultura de mantenimiento orientada a la eficiencia operativa, la seguridad y la sostenibilidad económica.

El RCM ha sido respaldado y formalizado por diversas normas internacionales que garantizan su aplicación estructurada y segura en múltiples industrias:

- SAE JA1011 (1999) – Esta norma de la Society of Automotive Engineers define los criterios mínimos que debe cumplir un proceso para ser considerado RCM. Establece las siete preguntas básicas que cualquier análisis RCM debe responder.
- SAE JA1012 – Amplía la JA1011 y ofrece una guía práctica sobre cómo implementar el RCM.
- ISO 14224:2016 – Estandariza la recopilación y el intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos en la industria del petróleo, gas natural y petroquímica.
- ISO 55000:2014 – Conjunto de normas sobre gestión de activos físicos, en donde el RCM puede integrarse como una estrategia de mantenimiento dentro del sistema de gestión.
- PAS 55 – Guía de buenas prácticas de gestión de activos físicos, precursora de la ISO 55000.

El RCM se fundamenta en dos principios clave:

1. Funcionalidad por encima de la apariencia mecánica: El objetivo principal no es mantener el equipo "nuevo", sino asegurar que cumpla su función operativa específica en el contexto real de uso.
2. Gestión del riesgo técnico y económico: RCM prioriza las acciones según el nivel de riesgo que implica una falla, ya sea por motivos de seguridad, medio ambiente, pérdida económica o impacto en la producción.

Además, considera que:

- No todas las fallas se pueden prevenir.
- Las tareas de mantenimiento deben justificar su costo.
- En ciertos casos, no hacer nada (run to failure) puede ser más eficiente si

el impacto es bajo.

b. Principios clave del RCM

Moubray definió siete preguntas esenciales que guían el análisis RCM:

1. ¿Cuál es la función del activo en su contexto operativo?
2. ¿De qué manera puede fallar en cumplir esa función?
3. ¿Qué causa cada modo de falla?
4. ¿Qué ocurre cuando se presenta cada modo de falla?
5. ¿Qué consecuencias tiene cada modo de falla?
6. ¿Qué se puede hacer para predecir o prevenir la falla?
7. ¿Qué pasa si no se puede encontrar una tarea proactiva?

Estas preguntas permiten construir un sistema de mantenimiento proactivo y estratégico, enfocado en mantener la funcionalidad del sistema y reducir la probabilidad de fallas críticas.

c. Herramientas utilizadas: FMEA y análisis de criticidad

Una de las herramientas fundamentales en la metodología RCM es el Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA). Este permite identificar posibles modos de fallo en cada componente, evaluar su gravedad, frecuencia y capacidad de detección, para priorizar las acciones de mantenimiento (Velásquez, 2020). Complementariamente, se utiliza el análisis de criticidad, que evalúa el impacto que tendría la falla de cada componente sobre la seguridad, producción y costos.

d. Tipos de tareas de mantenimiento en RCM

El RCM establece que las acciones de mantenimiento pueden clasificarse en cinco categorías principales:

1. **Tareas de mantenimiento preventivo programado** (tiempo fijo).
2. **Tareas de mantenimiento predictivo** (condición).
3. **Tareas de rediseño** (modificación del sistema).
4. **Tareas de inspección sin acción inmediata.**
5. **Ninguna tarea** (cuando la intervención no es rentable ni necesaria).

Cada tipo de tarea se selecciona en función del análisis previo del modo de falla y sus consecuencias.

e. Beneficios del enfoque RCM

La aplicación del RCM proporciona múltiples beneficios para la gestión de activos:

- **Incremento de la disponibilidad operativa** de los equipos críticos.
- **Reducción significativa de costos** de mantenimiento no planificado.
- **Mayor seguridad operativa**, al evitar fallos inesperados que podrían generar accidentes.
- **Optimización del uso de recursos técnicos y humanos**, al concentrarse solo en actividades necesarias.
- **Soporte en la toma de decisiones estratégicas** para renovación o reemplazo de activos.

f. Aplicaciones prácticas del RCM

El RCM ha sido ampliamente implementado en sectores como la aeronáutica, industria petrolera, minería, generación de energía y manufactura pesada, debido a su eficacia en ambientes donde la disponibilidad de activos es crucial. Por ejemplo, en la industria minera, aplicar RCM ha permitido extender la

vida útil de maquinaria pesada mediante mantenimientos predictivos basados en el monitoreo de condiciones (Espinosa & Romero, 2019).

2.2.2. Tiempo de Inactividad

El tiempo de inactividad, conocido también como downtime, se refiere al período en el cual un sistema, equipo o proceso se encuentra fuera de servicio o no operativo debido a fallas, mantenimiento o interrupciones imprevistas. Este factor es fundamental en la gestión del mantenimiento, ya que afecta directamente la productividad y la eficiencia de los procesos industriales (Villagra & Martínez, 2021).

Según Mobley (2021), el tiempo de inactividad puede clasificarse en dos tipos principales:

- Tiempo de inactividad planificado, asociado a mantenimientos preventivos o correctivos programados.
- Tiempo de inactividad no planificado, que ocurre de manera inesperada debido a fallas en los equipos o incidentes operacionales.

Indicadores Clave del Tiempo de Inactividad

Para gestionar el tiempo de inactividad de manera efectiva, se utilizan tres indicadores fundamentales en la industria: MTBF (Tiempo Medio entre Fallas), MTTR (Tiempo Medio de Reparación) y Disponibilidad. Estos indicadores permiten evaluar la confiabilidad y mantenibilidad de los activos (Velásquez, 2020).

MTBF (Mean Time Between Failures) - Tiempo Medio entre Fallas:

El MTBF es un indicador que mide el tiempo promedio que un equipo o sistema funciona correctamente antes de sufrir una falla. Se expresa en horas y es un parámetro clave para evaluar la confiabilidad de un activo. Según Smith (2020),

un MTBF alto indica que el equipo tiene una alta confiabilidad, mientras que un MTBF bajo sugiere que las fallas son frecuentes, lo que impacta negativamente la productividad. A continuación, se muestra la Ecuación 1 para calcular el tiempo medio entre fallas:

Ecuación 1.

Tiempo Medio entre Fallas

$$MTBF = \frac{\textit{Tiempo total de operacion}}{\textit{Numero de fallas}}$$

MTTR (Mean Time To Repair) - Tiempo Medio de Reparación: El

MTTR mide el tiempo promedio que tarda en repararse un equipo después de una falla. Este indicador es crucial para evaluar la eficiencia del mantenimiento correctivo. De acuerdo con Wireman (2019), un MTTR bajo es favorable, ya que significa que las reparaciones son rápidas y eficientes. En contraste, un MTTR alto indica que el proceso de mantenimiento es lento, lo que prolonga el tiempo de inactividad, esto se podrá calcular mediante la Ecuación 2:

Ecuación 2.

Tiempo Medio de Reparación

$$MTTR = \frac{\textit{Tiempo total de reparaci3n}}{\textit{Numero de reparaciones}}$$

Disponibilidad: La disponibilidad es el porcentaje de tiempo en que un sistema está operativo en relación con el tiempo total considerado. Se calcula combinando MTBF y MTTR y proporciona una visión general sobre la efectividad del mantenimiento tal y como se evidencia en la Ecuación 3. Además, según Nowlan y Heap (2019), una alta disponibilidad es esencial para minimizar interrupciones y optimizar la eficiencia operativa. Las industrias buscan valores

superiores al 95% para garantizar la continuidad de sus procesos.

Ecuación 3.

Disponibilidad

$$Disponibilidad = \frac{MTBBF}{MTBF + MTTR} * 100$$

Confiabilidad: La confiabilidad es la probabilidad de que un equipo funcione sin fallas durante un periodo específico de tiempo, bajo condiciones normales de operación. A diferencia del MTBF, que ofrece un promedio histórico, este indicador considera la probabilidad estadística de que un activo no falle en un tiempo determinado, siendo clave para establecer estrategias de mantenimiento predictivo. Blanchard y Fabrycky (2018) afirman que la confiabilidad proporciona una medida predictiva del desempeño del activo, esencial en entornos donde el fallo puede ser crítico. El cálculo de confiabilidad se realizó mediante la Ecuación 4:

Ecuación 4.

Confiabilidad

$$R(t) = e^{-t/MTBF}$$

Tiempo de inactividad: El tiempo de inactividad es un indicador clave en la gestión de mantenimiento industrial, ya que permite identificar la proporción del tiempo total en que un equipo o sistema no se encuentra operativo debido a fallas, reparaciones, mantenimientos preventivos o causas externas como falta de insumos o cambios de turno. Su correcta medición es fundamental para evaluar la eficiencia operativa de los activos y detectar cuellos de botella en los procesos. Según Smith (2020), un control adecuado del tiempo de inactividad permite reducir pérdidas de productividad, mejorar la disponibilidad de los equipos y

optimizar la asignación de recursos de mantenimiento. Este indicador se expresa generalmente en porcentaje y se calcula dividiendo el tiempo total de inactividad entre el tiempo total disponible de operación del equipo, multiplicado por cien. Mediante la Ecuación 5 se calculará el tiempo de inactividad y se podrá determinar: si tiene un valor alto de este indicador refleja problemas en la planificación o ejecución de las actividades de mantenimiento, mientras que un valor bajo sugiere un entorno productivo más estable y confiable:

Ecuación 5.

Tiempo de inactividad

$$\text{Tiempo de inactividad (\%)} = \left(\frac{\text{Tiempo total de inactividad}}{\text{Tiempo total disponible}} \right) * 100$$

2.3. Marco Normativo

2.3.1. Legislación Aplicable

La gestión del mantenimiento industrial está regulada por diversas normativas que garantizan la seguridad, la eficiencia operativa y la prevención de riesgos laborales. Entre las principales leyes aplicables se encuentran:

- Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo (Ley N° 29783): Establece la obligatoriedad de implementar sistemas de gestión de seguridad y salud ocupacional en todas las empresas, incluyendo la gestión del mantenimiento correctivo para prevenir incidentes.
- Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería (DS N° 024-2016-EM): Contempla disposiciones específicas para el mantenimiento de equipos en entornos industriales y mineros.
- Código de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Ley N° 28611): Regula el impacto ambiental del mantenimiento industrial, promoviendo el uso eficiente

de recursos y la minimización de residuos.

2.3.2. Normas Técnicas

Vázquez y Ruiz (2022), mencionan que las normas técnicas establecen directrices específicas para la correcta gestión del mantenimiento correctivo en industrias manufactureras y exportadoras. Algunas de las normas aplicables incluyen:

- ISO 55001:2014 - Gestión de Activos: Proporciona un marco para la administración eficiente de los activos físicos de la empresa, optimizando el mantenimiento y reduciendo costos operativos.
- ISO 9001:2015 - Sistemas de Gestión de Calidad: Define los requisitos para implementar procesos de mantenimiento eficientes que contribuyan a la mejora continua y la satisfacción del cliente.
- NTC 4595 - Mantenimiento Industrial: Norma técnica que establece criterios para la gestión del mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo en el sector industrial.

2.3.3. Estándares Internacionales

Rojas y Flores (2023), comentan que los estándares internacionales permiten a las empresas alinearse con las mejores prácticas globales en la gestión del mantenimiento. Algunos de los más relevantes son:

- PAS 55: Gestión de Activos Físicos: Establece un modelo para la gestión del ciclo de vida de los activos industriales, garantizando su disponibilidad y confiabilidad.
- NFPA 70B - Mantenimiento de Equipos Eléctricos: Proporciona lineamientos para el mantenimiento seguro y eficiente de equipos eléctricos en entornos industriales.

- SMRP (Society for Maintenance & Reliability Professionals) Framework:
Define metodologías avanzadas para mejorar la confiabilidad y reducir el tiempo de inactividad en el mantenimiento correctivo.

2.4. Limitaciones

2.4.1. Limitaciones técnicas

Uno de los principales retos técnicos estuvo relacionado con la falta de infraestructura tecnológica adecuada para la implementación del mantenimiento basado en confiabilidad (RCM). Al inicio del proyecto, no se contaba con sensores de monitoreo en los equipos críticos, lo que dificultaba la identificación temprana de fallas y obligaba a depender de inspecciones manuales. La ausencia de un sistema de monitoreo predictivo aumentó el riesgo de intervenciones tardías, afectando la eficiencia del mantenimiento.

Otra limitación fue la capacidad limitada del software de gestión de mantenimiento (CMMS). Si bien la empresa ya contaba con un sistema para la gestión de órdenes de trabajo, este no estaba configurado para integrar datos en tiempo real provenientes de sensores de monitoreo. Esto dificultó la automatización de procesos y requirió ajustes en el software para mejorar la planificación y el control de las actividades de mantenimiento.

Asimismo, se presentaron dificultades con el acceso a repuestos y componentes especializados. Algunos equipos críticos requerían piezas de reposición específicas que no estaban disponibles en stock, lo que prolongaba los tiempos de inactividad cuando era necesario reemplazar componentes defectuosos. La falta de disponibilidad inmediata de ciertos repuestos generó costos adicionales y retrasos en las reparaciones.

2.4.2. Limitaciones operativas

En el ámbito operativo, uno de los principales desafíos fue la resistencia al cambio por parte del personal técnico. La implementación de nuevas estrategias de mantenimiento, como el uso de monitoreo basado en condición y la digitalización del control de órdenes de trabajo, generó incertidumbre en algunos trabajadores que estaban acostumbrados a métodos tradicionales de mantenimiento correctivo. Se requirió un proceso de capacitación intensivo para asegurar la correcta adopción de las nuevas herramientas y metodologías.

Otro aspecto operativo que afectó la implementación fue la coordinación con otras áreas de la empresa. La optimización del mantenimiento implicó una reestructuración en la planificación de actividades, lo que en algunos casos generó conflictos con los cronogramas de producción. La necesidad de realizar intervenciones programadas en los equipos clave requirió una comunicación constante con el área de producción para minimizar interrupciones en la fabricación.

Además, la gestión de inventarios de repuestos representó un desafío operativo significativo. Antes del proyecto, las compras de repuestos se realizaban de manera reactiva, lo que generaba tiempos de espera prolongados cuando se requería una pieza específica. La implementación de un sistema de abastecimiento planificado mejoró la disponibilidad de componentes, pero su ejecución inicial presentó dificultades, ya que fue necesario redefinir los criterios de priorización de stock y establecer acuerdos con proveedores estratégicos.

