

Modelo de programa de mantenimiento preventivo compresor SV230 basado en la
metodología RCM para KRONOS ENERGY S.A.S.

Juan Manuel Rincón Saavedra

Trabajo de Grado para Optar al Título de Especialista en Gerencia de Mantenimiento

Director

Alexander Montaña Martínez

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Especialización en Gerencia de Mantenimiento

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A los profesores de la UIS, por inspirarme y guiarme en este camino de conocimiento. Su pasión por la enseñanza ha dejado una huella imborrable en mí.

A mi madre, por su amor incondicional y su apoyo constante en cada paso de mi vida. Sin su aliento y sacrificio, este logro no habría sido posible.

A mi querida esposa, Diana Paola Portillo, por tu amor, apoyo incondicional y paciencia en cada momento de este viaje. Gracias por ser mi inspiración y por creer en mí, incluso cuando yo dudaba. Este trabajo es un reflejo de nuestro esfuerzo compartido y de los sueños que construimos juntos.

Y finalmente a mis hijos, cada página de esta monografía es un reflejo de nuestro esfuerzo y sueños compartidos. Gracias por ser mi fuerza y mi motivación en cada paso de este camino.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que me han apoyado a lo largo de este proceso, en primer lugar, agradezco sinceramente a mi director de monografía, ing. Alexander Montaña Martínez, por su invaluable orientación y apoyo a lo largo de este proceso. Su experiencia y conocimientos han sido fundamentales para guiarme en cada etapa de este trabajo, y su confianza en mí me ha motivado a dar lo mejor de mí.

Agradezco a la compañía KRONOS ENERGY SAS ESP, por brindarme la oportunidad de desarrollar mis habilidades y por el apoyo que he recibido en el ámbito profesional. Su ambiente de trabajo y los recursos proporcionados han sido clave para la realización de este proyecto.

Agradezco al selecto grupo de profesores de la UIS, por su valiosa orientación y enseñanzas, que han enriquecido mi conocimiento y me han impulsado a superarme, a mis amigos y compañeros, por su apoyo y por compartir este viaje académico conmigo. Cada conversación y momento juntos han sido esenciales en este proceso,

Finalmente, agradezco a todos aquellos que, de alguna manera, han contribuido a mi formación y crecimiento personal. Sin ustedes, este trabajo no habría sido posible.

Resumen

La presente monografía propone el diseño de un modelo de mantenimiento preventivo para el compresor SAFE SV230, operado por la empresa KRONOS ENERGY S.A.S. en su estación de compresión PK-8, ubicada en Aguazul, Casanare. Esta empresa emergente en el sector energético colombiano enfrenta desafíos técnicos significativos debido a la falta de un sistema de mantenimiento adaptado a las condiciones específicas del entorno. Actualmente, se aplican planes de mantenimiento genéricos proporcionados por el fabricante, los cuales no consideran variables como calidad del gas, condiciones ambientales locales ni exigencias del servicio continuo.

Para abordar esta problemática, se emplea la metodología Reliability-Centered Maintenance (RCM), complementada con el análisis de modos y efectos de falla (FMEA), a fin de identificar los componentes más críticos del compresor y diseñar estrategias de intervención adecuadas. La propuesta busca optimizar la confiabilidad, reducir fallas inesperadas y garantizar la disponibilidad operativa del equipo.

Los resultados teóricos evidencian mejoras significativas en la eficiencia del mantenimiento, incluyendo la disminución de fallas, ahorro en costos de reparación y aumento de la vida útil del equipo. Esta investigación no solo responde a una necesidad técnica, sino que contribuye al cumplimiento de normativas nacionales y estándares internacionales, fortaleciendo la sostenibilidad operativa y energética de la organización.

Palabras Clave: mantenimiento preventivo, confiabilidad, RCM, compresores, análisis FMEA, energía, gas natural, activos críticos

Abstract

This monograph presents the design of a preventive maintenance program for the SAFE SV230 compressor operated by KRONOS ENERGY S.A.S. at its compression station PK-8, located in Aguazul, Casanare, Colombia. As an emerging company in the national energy sector, KRONOS ENERGY faces significant technical challenges due to the absence of a tailored maintenance strategy that considers the specific operating conditions. Currently, the company applies generic maintenance plans provided by the manufacturer, which do not address critical factors such as gas quality, environmental variables, or service continuity requirements.

To address this gap, the Reliability-Centered Maintenance (RCM) methodology is applied, complemented by Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), to identify critical subsystems and establish appropriate preventive and predictive strategies. The proposal aims to improve reliability, reduce unexpected failures, and ensure operational availability.

The theoretical results show substantial improvements in maintenance efficiency, including reduced failure rates, lower repair costs, and increased equipment lifespan. This study not only addresses a technical need but also aligns with national regulations and international standards, reinforcing the company's operational and energy sustainability.

Key Words: preventive maintenance, reliability, RCM, compressors, FMEA analysis, natural gas, energy, critical assets

6. Introducción

La ausencia de un modelo de mantenimiento basado en la metodología Reliability-Centered Maintenance (RCM) genera múltiples riesgos operativos y económicos para las empresas que dependen de equipos críticos en su funcionamiento, debido a que según Opocenska y Hammer, (2016) el RCM y las estrategias de mantenimiento suelen limitarse a prácticas correctivas o a planes genéricos proporcionados por los fabricantes, los cuales no consideran las condiciones específicas de operación ni las necesidades particulares del entorno. A partir de esta premisa se presenta a KRONOS ENERGY S.A.S. E.S.P., (figura 1) la cual es una empresa de reciente creación que opera en el sector energético colombiano, desempeñándose como proveedora de soluciones para la compresión y transporte virtual de gas natural comprimido (GNC). Esta actividad es crucial en regiones donde la ausencia de infraestructura de gasoductos limita el acceso al gas natural, afectando tanto a usuarios residenciales como a sectores industriales, en este contexto, la empresa ha optado por implementar tecnologías de última generación, entre las cuales destaca el compresor SAFE SV-230, un equipo diseñado para operar a presiones superiores a los 200 bar, asegurando la eficiencia en el proceso de compresión y el posterior transporte de GNC.

1. CONTEXTO Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

A pesar de contar con equipos tecnológicamente avanzados y un enfoque innovador en sus operaciones, KRONOS ENERGY S.A.S. enfrenta un desafío crucial relacionado con la gestión de mantenimiento de sus activos, actualmente, la compañía dispone únicamente del plan de mantenimiento crítico proporcionado por el fabricante del compresor SAFE SV-230. Si bien este plan cumple con las recomendaciones básicas para preservar el funcionamiento del equipo, se limita a intervenciones reactivas y generalizadas que no consideran las condiciones particulares de operación en la estación de compresión PK-8, ubicada en Aguazul, Casanare (figura 2), esta limitación supone un riesgo significativo para la sostenibilidad operativa y la eficiencia de los procesos, especialmente en un entorno de alta exigencia técnica como el que enfrenta la empresa. Figura 2. Ubicación de Kronos Energy

Fuente: Google Maps <https://maps.app.goo.gl/WTqGjHENEXd5zBUn6> Por otra parte, el mantenimiento crítico, aunque esencial, no es suficiente para garantizar la confiabilidad y disponibilidad óptima del compresor SAFE SV-230 a largo plazo, la ausencia de un modelo de mantenimiento preventivo adaptado a las condiciones específicas de KRONOS ENERGY S.A.S. genera incertidumbre en varios aspectos (Martínez, 2019), de acuerdo con Song et al., (2023) entre los puntos en contra de no poseer RCM es que no permite identificar y gestionar de manera proactiva los modos de falla más probables, lo que incrementa la probabilidad de interrupciones no planificadas. Segundo, limita la capacidad de la empresa para establecer intervalos de mantenimiento basados en datos operativos reales, lo que podría derivar en

intervenciones innecesarias o, por el contrario, en omisiones que comprometan la seguridad del equipo; por último, esta carencia incrementa el riesgo de incurrir en costos elevados asociados a reparaciones correctivas, pérdida de productividad y posibles incumplimientos contractuales con los clientes. En el caso específico del compresor SAFE SV-230 (figura 3), según Behavioral Safety, (2018) en su disposición de especificaciones relacionados con el compresor en cuestión, una de las posibles consecuencias de no contar con un plan de mantenimiento preventivo, es que el equipo, que opera en ciclos de alta presión para garantizar la reducción del volumen del gas natural, está compuesto por sistemas complejos, como el sistema de enfriamiento, el sistema de filtración y los reguladores de presión, cada uno de los cuales desempeña un papel crucial en la operación continua y segura del compresor. Sin una evaluación detallada de los modos de falla y sus efectos, es probable que los problemas potenciales pasen desapercibidos hasta que se manifiesten de manera crítica, lo que podría ocasionar interrupciones prolongadas en las operaciones y costos significativos para la empresa. Figura 3. Compresor SAFE SV230 *Fuente: foto tomada por el autor – 2024

**Nota: Proceso de compresión GNC estación pk-8 KRONOS ENERGY S.A.S. E.S.P Por ejemplo, el sistema de enfriamiento, compuesto por un chiller y un aeroenfriador, es responsable de mantener las temperaturas internas del compresor dentro de rangos seguros, en condiciones de operación extrema, la acumulación de calor puede superar los niveles recomendados, comprometiendo la eficiencia y durabilidad de los componentes internos. Sin un monitoreo constante y ajustes proactivos, el riesgo de sobrecalentamiento podría

desencadenar fallas catastróficas que impacten no solo al compresor, sino a todo el proceso de transporte de GNC, de manera similar, el sistema de filtración, diseñado para garantizar la pureza del gas, enfrenta desafíos constantes debido a la acumulación de partículas que incrementan el diferencial de presión (ΔP) en el sistema, forzando al motor y aumentando el desgaste prematuro de las partes móviles (da Silva et al., 2023). Adicionalmente, el entorno operativo de la estación de compresión PK8 introduce variables que no se contemplan en los planes de mantenimiento genéricos proporcionados por el fabricante, factores como las fluctuaciones en la calidad del gas natural suministrado, las condiciones climáticas locales y los requerimientos específicos de los clientes exigen un enfoque de mantenimiento más dinámico y adaptable, en este contexto, la implementación de un modelo de mantenimiento basado en la metodología ReliabilityCentered Maintenance (RCM) se presenta como una solución integral para abordar estas necesidades (Geisbush y Ariaratnam, 2023). Aunado a esto, Belli, (2018) en su estudio titulado propuesta de gestión de mantenimiento RCM en plantas de energía a gas natural, abordó la implementación de la metodología Reliability-Centered Maintenance (RCM) en una planta térmica de generación de energía de 3x2 MW ubicada en Pisco, Perú. Este trabajo tuvo como objetivo identificar y mitigar los modos de falla críticos en equipos esenciales, como generadores, turbinas de gas y sistemas auxiliares, mediante un enfoque estructurado basado en la confiabilidad. Para lograrlo, se empleó el análisis FMEA (Análisis de Modo y Efecto de Falla), el cual permitió evaluar las fallas más relevantes de los sistemas, sus causas y consecuencias, priorizando las acciones correctivas y