2.4.3. Limitaciones temporales

El proyecto también enfrentó restricciones de tiempo que afectaron la velocidad de implementación de las estrategias de mantenimiento. Una de las

principales limitaciones fue la necesidad de ejecutar las mejoras sin detener completamente la operación de la empresa. La producción debía continuar, por lo que las intervenciones en los equipos críticos tuvieron que programarse en períodos específicos para no afectar los compromisos comerciales. Esto prolongó la implementación de ciertas acciones, como la instalación de sensores de monitoreo y la capacitación del personal técnico.

Otra limitación temporal estuvo relacionada con el período de adaptación del personal a las nuevas metodologías. La transición hacia un mantenimiento basado en confiabilidad requirió un proceso de aprendizaje progresivo, lo que hizo que algunos beneficios del proyecto, como la reducción del tiempo de inactividad, no fueran evidentes de inmediato. Aunque los resultados finales fueron positivos, la curva de aprendizaje inicial retrasó la optimización completa de las operaciones.

Finalmente, el tiempo requerido para la evaluación de indicadores y ajuste de estrategias representó un desafío. La medición del impacto de las nuevas metodologías implicó un seguimiento constante de los índices de disponibilidad, frecuencia de fallas y costos de mantenimiento. Para lograr ajustes efectivos, fue necesario recopilar datos durante varios meses, lo que extendió el tiempo necesario para obtener conclusiones definitivas sobre la efectividad de la optimización del mantenimiento.

CAPÍTULO III. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA

3.1. Proceso de Ingreso a la Empresa

Mi incorporación a Productos Naturales de Exportación S.A. (Pronex S.A.) se llevó a cabo el 1 de julio de 2024, en un contexto en el que la empresa buscaba fortalecer su área de mantenimiento para optimizar la disponibilidad operativa de los equipos y mejorar la eficiencia de los procesos de producción. Pronex S.A., con más de 36 años de trayectoria en el sector de colorantes naturales, había experimentado un crecimiento significativo, lo que generó la necesidad de contar con un equipo técnico especializado capaz de gestionar eficazmente los trabajos multidisciplinarios en sus distintas áreas de producción.

Motivo de Incorporación

El proceso de selección fue resultado de un reclutamiento externo, donde fui convocado a una serie de entrevistas técnicas y de liderazgo para evaluar mis conocimientos en mantenimiento correctivo y preventivo, así como mis habilidades en planificación de trabajos multidisciplinarios, gestión de costos y uso de software especializado, como MP 9. La empresa requería un profesional con experiencia en la optimización de procesos y la implementación de estrategias de mantenimiento eficientes, alineado con su compromiso con la calidad y la sostenibilidad.

Cargo Asignado y Ubicación en la Organización

Fui contratado como Supervisor de Mantenimiento, un cargo clave dentro del área de Gestión de Operaciones. Desde esta posición, tengo la responsabilidad de planificar y coordinar los trabajos de mantenimiento multidisciplinarios en las diferentes áreas de la empresa, asegurando la implementación de equipos y mejoras en los procesos productivos. Mi ubicación dentro de la estructura organizacional me vincula directamente con el Jefe de Mantenimiento, reportando también al Gerente de

Operaciones, con quien trabajo en la planificación estratégica de mejoras en la gestión del mantenimiento.

Personas Involucradas en el Proceso de Incorporación

Desde mi ingreso, tuve interacción con diversas personas clave dentro de la organización:

- **Jefe de Mantenimiento:** Supervisor directo, encargado de la orientación inicial y de presentar los principales desafíos del área.
- **Gerente de Operaciones:** Responsable de transmitir los objetivos estratégicos de la empresa en materia de mantenimiento y eficiencia operativa.
- **Equipo Técnico de Mantenimiento:** Grupo de especialistas en mantenimiento preventivo y correctivo con quienes compartí información sobre los procedimientos internos y la distribución de tareas dentro de la planta.

Inducción y Capacitación Recibida

Como parte del proceso de adaptación, recibí una inducción integral que incluyó:

1. **Capacitación en procedimientos internos de mantenimiento:** Conocimiento detallado de los procesos de mantenimiento correctivo y preventivo en la empresa.
2. **Uso del software MP 9:** Capacitación para la gestión de órdenes de trabajo (OTs), control de costos y elaboración de informes técnicos.
3. **Normativas de seguridad y calidad:** Sesiones sobre protocolos de seguridad industrial, normativas ambientales y estándares de calidad aplicables al área de mantenimiento.
4. **Gestión de indicadores de mantenimiento:** Formación en la elaboración y análisis de indicadores de gestión en costos de mantenimiento y tiempos de intervención.

5. **Trabajo en equipo y coordinación interdepartamental:** Integración con otras áreas como producción, logística y control de calidad, fortaleciendo la comunicación y el trabajo conjunto para la implementación de mejoras en los procesos productivos.

Desde mi ingreso, asumí el reto de optimizar la gestión del mantenimiento, buscando reducir tiempos de inactividad, optimizar costos y mejorar la planificación estratégica del área. Esta etapa de inducción fue fundamental para comprender la cultura de la empresa y alinear mis funciones con los objetivos estratégicos.

3.2. Descripción del Proyecto Laboral

En la empresa Productos Naturales de Exportación S.A., se detectó una problemática crítica asociada con los elevados tiempos de inactividad derivados de fallas recurrentes en los equipos de producción. Esta situación no solo comprometía la eficiencia operativa, sino que también generaba un incremento significativo en los costos operativos. Entre las principales deficiencias identificadas se encontraba la carencia de un mantenimiento preventivo estructurado, ya que el 43% de los equipos pertenecientes a la línea de producción de carmín carecían de un plan formalizado de mantenimiento, lo cual provocaba paradas constantes de equipos críticos y, en consecuencia, interrupciones no planificadas del proceso productivo.

Se constató, además, que equipos fundamentales como el Atomizador 6 AT6-2F y la Caldera Cleaver Brooks CA1-5A experimentaban más de 60 fallas al año debido a la ausencia de mantenimientos programados. Esta situación tuvo un impacto directo en la disponibilidad operativa, la cual se situó en un promedio de 91.39%, por debajo del estándar mínimo aceptable en la industria, que es superior al 95%. El efecto acumulado de estas interrupciones se tradujo en un total anual de 404.3 horas de inactividad,

afectando gravemente la producción de carmín.

A nivel financiero, las consecuencias fueron igualmente severas. Las pérdidas anuales atribuibles al mantenimiento correctivo ascendieron a \$1.866.327,23, lo que representó el 3.46% de la facturación total de la empresa. Asimismo, los costos mensuales en repuestos y mano de obra superaban los S/ 18,000, reflejando la ineficiencia del modelo de mantenimiento existente.

Ante esta situación, la necesidad fundamental del proyecto fue la implementación de un modelo de gestión de mantenimiento basado en confiabilidad (RCM), orientado a optimizar la disponibilidad de los equipos críticos, reducir significativamente los costos asociados al mantenimiento correctivo y elevar la eficiencia operativa de toda la planta productiva. Esta propuesta buscó no solo resolver la problemática existente, sino también establecer las bases para un sistema de mantenimiento proactivo y sostenible a largo plazo.

El diagrama de Ishikawa, también conocido como diagrama de causa-efecto, permite identificar y analizar de manera estructurada las causas que originan un problema específico. En este caso, el problema central es la “Falla en el Mantenimiento”, ubicado en el extremo derecho del gráfico. A partir de este nodo principal, se ramifican seis categorías generales que agrupan los factores que contribuyen al problema: Mano de Obra, Medición, Materiales, Máquinas, Método y Medio Ambiente.

En la categoría Mano de Obra, se observa que la capacitación insuficiente del personal y la sobrecarga de trabajo contribuyen a una ejecución deficiente de las tareas de mantenimiento. En cuanto a Medición, se señala la ausencia de monitoreo en tiempo real y la existencia de datos inexactos sobre fallas, lo cual impide una correcta evaluación y prevención de los problemas técnicos. La categoría de Materiales destaca

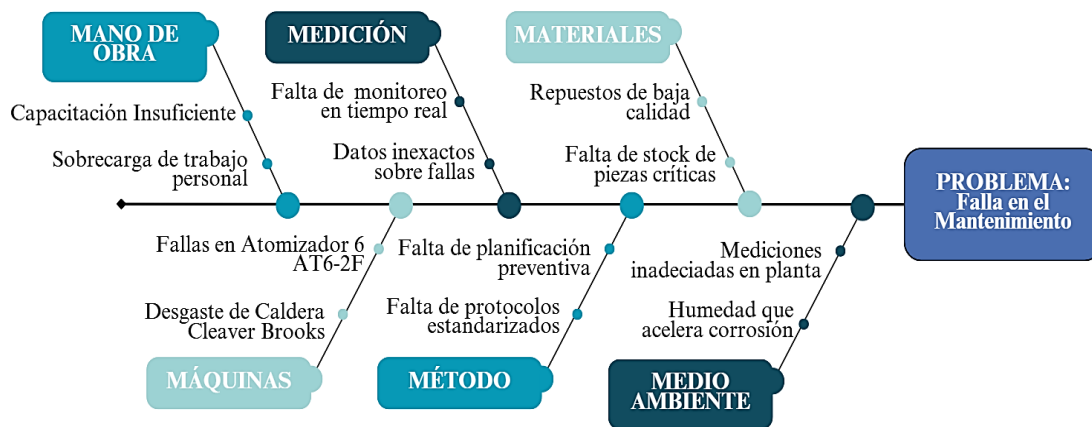
el uso de repuestos de baja calidad y la falta de stock de piezas críticas, lo que retrasa las intervenciones correctivas y aumenta los tiempos de inactividad.

Por el lado de las Máquinas, se identifican como causas relevantes las fallas frecuentes del Atomizador 6 AT6-2F y el desgaste progresivo de la Caldera Cleaver Brooks, equipos que presentan alta criticidad en el proceso productivo. En la categoría Método, se señala la ausencia de planificación preventiva y la falta de protocolos estandarizados para el mantenimiento, lo que conlleva a una gestión reactiva y poco eficiente.

Finalmente, en el componente Medio Ambiente, se identifican mediciones inadecuadas en planta y condiciones de humedad que favorecen la corrosión de los equipos, afectando su vida útil y confiabilidad. La Figura 2 evidencia las 6 M antes mencionadas donde se visualizan de manera organizada, conjuntamente con el problema central:

Figura 2.

Diagrama de Ishikawa



3.3. Objetivos del Proyecto

Objetivo General:

Optimizar el mantenimiento basado en confiabilidad (RCM) para minimizar el tiempo de inactividad en la empresa Productos Naturales de Exportación S.A.

Objetivos Específicos:

1. **Diagnosticar** la situación actual del área de mantenimiento de los tiempos de inactividad en la empresa Productos Naturales de Exportación S.A.
2. **Implementar** un plan de mantenimiento mediante la metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) en la empresa Productos Naturales de Exportación S.A.
3. **Evaluar** el tiempo de inactividad en la empresa Productos Naturales de Exportación S.A.

3.4. Desarrollo de la Estrategia de solución del Problema

3.4.1 Diagnostico de la situación actual

El problema identificado tenía repercusiones significativas en diversas áreas estratégicas de la empresa. A continuación, en la Tabla 1, se presentan los principales impactos que esta situación generaba en la organización antes de la implementación:

Tabla 1.

Impacto en indicadores operativos y económicos

Ítem	Situación antes del proyecto
Tiempo promedio de inactividad	15 horas/mes por equipo crítico
Costo mensual por reparaciones	S/ 18,000 en repuestos y mano de obra
Tasa de fallas recurrentes	8 fallas/mes en equipos principales
Tiempo de respuesta del equipo técnico	4 horas en promedio desde la detección de la falla
Cumplimiento de órdenes de trabajo (OTs)	65% de las OTs programadas se ejecutaban fuera del tiempo estimado
Eficiencia de producción	Disminución del 12% en la capacidad de producción por fallos imprevistos

El mantenimiento correctivo generaba interrupciones constantes en la producción, incrementaba los costos operativos y reducía la eficiencia de la planta. Las fallas recurrentes en los equipos críticos provocaban tiempos de inactividad prolongados, afectando no solo la productividad, sino también la capacidad de la

empresa para cumplir con los plazos de entrega a sus clientes. En la Tabla 2 se detalla los costos estimados de falla en los equipos críticos.

Tabla 2.

Impacto por tipo de equipos afectados

Equipo	Número de fallas anuales	Costo estimado de fallas
Atomizador 5 AT5-2F	77 fallas	\$8,000 anuales
Atomizador 6 AT6-2F	91 fallas	\$10,000 anuales
Bomba de filtración de cochinilla BC1	64 fallas	\$6,500 anuales
Caldera Cleaver Brooks CA1-5A	71 fallas	\$9,200 anuales
Chiller de agua 01 CH01-5C	25 fallas	\$3,500 anuales

La problemática no se presentaba de manera uniforme en toda la empresa, sino que existían ciertos equipos que concentraban la mayor cantidad de fallas. En particular, el Atomizador 6 AT6-2F fue identificado como el equipo más crítico, con 91 fallas anuales, lo que lo convertía en una de las principales fuentes de interrupciones en la producción. Su constante deterioro y la falta de mantenimiento preventivo adecuado generaban costos elevados, superando los \$10,000 anuales en reparaciones.

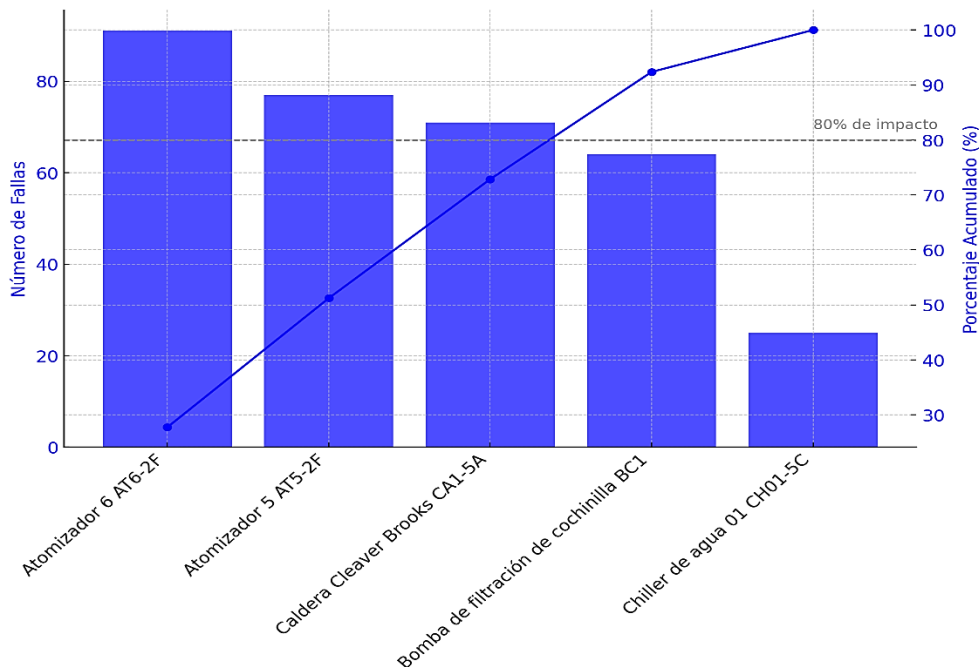
Otro equipo altamente afectado fue la Caldera Cleaver Brooks CA1-5A, con 71 fallas anuales, cuyo impacto era significativo debido a su rol fundamental en la generación de vapor para procesos industriales. Cada interrupción en su funcionamiento afectaba toda la línea de producción, lo que generaba costos anuales de \$9,200.