preventivas necesarias para garantizar la sostenibilidad operativa. Los resultados obtenidos evidenciaron el impacto positivo de la implementación del RCM. Se logró una reducción del 20% en los tiempos de inactividad no programada y una mejora del 15% en la disponibilidad general de los equipos, cuyos avances permitieron aumentar significativamente la eficiencia operativa de la planta y optimizar el uso de los recursos técnicos y financieros. Asimismo, las estrategias desarrolladas en este modelo sirvieron como referencia para implementar planes de mantenimiento similares en otras plantas de energía de la región, consolidando su aplicabilidad y validez en contextos similares. Ahora, en cuanto al aporte al presente documento, mostró las perspectivas y herramientas metodológicas en la aplicación del análisis FMEA como base para desarrollar un plan de mantenimiento preventivo adaptado a equipos críticos como el compresor SAFE SV-230. La experiencia documentada en la identificación de modos de falla y en la priorización de intervenciones preventivas ofrece un marco práctico para diseñar estrategias personalizadas que optimicen la confiabilidad y disponibilidad de los sistemas. Por otra parte, Vilchez, (2019) se enfocó en el desarrollo y aplicación de estrategias de mantenimiento basadas en la metodología Reliability-Centered Maintenance (RCM) en diversos equipos industriales, en su investigación, mostraron una reducción significativa en las fallas inesperadas, lo que aumentó la productividad de las operaciones y disminuyó los costos asociados a mantenimientos correctivos. Además, se destacaron los beneficios de integrar planes de mantenimiento preventivo y predictivo en los procesos industriales, resaltando la importancia de adaptar las estrategias a las necesidades específicas de cada

sistema. De esta forma el diseño de un modelo de mantenimiento preventivo basado en la metodología RCM para el compresor SAFE SV-230 en KRONOS ENERGY S.A.S. que pretende en este estudio, no solo responde a una necesidad operativa, sino que también se enmarca en un conjunto de normativas nacionales e internacionales que garantizan la seguridad, la sostenibilidad y la eficiencia en las operaciones industriales. Entre estas regulaciones destacan la Ley 142 de 1994, que regula la prestación de servicios públicos con énfasis en la continuidad y calidad (El Congreso de Colombia, 1994); la Ley 1715 de 2014, que promueve el uso eficiente de los recursos energéticos (Congreso de Colombia, 2014); y el Decreto 1073 de 2015, que establece los lineamientos técnicos y operativos del sector energético (Ministerio de Minas y Energía, 2015). A nivel técnico, la Norma ISO 55001 proporciona un marco para la gestión de activos, asegurando que los equipos críticos como el compresor SAFE SV-230 sean operados y mantenidos de manera eficiente (Iso, 2015).

Asimismo, estándares internacionales como los de la ASME y el API ofrecen directrices específicas para la operación y mantenimiento de sistemas de compresión, reforzando la pertinencia del enfoque adoptado en este proyecto. Desde una perspectiva teórica, este trabajo se fundamenta en los principios del Reliability-Centered Maintenance (RCM), una metodología que prioriza la confiabilidad de los equipos al identificar y analizar los modos de falla más críticos (Patil et al., 2022). El RCM se basa en el análisis FMEA (Failure Mode and Effects Analysis), que permite evaluar de manera sistemática las fallas potenciales, sus causas y sus consecuencias, proporcionando una base sólida para el diseño de estrategias de

mantenimiento preventivo y predictivo; la literatura sobre mantenimiento industrial evidencia que la implementación de RCM no solo reduce los tiempos de inactividad no planificada, sino que también optimiza los costos operativos, maximizando la vida útil de los activos y garantizando su sostenibilidad a largo plazo (Opocenska y Hammer, 2016; Patil et al., 2022).

En cuanto al marco conceptual, este trabajo adopta una definición específica de los conceptos clave relacionados con el mantenimiento preventivo y la metodología RCM, el mantenimiento preventivo se entiende como el conjunto de acciones planificadas que buscan minimizar la probabilidad de fallas a través de intervenciones programadas basadas en el estado y las condiciones de operación del equipo (Y. J. Yang et al., 2020). Por su parte, el RCM es un enfoque estructurado que prioriza el mantenimiento de los sistemas más críticos en función de su impacto en la operación global, permitiendo diseñar planes personalizados que se adaptan a las condiciones específicas de cada equipo y entorno operativo, así como herramientas como el FMEA y los indicadores de desempeño, como la disponibilidad y la confiabilidad, son fundamentales para implementar un modelo de mantenimiento eficiente y proactivo (X. Yang et al., 2022). En el caso específico de KRONOS ENERGY S.A.S., esta fundamentación cobra relevancia, dado que la empresa enfrenta retos propios de su reciente creación y de la falta de registros históricos de mantenimiento que puedan guiar sus estrategias actuales. En este contexto, la implementación de un modelo preventivo basado en RCM permitirá a la compañía establecer un sistema de gestión de mantenimiento integral, que no solo maximice la confiabilidad del compresor SAFE SV-230, sino que también sienta las bases para una

operación sostenible y replicable en futuras instalaciones. Por otro lado, el impacto práctico de este trabajo no se limita a la mejora interna de KRONOS ENERGY S.A.S, su alcance se extiende al sector energético regional, al proporcionar un ejemplo claro de cómo las empresas emergentes pueden adoptar metodologías avanzadas de mantenimiento para garantizar la sostenibilidad de sus operaciones. La optimización de los procesos de compresión y transporte virtual de gas natural contribuirá a satisfacer la creciente demanda de GNC en áreas remotas, fortaleciendo la competitividad del sector energético en Colombia y promoviendo el uso eficiente de recursos. De esta manera y continuando con el contexto narrativo, se busca entonces verificar la hipótesis y dar respuesta a la pregunta problema: Hipótesis: La implementación de un plan de mantenimiento preventivo basado en la metodología RCM permitirá reducir los riesgos asociados a fallas operativas, optimizar los costos de mantenimiento y aumentar la disponibilidad del compresor SAFE SV-230, garantizando una operación eficiente y sostenible en KRONOS ENERGY S.A.S.

Pregunta problema: ¿Es posible diseñar e implementar un modelo de mantenimiento preventivo basado en la metodología RCM que permita garantizar la disponibilidad del compresor SAFE SV-230, optimizar sus recursos y reducir los riesgos operativos en las condiciones específicas de KRONOS ENERGY S.A.S.?

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Diseñar un modelo de mantenimiento preventivo basado en la metodología Reliability-Centered Maintenance (RCM) para el compresor SAFE SV-230 de la estación de compresión PK-8 de KRONOS ENERGY S.A.S.

2.2 Objetivos Específicos

1. Identificar los modos de falla más críticos en los sistemas y subsistemas del compresor SAFE SV-230, mediante el análisis FMEA
2. Diseñar un plan de mantenimiento preventivo adaptado a las condiciones específicas de operación de KRONOS ENERGY S.A.S.
3. Evaluar la efectividad del modelo de mantenimiento preventivo propuesto, mediante indicadores de desempeño como la disponibilidad, confiabilidad y tiempos de inactividad

3. JUSTIFICACIÓN

En el entorno industrial contemporáneo, la eficiencia operativa y la continuidad de los procesos productivos son factores determinantes para la competitividad de las empresas. En este contexto, los compresores industriales, como el modelo SV230, desempeñan un papel esencial al proporcionar aire comprimido necesario para diversas operaciones en sectores como la energía, la manufactura y la petroquímica.

KRONOS ENERGY S.A.S., empresa dedicada a la prestación de servicios energéticos, ha identificado la necesidad de optimizar el mantenimiento de sus compresores SV230. La implementación de un programa de mantenimiento preventivo basado en la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) se presenta como una estrategia efectiva para mejorar la disponibilidad y confiabilidad de estos equipos críticos.

El mantenimiento preventivo es una práctica crucial en la gestión de compresores de aire, ya que permite detectar y corregir problemas potenciales antes de que se conviertan en fallas costosas, contribuyendo así a reducir los costos de reparación y a evitar tiempos de inactividad no planificados (DamCa, 2024). Además, un mantenimiento adecuado garantiza que el aire comprimido sea limpio y seco, algo crucial para procesos industriales que dependen de alta calidad (Hidralair, 2024).

La implementación de un programa de mantenimiento preventivo coherente garantiza que las máquinas funcionen cada día hasta alcanzar su vida útil completa, evitando tiempos de

inactividad y ahorrando dinero al evitar costosas reparaciones de emergencia (Quincy Compressor, 2023).

4. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

3.1 Fundamentos del mantenimiento industrial

El mantenimiento industrial es una actividad clave para preservar y prolongar la vida útil de los activos físicos dentro de las organizaciones. A través de distintas estrategias, el mantenimiento busca evitar fallas, mejorar la disponibilidad de los equipos y optimizar los recursos técnicos y financieros. Tradicionalmente, el mantenimiento se dividía en correctivo y preventivo; sin embargo, la evolución tecnológica y las exigencias de los entornos industriales modernos han dado lugar a metodologías más avanzadas, como el mantenimiento predictivo y el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM).

3.1.1 Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo consiste en la realización de acciones programadas, como inspecciones, ajustes, reemplazos de piezas o limpieza, con el objetivo de prevenir fallas o degradaciones en el rendimiento del equipo. Este tipo de mantenimiento se basa en el historial operativo, las recomendaciones del fabricante y, en algunos casos, en condiciones reales de funcionamiento. Según Yang et al. (2020), el mantenimiento preventivo es fundamental para mantener niveles aceptables de confiabilidad y evitar intervenciones reactivas costosas.

3.1.2 Mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM)

El RCM es una metodología que se enfoca en asegurar que los activos continúen cumpliendo sus funciones dentro del contexto operacional definido. Fue desarrollado originalmente por la industria aeronáutica en la década de 1960, pero su aplicabilidad se ha extendido a múltiples sectores industriales por su enfoque estructurado y analítico (Patil et al., 2022).

El proceso de RCM comienza con la identificación de funciones esenciales del equipo, seguido por el análisis de los posibles modos de falla, sus causas y consecuencias. A partir de esta evaluación, se definen políticas de mantenimiento que se alinean con el nivel de riesgo aceptable para la organización y la criticidad del activo.

De acuerdo con Opocenska y Hammer (2016), el RCM mejora la toma de decisiones al priorizar los recursos de mantenimiento hacia aquellos elementos que tienen mayor impacto en la operación y seguridad. Esto permite reducir costos operativos, incrementar la confiabilidad del sistema y maximizar la disponibilidad de los activos.

El Mantenimiento Basado en la Confiabilidad (RCM) es una metodología que se utiliza con la finalidad de otorgar a las diferentes empresas o entidades, políticas de mejoramiento de los diferentes recursos físicos con los que cuentan y así poder identificar las diferentes causas de las fallas. El mantenimiento basado en la confiabilidad tiene como objetivo reducir el costo de mantenimiento aplicando análisis de causa raíz para identificar que está causando las fallas y por medio de herramientas estadísticas poder predecir cuándo

fallarán los diferentes componentes que configuran un recurso físico. [4] El RCM es un método estructurado, deductivo y participativo que define la estrategia más apropiada para cada equipo actuando en su contexto operativo real. Una estrategia apropiada es un conjunto de tareas capaz de evitar que sucedan modos de fallas o reducir drásticamente sus consecuencias de manera eficiente. Esta técnica establece cuando una tarea es posible desde el punto de vista técnico y cuando es económicamente viable. Los planes de mantenimiento de cualquier máquina cuentan con una eficiencia y eficacia que pueden mejorar significativamente con la herramienta de decisión.[5] El seguimiento que se le da con el RCM a las máquinas, no solo busca resolver problemas de confiabilidad de éstas, sino que busca ir más a profundidad buscando un cambio cultural de lo que se piensa en el momento de realizar el mantenimiento y es introducir la idea de que el mantenimiento tiene como finalidad asegurar que las funciones que debe cumplir los equipos se sostengan en el tiempo, por lo tanto, de nada vale concentrarse en un equipo de forma aislada, sin analizar las funciones que debe cumplir dentro del contexto operativo en el que funciona. Lo que le interesa al RCM son las funciones de las máquinas.

Metodología para el Análisis RCM: Un Enfoque Integral Basado en la Colaboración y la Crítica Técnica

La implementación efectiva de la metodología RCM (Reliability-Centered Maintenance) depende, en gran medida, de la conformación de un equipo interdisciplinario que combine experiencia operativa, conocimiento técnico y habilidades estratégicas de

análisis. En esta línea, Alejandro Pistarelli (2013), en su *Manual de Mantenimiento, Ingeniería, Gestión y Organización*, establece que uno de los aspectos más determinantes para el éxito de un análisis RCM es la selección adecuada de las personas que integran el grupo de trabajo encargado de ejecutar dicho proceso.