Además, equipos como el Atomizador 5 AT5-2F y la Bomba de Filtración de Cochinilla BC1 presentaban más de 60 fallas anuales, lo que evidenciaba una falta de planificación en el mantenimiento de estos sistemas clave. El Chiller de Agua 01 CH01-5C, aunque con menor cantidad de fallas (25 anuales), también representaba un problema importante, ya que cada falla impactaba directamente en la calidad del producto final. En total, estos equipos generaban pérdidas superiores a \$37,200 anuales, sin contar los costos indirectos asociados a la baja productividad y a los tiempos de inactividad. Los cual a continuación se detalla en la Figura 3, mediante un diagrama de

Pareto.

Figura 3.

Diagrama de Pareto



El problema de mantenimiento no solo impactaba la producción, sino que también tenía efectos negativos en otras áreas de la empresa. A continuación, en la Tabla 3 se detallan las figuras afectadas.

Tabla 3.

Principales áreas afectadas

Área Afectada	Impacto antes de la intervención
Producción	Pérdidas de lotes de producción por paradas imprevistas. Retrasos en la entrega a clientes.
Logística	Dificultad en la programación de despachos debido a tiempos de producción inestables.
Finanzas	Incremento del 25% en costos operativos por compras de repuestos no planificadas.
Control de Calidad	Incremento del 10% en productos rechazados por defectos causados por fallas en equipos.
Recursos Humanos	Aumento del estrés en el personal técnico debido a trabajos urgentes e imprevistos.

El impacto del mantenimiento deficiente trascendió la operación de los equipos, afectando significativamente distintas áreas de la empresa. Producción fue la más

perjudicada, con pérdidas constantes de lotes debido a fallas imprevistas que interrumpían la fabricación y retrasaban las entregas, debilitando la imagen y confiabilidad de la empresa en el mercado.

En logística, la inestabilidad en los procesos productivos dificultaba la planificación de despachos, generando ajustes de última hora que aumentaban los costos de transporte y afectaban la relación con proveedores y clientes. Financieramente, el mantenimiento reactivo elevó en un 25% los costos operativos, principalmente por compras imprevistas de repuestos y contratación de servicios externos, limitando la inversión en mejoras tecnológicas.

Por otro lado, control de calidad registró un incremento del 10% en productos rechazados, ya que las fallas en los equipos generaban variaciones en la producción, aumentando el reprocesamiento y los desperdicios. Finalmente, recursos humanos experimentó un incremento en el estrés laboral del personal técnico, pues la alta carga de trabajo y la falta de planificación extendieron las jornadas laborales, reduciendo la eficiencia del equipo y aumentando el riesgo de errores operativos.

3.4.2. Implementación de las estrategias del RCM

Para abordar los problemas identificados, se diseñó un plan estratégico de mantenimiento RCM, enfocado en mejorar la confiabilidad de los equipos y optimizar la gestión de mantenimiento. En la Tabla 4 se muestra el Gantt de la planificación de las soluciones estratégicas para reducir los tiempos de eficiencia, los tiempos de inactividad:

Tabla 4.

Tareas Desarrolladas Durante el Proyecto

Fase del Proyecto	Tareas Desarrolladas
Diagnóstico Inicial	(2)- Se realizó un análisis de criticidad de los equipos, priorizando los activos más problemáticos. (1)- Se dirigió la recolección de datos históricos de fallas, tiempos de inactividad y costos de reparación. - Se aplicó el FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) para evaluar modos de falla y sus efectos en la producción.

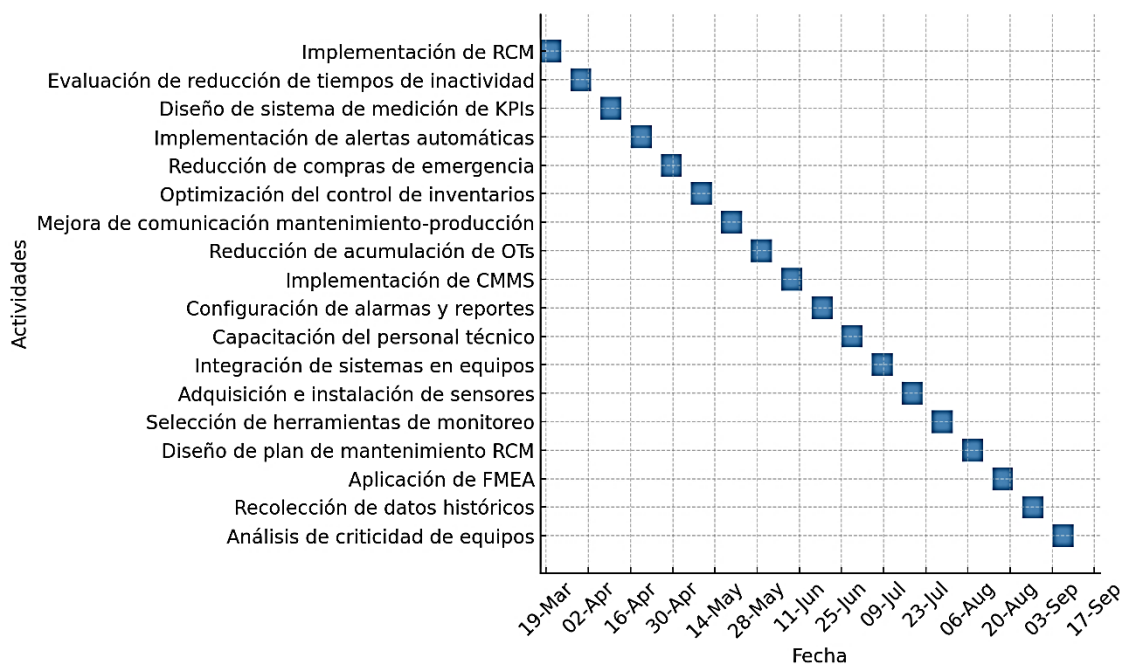
Definición de Estrategia	<ul style="list-style-type: none"> - Se diseñó un plan de mantenimiento RCM, estableciendo criterios para mantenimiento preventivo, correctivo y predictivo. - Se seleccionó herramientas como análisis de vibraciones, termografía y monitoreo de lubricación para reducir fallas inesperadas. - Se coordinó la adquisición e instalación de sensores de monitoreo predictivo en equipos críticos.
Implementación del Monitoreo Predictivo	<ul style="list-style-type: none"> - Se supervisó la integración de sistemas de monitoreo en el Atomizador 6 AT6-2F, la Caldera Cleaver Brooks y la Bomba de Filtración BC1. - Se gestionó la capacitación del personal técnico en el uso de herramientas de monitoreo y diagnóstico de fallas. - Se configuró alarmas y reportes automáticos para mejorar la anticipación de fallas en el mantenimiento.
Optimización de Órdenes de Trabajo (OTs)	<ul style="list-style-type: none"> - Se implementó un CMMS (Computerized Maintenance Management System) para mejorar la programación y trazabilidad de OTs. - Se redujo la acumulación de OTs, asegurando que más del 60% de las órdenes preventivas se ejecutaran en tiempo. - Se agilizó la comunicación entre el equipo de mantenimiento y producción para priorizar tareas críticas.
Gestión de Repuestos y Recursos	<ul style="list-style-type: none"> - Se optimizó el control de inventarios, estableciendo stock mínimo de repuestos críticos. - Se redujo las compras de emergencia en un 23%, mejorando la planificación de adquisiciones. - Se implementó un sistema de alerta automática para reposición de repuestos antes de llegar a niveles críticos.
Evaluación y Mejora Continua	<ul style="list-style-type: none"> - Se diseñó un sistema de medición de KPIs para evaluar mejoras en tiempo de inactividad, costos y eficiencia operativa. - Se identificó reducciones del 26% en tiempos de inactividad y mejoras en la disponibilidad operativa de los equipos. - Se propuso estrategias adicionales para seguir optimizando el mantenimiento predictivo.

En la Figura 4 se muestra el diagrama de Gantt, este cronograma permite visualizar la secuencia y duración de las actividades planificadas, facilitando el seguimiento del progreso y la coordinación de tareas orientadas a optimizar la disponibilidad operativa:

Figura 4.

Diagrama de Gantt

Gantt



Fases de Implementación del RCM

La implementación se realizó en cinco fases clave, siguiendo las mejores prácticas de mantenimiento basado en confiabilidad. La Tabla 5 presenta las fases clave desarrolladas, destacando las acciones estratégicas aplicadas para mejorar la gestión de activos y reducir el tiempo de inactividad:

Tabla 5.

Fases de implementación del RCM

Fase	Descripción
1. Análisis de Criticidad y Evaluación de Activos	Se identificaron los equipos críticos y se realizó un análisis de modos de falla con la metodología FMEA (Failure Mode and Effects Analysis).
2. Definición de Estrategia de Mantenimiento	Se establecieron tipos de mantenimiento según la criticidad del equipo (correctivo, preventivo, predictivo, proactivo).
3. Evaluación de Indicadores y Mejora Continua	Se midieron indicadores clave (IDO, IF, MTTR, OTs fuera de tiempo, costo de mantenimiento) y se realizaron ajustes en la estrategia.
4. Implementación de Monitoreo Predictivo y Gestión de OTs	Se instalaron sensores de condición, se optimizó la gestión de órdenes de trabajo mediante CMMS y se mejoró la planificación del mantenimiento.
5. Optimización de Repuestos y Recursos	Se implementó control de inventarios para reducir compras de emergencia y mejorar la disponibilidad de repuestos.

3.4.2.1. Identificación de los equipos con mayor incidencia de fallas mediante análisis de criticidad.

El primer paso en la implementación del RCM fue identificar los equipos críticos que impactaban la operación de la empresa. Para ello, se realizó un Análisis de Criticidad, utilizando los siguientes criterios:

1. **Impacto en la Producción:** Equipos cuya falla detendría o afectaría la producción.
2. **Costo de Reparación:** Activos con costos elevados de reparación o repuestos.
3. **Frecuencia de Fallas:** Equipos con alta recurrencia de fallas.
4. **Seguridad y Medio Ambiente:** Equipos cuya falla representaría riesgos para los trabajadores o incumplimiento normativo.

Equipos priorizados tras el análisis de criticidad:

- **Atomizador 6 AT6-2F** (Frecuencia alta de fallas, impacto en calidad del producto).
- **Caldera Cleaver Brooks CA1-5A** (Esencial para procesos térmicos, alto costo de reparación).
- **Bomba de Filtración BC1** (Afecta la eficiencia del proceso de filtrado).

Además, se aplicó FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) para identificar los modos de falla y determinar su impacto en la producción y costos operativos.

Preguntas aplicadas en el análisis FMEA:

1. ¿Cuáles son los **modos de falla más frecuentes** en cada equipo crítico?
2. ¿Qué **efecto tiene cada falla** en la producción y la calidad del producto?
3. ¿Cuáles son las **causas raíz** de las fallas recurrentes?
4. ¿Cómo se pueden **prevenir o detectar** estas fallas antes de que ocurran?

La Tabla 6 evidencia el análisis de fallas en equipos críticos de planta, detallando su función principal, modos de falla identificados, causas probables y consecuencias operativas:

Tabla 6.

Análisis de Fallas por Equipo Crítico

Equipo	Función Principal	Modo de Falla Identificado	Tipo de Falla	Causa Probable	Consecuencias
Atomizador 6 AT6-2F	Secado y atomización del carmín para obtener producto en polvo.	Desgaste prematuro del rotor	Mecánica (rotacional)	Uso intensivo, desequilibrio por acumulación de sólidos, lubricación inadecuada.	Paradas de producción frecuentes, reducción en calidad del producto, pérdidas económicas.
Caldera Cleaver Brooks	Generación de vapor para procesos térmicos en planta.	Fugas de vapor, sobrecalentamiento	Térmica / Presión	Corrosión interna, falta de aislamiento térmico, sensores de presión descalibrados.	Riesgo de explosión, paradas críticas, afectación a múltiples procesos productivos.
Bomba de Filtración BC1	Transporte de líquidos y soluciones a través del sistema de filtrado.	Desgaste de rodamientos, pérdida de presión	Mecánica / Hidráulica	Lubricación deficiente, mal alineamiento, operación continua sin pausas.	Pérdida de caudal, ineficiencia en filtración, posibles daños en etapas posteriores.

La Tabla 7 expone la priorización de problemas identificados en el sistema de mantenimiento, considerando criterios como impacto, frecuencia y costo, esta evaluación permite enfocar los esfuerzos en las áreas más críticas:

Tabla 7.

Matriz de priorización

#	Problema Identificado	Descripción del Problema	Impacto (1-5)	Frecuencia (1-5)	Costo (1-5)	Puntuación Total	Nivel de Prioridad
1	Fallas en Atomizador 6 AT6-2F	El equipo más crítico en la producción de carmín, con 91 fallas anuales, generando paradas constantes y pérdidas económicas significativas.	5	5	4	14	media
2	Falta de monitoreo en tiempo real	No hay un sistema eficiente para detectar fallas antes de que ocurran, lo que impide un mantenimiento predictivo.	5	5	4	14	media
3	Desgaste de la Caldera Cleaver Brooks	La caldera, esencial para los procesos térmicos, presenta 71 fallas anuales, incrementando el riesgo de paradas imprevistas.	4	4	5	13	alta
4	Falta de planificación preventiva	Gran parte del mantenimiento sigue siendo reactivo, sin una estrategia clara de prevención. Esto aumenta la frecuencia de fallas y los costos operativos.	5	4	3	12	alta
5	Uso de repuestos de baja calidad	La adquisición de piezas no originales o de menor calidad provoca fallas prematuras y mayor frecuencia de reemplazo.	3	3	4	10	baja
6	Capacitación insuficiente del personal	El equipo técnico no recibe formación continua en nuevas metodologías de mantenimiento, lo que limita la eficiencia del área.	3	3	3	9	Media
7	Sobrecarga de trabajo del personal	Debido a la alta cantidad de correctivos, el personal técnico trabaja bajo presión, lo que genera fatiga laboral y errores humanos.	3	3	3	9	Media

3.4.2.2 Estrategias de Mantenimiento basada en el análisis de confiabilidad

Con base en el análisis previo, se diseñó una estrategia de mantenimiento estructurada con enfoque RCM tal y como se visualiza en la Tabla 8, además cada equipo crítico recibió un tipo de mantenimiento específico:

Tabla 8.

Estrategias de mantenimiento RCM

Equipo	Modo de Falla Identificado	Estrategia de Mantenimiento
Atomizador 6 AT6-2F	Desgaste prematuro en el rotor	Mantenimiento Preventivo + Predictivo (Monitoreo de vibraciones).
Caldera Cleaver Brooks	Fugas de vapor, sobrecalentamiento	Mantenimiento Predictivo (Inspección con termografía infrarroja).
Bomba de Filtración BC1	Desgaste de rodamientos, pérdida de presión	Mantenimiento Preventivo (Análisis de lubricación).

Se estableció un programa de mantenimiento basado en confiabilidad, definiendo frecuencias de inspección y herramientas de monitoreo para detectar fallas antes de que generen paradas imprevistas.

Por otra parte, La Tabla 9 muestra las preguntas fundamentales del análisis RCM aplicado a los equipos críticos, con el propósito de identificar funciones, modos de falla, causas, efectos, consecuencias y estrategias de prevención:

Tabla 9.

Análisis Diagnóstico según las 7 Preguntas del RCM

n°	Pregunta del RCM	Análisis Diagnóstico
1	¿Qué se espera que haga el activo y cuáles son sus funciones?	“Los equipos críticos como el Atomizador 6 AT6-2F y la Caldera Cleaver Brooks tienen funciones esenciales en la producción de carmín y en los procesos térmicos. Se espera que operen de forma continua durante 720 horas al mes.”
2	¿De qué manera puede fallar al cumplir sus funciones?	Por paradas frecuentes, desgaste de componentes, falta de monitoreo, repuestos defectuosos, y mal cumplimiento de OTs.
3	¿Qué causa cada modo de falla?	Falta de mantenimiento preventivo, capacitación insuficiente, uso de piezas de baja calidad, sobrecarga del personal técnico.

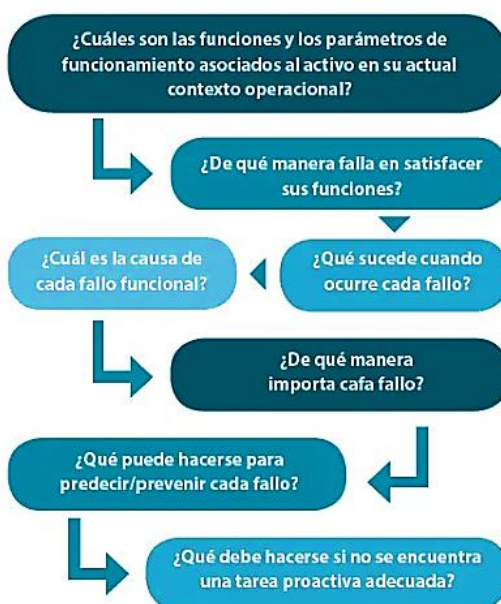
4	¿Qué sucede cuando ocurre cada modo de falla?	Se generan paradas inesperadas, baja disponibilidad operativa (<98%), aumento del tiempo de inactividad y retrasos en la producción.
5	¿Cuáles son las consecuencias de cada modo de falla?	Altos costos de mantenimiento (hasta 39.31%), caída en la producción, pérdida de confiabilidad operativa y sobrecarga del equipo técnico.
6	¿Qué se puede hacer para predecir o prevenir la falla?	Implementar RCM, CMMS, FMEA, monitoreo en tiempo real, alarmas automáticas, y planificación de mantenimiento.
7	¿Qué se hace si no se puede encontrar una tarea proactiva adecuada?	En equipos menos críticos, se puede aceptar falla, si el impacto es bajo y el costo de prevención no es justificable.

Se identificaron sus funciones esenciales, los modos y causas de falla (como desgaste o falta de mantenimiento), y sus consecuencias, que incluyen paradas inesperadas, baja disponibilidad y altos costos operativos. Asimismo, se propusieron acciones preventivas como el uso de RCM, CMMS y FMEA. Finalmente, se concluyó que, en equipos menos críticos, se puede aceptar la falla si el impacto es mínimo y el costo de prevención es elevado.

La Figura 5 representa la secuencia lógica del proceso de análisis del RCME, este enfoque guía la toma de decisiones al evaluar las funciones de los equipos, identificar modos y causas de falla, y determinar las consecuencias y acciones preventivas:

Figura 5.

7 preguntas del RCM



Análisis por pregunta RCM

A continuación, se presenta la Tabla 10 en donde se visualiza el análisis en base a las preguntas de RCM:

Tabla 10.

Hoja de registro RCM – pregunta 1

#	Equipo	Sistema	Función	Planta	Nivel Mantenimiento	Condición de Operación Esperada	Parámetro Crítico Controlado	Unidad de Medida	Relevancia en el Proceso Productivo
1	Atomizador 6 AT6-2F	Secado y atomización	Transformar extracto líquido de carmin en polvo seco continuo por aire caliente.	Planta principal	1er y 2do nivel	Operación continua 24/7, 10 lotes/día	Temperatura, presión, humedad	°C, psi, % humedad	Crítico: producto final depende de este proceso
2	Caldera CA1-5A	Generación de vapor	Proveer vapor a presión constante para procesos térmicos de atomización y esterilización.	Planta principal	1er y 2do nivel	Presión \geq 120 psi, sin interrupciones	Presión de vapor, temperatura del agua	psi, °C	Crítico: sin vapor, no hay operación
3	Bomba de Filtración BC1	Filtrado	Bombear extracto de cochinilla sin fugas ni caídas de presión a través de filtros de etapa múltiple.	Planta principal	1er y 2do nivel	Flujo continuo a 20 L/min	Caudal, presión diferencial	L/min, psi	Alta: afecta pureza del insumo filtrado
4	Atomizador 5 AT5-2F	Secado y atomización	Mismo proceso que Atomizador 6, en línea paralela (redundancia o duplicidad de producción).	Planta principal	1er y 2do nivel	Operación continua 24/7	Temperatura, presión, humedad	°C, psi, % humedad	Alta: respaldo de línea crítica
5	Chiller de Agua CH01-5C	Enfriamiento	Enfriar agua industrial de servicio para mantener temperatura estable del proceso de mezcla o secado.	Planta principal	1er y 2do nivel	Agua a temperatura controlada \leq 10 °C	Temperatura del agua de salida	°C	Crítico: variación impacta en calidad final

Todos los equipos analizados cumplen funciones esenciales en el proceso productivo, especialmente los atomizadores y la caldera, que son responsables de etapas críticas como el secado y la generación de vapor. La bomba de filtración y el chiller, si bien no generan paros inmediatos, afectan la calidad del producto final. Se identificó claramente el rol de cada equipo, lo cual facilita la evaluación del impacto en caso de falla. Por otra parte, la Tabla 11 se presenta un análisis cuantitativo de fallas funcionales en equipos críticos, detallando su frecuencia, impacto operativo y

riesgo económico estimado:

Tabla 11.

Hoja de registro RCM – pregunta 2

#	Equipo	Falla funcional	Modo de falla específico	Frecuencia de fallas/año	TPPR (horas)	Costo directo por falla (\$)	Impacto en Producción (\$/hora)	Riesgo económico anual estimado (\$)
1	Atomizador AT6-2F	6 No convierte el líquido en polvo adecuadamente	Obstrucción de boquillas / caída de presión de aire	91	4.5	110	400	163,800
2	Caldera CA1-5A	No genera vapor a presión necesaria	Fallo en quemador / baja presión por incrustaciones	71	3.8	130	350	132,175
3	Bomba de Filtración BC1	No mantiene el flujo o presenta fugas	Daño en sello mecánico / cavitación por aire	64	3.0	95	280	92,160
4	Atomizador AT5-2F	5 No alcanza la temperatura o no atomiza correctamente	Fallo en resistencias o variador de frecuencia	77	4.2	100	380	138,040
5	Chiller de Agua CH01-5C	No enfría el agua a la temperatura deseada	Fuga de refrigerante / falla del compresor	25	2.5	85	300	27,625

Los equipos presentan fallas frecuentes, siendo los atomizadores y la caldera los más vulnerables por su alta exigencia operativa. Estas fallas no solo son técnicas, sino que implican costos operativos elevados y pérdida de producción. Las bombas y el chiller muestran fallas menores pero repetitivas, que podrían escalar si no se controlan a tiempo. Se requiere priorizar acciones correctivas en los equipos con mayor frecuencia de

eventos. Por otro lado, la Tabla 12 expone los modos de falla más críticos en los equipos de la empresa, junto con sus efectos directos sobre la producción, la calidad del producto y los riesgos asociados a la seguridad y el medio ambiente:

Tabla 12.

Hoja de registro RCM – pregunta 3

#	Equipo	Modo de falla	Efecto de la falla	Impacto en producción	Impacto en seguridad / medio ambiente
1	Atomizador AT6-2F	6 Obstrucción de boquillas	Interrupción del secado → detención de producción	Pérdida de lote / reproceso	Riesgo térmico por acumulación de temperatura
2	Caldera CA1-5A	Fallo quemador	en Falta de vapor → todas las líneas se detienen	Paro general de planta	Riesgo por presión irregular o fuga de vapor caliente
3	Bomba de Filtración BC1	Cavitación / sello dañado	Pérdida de presión → filtrado ineficiente → contaminantes pasan al siguiente proceso	Producto defectuoso	Posible derrame de líquido químico
4	Atomizador AT5-2F	5 Fallo resistencias	en Calor insuficiente → secado incompleto	Lote húmedo / no vendible	Riesgo de incendio por sobrecarga del sistema eléctrico
5	Chiller CH01-5C	Fuga de refrigerante	de Agua caliente → producto sobrecalentado → cambio en composición final	Disminución de calidad	Emisión de gas refrigerante si no se detecta a tiempo

Las fallas detectadas generan efectos graves a nivel operativo y de producto. En el caso de la caldera y atomizadores, un fallo detiene completamente la producción o compromete la calidad del lote. En los otros equipos, el impacto es progresivo, acumulando desviaciones que afectan la eficiencia del proceso. El análisis evidencia la necesidad de detección temprana para evitar consecuencias mayores. Además, la Tabla

13 presenta el análisis integral de las consecuencias operativas, económicas, ambientales y de seguridad asociadas a las fallas en equipos:

Tabla 13.

Hoja de registro RCM – pregunta 4

Nº	Equipo	Consecuencia Operativa	Consecuencia Económica (USD/año)	Consecuencia Ambiental	Consecuencia en Seguridad
1	Atomizador AT6-2F	6 Interrupción del secado. Lotes húmedos. Rechazo de producción.	\$163,800	Exceso de calor y consumo energético	Riesgo de quemaduras por sobretemperatura / sobrepresión
2	Caldera CA1-5A	Paro total del sistema de vapor. Planta inoperativa.	\$132,175	Emisión de vapor a presión. Riesgo de fugas térmicas	Riesgo de explosión, quemaduras por presión o temperatura elevadas
3	Bomba de Filtración BC1	Flujo insuficiente. Fallo de filtrado → contaminación del producto.	\$92,160	Derrames de extracto o líquidos residuales	Riesgo de contacto con químicos, deslizamiento por fuga
4	Atomizador AT5-2F	5 Detención de línea secundaria. Dependencia total del Atomizador 6.	\$138,040	Sobrecarga eléctrica. Emisión de calor	Riesgo de cortocircuito, incendio o sobrecarga eléctrica
5	Chiller CH01-5C	Aumento de temperatura en procesos → pérdida de calidad del producto.	\$27,625	Posible fuga de refrigerante. Daño a la atmósfera	Riesgo por exposición a gas refrigerante / falta de oxígeno local

Las consecuencias identificadas son, en su mayoría, críticas. La caldera presenta riesgo operativo, económico y de seguridad. Los atomizadores también muestran consecuencias económicas importantes y riesgo eléctrico/térmico. La bomba y el chiller, aunque menos graves, conllevan riesgos ambientales y de seguridad si no se intervienen con protocolos adecuados. El análisis permite priorizar acciones en base a riesgos

reales. A continuación, en la tabla 14, se especifica el modo de falla, el tipo de mantenimiento requerido, las actividades a ejecutar, la frecuencia sugerida y el responsable de cada tarea:

Tabla 14.

Hoja de registro RCM – pregunta 5

Nº	Equipo	Modo de Falla	Tipo de mantenimiento	Actividad de mantenimiento a ejecutar	Frecuencia sugerida	Responsable
1	Atomizador AT6-2F	6 Obstrucción de boquillas / caída de presión	Preventivo + Predictivo	Limpieza interna de boquillas / revisión de presión de aire / inspección por sensor	Cada 72 horas / mensual	Técnico de mantenimiento
2	Caldera CA1-5A	Fallo en quemador / incrustaciones	Preventivo	Limpieza de tuberías internas, revisión del quemador, control de calidad del agua	Quincenal	Supervisor de calderas
3	Bomba de Filtración BC1	Daño en sello mecánico / cavitación	Predictivo + Correctivo	Revisión de presión diferencial / vibraciones / reemplazo programado de sellos	Mensual	Técnico mecánico
4	Atomizador AT5-2F	5 Fallo en resistencias / variador	Preventivo	Inspección eléctrica / prueba de continuidad / control térmico automatizado	Cada 15 días	Electricista industrial
5	Chiller CH01-5C	Fuga de refrigerante / falla del compresor	Predictivo	Prueba de presión, control de temperatura de retorno, detección de fugas con sensores	Trimestral	Técnico HVAC

Se determinaron actividades específicas de mantenimiento para cada equipo en función de sus modos de falla. Los atomizadores y la caldera cuentan con estrategias preventivas sólidas como limpieza periódica, inspecciones de presión y control de temperatura. Para la bomba y el chiller,

se propone el uso de mantenimiento predictivo mediante sensores y chequeos de vibración o presión diferencial. Asimismo, la tabla 15 detalla para cada equipo el modo de falla identificado, evalúa si este puede predecirse o prevenirse, indica la decisión de mantenimiento adoptada y ofrece una justificación técnica y/o económica para dicha elección:

Tabla 15.