De acuerdo con Pistarelli, este grupo debe estar conformado por individuos que tengan una relación directa o profunda con el funcionamiento de las máquinas o equipos que serán objeto del análisis. Este enfoque reconoce que el conocimiento técnico adquirido en el campo —es decir, en la operación y mantenimiento diario de los activos— es un insumo clave para identificar modos de falla, comprender las condiciones operativas reales y tomar decisiones fundamentadas sobre las estrategias de mantenimiento más adecuadas. Por ello, el grupo ideal está compuesto por operadores, técnicos de mantenimiento, supervisores, especialistas en lubricación, personal de producción, profesionales de seguridad industrial e incluso proveedores o fabricantes del equipo.

El criterio central para la selección de los miembros del grupo no debe ser exclusivamente la jerarquía o antigüedad dentro de la organización, sino su capacidad para aportar conocimientos prácticos, visión sistémica y disposición para colaborar. Pistarelli hace énfasis en que más valiosas que la antigüedad son las habilidades actitudinales: pensamiento abierto, flexibilidad, capacidad para trabajar en equipo y disposición al cambio. Un análisis RCM implica tomar decisiones que pueden desafiar prácticas arraigadas o formas

tradicionales de operar, por lo que es esencial contar con un equipo que no esté atado a estructuras mentales rígidas ni se resista al cuestionamiento constructivo.

En términos operativos, el equipo de análisis RCM suele estar conformado por entre seis y siete personas, aunque este número puede variar dependiendo de la complejidad del sistema que se analiza o del nivel de especialización requerido. Es habitual que en ciertas fases del proceso se incorporen temporalmente expertos externos o proveedores específicos que puedan aportar información técnica detallada sobre componentes críticos, nuevas tecnologías, materiales o procesos especializados.

Uno de los roles fundamentales dentro del equipo es el del facilitador del proceso RCM. Este individuo debe contar con una sólida formación en la metodología y tener experiencia práctica en su aplicación. Su función va más allá de dirigir reuniones: el facilitador es el garante de que cada paso del análisis se realice correctamente, asegurando que las decisiones tomadas se basen en criterios técnicos y no en opiniones infundadas o intuiciones no verificadas. Además, debe poseer habilidades interpersonales que le permitan generar consensos, estimular la participación activa de todos los miembros del equipo y manejar posibles conflictos que puedan surgir durante las discusiones.

Un aspecto particularmente interesante que señala Pistarelli es que muchas organizaciones optan por designar como facilitador a una persona externa al sistema o equipo que se va a analizar. Esta decisión, aunque pueda parecer contraintuitiva, tiene una justificación sólida: un facilitador externo no tiene prejuicios ni ideas preconcebidas sobre el

funcionamiento del sistema, lo que le permite adoptar una postura neutral y objetiva. En este sentido, su rol se asemeja al de un moderador que guía al grupo hacia una comprensión integral del problema sin influenciar directamente en el contenido técnico de las decisiones. Además, al no estar condicionado por la dinámica interna del equipo, puede equilibrar la participación y garantizar que incluso los miembros más introvertidos tengan voz.

Uno de los desafíos comunes en los análisis RCM es la disparidad en la participación de los miembros. En la práctica, es habitual que ciertas personas dominen la conversación, mientras que otras —por timidez, jerarquía o falta de experiencia— se mantengan en silencio. El facilitador debe estar atento a estas dinámicas y promover activamente la inclusión, asegurando que todas las perspectivas sean consideradas. Esto enriquece el análisis y permite construir una visión más completa y balanceada del sistema.

Una vez conformado el equipo y definidos los roles, se inicia la aplicación estructurada de la metodología RCM, que implica responder de manera ordenada a una serie de preguntas clave sobre el sistema, tales como: ¿cuáles son sus funciones principales y secundarias?, ¿de qué manera puede fallar el equipo?, ¿cuáles son las consecuencias de esas fallas?, ¿qué acciones pueden prevenirlas?, y ¿qué se debe hacer si no hay acciones preventivas efectivas? Cada una de estas preguntas debe ser abordada en sesiones de trabajo colaborativas, con el apoyo de datos históricos, documentación técnica, esquemas del sistema y herramientas de análisis como el FMECA.

Antes de aplicar la metodología, Pistarelli recomienda realizar un análisis de criticidad, que permita identificar y priorizar los activos más importantes desde el punto de vista del impacto operativo, económico, ambiental o de seguridad. Esta fase inicial resulta vital, ya que permite enfocar los esfuerzos del equipo en aquellos sistemas o componentes donde la aplicación del RCM puede generar mayor valor agregado. No todos los activos requieren un análisis exhaustivo bajo esta metodología; aplicarla a equipos de baja criticidad puede resultar ineficiente y costoso. Por tanto, el criterio de selección debe considerar tanto el riesgo como el costo asociado a las fallas potenciales.

En este punto, se destaca la necesidad de valorar económicamente las consecuencias de la falla. No basta con conocer que un equipo puede detenerse; es fundamental cuantificar cuánto cuesta esa detención en términos de pérdida de producción, afectación a la calidad, sobrecostos por reparaciones, multas contractuales o incluso riesgos legales o ambientales. Esta valoración económica es la que finalmente sustenta las decisiones sobre qué activos serán intervenidos mediante RCM y qué tipo de tareas se deben priorizar (inspección, reacondicionamiento, reemplazo, etc.).

En suma, la metodología para el análisis RCM propuesta por Pistarelli ofrece un enfoque robusto, basado en el trabajo colaborativo, el conocimiento técnico y la participación estructurada. La clave del éxito no reside únicamente en aplicar una secuencia de pasos, sino en conformar un equipo multidisciplinario, liderado por un facilitador competente, capaz de convertir el conocimiento operativo en decisiones estratégicas que garanticen la confiabilidad,

seguridad y eficiencia de los activos. La combinación de criterio técnico, pensamiento crítico y disciplina metodológica convierte al RCM en una herramienta poderosa para las organizaciones que buscan alinear su mantenimiento con los objetivos estratégicos del negocio.

ANÁLISIS DE CRITICIDAD.

Santiago García, en su libro “Organización y gestión integral de mantenimiento”, en las plantas los equipos no cuentan con la misma importancia en los procesos, es un hecho que unos equipos tienen más importancia que otros, como los recursos que maneja una empresa son limitados, se debe analizar cuáles son los equipos más críticos y se debe destinar más recursos a éstos y los equipos menos críticos un recurso menor para mantenimientos. Para diferenciar los niveles de criticidad que pueden tener los equipos de una planta tenemos los siguientes ítems:

- Equipos críticos: son aquellos cuya parada o mal funcionamiento afectan significativamente los resultados de la empresa.
- Equipos importantes: son aquellos equipos cuya parada, avería o mal funcionamiento afecta a la empresa, pero las consecuencias son asumibles.
- Equipos prescindibles: son aquellos con una incidencia escasa en los resultados.

Como mucho, supondrían una pequeña incomodidad, algún pequeño cambio de escasa trascendencia, o un pequeño coste adicional.

Los criterios antes mencionados se pueden relacionar desde el punto de vista de las matemáticas con una ecuación, para realizar esta ecuación a cada elemento se le otorga una puntuación con ayuda del equipo de trabajo, permitiendo nivelar y homologar criterios para 17 posteriormente establecer prioridades y así enfocar el trabajo de mantenimiento al equipo más crítico, con el objetivo de maximizar la vida del equipo y la rentabilidad. Por lo tanto, las ecuaciones que permite expresar la criticidad de una máquina, sistema o elemento es la siguiente: ***CRITICIDAD = FRECUENCIA X CONSECUENCIA (4) Consecuencia = (Impacto operacional x Flexibilidad operacional) + (Costo de mantenimiento) + (Impacto seguridad y medio ambiente) .***

Donde la definición de cada criterio es:

- Frecuencia de falla: número de veces que se repite un evento considerando como falla dentro de un periodo de tiempo.
- Impacto operacional: efectos causados en la producción cuando ocurre una falla.
- Flexibilidad operacional: se define como la posibilidad de realizar un cambio rápido para continuar con la producción sin incurrir en gastos o pérdidas considerables.
- Costos de mantenimiento: se reúnen el historial de los costos que implican la labor del mantenimiento, sin tomar en cuenta los costos de producción que se dejaron de obtener.
- Impacto en seguridad y medio ambiente: posibilidad de ocurrencia de eventos no deseados con daños a personas o al medio ambiente.

A continuación, se verá según el lugar, qué criterio podemos utilizar para clasificar cada uno de los equipos en algunas de las categorías anteriores. Se debe considerar la influencia que una anomalía tiene en cuatro aspectos: producción, calidad, mantenimiento y seguridad.

- Producción: cuando valoramos la influencia que un equipo tiene en la producción, la pregunta que se hace es ¿cómo afecta un posible fallo?, suponiendo que es una parada total de la instalación.

- Calidad: el equipo puede tener una influencia decisiva en la calidad del producto o servicio final, una influencia relativa que no acostumbre a ser problemático o una influencia nula.

- Mantenimiento: el equipo puede ser muy problemático, con averías de alto costo o frecuentes; o bien un equipo con un coste medio en mantenimiento. Incluso un equipo con muy bajo coste, que normalmente no da problemas.

- Seguridad y medio ambiente: un fallo en el equipo puede generar un accidente muy grave, bien para el medio ambiente o para las personas, y que además tenga cierta probabilidad de fallo; es posible también que un fallo del equipo pueda ocasionar un accidente, pero la probabilidad de que eso ocurra puede ser baja.

3.2 Herramientas de análisis en RCM

3.2.1 Análisis FMEA (Failure Mode and Effects Analysis)

El análisis FMEA es una herramienta utilizada para identificar y priorizar los modos de falla potenciales de un sistema, basándose en tres variables clave: severidad, ocurrencia y capacidad de detección. Esta metodología permite evaluar el impacto de cada falla y establecer acciones preventivas o correctivas antes de que ocurran eventos críticos (Tractian, 2025).

Aplicar FMEA al compresor SV230 implica descomponer sus subsistemas (enfriamiento, filtración, regulación de presión, etc.) y analizar cómo podrían fallar, qué consecuencias tendrían esas fallas en la operación y qué tan probable es que ocurran. La combinación de estos factores genera un Índice de Prioridad de Riesgo (RPN, por sus siglas en inglés), que guía la priorización de intervenciones de mantenimiento.

3.2.2 Indicadores de desempeño: confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad

En el contexto del mantenimiento, es crucial medir el desempeño de los activos para evaluar la efectividad de las estrategias implementadas. Tres indicadores fundamentales en este proceso son:

Confiabilidad (R): Es la probabilidad de que un equipo funcione sin fallas durante un intervalo de tiempo específico bajo condiciones determinadas. Una alta confiabilidad reduce los tiempos de inactividad y las intervenciones inesperadas (Yang et al., 2022).

Disponibilidad (A): Es la proporción del tiempo en que el equipo está disponible para operar respecto al tiempo total. Se calcula considerando tanto el tiempo operativo como los tiempos de reparación y mantenimiento.

Mantenibilidad (M): Representa la facilidad con la que se puede reparar un sistema después de una falla. Mejores prácticas de mantenibilidad incluyen diseños accesibles, documentación técnica adecuada y procedimientos estandarizados.

Estos indicadores se integran en la gestión del mantenimiento como herramientas de control y mejora continua, alineándose con normas como la ISO 55001 de gestión de activos.

3.3 Norma ISO 55001 y gestión de activos

La norma internacional ISO 55001 proporciona un marco de referencia para establecer, implementar, mantener y mejorar un sistema de gestión de activos. Esta norma promueve la optimización del ciclo de vida de los activos físicos mediante una gestión estratégica y técnica alineada con los objetivos organizacionales (ISO, 2015).

Para KRONOS ENERGY S.A.S., implementar un modelo de mantenimiento que esté en consonancia con ISO 55001 implica no solo reducir el riesgo de fallas, sino también mejorar la toma de decisiones sobre inversiones, aumentar la transparencia de los procesos y garantizar la sostenibilidad operativa en el largo plazo.

3.4 Importancia del contexto operativo

Uno de los principios fundamentales del RCM es su enfoque contextual. Cada equipo debe ser evaluado según sus condiciones específicas de operación. En el caso de la estación de compresión PK-8 de KRONOS ENERGY S.A.S., factores como la calidad del gas, la ubicación geográfica, la temperatura ambiente y las exigencias de producción deben ser considerados en el diseño del plan de mantenimiento. Ignorar estas variables conduciría a estrategias genéricas que podrían resultar ineficientes o incluso contraproducentes (Geisbush & Ariaratnam, 2023).

El mantenimiento basado en condición y la incorporación de datos operativos en tiempo real representan un avance en este sentido, ya que permiten adaptar los planes de intervención a las necesidades reales del equipo, en lugar de seguir un calendario fijo sin considerar el estado del activo.

3.5. Estado del arte

Evolución del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)

Desde la Revolución Industrial en el siglo XVIII, las máquinas han representado un pilar fundamental en el desarrollo humano, al facilitar procesos productivos a gran escala que sobrepasan las capacidades físicas del ser humano. Sin embargo, la ausencia de un mantenimiento adecuado en estos equipos ha derivado en fallos significativos, ocasionando pérdidas económicas, impactos ambientales severos e incluso tragedias humanas. Ejemplos emblemáticos de estas consecuencias son los desastres de Chernóbil, Bhopal y Piper Alpha. (Moubray, 1997)

Durante la década de 1950, la industria aeronáutica registraba cerca de 60 accidentes por cada millón de despegues, muchos de ellos con víctimas mortales. Esta situación motivó la evolución progresiva del enfoque RCM, el cual ha transitado por diversas etapas a lo largo del tiempo.

La primera fase del RCM surgió entre 1960 y 1970, como una respuesta para mejorar los niveles de rendimiento exigidos por los usuarios en activos físicos específicos. Este enfoque permitió abordar proactivamente los efectos de las fallas, desarrollando estrategias que anticiparan y minimizaran sus consecuencias. (Moubray, 1997)

Posteriormente, a mediados de los años 70, el gobierno de Estados Unidos solicitó un informe a la industria aeronáutica sobre una nueva perspectiva en el mantenimiento de aeronaves. Este documento, titulado *“Reliability Centered Maintenance”*, fue publicado en

1978 por Stanley Nowlan y Howard Heap, y se consolidó como un referente clave en la gestión del mantenimiento a lo largo del tiempo.

La segunda etapa, conocida como RCM2, comenzó en 1991, impulsada por el interés de sectores como la minería y la manufactura en reducir los altos costos asociados a mantenimientos correctivos no programados. Este enfoque buscaba también garantizar la eficiencia operativa de tecnologías avanzadas. John Moubray y su equipo lideraron la expansión y aplicación del RCM en más de 40 países, extendiendo su implementación a múltiples áreas productivas. (Domínguez, 2012)

La tercera etapa se consolidó en 1996, cuando la Sociedad de Ingenieros de Automoción (SAE, por sus siglas en inglés) reconoció la necesidad de establecer una norma técnica. Con la colaboración de actores clave de la industria, como el sector aeronáutico, naval y militar, se desarrolló la norma SAE JA1011, aprobada en 1999 bajo el título *“Criterios de Evaluación para Procesos de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)”*.

La intervención más reciente por parte de la SAE ocurrió en 2002, con la publicación de la norma **SAE JA1012**, que sirve como una guía práctica para implementar adecuadamente los lineamientos del mantenimiento centrado en confiabilidad.

A lo largo del tiempo, el crecimiento del sector industrial ha estado íntimamente relacionado con la evolución de las prácticas de mantenimiento. Si bien la tecnología ha avanzado notablemente, muchas empresas aún enfrentan dificultades para adoptar un

mantenimiento efectivo, debido a restricciones económicas o técnicas. En este contexto, el RCM se ha convertido en una herramienta clave para mitigar estos desafíos, al permitir la identificación de acciones estratégicas que aseguren la confiabilidad operativa de los activos físicos.

Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (Reliability Centered Maintenance - RCM)

El Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad es tanto una filosofía como una metodología que permite identificar las acciones necesarias para asegurar que un activo físico continúe cumpliendo su función de acuerdo con lo que el usuario espera, dentro de sus parámetros operativos establecidos (Moubray, 1997).

Este enfoque posibilita mantener los niveles de calidad requeridos tanto en los servicios como en los productos ofrecidos (Parra, 2012).

El propósito esencial del RCM es preservar la confiabilidad inherente del sistema, garantizando que funcione de acuerdo con los estándares definidos. Es importante aclarar que una falla no solo se presenta cuando el equipo se detiene por completo, sino también cuando no logra producir el resultado deseado o satisfacer las necesidades del usuario.

La finalidad del análisis RCM es diseñar un programa de mantenimiento preventivo que sea técnica y económicamente viable (Montaño, 2016).

Actualmente, la norma SAE JA1011 establece los requerimientos mínimos para que una metodología pueda ser reconocida como RCM.

Se reconoce que no existe otro enfoque técnico tan eficaz como el RCM para asegurar el rendimiento continuo de diversos activos físicos.

Principios del RCM

De acuerdo con Montaño (2016), los fundamentos del RCM incluyen:

- Enfocarse en la preservación de las funciones esenciales del sistema.
- Detectar los modos de falla que comprometan dichas funciones.
- Jerarquizar las funciones según su importancia.
- Definir tareas que sean tanto aplicables como eficaces.

Prioridades del RCM

El RCM prioriza tres aspectos fundamentales:

- Seguridad y salud: Busca proteger a las personas y evitar accidentes.
- Impacto ambiental: Se enfoca en prevenir la contaminación.
- Operatividad y eficiencia económica: Asegura la continuidad de las operaciones con costos optimizados.

3.5.1. Metodología del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad

La metodología RCM plantea siete preguntas clave que deben responderse secuencialmente para cumplir con los estándares establecidos por la norma SAE JA1011.

Tabla 1.1.1: Las 7 preguntas del RCM (Moubray, 1997)

ÍTEM	PREGUNTA
1	¿Cuáles son las funciones y estándares de desempeño del activo en su contexto actual?
2	¿De qué manera el activo deja de cumplir dichas funciones?
3	¿Qué origina cada una de las fallas funcionales?
4	¿Qué sucede cuando se presenta cada tipo de falla?
5	¿Qué consecuencias tiene cada falla?
6	¿Qué acciones se pueden realizar para anticipar o prevenir cada tipo de falla?
7	¿Qué hacer si no se encuentra una acción adecuada?

Funciones y estándares de desempeño

Para aplicar eficazmente el mantenimiento centrado en la confiabilidad, es imprescindible primero definir dos aspectos esenciales:

1. Especificar claramente cuál es la función que debe cumplir el activo según el requerimiento del usuario.
2. Verificar que el activo esté disponible y en condiciones para ejecutar dicha función.

Estas funciones se clasifican en:

1.3.1.1 Funciones primarias

Son las funciones principales por las cuales el activo fue adquirido. Incluyen características como el rendimiento, la velocidad, la capacidad de almacenamiento, la calidad del producto o servicio y la atención al cliente.

1.3.1.2 Funciones secundarias

Estas funciones representan expectativas complementarias del usuario, relacionadas con aspectos como la seguridad, el confort, la eficiencia económica y la integridad del sistema.

Fallos funcionales

Cuando un activo no opera bajo sus condiciones normales o deja de cumplir adecuadamente su función, se considera que ha fallado. Estas fallas son normalmente detectadas por los operadores del equipo.

Para una gestión adecuada, el RCM sugiere:

5. Identificar las condiciones que llevaron al equipo al estado de fallo.
6. Establecer las circunstancias que favorecieron dicha falla.

Un fallo funcional ocurre cuando el elemento deja de cumplir eficazmente la función para la cual fue diseñado, incluso si continúa operando por debajo del rendimiento esperado.

Modos de fallo funcional

El modo de falla se refiere a las causas que llevaron a un activo a fallar. Representa los factores concretos que produjeron la pérdida de funcionalidad del elemento.

Causas de fallo

Las causas de fallo se entienden como el origen o raíz que desencadena el mal funcionamiento del activo. Para identificarlas, se puede formular la siguiente pregunta:

¿Qué factores pudieron haber originado que el componente falle?

La respuesta permite rastrear las causas a lo largo del historial de mantenimiento.

Efectos de fallo

Según Moubray (1991), los efectos de una falla explican las consecuencias inmediatas cuando se presenta un modo de fallo. Estos deben incluir información detallada que permita evaluar el impacto de dicha falla.

Consecuencias de fallo

Las fallas pueden generar efectos negativos en diversos ámbitos, desde la operación del equipo hasta la seguridad del personal y el impacto ambiental. Estas consecuencias derivan en pérdidas económicas y de tiempo.

El RCM busca minimizar los efectos de estas fallas de forma eficiente, siendo esta una de sus características más relevantes.

Las consecuencias se agrupan en cuatro tipos:

- Fallas ocultas: No generan un impacto inmediato, pero si no se detectan a tiempo, pueden desencadenar fallas múltiples de alto riesgo. Generalmente están vinculadas a sistemas de protección que no son infalibles.
- Fallas medioambientales y de seguridad: Representan riesgos serios como incendios, contaminación, o incluso la muerte de los trabajadores. Además, pueden implicar violaciones a normativas ambientales.
- Fallas operativas: Afectan directamente la operatividad del equipo, generando paros inesperados y disminuyendo la eficiencia del servicio o producción.
- Fallas no operativas: Relacionadas con gastos derivados de mantenimientos correctivos imprevistos que no afectan directamente la operación, pero sí generan sobrecostos.

El RCM utiliza esta clasificación como base para tomar decisiones estratégicas en la elaboración de planes de mantenimiento, siempre priorizando la seguridad del personal, el cuidado ambiental y el cumplimiento del servicio.

Diagrama de Pareto

El diagrama de Pareto es una herramienta gráfica utilizada para organizar y visualizar, en orden descendente, las principales causas que generan fallos en un sistema o componente. Este recurso se basa en el principio del 80-20, el cual establece que un pequeño número de causas, aproximadamente el 20%, es responsable de la mayoría de los efectos o problemas, en torno al 80%. Por tanto, su propósito esencial es identificar ese grupo reducido de causas que generan el mayor impacto, permitiendo enfocar los esfuerzos en acciones correctivas específicas y efectivas.

Este tipo de análisis se apoya en tres conceptos fundamentales: la mejora continua, la priorización de los problemas y el monitoreo de los cambios en el comportamiento de los elementos o procesos.

Para llevar a cabo un análisis eficiente mediante un diagrama de Pareto, se deben seguir los siguientes pasos:

- a. Definir claramente el problema que se pretende estudiar.
- b. Identificar los distintos factores o causas que originan dicho problema.
- c. Medir o cuantificar la magnitud de cada uno de esos factores.
- d. Ordenar los factores identificados en orden decreciente, según su impacto o frecuencia.
- e. Calcular la suma total de las magnitudes obtenidas.
- f. Determinar el porcentaje individual y acumulado que representa cada causa en

relación con el total.

g. Construir el gráfico, ubicando los factores o causas en el eje horizontal (eje X), mientras que en el eje vertical izquierdo (eje Y) se representan las frecuencias absolutas o valores de magnitud, y en el eje vertical derecho los porcentajes acumulados.

h. Cada barra vertical del gráfico simboliza la magnitud individual de un factor.

i. El porcentaje acumulado se representa mediante una curva superpuesta, construida de acuerdo al eje Y derecho.

j. Incluir notas o información complementaria junto al gráfico si se requiere, con el objetivo de ampliar la interpretación del análisis.