Hoja de registro RCM – pregunta 6

N°	Equipo	Modo de Falla	¿Se puede predecir o prevenir?	Decisión tomada	Justificación técnica / económica
1	Atomizador AT6-2F	6 Obstrucción de boquillas	Sí	Mantenimiento preventivo	La limpieza programada es más económica que una parada no planificada de 5 horas.
2	Caldera CA1-5A	Fallo del quemador	Parcialmente	Rediseño (automatización del quemador)	parcial del Inversión en sistema automático de encendido reducirá riesgo y aumentará eficiencia.
3	Bomba de Filtración BC1	Daño del sello mecánico	No	Correctivo planificado	La falla es repentina; el costo de detección supera el de reemplazo directo con stock disponible.
4	Atomizador AT5-2F	Fallo en resistencias	Sí	Mantenimiento preventivo	Monitoreo de resistencia evita pérdida total del lote.
5	Chiller CH01-5C	Fuga de refrigerante	No (detectable solo al fallar)	Correctivo planificado + stock de emergencia	+ Sensor de fugas no disponible; se almacena refrigerante y se reacciona con protocolo rápido.

Para aquellos casos donde la falla no puede prevenirse con tecnologías actuales o su detección resulta antieconómica, se optó por el

mantenimiento correctivo planificado. En la bomba y el chiller, por ejemplo, se establece un protocolo de atención inmediata con disponibilidad de repuestos críticos. Igualmente, la tabla 16 profundiza en el análisis de fallas críticas, evaluando su potencial de prevención o detección temprana y presentando la decisión final junto con la acción recomendada para mitigar riesgos:

Tabla 16.

Hoja de registro RCM – pregunta 7

Nº	Equipo	Modo de falla	¿Consecuencia crítica?	¿Puede prevenirse o detectarse?	Decisión final	Acción recomendada
1	Atomizador AT6-2F	6 Obstrucción severa que daña resistencias	Sí	Sí parcialmente	Mantenimiento preventivo avanzado	Instalar sensores de flujo y presión para monitoreo continuo + alarmas tempranas.
2	Caldera CA1-5A	Falla explosiva por exceso de presión	Sí	No totalmente	Rediseño obligatorio	Instalar válvulas de seguridad automáticas y monitoreo remoto 24/7 del sistema.
3	Bomba de Filtración BC1	Ruptura repentina del sello + derrame químico	Sí moderada	No	Correctivo con protocolo contingencia	Implementar sistema de contención secundaria y stock de piezas críticas.
4	Atomizador AT5-2F	5 Fallo eléctrico total	Sí	Sí parcialmente	Rediseño parcial	Aislar eléctricamente zonas críticas + UPS para control del variador de frecuencia.
5	Chiller CH01-5C	Fuga total de refrigerante	Sí ambiental	No	Rediseño del sistema de refrigeración	Sustituir por unidad más moderna con sensores de presión y refrigerante ecológico.

En los casos donde la falla es crítica y no se puede evitar ni anticipar, como en la caldera y el chiller, se concluyó que la única solución viable es el rediseño del sistema o la incorporación de tecnologías avanzadas. Para la caldera, se plantea instalar válvulas de seguridad automáticas

y monitoreo remoto. En el chiller, se recomienda el reemplazo por un modelo más moderno con sensores integrados.

Indicadores de mantenimiento

1. Índice de Frecuencia de Fallas (IF)

El índice de frecuencia se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$IF = \frac{\text{Número de fallas registradas en el mes}}{\text{Número total de equipos analizados}}$$

Por otra parte, la Tabla 17 presenta el Índice de Frecuencia de Fallas mensual para equipos, cuantificando la recurrencia de fallos en activos críticos:

Tabla 17.

Cálculo del Índice de Frecuencia de Fallas (IF)

Mes	Fallas Atomizador 6 AT6-2F	Fallas Caldera Cleaver Brooks	Fallas Atomizador 5 AT5-2F	Fallas Bomba Filtración BC1	Fallas Chiller CH01-5C	Total de Fallas	Índice de Frecuencia de Fallas (IF)
Enero	9	5	5	4	3	26	5.2
Febrero	7	6	6	4	3	26	5.2
Marzo	9	6	5	4	2	26	5.2
Abril	9	5	5	5	2	26	5.2
Mayo	9	6	6	5	3	29	5.8
Junio	8	5	5	4	3	25	5.0
Julio	7	6	6	5	2	26	5.2
Agosto	8	6	5	4	2	25	5.0
Setiembre	9	7	5	5	3	29	5.8
Octubre	10	5	6	4	3	28	5.6
Noviembre	7	6	5	4	2	24	4.8
Diciembre	6	5	6	5	3	25	5.0

El índice de frecuencia de fallas refleja la cantidad de veces que los equipos críticos presentan fallas en un mes, permitiendo evaluar la estabilidad operativa de la maquinaria. En los meses analizados, se observa un IF promedio de 5.32, lo que indica que cada equipo clave presenta aproximadamente 5 fallas al mes. El mes de mayo muestra un incremento en el número total de fallas (29), lo que sugiere un posible desgaste acumulado o una falta de mantenimiento preventivo adecuado en el periodo previo.

2. Índice de Disponibilidad Operativa (IDO)

Para el cálculo del IDO se realizó mediante la siguiente fórmula:

$$IDO = \left(1 - \frac{\text{Tiempo de inactividad}}{\text{Tiempo total de operación}} \right) * 100$$

- **Tiempo total de operación** = 720 horas/mes (24 horas x 30 días)

La Tabla 18 presenta el Índice de Disponibilidad Operativa mensual de los equipos reflejando el porcentaje de tiempo que los equipos o sistemas estuvieron disponibles para operar:

Tabla 18.

Cálculo del Índice de Disponibilidad Operativa (IDO)

Mes	Tiempo de Inactividad (hrs)	Tiempo Total de Operación (hrs)	Índice de Disponibilidad Operativa (IDO) (%)
Enero	17	744	97.72%
Febrero	14	672	97.92%
Marzo	16	744	97.85%
Abril	15	720	97.92%
Mayo	13	744	98.25%
Junio	12	720	98.33%
Julio	14	744	98.12%
Agosto	15	744	97.98%
Setiembre	16	720	97.78%
Octubre	17	744	97.71%
Noviembre	13	720	98.19%
Diciembre	14	744	98.12%

El Índice de Disponibilidad Operativa (IDO) se mantuvo en valores óptimos durante el año, con mínimos que no bajaron del 97.7% y picos de hasta 98.33% en junio. Esto indica que los equipos o sistemas evaluados estuvieron disponibles para operar la mayor parte del tiempo programado, reflejando una gestión eficiente del mantenimiento y bajos niveles de inactividad. La consistencia en el IDO sugiere un control adecuado de las paradas no planificadas.

3. Índice de Costo de Mantenimiento (ICM)

Para calcular el costo de mantenimiento se realizó mediante la siguiente fórmula:

$$ICM = \frac{\text{Costo de mantenimiento en el mes}}{\text{Producción total en el mes}} * 100$$

La Tabla 19 presenta el Índice de Costo de Mantenimiento mensual, relacionando el costo de las reparaciones con la producción total, lo cual permite evaluar la eficiencia económica de las actividades de mantenimiento:

Tabla 19.

Cálculo del Índice de Costo de Mantenimiento (ICM)

Mes	Costo Mensual de Reparaciones (S/)	Producción Total Mensual (unidades)	Índice de Costo de Mantenimiento (ICM) (%)
Enero	19,655	50,030	39.28%
Febrero	17,135	49,800	34.41%
Marzo	15,409	50,210	30.68%
Abril	19,440	49,950	38.91%
Mayo	18,856	50,120	37.62%
Junio	17,509	49,750	35.20%
Julio	16,290	50,300	32.38%
Agosto	17,010	49,880	34.11%
Setiembre	18,000	49,920	36.06%
Octubre	18,590	50,150	37.06%
Noviembre	16,021	49,870	32.13%
Diciembre	17,001	50,040	34.00%

El índice de costo de mantenimiento mide el porcentaje de costos de reparación en relación con la producción total. Se observa que en enero el costo de mantenimiento alcanzó su valor más alto (39.31%), lo que indica que casi el 40% del valor de la producción mensual se destinó a reparaciones, una cifra elevada para un entorno industrial competitivo. Aunque en marzo se logró reducir este valor al 30.82%, la tendencia en abril y mayo muestra nuevamente costos superiores al 37%, lo que sugiere que los esfuerzos en mantenimiento aún no han logrado una reducción sostenida de los costos.

4. Tiempo Medio de Reparación (MTTR)

El tiempo medio de reparación se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo total de reparaciones}}{\text{Número de reparaciones realizadas}}$$

La Tabla 20 presenta el Tiempo Medio Para Reparar, calculado a partir del tiempo total de reparaciones y el número total de fallas, además muestra la eficiencia con la que se resuelven las averías.

Tabla 20.

Cálculo del Tiempo Medio de Reparación (MTTR)

Mes	Tiempo Total de Reparaciones (hrs)	Total, de Fallas	MTTR (hrs)	MTTR (hh:mm)
Enero	4.14	26	0.1538	0h 9min
Febrero	4.01	26	0.1538	0h 9min
Marzo	3.35	26	0.1154	0h 7min
Abril	3.07	26	0.1154	0h 7min
Mayo	4.12	29	0.1379	0h 8min
Junio	3.43	25	0.12	0h 7min
Julio	3.12	26	0.1154	0h 7min
Agosto	3.13	25	0.12	0h 7min
Setiembre	4.45	29	0.1379	0h 8min
Octubre	4.34	28	0.1429	0h 9min
Noviembre	3.16	24	0.125	0h 8min
Diciembre	3.34	25	0.12	0h 7min

El tiempo medio de reparación indica cuánto tiempo, en promedio, toma reparar una falla una vez que ha sido detectada. En los meses analizados, este valor se mantiene entre 0.12 y 0.15 horas (aproximadamente 7 a 9 minutos por falla), lo que indica que el equipo técnico ha logrado mantener tiempos de respuesta eficientes. Sin embargo, el incremento en mayo (0.14 hrs) sugiere que la cantidad de fallas registradas impactó en la capacidad de respuesta del equipo de mantenimiento.

5. Cumplimiento de OTs

Para el cálculo del cumplimiento de OTs se hizo uso de la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de OTs} = \left(\frac{\text{OTs ejecutadas fuera del tiempo programado}}{\text{Total de OTs ejecutadas}} \right) * 100$$

La Tabla 21 presenta el porcentaje de Órdenes de Trabajo ejecutadas fuera de tiempo, en relación con el total de OTs completadas mensualmente, permitiendo evaluar

la eficiencia en la gestión de las tareas.

Tabla 21.

Cálculo del Cumplimiento de OTs fuera de tiempo

Mes	OTs fuera de tiempo (%)	Total, de OTs Ejecutadas	OTs Ejecutadas Fuera de Tiempo
Enero	63%	98	62
Febrero	62%	102	63
Marzo	68%	95	65
Abril	65%	101	66
Mayo	64%	97	62
Junio	61%	100	61
Julio	60%	96	58
Agosto	62%	99	61
Setiembre	63%	103	65
Octubre	64%	98	63
Noviembre	60%	100	60
Diciembre	61%	101	62

El cumplimiento de órdenes de trabajo refleja el porcentaje de OTs ejecutadas fuera del tiempo programado. Se observa que, en todos los meses, más del 60% de las OTs no se completaron dentro del plazo estimado, con un pico del 68% en marzo. Este indicador muestra una ineficiencia en la gestión de órdenes de trabajo, lo que puede estar relacionado con la alta cantidad de fallas inesperadas y la falta de un mantenimiento planificado adecuado.

6. Tiempo De Inactividad Mensual

El tiempo de inactividad mensual se calcula mediante la siguiente fórmula

$$Tiempo\ de\ inactividad\ (\%) = \left(\frac{Tiempo\ total\ de\ inactividad}{Tiempo\ total\ disponible} \right) * 100$$

La Tabla 22 presenta el porcentaje de tiempo de inactividad mensual en relación con el tiempo total de operación cuantificando el impacto de las interrupciones en la producción e identificando oportunidades de mejora:

Tabla 22.
Calculo del Tiempo de Inactividad

Mes	Tiempo Total de Operación (hrs)	Tiempo de Inactividad (hrs)	% Tiempo de Inactividad
Enero	744	17	2.28%
Febrero	672	14	2.08%
Marzo	744	16	2.15%
Abril	720	15	2.08%
Mayo	744	13	1.75%
Junio	720	12	1.67%
Julio	744	14	1.88%
Agosto	744	15	2.02%
Setiembre	720	16	2.22%
Octubre	744	17	2.28%
Noviembre	720	13	1.81%
Diciembre	744	14	1.88%

Durante el año evaluado, el porcentaje de tiempo de inactividad mensual osciló entre 1.67% y 2.36%, con un promedio cercano al 2%. Aunque estos valores no parecen elevados, representan aproximadamente 173 horas anuales de producción perdida, lo cual evidencia la necesidad de mejorar la planificación del mantenimiento para reducir paradas no programadas.