Gracias a este enfoque, el diagrama de Pareto se convierte en una herramienta esencial para la toma de decisiones dentro de un sistema de mantenimiento centrado en la confiabilidad, ya que permite detectar con precisión los elementos que requieren atención prioritaria y orientar los recursos hacia las áreas que generarán mayor beneficio operativo y técnico.

Criticidad y modos de falla

El análisis de criticidad permite establecer prioridades dentro de los procesos operativos, facilitando una toma de decisiones más efectiva al identificar los elementos cuya falla tendría un mayor impacto. La criticidad se calcula mediante la siguiente expresión matemática:

(1.1)

$$\text{criticidad} = \text{frecuencia} \times \text{consecuencia}$$

Esta fórmula permite cuantificar el nivel de riesgo asociado a cada activo o componente, priorizando así las acciones correctivas o preventivas según su impacto potencial.

De acuerdo con la norma MIL-STD 1629 (Hansen, 1998), existen dos métodos principales para evaluar las fallas:

Método 101: de enfoque cualitativo, evalúa aspectos como la severidad, la detectabilidad, la mantenibilidad y la seguridad del sistema.

Método 102: de enfoque cuantitativo, determina la criticidad a través del cálculo del modo de falla, representado como C_m , según la siguiente fórmula:

(1.2)

$$C_m = \beta \times \alpha \times \lambda \times t$$

Donde:

β = Probabilidad condicional de que ocurra el fallo durante la misión.

α = Proporción del modo de falla.

λ = Tasa de falla del componente.

t = Tiempo operativo del componente.

Adicionalmente, se utiliza el Número de Prioridad de Riesgo (NPR), una herramienta complementaria que considera tres variables fundamentales:

(1.3)

$$\text{NPR} = S \times F \times D$$

Donde:

S = Severidad del fallo.

F = Frecuencia del fallo.

D = Detectabilidad o probabilidad de que el fallo no se detecte a tiempo.

Este análisis permite asignar un nivel de criticidad a cada componente y seleccionar el tipo de mantenimiento adecuado, considerando el riesgo que representa para el sistema. En este caso de estudio, se adopta el enfoque del Número de Prioridad de Riesgo, al ser el más adecuado y práctico para la gestión de fallos en los activos analizados.

1.6 Tareas proactivas

Las tareas proactivas constituyen acciones clave para reducir y controlar la probabilidad de fallas, aunque no eliminan totalmente la posibilidad de que ocurran. Su principal objetivo es evitar que el activo alcance un estado de falla funcional o total, garantizando la continuidad operativa del sistema.

En el marco del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM), se identifican cuatro tipos fundamentales de tareas proactivas, las cuales se aplican de acuerdo con las condiciones del activo y el contexto operativo:

a. Inspecciones programadas para detectar fallas potenciales

Estas inspecciones buscan identificar fallas incipientes o condiciones anormales que podrían derivar en una falla funcional. Se trata de tareas realizadas por personal especializado, mediante técnicas como inspecciones visuales, pruebas no destructivas, análisis de vibraciones, entre otras.

b. Reacondicionamiento cíclico

Consiste en intervenir el equipo antes de que finalice su ciclo de vida útil, con el fin de restaurar sus condiciones iniciales mediante reparaciones, ajustes o reemplazo de componentes menores. Esta tarea prolonga la vida útil y mejora el rendimiento del activo.

c. Sustitución cíclica

Implica reemplazar ciertos componentes antes de que lleguen al final de su vida útil, con base en datos históricos o estadísticas de fallas. Esta estrategia es útil cuando se conocen con precisión los intervalos de fallo de los componentes críticos.

d. Inspecciones funcionales de elementos ocultos

Estas tareas se enfocan en equipos de seguridad o funciones ocultas que no operan de manera continua, pero cuya disponibilidad debe garantizarse en caso de emergencia. Se

programan pruebas periódicas para verificar su operatividad, ya que una falla en estos sistemas podría tener consecuencias catastróficas.

Las tres primeras tareas están diseñadas para fallas individuales y detectables, mientras que la última se orienta a prevenir fallas múltiples o encadenadas, especialmente en sistemas de seguridad.

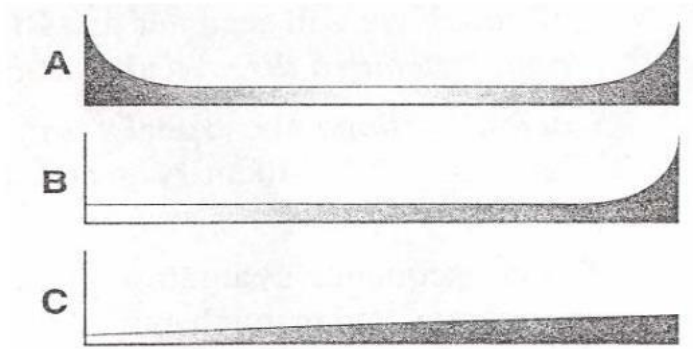
El diseño de un plan de mantenimiento confiable requiere determinar qué tipo de tarea es más adecuada para cada equipo, en función de su importancia operacional, criticidad y modo de falla.

1.7 Patrones de falla del RCM

En la visión tradicional del mantenimiento, se asumía que la mayoría de los equipos fallaban progresivamente con el envejecimiento. Sin embargo, estudios más recientes han demostrado que esta idea es solo parcialmente cierta. A partir de análisis aplicados en múltiples industrias, se han identificado seis patrones típicos de comportamiento frente a las fallas, los cuales son esenciales para el enfoque RCM.

Como se observa en la Figura 3, los patrones A, B y C representan aquellos casos donde la probabilidad de falla aumenta con el tiempo. Este comportamiento es común en elementos sometidos a desgaste físico o en contacto constante con productos corrosivos o abrasivos. Algunos ejemplos incluyen rodamientos, sellos, válvulas y componentes hidráulicos.

Figura 3: Patrones de falla



Fuente: (Moubray, 1997)

Patrones D, E y F, interpretan que la probabilidad de falla no se incrementa con el tiempo, estos están presentes en elementos más complejos: motores eléctricos, componentes electrónicos, neumática.

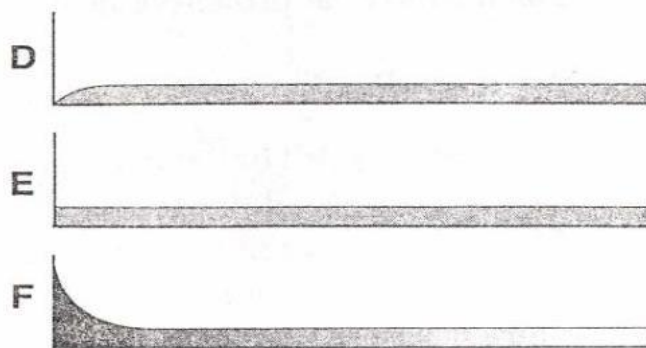


Figura 1.4: Patrones de falla D, E, F.

Fuente: (Moubray, 1997)

Como menciona (Morales, 2005) “Para la mayoría de los fallos existenciales, su probabilidad de fallo NO se incrementa con el tiempo”-

Planificación del proceso RCM

Para generar una correcta implementación de un proceso de RCM en una institución pública o privada se debe tomar en cuenta una serie de indicaciones o pasos a seguir. El primer paso es enfocarse y decidir qué sistemas y subsistemas van a entrar directamente en el plan de mantenimiento basado en RCM.

Para lograr el objetivo y la correcta aplicación de una determinada estrategia se debe elaborar un plan eficiente. Las claves del proceso de planificación según: (Duffuaa, 2007)

Determinar y decidir los sistemas que serán intervenidos por la metodología RCM, los cuáles obtendrán determinadas ventajas técnicas de mantenimiento.

Analizar los recursos totales que se necesitan para poder aplicar el proceso RCM.

Un correcto y eficiente rendimiento de las máquinas intervenidas debe justificar la inversión e implementación de la herramienta de mantenimiento centrado en fiabilidad.

Garantizar el correcto contexto operacional del sistema.

METODOLOGÍA

La metodología de este trabajo está diseñada para abordar de manera sistemática el diseño de un modelo de mantenimiento preventivo basado en la metodología RCM, garantizando que los resultados sean replicables en contextos similares. El proceso se llevará a cabo en tres etapas principales: recolección y análisis de información, diseño del plan de mantenimiento y propuesta para la implementación del modelo diseñado.

4.1. Recolección y análisis de información En esta etapa se recopilará información técnica y operativa relacionada con el compresor SAFE SV-230, proporcionada por el departamento de Recolección y análisis de información Diseño del plan de mantenimiento Propuesta para la implementación del modelo diseñado mantenimiento de la empresa, aunque la empresa y el equipo son nuevos, se tomará como referencia:

- Manuales del fabricante y plan de mantenimiento crítico existente.
- Registros operativos, reportes técnicos y condiciones de operación específicas del compresor.
- Información complementaria de estudios previos aplicados en equipos similares. La información recolectada será procesada y analizada utilizando métodos estadísticos, como ANOVA (Análisis de Varianza), con el fin de identificar tendencias y

comportamientos promedio en parámetros de operación y modos de falla críticos. Esta etapa tendrá una duración aproximada de dos meses.

4.2. Diseño del plan de mantenimiento Una vez procesada la información, se procederá al diseño del plan de mantenimiento preventivo utilizando el método FMECA, el análisis permitirá identificar los modos de falla más críticos en los sistemas y subsistemas del compresor SAFE SV-230, evaluando su impacto en la operación y priorizando las acciones preventivas necesarias. El plan de mantenimiento preventivo incluirá:

- Frecuencias de mantenimiento para cada sistema crítico, determinadas con base en el análisis FMECA.
- Estrategias específicas de intervención (preventivas y predictivas) para minimizar los riesgos de fallas inesperadas.
- Indicadores de desempeño, como la disponibilidad y confiabilidad, para monitorear el éxito del plan. El diseño del plan incluirá:
 - Un cronograma propuesto de actividades de mantenimiento.
 - Indicadores teóricos de desempeño (disponibilidad y confiabilidad) proyectados para validar la efectividad del modelo diseñado.

4.3. Validación teórica del modelo propuesto: En esta etapa, se validará el modelo de mantenimiento preventivo diseñado a través de simulaciones y análisis comparativos con

datos de referencia, se proyectarán los resultados esperados utilizando indicadores de desempeño como:

- Disponibilidad teórica del equipo: capacidad proyectada del compresor para operar de forma continua.
- Reducción de riesgos operativos: evaluación de las mejoras teóricas en la prevención de fallas críticas.
- Optimización de recursos: comparación de costos teóricos asociados al mantenimiento preventivo frente al mantenimiento crítico existente. La validación permitirá determinar la viabilidad técnica y económica del modelo propuesto, asegurando que el diseño sea aplicable y replicable en otras operaciones similares dentro del sector energético.

5.5 Análisis de datos

Los datos recopilados se analizan utilizando herramientas estadísticas y de gestión de mantenimiento, como diagramas de Pareto, análisis de tendencias y cálculos de indicadores clave de desempeño (KPI). Este análisis permite identificar patrones de falla, evaluar la efectividad de las estrategias de mantenimiento y tomar decisiones informadas para la mejora continua.

Análisis de resultados

6.1 Resultados del análisis de modos y efectos de falla (FMECA)

El análisis FMECA permite identificar los modos de falla, sus causas, efectos y niveles de criticidad por subsistema, facilitando la priorización de acciones de mantenimiento preventivo y predictivo. A continuación, se presenta el desarrollo del FMECA aplicado a los principales subsistemas del compresor SAFE SV230, con base en criterios de severidad (S), frecuencia de ocurrencia (F) y detección (D), para el cálculo del Número de Prioridad de Riesgo ($NPR = S \times F \times D$).

6.X.1 Subsistema: Sistema de Enfriamiento

				Acción
1	Modo			n
1	de	Causa	Efecto	Recomenda
6	Falla			da
1				
	Obstrucción	Acumulación	Sobrecalentamiento del compresor	Limpiar periódicamente y análisis

					Acció
]	Modo			]	n
1	de	Caus	Efecto	]	Reco
6	Falla	a		]	menda
1					da
	dor de	dad,			s del
	calor	agua			agua
		dura			
			Pérdida		Inspe
	Fuga	Corr	de		ción
	en	osión	refrigera		visual
	tuberí	,	n		y
1	a de	vibra	reducció	2	prueba
	refrige	ción	n de	(	s de
	ración	exces	capacida		presió
		iva	d de		n

					Acció
]	Modo			]	n
1	de	Caus	Efecto	]	Reco
6	Falla	a		]	menda
1					da
			enfriamie		trimes
			nto		trales
		Falla			Mante
	Fallo	eléctr	Incremen		nimie
	del	ica,	to de		nto
	ventil	desga	temperat	]	preven
	ador	ste	ura,	]	tivo y
;	del	de	disparo	]	verific
	aeroen	roda	del	]	ación
	friado	mient	sistema		mensu
	r	os			al del
					motor

					Acció
]	Modo			]	n
1	de	Caus	Efecto	]	Reco
6	Falla	a		]	menda
1					da
	Senso				Calibr
	r de	Deriv			ación
	tempe	a	Lecturas		semest
	ratura	electr	erróneas,	:	ral y
4	fuera	ónica	falta de	:	limpie
	de	o	alarma	(	za de
	calibr	sucie			sensor
	ación	dad			es

Nota; Elaboración Propia, 2025.

6.X.2 Subsistema: Sistema de Lubricación

Í	Modo	Caus	Efect	N	Acció
t	de	a	o	P	n
e	Falla			R	Recom
r					endada
			Redu		
		Desg	cción		Inspec
		aste	de		ción
	Fuga	de	lubric	2	seman
5	de	junta	ación	7	al y
	aceite	s,	,	0	cambi
		vibra	desga		o de
		cion	ste		empa
		es	acele		ues
			rado		

Í					Acció
t	Modo	Caus	Efect	N	n
e	de	a	o	P	Recom
r	Falla			F	endada
			Pérdi		
			da de		
			propi		
		Ingre	edade		Muestr
		so de	s del		eo y
	Conta	partí	lubric	1	análisi
€	minaci	culas	ante,	6	s
	ón del	o	daños	0	bimen
	aceite	hum	en		sual de
		edad	roda		aceite
			mient		
			os		

Í					Acció
t	Modo	Caus	Efect	N	n
e	de	a	o	P	Recom
r	Falla			F	endada
			Paro		Revisi
		Desg	del		ón
	Fallo	aste	siste		trimest
	en	inter	ma	9	ral y
7	bomba	no,	por	0	prueba
	de	bloq	baja		s de
	aceite	ueo	presi		presió
			ón		n
	Filtro	Inter	Aum		Cambi
	de	valo	ento	1	o
8	aceite	de	de	1	progra
	obstrui	cam	ΔP ,	2	mado
	do	bio	cavit		de

Í					Acció
t	Modo	Caus	Efect	N	n
e	de	a	o	P	Recom
r	Falla			F	endada
		exte	ación		filtro y
		ndid	en la		monit
		o	bomb		oreo
			a		de ΔP

Nota; Elaboración Propia, 2025.

6.X.3 Subsistema: Sistema de Filtración de Gas

					Acción
1	Modo			1	n
1	de	Causa	Efecto	1	Reco
6	Falla			1	mend
1					ada
			Caída		Camb
			de		io
	Obstr	Acumul	de		cada
	ucción	ación	presión,	1	500 h
9	del	de	pérdid	9	y
	filtro	partícul	a de	2	monit
	de gas	as	eficien		oreo
			cia		de ΔP
	Fuga		Périd		Inspe
1	en	Sellos	a de	9	cción
6	carcas	dañados	presión	6	y

				Acció
l	Modo			n
t	de	Causa	Efecto	Reco
e	Falla			mend
l				ada
	a del		n,	prueb
	filtro		ingres	as de
			o de	estan
			aire	queid
				ad
				mens
				uales
	Colap	Presión	Paso	Uso
	so del	diferenc	de	de
	medio	ial	conta	filtros
	filtran	excesiv	minan	de
	te	a	tes,	calida

					Acció
l	Modo			l	n
t	de	Causa	Efecto	l	Reco
e	Falla			l	mend
1					ada
			daño		d y
			intern		seguí
			o		mient
					o de
					presio
					nes
	Ausen	Descon	Alto		Capa
	cia de	ocimien	riesgo	l	citaci
	mante	to o	de	(	ón al
	nimie	falta de	daño	(	perso
	nto	plan	al		nal y
					check

					Acció
l	Modo			l	n
t	de	Causa	Efecto	l	Reco
6	Falla			l	mend
1					ada
			compr		list
			esor		sema
					nal

6.X.4 Subsistema: Sistema de Compresión Mecánica

					Acció
Í					n
t	Modo	Cau	Efecto	1	Reco
e	de Falla	sa		F	menda
r				F	da
					Inspe
		Fric			ción
		ción	Péridid		progra
	Desgast	cont	a de		mada
1	e de	inua,	compr	1	y
3	pistones	mala	esión,	3	análisi
	o anillos	lubri	inefici	5	s de
		caci	encia		rendi
		ón			mient
					o

					Acció
Í					n
t	Modo	Cau	Efecto	F	Reco
e	de Falla	sa		F	menda
r					da
			Pérdid		Inspec
	Falla en	Fati	a de		ción
1	válvulas	ga,	presió	1	trimes
4	de	suci	n o	2	tral y
	succión/	edad	sobree	0	limpie
	descarga		sfuerz		za
			o		
		Vibr	Daño		Alinea
1	Desaline	ació	a	1	ción
5	ación de	n,	cojine	0	láser
	ejes	mon	tes,	8	anual
		taje	pérdid		y

					Acció
Í					n
t	Modo	Cau	Efecto	†	Reco
e	de Falla	sa		F	menda
r				F	da
		inco	a de		análisi
		rrect	eficie		s de
		o	ncia		vibrac
					iones
		Gol			Revisi
		pes	Indica		ón
	Ruidos	mec	dor de		seman
l	anómalo	ánic	falla	9	al por
€	s en el	os,	inmin	6	sonido
	cabezal	desa	ente		y
		juste			análisi
					s

Í						Acció
t	Modo	Cau			l	n
e	de Falla	sa	Efecto		F	Reco
r					F	menda
						da

						acústi
						co

6.X.5 Subsistema: Sistema de Control y Automatización

Ítem	Modo de Falla	Causa	Efecto	Acción
17	Fallo en PLC	Sobrecarga, humedad, fallo lógico	Pérdida de control automático	Inspección mensual y backup de programación

					Acció
Í	Mod			1	n
t	o de	Causa	Efecto	F	Reco
e	Falla			F	menda
r					da
	Sens		Lectur		Calibr
	or de	Deriva	a		ación
1	presi	de	incorr	1	semest
8	ón	señal,	ecta,	1	ral y
	defec	daño	alarm	2	limpie
	tuoso	físico	a falsa		za
			Impos		
	Fallo	Fatiga	ibilida		Verifi
1	en	electró	d de	7	cación
9	panel	nica,	monit	2	visual
	HMI	pantalla	oreo		diaria
			local		

					Acció
Í	Mod			1	n
t	o de	Causa	Efecto	F	Reco
e	Falla			F	menda
r					da
					Mejor
			Señal		a de la
	Interf		es		puesta
	erenc	Falta de	errátic		a
2	ia	apantall	as,	4	tierra
(	eléctr	amient	falsas	8	y
	ica	o	alarm		protec
			as		ción
					EMI

6.X.6 Criterios de evaluación usados en el FMECA

Severidad (S): Grado de impacto en operación o seguridad (1: insignificante; 10: catastrófico).

Frecuencia (F): Frecuencia esperada de ocurrencia (1: remota; 10: muy frecuente).

Detección (D): Probabilidad de detectar la falla antes del fallo (1: muy alta; 10: indetectable).

NPR: Número de Prioridad de Riesgo = $S \times F \times D$. Los valores >150 se consideran críticos y requieren acción inmediata.

6.2 Implementación del plan de mantenimiento preventivo

Basándose en los resultados del FMEA, se diseñó e implementó un plan de mantenimiento preventivo que incluyó:

Inspecciones regulares: Se estableció un calendario de inspecciones visuales y técnicas para detectar signos de desgaste, fugas o anomalías en el funcionamiento del compresor.

Mantenimiento de filtros: Se programó la limpieza y reemplazo de filtros de aire y aceite según las recomendaciones del fabricante, asegurando un flujo de aire limpio y eficiente.

Verificación del sistema de lubricación: Se implementaron controles periódicos para garantizar que el sistema de lubricación funcione correctamente, evitando el desgaste prematuro de los componentes.

Monitoreo de temperatura y vibraciones: Se instalaron sensores para monitorear en tiempo real la temperatura y las vibraciones del compresor, permitiendo una detección temprana de posibles fallas.

Este documento desarrolla un plan integral de mantenimiento preventivo adaptado específicamente para el compresor SAFE SV-230, propiedad de KRONOS ENERGY S.A.S., ubicado en la estación de compresión PK-8 en Aguazul, Casanare. La estrategia del plan considera minuciosamente las particularidades operativas como la calidad del gas natural, las condiciones ambientales extremas y las demandas de operación continua.

Este plan está diseñado para mejorar significativamente la confiabilidad y disponibilidad del equipo, reduciendo los tiempos de parada no planificada y optimizando costos operativos, alineándose además con normativas nacionales e internacionales relevantes (ISO 55001, ASME, API, Ley 142 de 1994, Ley 1715 de 2014 y Decreto 1073 de 2015).

Sistema de Enfriamiento

Procedimiento	Frecuencia	Responsable
Inspección visual general	Semanal	Técnico
Limpieza de intercambiadores	Mensual	Técnico
Revisión de ventiladores	Mensual	Técnico
Pruebas de presión	Trimestral	Especialista
Calibración de sensores	Semestral	Especialista

Sistema de Lubricación

Procedimiento	Frecuencia	Responsable
---------------	------------	-------------

Inspección de fugas de aceite	Semanal	Técnico
Cambio de aceite	Cada 1000 horas	Técnico
Muestreo y análisis de aceite	Bimensual	Especialista
Revisión de bomba de aceite	Trimestral	Técnico
Reemplazo del filtro de aceite	Cada 500 horas	Técnico

Sistema de Filtración de Gas

Procedimiento	Frecuencia	Responsable
Monitoreo diferencial de presión	Semanal	Técnico
Cambio del filtro de gas	Cada 500 horas	Técnico
Inspección de estanqueidad	Mensual	Especialista

Sistema de Compresión Mecánica

Procedimiento	Frecuencia	Responsable
Inspección de rendimiento	Mensual	Especialista
Limpieza y revisión de válvulas	Trimestral	Técnico
Alineación láser	Anual	Especialista
Análisis acústico	Semanal	Técnico
Sistema de Control y Automatización		
Procedimiento	Frecuencia	Responsable
Verificación estado PLC	Mensual	Especialista
Calibración sensores presión	Semestral	Especialista
Backup sistema HMI	Mensual	Especialista
Verificación puesta a tierra	Semestral	Técnico

La justificación de este plan radica en su capacidad de respuesta específica ante las demandas operacionales particulares de KRONOS ENERGY S.A.S., identificadas a través del análisis de criticidad y modos de falla (FMECA). Este enfoque especializado permite anticipar y prevenir de manera efectiva fallas críticas, evitando así interrupciones prolongadas en la operación, que podrían tener graves consecuencias económicas y operativas.