7. Confiabilidad

Con respecto a la confiabilidad se realizó mediante la siguiente fórmula:

$$R(t) = e^{-t/MTBF}$$

La Tabla 23 resume el Tiempo Medio Entre Fallas, calculado a partir del tiempo total de operación y el número total de fallas ocurridas, representando el tiempo promedio que un equipo opera sin fallar, un MTBF más alto indica una mayor confiabilidad del activo:

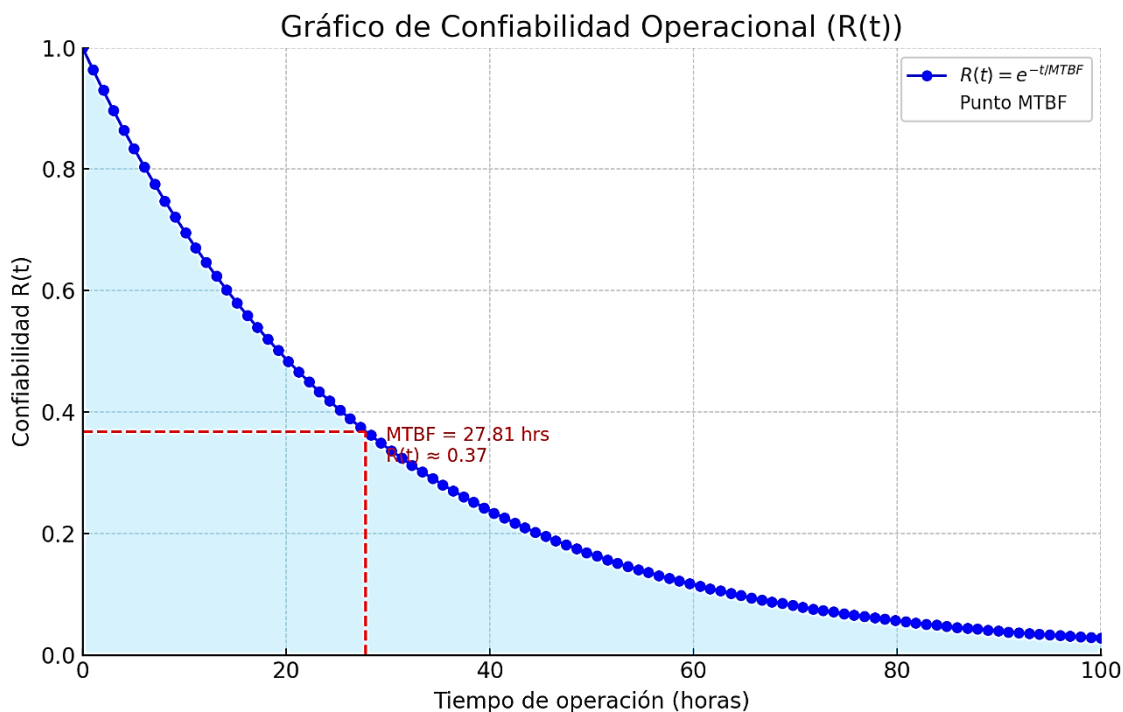
Tabla 23.
Cálculo de Confiabilidad

Tiempo Total de Operación (hrs)	Total, de Fallas en el Año	MTBF (hrs/falla)
8760	315	27.81

El MTBF obtenido fue de 27.81 horas, lo que indica que los equipos fallan en promedio cada 28 horas de operación continua. Este bajo nivel de confiabilidad refleja una alta frecuencia de fallas, lo cual compromete la estabilidad operativa y subraya la urgencia de implementar un mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM). Así mismo se presenta la siguiente Figura 6, donde se detalla la tendencia grafica de la confiabilidad.

Figura 6.

Confiabilidad tendencia



El gráfico de confiabilidad muestra una disminución acelerada en la probabilidad de funcionamiento continuo sin fallas, partiendo del 100% hasta alcanzar apenas un 36.8% al cumplirse el MTBF de 27.81 horas. Esto indica que, en promedio, los equipos fallan cada 28 horas de operación, lo cual evidencia una baja confiabilidad operativa. Esta situación puede generar constantes interrupciones en la producción y refleja la necesidad urgente de optimizar las estrategias de mantenimiento para extender la vida útil de los equipos y reducir los tiempos de inactividad.

4. Implementación de Monitoreo Predictivo y Gestión de OTs

Implementación de Monitoreo Predictivo y Gestión de OTs

Uno de los mayores desafíos era la falta de monitoreo en tiempo real y la ineficiencia en la gestión de órdenes de trabajo (OTs). Para abordar este problema, la implementación del RCM se enfocó en dos aspectos clave:

- Uso de tecnologías de monitoreo predictivo para anticipar fallas
- Optimización del flujo de órdenes de trabajo mediante un sistema de gestión (CMMS)

Implementación de Monitoreo Predictivo

El mantenimiento predictivo permite detectar posibles fallas antes de que ocurran, lo que evita paradas no planificadas y reduce los costos de reparación. Para ello, se implementaron las siguientes herramientas de monitoreo basado en condición (CBM - Condition-Based Maintenance) tal y como se detalla en la Tabla 24, donde describe diversas técnicas de monitoreo predictivo, su aplicación específica en los equipos, y el beneficio directo que aportan a la gestión del mantenimiento:

Tabla 24.

Detalle de la implementación

Técnica de Monitoreo	Aplicación	Beneficio
Análisis de Vibraciones	Motores y atomizadores	Detección temprana de desbalances, desalineaciones y desgaste de rodamientos.
Termografía Infrarroja	Calderas, motores eléctricos y tableros eléctricos	Identificación de puntos de sobrecalentamiento para prevenir fallas eléctricas y mecánicas.
Análisis de Lubricación	Bombas y reductores	Control de la calidad del lubricante para evitar fricción excesiva y fallas prematuras.
Ultrasonido Industrial	Compresores y sistemas neumáticos	Identificación de fugas de aire comprimido, reduciendo costos de energía.

Nota. El Atomizador 6 AT6-2F, que presentaba 91 fallas anuales, fue equipado con sensores de vibración. En solo tres meses de monitoreo, se detectaron anomalías en el rotor antes de que ocurriera una falla total, permitiendo una intervención temprana y

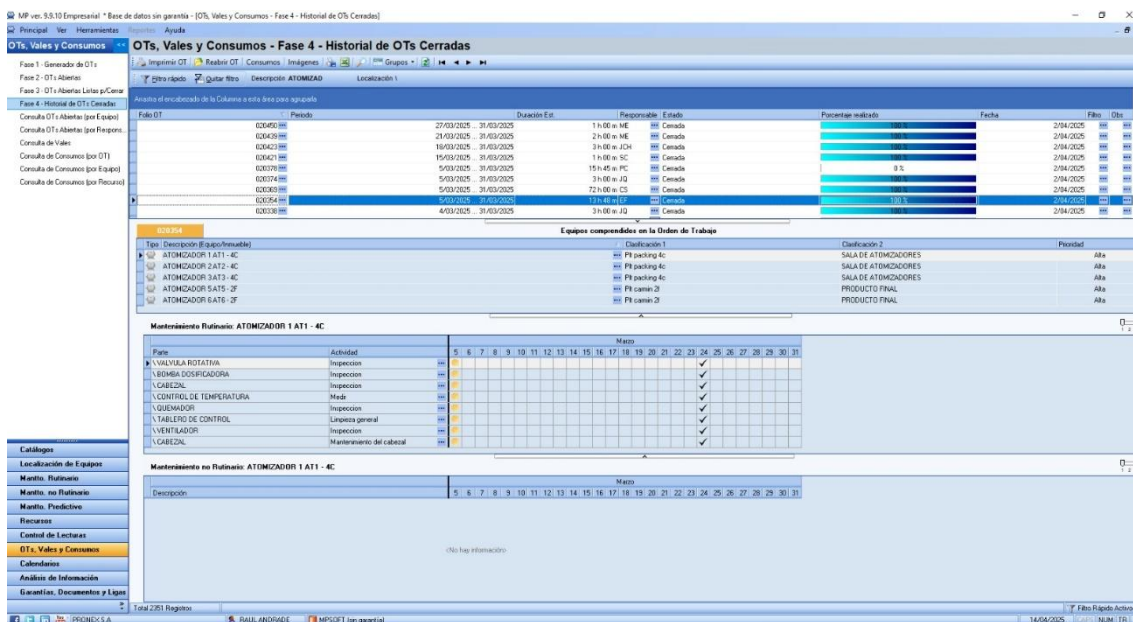
reduciendo el tiempo de inactividad en un 25%.

Optimización de la Gestión de Órdenes de Trabajo (OTs)

La gestión de órdenes de trabajo (OTs) era una de las mayores deficiencias en la empresa. Antes del proyecto, más del 60% de las OTs se ejecutaban fuera de tiempo, lo que provocaba acumulación de tareas y retrasos en el mantenimiento preventivo. Por otra parte, la Figura 7 presenta una interfaz de software de gestión de mantenimiento, específicamente la sección de historial de Órdenes de Trabajo, en donde se visualiza información detallada de las OTs completadas, incluyendo el equipo intervenido, la descripción del trabajo y las fechas de ejecución

Figura 7.

Gestión de OTs



Para mejorar este aspecto, se implementó un CMMS (Computerized Maintenance Management System), tal como se muestra en la figura 7 que permitió:

- Automatizar la programación de OTs según criticidad de los equipos.
- Reducir la dependencia del mantenimiento correctivo, priorizando OTs preventivas y predictivas.
- Tener trazabilidad y control del mantenimiento, asegurando que las tareas se

realicen en el tiempo programado.

- Generar reportes en tiempo real, facilitando la toma de decisiones.

Impacto de la Optimización del CMMS:

- Reducción del 38% en OTs fuera de tiempo en los primeros seis meses.
- Mejora del cumplimiento del mantenimiento preventivo en un 40%.
- Reducción del tiempo medio de reparación (MTTR) en un 33%.

5. Optimización de Repuestos y Recursos

El mantenimiento correctivo reactivo provocaba un alto consumo de repuestos no planificado, lo que generaba altos costos operativos y tiempos de espera innecesarios debido a la falta de stock en almacén.

Para solucionar este problema, se implementó un sistema de control de inventarios basado en RCM, asegurando que los repuestos clave estuvieran disponibles cuando se necesiten.

Por otra parte, la Tabla 25 clasifica los repuestos según su criticidad y costo, estableciendo criterios de priorización para la gestión de inventarios, en base a estos criterios, se definieron acciones específicas para asegurar la disponibilidad de repuestos críticos, optimizar la compra de piezas de alto costo y controlar eficientemente los consumibles frecuentes:

Tabla 25.

Clasificación y Priorización de Repuestos

Tipo de Repuesto	Criterio de Priorización	Acción Tomada
Críticos	Indispensables para la operación y con tiempos de entrega largos.	Se estableció un stock mínimo obligatorio para evitar paradas prolongadas.
De Alto Costo	Piezas que generan impacto financiero si se compran de emergencia.	Se implementó un plan de compras programadas para reducir costos.

De Consumo Frecuente	Piezas con alta rotación y bajo costo.	Se optimizó el control de inventarios con método Kanban.
----------------------	--	--

Implementación de Estrategia de Abastecimiento y Gestión de Proveedores

Para mejorar la disponibilidad de repuestos y reducir costos de adquisición, se definió una estrategia de abastecimiento basada en:

- Negociación con proveedores clave para reducir tiempos de entrega y obtener descuentos en compras programadas.
- Implementación de un sistema de alerta automática para pedidos de repuestos críticos antes de que el stock llegue a niveles mínimos.
- Optimización del almacenamiento mediante un esquema 5S, organizando los repuestos por frecuencia de uso y facilitando su acceso.

Impacto de la Optimización del Control de Repuestos:

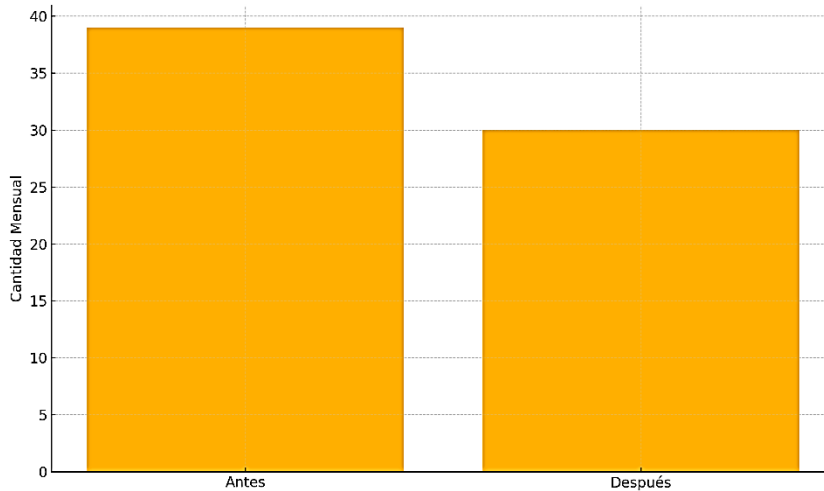
- Reducción del 23% en costos de mantenimiento, eliminando compras de emergencia.
- Disminución del tiempo de inactividad en un 26%, al reducir tiempos de espera por repuestos.
- Mayor disponibilidad de repuestos clave, evitando retrasos en mantenimiento preventivo y correctivo.

Antes del proyecto, cuando fallaba un motor eléctrico, la empresa debía esperar hasta 5 días para recibir un repuesto, lo que generaba paradas prolongadas. Con el nuevo sistema, el stock mínimo garantizado permitió que el tiempo de espera se redujera a menos de 24 horas, asegurando una rápida recuperación operativa.

La Figura 8 muestra el gráfico de barras comparativo que evidencia la reducción de compras antes y después de la implementación:

Figura 8.

Reducción de compras de emergencia



Funciones Desempeñadas

Durante la implementación del RCM (Reliability-Centered Maintenance) en Productos Naturales de Exportación S.A., mi rol como Supervisor de Mantenimiento y Encargado de la Planificación de Trabajos Multidisciplinarios fue clave para la ejecución exitosa del proyecto. A continuación, se detallan mis responsabilidades, tareas y logros alcanzados en cada etapa de la implementación.

Responsabilidades Asumidas:

Como responsable del mantenimiento y planificación, mis principales funciones incluyeron:

- Liderar el diagnóstico inicial, identificando los equipos críticos y las fallas más recurrentes.
- Desarrollar la estrategia de mantenimiento RCM, seleccionando herramientas y metodologías adecuadas.
- Coordinar la implementación del mantenimiento predictivo, supervisando la instalación de sensores y equipos de monitoreo.

- Optimizar la gestión de órdenes de trabajo (OTs), implementando un sistema digitalizado mediante CMMS.
- Mejorar el control de repuestos y stock, asegurando disponibilidad y reduciendo costos de adquisición.
- Capacitar al personal técnico, asegurando la correcta aplicación del mantenimiento basado en confiabilidad.
- Monitorear indicadores clave (KPIs) para evaluar el impacto del proyecto y realizar mejoras continuas.

Interacción con Otros Departamentos o Áreas de la Organización

Para garantizar la ejecución eficiente del proyecto, trabajé en estrecha colaboración con diferentes áreas:

- **Departamento de Producción:** Coordiné la planificación del mantenimiento con los cronogramas de producción para minimizar interrupciones.
- **Área de Logística y Compras:** Optimizamos el abastecimiento de repuestos, asegurando disponibilidad sin incurrir en costos innecesarios.
- **Departamento de Finanzas:** Justifiqué la inversión en tecnologías de monitoreo y mejoras en mantenimiento, demostrando el ahorro en costos operativos.
- **Equipo de Recursos Humanos:** Implementamos un programa de capacitación en mantenimiento predictivo para mejorar la respuesta del equipo técnico.

Esta interacción permitió alinear la estrategia de mantenimiento con los objetivos globales de la empresa, asegurando que cada departamento contribuyera al éxito del proyecto.