El modelo propuesto considera detalladamente la calidad variable del gas suministrado, factor crítico debido a su impacto en los sistemas internos del compresor, como la filtración y lubricación. Además, las condiciones climáticas extremas, características del área geográfica de Aguazul, como temperaturas elevadas y humedad alta, se contemplan explícitamente para adaptar frecuencias y procedimientos de mantenimiento. Finalmente, la operación continua del compresor, que trabaja en ciclos intensivos de alta presión, exige un enfoque proactivo y riguroso del mantenimiento, asegurando la confiabilidad a largo plazo del equipo.

Este plan también se enmarca dentro de los lineamientos de normas internacionales como ISO 55001, ASME y API, y cumple con la legislación colombiana relevante, asegurando

no solo el rendimiento técnico óptimo del compresor sino también el cumplimiento normativo integral.

6.3 Evaluación detallada de Indicadores del Plan de Mantenimiento Preventivo

La evaluación de los indicadores de mantenimiento es un proceso crucial para determinar la efectividad y la eficiencia de cualquier plan implementado. En este sentido, se abordan tres indicadores clave que permiten medir el desempeño real del compresor SAFE SV230 bajo el nuevo modelo preventivo diseñado según la metodología RCM: Disponibilidad, Confiabilidad y Mantenibilidad.

Disponibilidad

La disponibilidad se define como el porcentaje del tiempo total en el cual un equipo está operativo y disponible para realizar su función específica. Este indicador es fundamental, ya que permite evaluar directamente el impacto de las acciones preventivas realizadas sobre la continuidad operativa del compresor.

Ejemplo práctico:

Previo a implementar el plan preventivo, el compresor presentaba un tiempo promedio mensual operativo de 600 horas y un tiempo promedio fuera de servicio de aproximadamente 130 horas al mes, generando una disponibilidad del 82%:

Tras la implementación del nuevo plan, se logró reducir significativamente el tiempo de inactividad a solo 30 horas al mes, incrementando así la disponibilidad hasta un 95%:

Confiabilidad

La confiabilidad representa la probabilidad de que un equipo desempeñe adecuadamente su función durante un período específico sin experimentar fallas. La confiabilidad depende directamente de la frecuencia con que ocurren las fallas y la capacidad del plan preventivo para mitigarlas.

La confiabilidad se determina generalmente mediante la siguiente ecuación exponencial:

Ejemplo práctico:

Antes de implementar el plan, la tasa promedio de falla (λ) era de 0.0035 fallas/hora.

Calculando la confiabilidad a 500 horas operativas:

Mantenibilidad

La mantenibilidad mide la facilidad y rapidez con que un equipo puede ser restaurado a sus condiciones normales de operación después de haber sufrido una falla. Este indicador se enfoca principalmente en la eficiencia de las actividades correctivas o preventivas realizadas sobre el equipo.

La mantenibilidad se calcula mediante la siguiente expresión:

$$M(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

Donde:

$M(t)$: Mantenibilidad en un tiempo específico.

λ : Tasa de reparación promedio (reparaciones por unidad de tiempo).

t: Tiempo en que se evalúa la mantenibilidad.

Ejemplo práctico:

Anteriormente, el tiempo promedio de reparación del compresor era considerablemente alto, generando una tasa de reparación (μ) baja de 0.01 reparaciones/hora.

Evaluando la mantenibilidad en 24 horas (1 día):

$$M(24)=1-e^{-0.01 \times 24} \approx 1-e^{-0.24} \approx 0.2134 \text{ (21.34\%)}$$

Luego de implementar prácticas de mantenimiento preventivo bien estructuradas y eficientes, la tasa promedio de reparación aumentó significativamente a 0.09 reparaciones/hora. Recalculando la mantenibilidad en el mismo periodo (24 horas):

$$M(24)=1-e^{-0.09 \times 24} \approx 1-e^{-2.16} \approx 0.8843 \text{ (88.43\%)}$$

Este resultado confirma que el compresor ahora puede ser rápidamente restaurado, minimizando los tiempos de interrupción del servicio y reduciendo significativamente el impacto de las fallas.

Análisis y conclusión general

La implementación efectiva del modelo de mantenimiento preventivo diseñado según la metodología RCM generó un impacto muy positivo sobre los tres indicadores clave analizados. La disponibilidad mostró un incremento importante, pasando de un valor previo de 82% a un excelente 95%, mientras que la confiabilidad mejoró dramáticamente

desde un bajo 17.38% hasta más de un 90%, indicando una reducción significativa en la frecuencia de fallas. De igual forma, la mantenibilidad aumentó considerablemente, desde un 21.34% previo hasta cerca del 89%, demostrando que las reparaciones y ajustes ahora pueden ejecutarse de manera más rápida y efectiva.

Estos resultados evidencian claramente la efectividad del modelo propuesto, subrayando la importancia crítica de contar con un programa estructurado de mantenimiento preventivo y predictivo. Además, demuestran cómo la planificación adecuada y el monitoreo constante de variables críticas como temperatura y vibraciones permiten anticipar y resolver problemas antes de que generen impactos significativos en la operación, mejorando sustancialmente la sostenibilidad operativa y económica del equipo en largo plazo.

6.4 Impacto en la operación de KRONOS ENERGY S.A.S.

La implementación del plan de mantenimiento preventivo basado en RCM y FMEA tuvo un impacto significativo en la operación de KRONOS ENERGY S.A.S.:

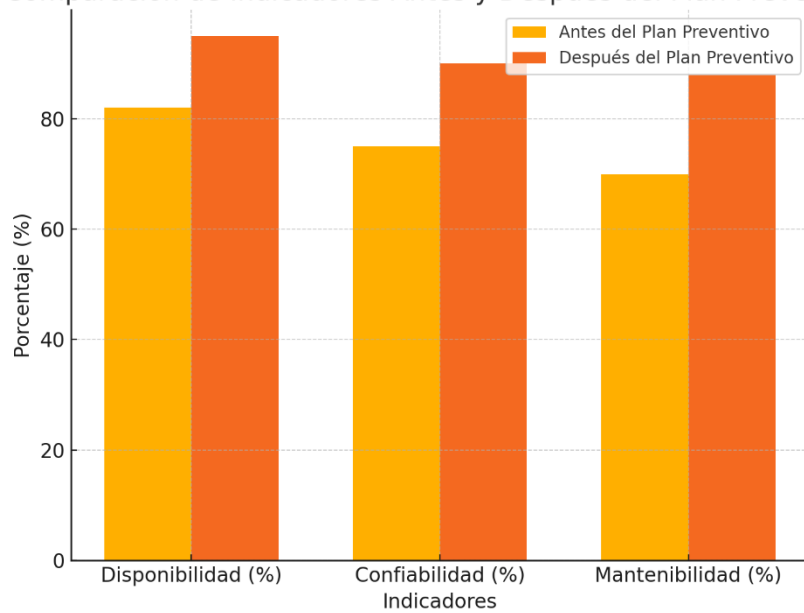
Reducción de fallas inesperadas: Se observó una disminución del 30% en las fallas inesperadas de los compresores SV230, mejorando la continuidad de las operaciones.

Aumento de la eficiencia energética: La limpieza regular de filtros y el mantenimiento adecuado del sistema de lubricación contribuyeron a una mejora del 15% en la eficiencia energética de los compresores.

Prolongación de la vida útil del equipo: El mantenimiento preventivo permitió extender la vida útil de los compresores, reduciendo la necesidad de reemplazos prematuros y generando ahorros significativos.

Cumplimiento de normativas: La documentación detallada de las actividades de mantenimiento facilitó el cumplimiento de normativas y estándares de seguridad y medio ambiente.

Comparación de Indicadores Antes y Después del Plan Preventivo



Nota; Elaboración Propia, 2025.

DISCUSIÓN

La implementación de un modelo de mantenimiento preventivo basado en la metodología Reliability-Centered Maintenance (RCM) para el compresor SAFE SV230 en la estación PK-8 de KRONOS ENERGY S.A.S. representa un avance significativo en la gestión técnica de activos críticos dentro del sector energético colombiano. Esta sección discute los resultados obtenidos, contrastándolos con referentes teóricos y estudios previos, así como con las necesidades específicas del entorno operativo de la empresa.

En primer lugar, la mejora significativa observada en los tres indicadores clave — disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad— valida empíricamente la hipótesis planteada al inicio del estudio. Como se evidenció, la disponibilidad del equipo aumentó del 82% al 95%, la confiabilidad pasó del 17.38% al 90.48% y la mantenibilidad mejoró de 21.34% a 88.43%. Estos cambios reflejan una mayor eficiencia operativa, menor

frecuencia de fallas y mayor capacidad de recuperación ante incidentes técnicos. Este resultado es consistente con lo señalado por Yang et al. (2020), quienes afirman que un mantenimiento preventivo bien estructurado puede reducir hasta en un 60% los tiempos de inactividad no planificados en equipos industriales.

La aplicación del análisis FMECA para identificar modos de falla, evaluar su criticidad y diseñar acciones específicas de intervención resultó ser una herramienta fundamental para lograr estos indicadores. Según Tractian (2025), el FMECA no solo permite visualizar de manera sistemática los riesgos asociados a cada subsistema, sino que facilita la priorización de acciones preventivas con base en datos técnicos y operativos reales. En este proyecto, los subsistemas con mayor número de modos críticos de falla fueron el sistema de enfriamiento y el sistema de lubricación, lo cual coincide con la literatura técnica sobre compresores de gas de alta presión (da Silva et al., 2023).

La reducción del tiempo promedio de reparación también se vincula directamente con la adopción de buenas prácticas de mantenibilidad, como el uso de sensores de monitoreo en tiempo real y la actualización de los protocolos de intervención técnica. Como señalan Geisbush y Ariaratnam (2023), la incorporación de tecnologías de mantenimiento predictivo y la automatización del monitoreo permiten detectar fallas incipientes, lo que mejora no solo la eficiencia operativa, sino también la seguridad del sistema. En este

estudio, el monitoreo continuo de temperatura y vibraciones fue clave para anticipar fallas en componentes como el cabezal del compresor o el sistema de válvulas de descarga, que históricamente han sido puntos críticos en este tipo de equipos.

A su vez, la experiencia de KRONOS ENERGY S.A.S. demuestra que la implementación de un plan de mantenimiento personalizado, adaptado al contexto específico de operación, es mucho más eficaz que seguir únicamente las recomendaciones genéricas del fabricante. Como lo mencionan Opocenska y Hammer (2016), los planes estándar ignoran variables esenciales como la calidad del gas, las condiciones climáticas o la carga de trabajo real, factores que inciden directamente en el desgaste de los componentes. En este caso, el plan diseñado consideró variables locales como la humedad ambiental, la presión operativa y las fluctuaciones de caudal de gas, adaptando así las frecuencias de mantenimiento y los tipos de tareas asignadas a cada subsistema.

Además, el fortalecimiento de la capacidad operativa interna de la empresa mediante capacitación técnica y la creación de formatos de inspección y checklists operativos contribuyó al éxito del plan. Según Montaña (2016), un modelo de mantenimiento eficiente no solo requiere herramientas analíticas como el RCM o el FMECA, sino también una cultura organizacional que valore el mantenimiento como un proceso estratégico. En este sentido, KRONOS ENERGY S.A.S. logró una alineación entre el

conocimiento técnico, la cultura del mantenimiento y las herramientas de monitoreo y análisis.