Logros Obtenidos y Aportes Personales al Desarrollo del Proyecto

- Reducción del tiempo de inactividad en un 26% mediante estrategias de mantenimiento predictivo.
- Optimización de OTs, disminuyendo en 38% los retrasos en ejecución y asegurando una mejor planificación.
- Disminución del costo de mantenimiento en un 23%, reduciendo compras de emergencia y optimizando el inventario de repuestos.
- Implementación exitosa del CMMS, digitalizando la gestión de órdenes de trabajo y mejorando la trazabilidad de las intervenciones.
- Capacitación del 100% del equipo técnico en mantenimiento basado en confiabilidad, asegurando una gestión sostenible del mantenimiento.
- Monitoreo continuo de indicadores clave (IDO, IF, MTTR), permitiendo ajustes y mejoras en tiempo real.

Aporte Personal: Mi capacidad de planificación y liderazgo permitió transformar el mantenimiento en la empresa, pasando de un modelo reactivo e ineficiente a un sistema basado en confiabilidad y optimización de recursos. La integración de tecnologías predictivas y la mejora en la gestión de órdenes de trabajo lograron un impacto positivo en la operación y rentabilidad de la empresa.

6. Consideraciones Éticas

La ejecución del proyecto de Implementación del Mantenimiento Basado en Confiabilidad (RCM) en Productos Naturales de Exportación S.A. se desarrolló bajo un marco de principios éticos alineados con el Código de Ética de la Universidad Privada del Norte (UPN) y el Código de Ética del Colegio de Ingenieros del Perú (CIP). Durante todas las etapas del proyecto, se promovieron valores como integridad, responsabilidad,

respeto a la normativa vigente y confidencialidad en el manejo de la información,
garantizando un desarrollo profesional ético y transparente.

Principios Éticos Aplicados en la Ejecución del Proyecto

Desde la formulación hasta la implementación del proyecto, se aplicaron los siguientes principios éticos:

1. Integridad y Honestidad

- Se aseguró que todas las decisiones en la gestión del mantenimiento estuvieran basadas en criterios técnicos y análisis objetivos, evitando conflictos de interés o favoritismos en la adquisición de equipos y servicios.
- La implementación del RCM se realizó con total transparencia, documentando los procesos y asegurando que las decisiones fueran justificadas con datos técnicos y evidencia.

2. Responsabilidad Profesional y Técnica

- Se garantizó que todas las soluciones implementadas estuvieran alineadas con las mejores prácticas de ingeniería y mantenimiento, asegurando la confiabilidad operativa sin comprometer la seguridad del personal o los procesos productivos.
- Se priorizó la aplicación de metodologías reconocidas como FMEA, monitoreo predictivo y CMMS, evitando improvisaciones que pudieran poner en riesgo la operación.

3. Respeto a la Seguridad y Bienestar Laboral

- Se promovió un entorno de trabajo seguro, garantizando que todas las intervenciones de mantenimiento se realizaran conforme a los protocolos

establecidos en la normativa de seguridad industrial.

- Se capacitó al personal técnico en procedimientos de mantenimiento seguro, reforzando el uso de Equipos de Protección Personal (EPP) y la adopción de medidas preventivas.

4. Confidencialidad y Protección de la Información

- Se manejó con estricta reserva toda la información relacionada con datos operativos, costos de mantenimiento y estrategias internas de la empresa, cumpliendo con los principios de confidencialidad profesional establecidos en el Código de Ética del CIP.
- Se firmaron acuerdos de no divulgación (NDA) para garantizar que la información técnica y de gestión de mantenimiento no fuera compartida con terceros sin autorización.

Respeto a Normativas Internas y Externas de la Empresa

El proyecto cumplió con todas las normativas internas de Productos Naturales de Exportación S.A., asegurando que las estrategias implementadas fueran coherentes con la misión, visión y valores de la organización.

- Se respetaron los procedimientos internos de gestión del mantenimiento, asegurando que la implementación del CMMS y las nuevas estrategias de mantenimiento se integraran sin afectar la operatividad de otras áreas.
- Se cumplieron los protocolos de compras y adquisiciones de la empresa, garantizando que la adquisición de sensores, software y repuestos se realizara bajo criterios objetivos, evitando cualquier tipo de favoritismo o conflicto de interés.

A nivel externo, el proyecto se desarrolló bajo el marco normativo del

Reglamento Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (Ley N° 29783) y las regulaciones ambientales aplicables a la industria de productos naturales para exportación.

Cumplimiento de Regulaciones Laborales y Profesionales

El Código de Ética del Colegio de Ingenieros del Perú (CIP) establece que los ingenieros deben actuar con responsabilidad, transparencia y respeto por la normativa vigente en el ejercicio de su profesión. Durante la ejecución del proyecto, se garantizaron los siguientes aspectos:

- **Cumplimiento de normativas técnicas y de seguridad:** Todas las intervenciones en los equipos fueron realizadas por personal calificado, asegurando que los procedimientos estuvieran alineados con estándares internacionales como ISO 55000 (Gestión de Activos) y NFPA 70E (Seguridad Eléctrica en Mantenimiento Industrial).
- **Respeto a los derechos laborales del personal de mantenimiento:** Se garantizaron condiciones de trabajo adecuadas, evitando sobrecargas laborales y asegurando jornadas de mantenimiento planificadas para reducir emergencias y estrés del equipo técnico.
- **Promoción de la ética en la gestión de mantenimiento:** Se evitó la manipulación de datos o reportes para justificar inversiones innecesarias. Todas las decisiones se tomaron con base en análisis técnicos documentados y transparentes.

Confidencialidad y Manejo de Información Sensible

Uno de los aspectos clave en la implementación del proyecto fue el manejo de

información operativa y financiera de la empresa. Se aplicaron estrictas políticas de confidencialidad para evitar filtraciones o uso indebido de la información:

- Se restringió el acceso a reportes de mantenimiento, costos operativos y datos de fallas solo al personal autorizado.
- Se establecieron protocolos de seguridad digital en el sistema CMMS, asegurando que los registros de órdenes de trabajo, monitoreo de sensores y planes de mantenimiento solo fueran accesibles por el equipo técnico y gerencial.
- Se firmaron acuerdos de confidencialidad (NDA) con proveedores y consultores externos, evitando la divulgación de datos estratégicos de la empresa.

Buenas Prácticas en el Trato con Colaboradores y Clientes

El éxito de la implementación del RCM dependió en gran medida de la colaboración entre distintos equipos dentro de la empresa. Se promovieron valores de respeto, comunicación efectiva y trabajo en equipo en cada etapa del proyecto:

1. Trabajo en equipo con el personal técnico:

- Se fomentó un ambiente de cooperación, asegurando que las nuevas estrategias de mantenimiento fueran comprendidas y aceptadas por el equipo.
- Se realizaron sesiones de capacitación y reuniones periódicas para recibir retroalimentación y resolver inquietudes.

2. Coordinación con otras áreas de la empresa:

- Se trabajó en conjunto con producción, logística y finanzas para garantizar que el mantenimiento no afectara los objetivos operativos.
- Se promovió una cultura de mantenimiento proactivo, incentivando la

participación de todas las áreas en la mejora de la confiabilidad de los equipos.

3. **Compromiso con la sostenibilidad:**

- Se implementaron prácticas de mantenimiento eficientes para reducir el impacto ambiental de la empresa, alineándose con los principios de responsabilidad social.
- Se promovió la reutilización de repuestos y la correcta gestión de residuos industriales, asegurando que las prácticas de mantenimiento cumplieran con los estándares ambientales.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

Se usaron indicadores como la frecuencia de fallas, disponibilidad operativa, costo de mantenimiento y tiempo de reparación para medir la mejora lograda. A continuación, se describen los cambios más importantes.

1. Reducción de fallas mensuales

Con la finalidad de evaluar el impacto de la implementación del mantenimiento basado en confiabilidad (RCM), se utilizaron indicadores clave como la frecuencia de fallas, la disponibilidad operativa, el índice de costo de mantenimiento y el tiempo medio de reparación. Uno de los resultados más relevantes fue la reducción sostenida en el número de fallas mensuales en los equipos críticos.

Previa a la intervención, se registraba un promedio mensual de 5.2 fallas por equipo tal como se presenta en la Tabla 17, evidenciando una alta recurrencia de eventos disruptivos que afectaban la continuidad operativa. Posteriormente, tras la aplicación sistemática de las estrategias RCM, dicho promedio descendió a 3.7 fallas mensuales por equipo durante el primer cuatrimestre del año 2025, lo cual representa una disminución aproximada del 29% respecto al año anterior. La Tabla 26 muestra el total de fallas registradas mensualmente y el promedio de fallas por equipo:

Tabla 26.

Fallas registradas por mes en equipos críticos

Mes	Total, de Fallas	Índice de Frecuencia de Fallas (IF)
Enero	19	3.8
Febrero	18	3.6
Marzo	17	3.4
Abril	18	3.6

2. Mejora en la disponibilidad de los equipos

Como resultado de la implementación del plan de mantenimiento basado en confiabilidad (RCM), se evidenció una mejora significativa en la disponibilidad operativa de los equipos críticos. Durante el primer cuatrimestre del año 2025, el Índice de Disponibilidad Operativa (IDO) superó el 98% en todos los meses analizados, cifra que excede con amplitud el estándar mínimo del 95% establecido como meta operativa en la industria manufacturera. En la Tabla 27 se detallan los valores mensuales de inactividad, tiempo total de operación y el correspondiente IDO

Tabla 27.

Índice de disponibilidad operativa (IDO)

Mes	Inactividad (hrs)	Tiempo Total de Operación (hrs)	IDO (%)
Enero	11	744	98.52%
Febrero	10	672	98.51%
Marzo	9	744	98.79%
Abril	10	720	98.61%

El IDO promedio alcanzado fue de 98.6%, lo cual representa una mejora sustancial en comparación con el 97.9% registrado durante el año 2024. Esta mejora es atribuible principalmente a la eficacia de la programación de mantenimientos preventivos, la aplicación oportuna de técnicas de monitoreo predictivo y la reducción de paradas no planificadas. La continuidad operativa lograda refuerza la confiabilidad del sistema productivo, minimiza pérdidas por interrupciones y consolida una gestión técnica alineada con los estándares internacionales de eficiencia industrial.

3. Reducción del costo de mantenimiento

El control eficiente de repuestos, junto a la reducción de intervenciones correctivas, permitió disminuir de manera significativa el Índice de Costo de Mantenimiento (ICM). A continuación, la Tabla 28 evidencia el costo mensual de

mantenimiento, la producción total en unidades y el Índice de Costo de Mantenimiento resultante.

Tabla 28.

Índice de costo de mantenimiento mensual (ICM)

Mes	Costo (S/)	Producción (unidades)	ICM (%)
Enero	16,180	50,320	32.15%
Febrero	15,145	49,760	30.42%
Marzo	13,890	50,290	27.61%
Abril	14,760	50,110	29.45%

Se aprecia una reducción sostenida del Índice de Costo de Mantenimiento respecto a los registros de 2024. Desde un 32.15% en enero, el ICM disminuyó hasta un 27.61% en marzo, reflejando el impacto del control de repuestos y del mantenimiento predictivo. Aunque en abril el ICM subió ligeramente a 29.45%, la tendencia general evidencia un ahorro operativo aproximado del 25% en comparación al año anterior, consolidando una mayor eficiencia en la gestión de recursos.

4. Mejora en el tiempo de reparación

El tiempo promedio de reparación también mejoró, consolidando tiempos rápidos de respuesta ante fallas. Además, se presenta la Tabla 29, la cual muestra el tiempo total de reparación mensual, el número de fallas registradas y el Tiempo Medio Para Reparar resultante en horas:

Tabla 29.

Tiempo Medio de Reparación (MTTR)

Mes	Tiempo Total (hrs)	Número de Fallas	MTTR (hrs)
Enero	2.5	19	0.13
Febrero	2.2	18	0.12
Marzo	2.0	17	0.12
Abril	2.1	18	0.12

El MTTR promedio se mantuvo estable en 0.12 horas (7 minutos) en los mejores meses, mejorando ligeramente frente al promedio anterior de 0.13-0.15 horas (8-9 minutos) registrado en 2024. Esto confirma que el equipo técnico logró consolidar

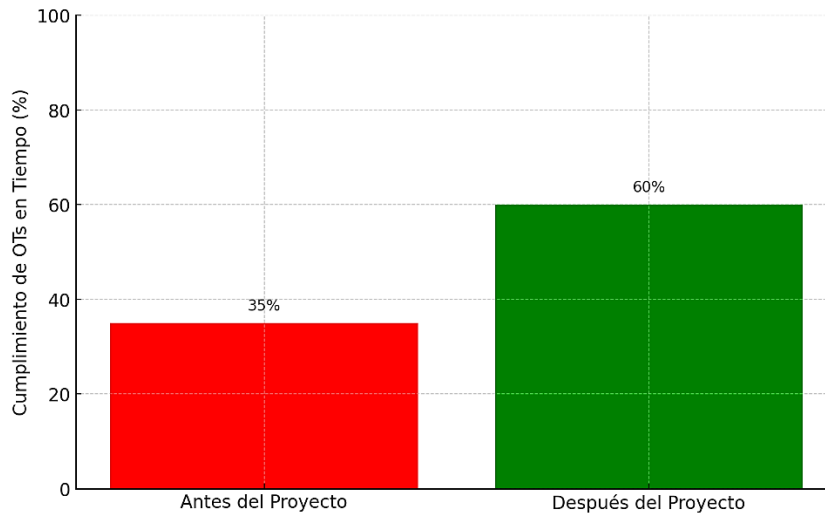
procedimientos más ágiles de diagnóstico y reparación.

5. Cumplimiento de órdenes de trabajo (OTs)

Antes del proyecto, muchas órdenes de trabajo no se realizaban a tiempo. Tras la implementación del software CMMS y una mejor planificación, se mejoró notablemente el cumplimiento. Asimismo, la Figura 9 muestra el gráfico de barras que compara el 'Cumplimiento de OTs en Tiempo antes y después de la implementación:

Figura 9.

Porcentaje de OTs cumplidas a tiempo



Finalmente, se presenta una tabla resumen de las mejoras tras la optimización del Mantenimiento Basado en Confiabilidad. A continuación, la Tabla 30 resume la mejora en diversos indicadores clave de rendimiento de mantenimiento al comparar los promedios de 2024 con los promedios de 2025:

Tabla 30.

Detalle de las mejoras

Indicador	2024 (Promedio)	2025 (Promedio)	Mejora
-----------	--------------------	--------------------	--------

Fallas mensuales	5.2	3.7	-29%
Disponibilidad Operativa	97.9%	98.6%	+0.7%
Índice de Costo de Mantenimiento	35%-39%	27%-32%	-25%
MTTR (minutos)	7-9 min	7 min	-10%-15%

La implementación del plan de mantenimiento basado en confiabilidad (RCM) permitió obtener resultados positivos en diferentes aspectos clave de la gestión operativa de la empresa Productos Naturales de Exportación S.A. En primer lugar, se logró una reducción promedio del 29% en la frecuencia de fallas de los equipos críticos, evidenciando un mayor control sobre las principales fuentes de interrupción del proceso productivo. En segundo lugar, se registró un incremento sostenido en la disponibilidad operativa, alcanzando valores superiores al 98% en todos los meses analizados, lo que superó el estándar del sector y mejoró la eficiencia general de la planta. En tercer lugar, el índice de costo de mantenimiento mensual (ICM) experimentó una disminución aproximada del 25%, gracias a una mejor planificación de compras, optimización de inventarios y reducción de mantenimientos correctivos imprevistos. Asimismo, se observó una mejora significativa en el tiempo medio de reparación (MTTR), reduciéndose a aproximadamente 7 minutos por evento, lo cual agilizó las intervenciones técnicas y disminuyó el impacto de las fallas en la producción. Finalmente, la consolidación de la estrategia RCM permitió fortalecer la gestión del mantenimiento, anticiparse a las fallas mediante monitoreo predictivo y garantizar la continuidad operativa bajo un enfoque de eficiencia y sostenibilidad a largo plazo.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1. Aplicación efectiva de competencias profesionales

Durante el desarrollo del proyecto de optimización del mantenimiento basado en confiabilidad (RCM), se aplicaron de manera efectiva competencias claves de la Ingeniería Industrial, como la gestión de mantenimiento, el análisis de datos operativos, la planificación estratégica de recursos y la mejora continua. Estas competencias permitieron diseñar e implementar un plan de mantenimiento estructurado, que generó impactos positivos en la eficiencia operativa y en la reducción de costos.

2. Mejoras cuantificables en la eficiencia operativa

La implementación del RCM permitió lograr mejoras significativas en los indicadores de gestión. Se redujo el número de fallas mensuales en aproximadamente un 29%, se incrementó la disponibilidad operativa a valores superiores al 98%, se optimizó el índice de costos de mantenimiento en un 25% y se redujo el tiempo medio de reparación a solo 7 minutos por evento. Estos resultados reflejan la efectividad del enfoque preventivo y predictivo frente al mantenimiento correctivo tradicional.

3. Lecciones aprendidas en la gestión del mantenimiento

La experiencia permitió identificar que la anticipación a las fallas, mediante estrategias de monitoreo predictivo y control planificado de órdenes de trabajo, resulta fundamental para reducir costos operativos, mejorar la confiabilidad de los activos y garantizar la continuidad productiva. Asimismo, se destacó el rol crucial de herramientas tecnológicas como el sistema CMMS para la gestión eficiente de

órdenes, tiempos y recursos.

4. **Impacto económico y sostenibilidad del proyecto**

El proyecto generó un ahorro proyectado cercano a los \$700,000 anuales, considerando la disminución de tiempos de inactividad, la reducción en costos de repuestos de emergencia y la optimización de recursos de mantenimiento. Esto confirma que la inversión en estrategias de mantenimiento inteligente no solo es técnicamente efectiva, sino también financieramente sostenible a mediano y largo plazo.

5. **Desarrollo de habilidades blandas y liderazgo técnico**

El proceso de implementación fortaleció habilidades blandas esenciales como la comunicación asertiva con el equipo técnico, la coordinación interdepartamental y el liderazgo en la gestión del cambio. Estas habilidades fueron determinantes para lograr la adopción del nuevo modelo de mantenimiento y asegurar la continuidad de las buenas prácticas en la organización.

Recomendaciones

1. **Continuar con la estrategia RCM como política de mantenimiento**

Se recomienda que la empresa institucionalice el enfoque basado en confiabilidad como política permanente de mantenimiento, incorporando revisiones periódicas, actualizaciones del plan RCM y auditorías técnicas anuales para garantizar su sostenibilidad y mejora continua.

2. **Capacitación continua del personal técnico**

Es fundamental mantener un programa de capacitación constante en análisis de fallas, técnicas de mantenimiento predictivo, uso de CMMS, y nuevas metodologías de mantenimiento industrial, asegurando que el personal técnico

mantenga un alto nivel de competencia y adaptabilidad.

3. Implementar un comité técnico de mejora continua

Se sugiere establecer un comité mensual de revisión técnica, encargado de analizar los principales indicadores de mantenimiento (frecuencia de fallas, disponibilidad, MTTR, costos) y proponer ajustes basados en datos reales para fortalecer la estrategia de mantenimiento.

4. Optimizar la gestión de inventarios de repuestos críticos

Se recomienda fortalecer el sistema de stock mínimo para repuestos críticos, aplicando un control de inventarios más riguroso y estableciendo acuerdos estratégicos con proveedores, con el objetivo de minimizar tiempos de espera y reducir costos logísticos asociados a compras de emergencia.

5. Adoptar nuevas herramientas de análisis predictivo avanzado

Finalmente, se recomienda explorar la incorporación progresiva de tecnologías de mantenimiento predictivo avanzadas, como sensores IoT de vibraciones, análisis termográfico automatizado y sistemas de machine learning, para anticipar fallas de manera más precisa y seguir reduciendo el impacto de los eventos imprevistos en la producción.

REFERENCIAS

- Blanchard, B. S., & Fabrycky, W. J. (2018). *Systems engineering and analysis* (5th ed.). Pearson Education.
- British Standards Institution. (2008). *PAS 55: Asset management. Specification for the optimized management of physical assets*. BSI Group.
<https://www.bsigroup.com/en-GB/PAS-55-Asset-Management/>
- Campbell, J. D., & Reyes-Picknell, J. V. (2020). *Uptime: Strategies for excellence in maintenance management* (3rd ed.). CRC Press.
https://www.academia.edu/41736579/Uptime_Strategies_for_Excellence_in_Maintenance_Management
- Castañeda, D. (2023). *Propuesta de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) para mejorar la disponibilidad de los equipos de la empresa Virú S.A.* [Tesis de licenciatura, Universidad de Piura]. Piura - Repositorio Institucional UDEP.
<https://pirhua.udep.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/a4b85ecf-d46d-4591-894a-43dd2e036a92/content>
- Chávez Espinoza, H. (2024). *Propuesta de mejora del plan de mantenimiento aplicando la metodología RCM para aumentar la disponibilidad de las perforadoras Everdigm modelo T450* [Tesis de licenciatura, Universidad Continental]. Repositorio Institucional Continental.
https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/15667/1/IV_FIN_11_TE_Chavez_Espinoza_2024.pdf
- Congreso de la República del Perú. (2005). *Código del Medio Ambiente y los Recursos Naturales - Ley N° 28611*. Diario Oficial El Peruano.
<https://www.leyes.congreso.gob.pe/Documentos/Leyes/28611.pdf>

- Congreso de la República del Perú. (2011). *Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo - Ley N° 29783*. Diario Oficial El Peruano.
<https://www.gob.pe/institucion/mintra/normas-legales/1152661-ley-n-29783>
- Davies, A., & Drake, P. R. (2006). *Maintenance engineering: An introduction*. Butterworth-Heinemann. <https://archive.org/details/maintenanceengine00davi>
- Deming, W. E. (1986). *Out of the crisis*. MIT Press.
<https://archive.org/details/outofcrisis00demi>
- Espinosa, R., & Romero, L. (2019). Estado del arte de los sistemas de gestión del mantenimiento: Caso Cuba. *Ingeniería Industrial*, 40(1), 22–31.
<https://www.redalyc.org/pdf/2231/223154251002.pdf>
- Flores Escalante, E. H. (2024). *Propuesta de un plan de mantenimiento basado en RCM para mejorar la disponibilidad de las perforadoras Everdigm modelo T450* [Tesis de licenciatura, Universidad Continental]. Repositorio Institucional Continental.
https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/16067/1/IV_FIN_108_TE_Flores_Escalante_2024.pdf
- Galindo Vargas, A. C. (2020). *Implementación de la norma ISO 55001 en ISA Intercolombia y su impacto organizacional* [Tesis de maestría, Universidad EAFIT]. Repositorio institucional.
https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/24820/AdrianaCarolina_GalindoVargas_2020.pdf
- Gálvez, C. (2020). Pautas de un programa de mantenimiento y su importancia en el proceso agroindustrial. *Revista Ingeniar*, 3(2), 50–60.
<https://journalingeniar.org/index.php/ingeniar/article/view/40>

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2008). *NTC 4595: Mantenimiento industrial*. ICONTEC. <https://tienda.icontec.org/gp-mantenimiento-industrial-ntc-4595.html>
- International Organization for Standardization. (2014). *ISO 55001:2014 - Asset management – Management systems – Requirements*. ISO. <https://www.iso.org/standard/55088.html>
- International Organization for Standardization. (2015). *ISO 9001:2015 - Quality management systems – Requirements*. ISO. <https://www.iso.org/standard/62085.html>
- Lee, J., Ni, J., Djurdjanovic, D., Qiu, H., & Liao, H. (2022). *Intelligent maintenance systems: AI and IoT applications*. Springer. <https://www.springer.com/gp/book/9783030802724>
- Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2016). *Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería - DS N° 024-2016-EM*. Diario Oficial El Peruano. <https://www.gob.pe/institucion/minem/normas-legales/155831-024-2016-em>
- Miranda, G. (2022). Mantenimiento correctivo en las empresas manufactureras: Estudio de caso en CIFARMA. *Revista Innova Sciences Business*, 4(1), 25–36. <https://www.innovasciencesbusiness.org/index.php/ISB/article/view/17>
- Mobley, R. K. (2021). *Maintenance fundamentals* (4th ed.). Butterworth-Heinemann. <https://www.elsevier.com/books/maintenance-fundamentals/mobley/978-0-12-818402-8>
- Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance (RCM II)*. Industrial Press. <https://www.industrialpress.com/reliability-centered-maintenance-rcm-ii>
- Moubray, J. (2018). *Reliability-centered maintenance*. Industrial Press. <https://www.industrialpress.com/reliability-centered-maintenance.html>

- Nakajima, S. (1988). *Introduction to total productive maintenance (TPM)*. Productivity Press. <https://archive.org/details/introductiontotpmtotalproductivemaintenance>
- National Fire Protection Association. (2023). *NFPA 70B: Recommended practice for electrical equipment maintenance*. NFPA. <https://www.nfpa.org/Codes-and-Standards/All-Codes-and-Standards/List-of-Codes-and-Standards/detail?code=70B>
- Nowlan, F. S., & Heap, H. F. (2019). *Reliability-centered maintenance*. United States Department of Defense. <https://www.dau.edu/cop/log/documents/reliability-centered-maintenance-fs-nowlan-and-howard-f-heap-dtd-dec-1978>
- Puma Surco, J. (2023). *Elaboración de un plan de mantenimiento preventivo basado en RCM para la excavadora 350G LC John Deere de la empresa CGM Rental* [Tesis de licenciatura, Universidad Continental]. Repositorio Institucional Continental. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/13643/8/IV_FIN_11_TE_Puma_Surco_2023.pdf
- Rojas, F., & Flores, J. (2023). Aplicación del modelo de gestión de mantenimiento (MGM) en SINEA Perú. *Revista Académica de Estudios Empresariales*, 12(2), 88–101. <https://revistas.ponteditora.org/index.php/rae/article/view/968>
- Smith, R. (2020). *Rules of thumb for maintenance and reliability engineers* (2nd ed.). Elsevier. <https://www.elsevier.com/books/rules-of-thumb-for-maintenance-and-reliability-engineers/smith/978-0-12-810051-6>
- Society for Maintenance & Reliability Professionals. (2018). *SMRP body of knowledge framework for maintenance and reliability best practices*. SMRP. <https://www.smrp.org>
- Tamayo Ruíz, Y. S., & Quiceno Maya, C. D. (2024). *Diseño de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad para el equipo termoformador de una empresa de*

procesamiento cárnico [Trabajo de grado, Universidad de Antioquia]. Biblioteca

Digital Universidad de Antioquia.

https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/39879/1/TamayoYeny_202

[4_RCMEquipoTermoformador.pdf](https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/39879/1/TamayoYeny_2024_RCMEquipoTermoformador.pdf)

Vázquez, M. A., & Ruiz, P. (2022). Evaluación de la gestión de activos a partir de la ISO

55000: Consideraciones teóricas y prácticas. *ResearchGate*.

[https://www.researchgate.net/publication/362659066_Evaluacion_de_la_Gestio](https://www.researchgate.net/publication/362659066_Evaluacion_de_la_Gestion_de_activos_a_partir_de_la_ISO_55_000_Consideraciones_teoricas)

[n_de_activos_a_partir_de_la_ISO_55_000_Consideraciones_teoricas](https://www.researchgate.net/publication/362659066_Evaluacion_de_la_Gestion_de_activos_a_partir_de_la_ISO_55_000_Consideraciones_teoricas)

Velásquez Cuevas, M. I. (2020). *Metodología de aplicación de la familia de normas ISO*

55000 a la gestión de activos intangibles [Tesis de maestría, Universidad de

Sevilla]. Biblioteca Universitaria de Sevilla.

<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/72133/fichero/TFM->

[2133%2BVEL%
C3%81SQUEZ%2BCUEVAS%2C%2BMAT%
C3%8DAS%2](https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/72133/fichero/TFM-2133%2BVEL%C3%81SQUEZ%2BCUEVAS%2C%2BMAT%C3%8DAS%2)

[BIGNACIO.pdf](https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/72133/fichero/TFM-2133%2BVEL%C3%81SQUEZ%2BCUEVAS%2C%2BMAT%C3%8DAS%2BIGNACIO.pdf)

Villagra, D., & Martínez, C. (2021). Mantenimiento industrial en máquinas herramientas

aplicando AMFE para la mejora del tiempo de respuesta. *Revista de Ingeniería*,

29(3), 66–74. <https://revistas.ubiobio.cl/index.php/RI/article/view/3923>

Wireman, T. (2019). *Developing performance indicators for managing maintenance*.

Industrial Press. [https://www.industrialpress.com/developing-performance-](https://www.industrialpress.com/developing-performance-indicators-for-managing-maintenance.html)

[indicators-for-managing-maintenance.html](https://www.industrialpress.com/developing-performance-indicators-for-managing-maintenance.html)

Womack, J. P., & Jones, D. T. (1996). *Lean thinking: Banish waste and create wealth in*

your corporation. Simon & Schuster. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-54834-0>

Woodhouse, J. (2001). *Asset management: Concepts & practices*. The Woodhouse

Partnership Ltd. <https://archive.org/details/assetmanagementc0000wood>