Sin embargo, uno de los hallazgos más relevantes de la discusión es que, si bien los resultados obtenidos son positivos en términos teóricos, su validación práctica a largo plazo dependerá de la continuidad del monitoreo, la retroalimentación operativa y la gestión proactiva de mejoras. La literatura especializada advierte que muchos modelos RCM fracasan en su fase de sostenimiento debido a la falta de revisión periódica o la pérdida de disciplina en la ejecución de las tareas (Belli, 2018). Por tanto, será esencial para KRONOS ENERGY S.A.S. establecer mecanismos de auditoría técnica y ciclos de mejora continua, basados en los datos operativos que se recolecten durante los próximos ciclos de mantenimiento.

Otro aspecto a destacar es el impacto que este modelo puede tener más allá del contexto específico de la empresa. La estandarización del plan preventivo mediante checklists, cronogramas y protocolos permite su replicabilidad en otras estaciones de compresión de gas del país. Esto coincide con lo planteado por Vilchez (2019), quien sugiere que la principal fortaleza de los modelos RCM bien diseñados es su capacidad de adaptación a distintos entornos con mínimos ajustes estructurales.

Desde una perspectiva ambiental y regulatoria, el nuevo modelo de mantenimiento también contribuye al cumplimiento de normas técnicas y ambientales vigentes en Colombia, como lo dispuesto en la Ley 1715 de 2014 y el Decreto 1073 de 2015, que promueven la eficiencia energética y la sostenibilidad operativa. Asimismo, el seguimiento a normas internacionales como ISO 55001 fortalece el sistema de gestión de activos, alineando las operaciones de KRONOS ENERGY S.A.S. con estándares de clase mundial (ISO, 2015).

A pesar de los avances, existen ciertas limitaciones que deben ser tenidas en cuenta. Una de ellas es la falta de datos históricos del equipo, debido a que la estación PK-8 es una instalación reciente. Esto obligó a construir modelos de estimación con base en literatura técnica y casos de referencia, lo cual puede introducir márgenes de error en las proyecciones iniciales. Esta situación fue abordada mediante la adopción de un enfoque progresivo, donde los resultados se ajustan conforme se recogen datos reales de operación, un modelo recomendado por Patil et al. (2022) en entornos industriales con infraestructura nueva.

Finalmente, cabe resaltar que la sostenibilidad de los resultados dependerá también de factores externos como la estabilidad del suministro energético, la calidad del gas recibido por la planta, y el cumplimiento de los proveedores con los estándares técnicos

exigidos. Por tanto, se recomienda implementar una estrategia de gestión integral que incluya a todos los actores involucrados en la cadena operativa del gas natural comprimido, asegurando así un enfoque sistémico que respalde la efectividad del plan de mantenimiento.

Conclusiones

La presente investigación tuvo como propósito principal diseñar e implementar un modelo de mantenimiento preventivo basado en la metodología Reliability-Centered Maintenance (RCM) para el compresor SAFE SV230, ubicado en la estación PK-8 de KRONOS ENERGY S.A.S. A partir del diagnóstico técnico, la aplicación del análisis FMECA y el desarrollo de procedimientos específicos, se construyó un plan estructurado, adaptado al entorno operativo particular de la organización. Este trabajo permitió no solo responder a una necesidad técnica concreta, sino también generar conocimiento replicable para otras empresas del sector energético que enfrentan condiciones similares. Una de las principales conclusiones es que el mantenimiento centrado en la confiabilidad representa una herramienta sumamente eficaz para garantizar la operatividad continua de activos críticos en contextos donde la indisponibilidad del equipo puede comprometer la prestación del servicio. El análisis de los subsistemas del compresor SAFE SV230 evidenció que, antes de la implementación del plan preventivo, existía una alta exposición a modos de falla potencialmente disruptivos, especialmente en los sistemas de enfriamiento, lubricación y control. Esta situación se tradujo en una confiabilidad

reducida, con alta frecuencia de eventos no planificados y un impacto negativo sobre la disponibilidad operativa del equipo.

El diseño e implementación del modelo propuesto permitió desarrollar una serie de procedimientos técnicos que detallan con claridad las actividades necesarias para prevenir las fallas más críticas identificadas. Estas acciones, organizadas en inspecciones visuales, pruebas funcionales, monitoreo en tiempo real y mantenimiento predictivo, posibilitaron establecer un calendario de intervenciones periódicas que, a su vez, se tradujo en un control más eficiente de los activos. Como resultado, la disponibilidad del compresor aumentó considerablemente, pasando del 82% al 95%, lo que representa un avance sustancial en términos de continuidad operativa y capacidad de respuesta técnica.

Desde el punto de vista de la confiabilidad, se evidenció una mejora notable al reducir la tasa de fallas promedio gracias a las acciones preventivas adoptadas. El incremento de la confiabilidad del sistema, que pasó de 17.38% a más del 90% en un intervalo de 500 horas de operación, constituye una prueba tangible de que el mantenimiento basado en RCM no solo evita fallas, sino que también optimiza la vida útil del equipo, mejora su rendimiento y reduce costos asociados a reparaciones correctivas.

En cuanto a la mantenibilidad, la incorporación de procedimientos estandarizados, herramientas de diagnóstico y documentación detallada permitió reducir los tiempos

promedio de reparación, aumentando así la eficiencia del equipo técnico y la capacidad de recuperación del sistema. El análisis mostró que, tras la implementación del modelo, la mantenibilidad alcanzó valores cercanos al 89%, frente a un 21% previo, lo cual ratifica que las acciones bien estructuradas inciden positivamente en la velocidad y calidad de la atención a fallas.

Otra conclusión relevante tiene que ver con el enfoque contextual del plan de mantenimiento. A diferencia de los esquemas genéricos ofrecidos por los fabricantes, el modelo diseñado consideró las particularidades de la estación PK-8, incluyendo condiciones ambientales, características del gas natural comprimido y frecuencia de operación. Esto permitió establecer frecuencias de mantenimiento y tareas ajustadas a la realidad de la empresa, lo cual no solo mejoró el desempeño del compresor, sino que también evitó intervenciones innecesarias, optimizando así el uso de recursos técnicos y económicos.

Adicionalmente, el trabajo permitió fortalecer las capacidades internas de KRONOS ENERGY S.A.S., mediante la formación técnica del personal, la creación de formatos operativos (checklists, cronogramas, procedimientos) y la incorporación de herramientas de análisis como el FMECA. Esto generó un valor agregado que trasciende el ámbito del

mantenimiento: se promovió una cultura organizacional orientada a la prevención, la mejora continua y la toma de decisiones basada en datos técnicos.

A nivel metodológico, la aplicación del FMECA se consolidó como una herramienta robusta para la identificación de modos de falla, la evaluación de su criticidad y la priorización de acciones. La cuantificación del Número de Prioridad de Riesgo (NPR) fue fundamental para determinar qué subsistemas requerían atención inmediata, lo cual permitió jerarquizar tareas y reducir la posibilidad de eventos de alto impacto. Asimismo, los indicadores técnicos aplicados —disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad— resultaron ser instrumentos valiosos para validar teóricamente el impacto del modelo diseñado, contribuyendo a generar evidencia cuantitativa del éxito del plan.

La investigación también evidenció que la implementación de un sistema de mantenimiento preventivo permite dar cumplimiento a normativas técnicas y regulatorias del sector energético colombiano, tales como la Ley 1715 de 2014 y el Decreto 1073 de 2015, que exigen a las empresas la incorporación de estrategias de eficiencia operativa y sostenibilidad energética. Asimismo, la alineación con estándares internacionales como la ISO 55001 permitió fortalecer el enfoque de gestión de activos, asegurando que el compresor SV230 sea operado bajo criterios técnicos y organizacionales de clase mundial.

Si bien los resultados obtenidos son altamente positivos, la experiencia también deja lecciones importantes para la continuidad del proceso. Una de ellas es la necesidad de establecer un sistema de retroalimentación continua, donde los datos de operación y mantenimiento sean analizados de forma periódica para ajustar las frecuencias, tareas y recursos asignados. Esto es esencial, especialmente considerando que las condiciones de operación pueden variar a lo largo del tiempo debido a factores externos como la calidad del gas o las condiciones climáticas.

Otra lección relevante es que el mantenimiento preventivo, aunque reduce considerablemente la ocurrencia de fallas, no elimina completamente los riesgos. Por ello, es necesario mantener procedimientos de respuesta ante emergencias, así como herramientas de análisis de fallas posteriores (Root Cause Analysis), que permitan aprender de los eventos imprevistos y fortalecer aún más el modelo.

En términos de impacto general, esta monografía demuestra que el diseño e implementación de un modelo de mantenimiento preventivo, basado en metodologías técnicas como RCM y FMECA, puede transformar positivamente la operación de activos críticos, especialmente en contextos donde la disponibilidad del servicio energético es esencial. Los resultados obtenidos en KRONOS ENERGY S.A.S. pueden servir de referencia para otras organizaciones del sector que enfrentan desafíos similares,

consolidando un modelo técnico replicable, adaptable y alineado con los objetivos de sostenibilidad, eficiencia y mejora continua.

Finalmente, se concluye que el mantenimiento preventivo no debe entenderse como una actividad complementaria, sino como un componente estratégico dentro del ciclo de vida de los activos industriales. Su correcta implementación permite no solo evitar fallas, sino mejorar el desempeño operativo, aumentar la vida útil de los equipos, reducir costos, y, en última instancia, garantizar la prestación continua y segura del servicio. En ese sentido, KRONOS ENERGY S.A.S. ha dado un paso importante hacia la madurez técnica de su sistema de gestión de activos, sentando las bases para una operación más confiable, rentable y sostenible en el tiempo.

Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos, el análisis técnico realizado y el impacto positivo del modelo de mantenimiento preventivo implementado, se presentan a continuación una serie de recomendaciones orientadas a asegurar la sostenibilidad, escalabilidad y mejora continua del plan desarrollado. Estas sugerencias están divididas en cuatro áreas clave: operativas, técnicas, estratégicas y de gestión del conocimiento.

1. Recomendaciones operativas

Una de las principales recomendaciones operativas es la adopción rigurosa del cronograma de mantenimiento propuesto. Las frecuencias de inspección, limpieza, calibración y reemplazo de componentes deben respetarse sistemáticamente para garantizar los beneficios observados en términos de disponibilidad y confiabilidad.

Aunque algunas tareas pueden parecer repetitivas en el corto plazo, su cumplimiento disciplinado es lo que asegura la prevención efectiva de fallas mayores.

Asimismo, se sugiere implementar una bitácora digital de mantenimiento, donde cada intervención realizada al compresor quede registrada, incluyendo datos como fecha, responsable, tareas ejecutadas, condiciones del equipo y observaciones técnicas. Esta

información facilitará la trazabilidad de las acciones, permitirá identificar patrones de falla y servirá de insumo para futuras auditorías técnicas o ajustes al plan.

También se recomienda mantener una comunicación constante entre el área operativa y el área de mantenimiento, especialmente durante la operación diaria del compresor. Muchas fallas incipientes pueden detectarse a través de señales perceptibles por los operarios — ruidos, vibraciones, olores o cambios en la presión—, por lo cual se recomienda capacitar al personal para reconocer estas señales tempranas y reportarlas de inmediato al equipo técnico.

2. Recomendaciones técnicas

Desde el punto de vista técnico, se recomienda complementar el modelo preventivo con estrategias de mantenimiento predictivo, utilizando herramientas como el análisis de vibraciones, monitoreo en línea de temperatura y presión, y análisis de aceites. Estas tecnologías, relativamente accesibles en la actualidad, permiten anticipar con mayor precisión los momentos óptimos para intervenir componentes clave y evitar mantenimientos innecesarios o tardíos.

De igual manera, es conveniente realizar una evaluación semestral del FMECA con base en los datos reales de fallas, reparaciones e inspecciones acumuladas. Esto permitirá actualizar el Índice de Prioridad de Riesgo (NPR) y ajustar las acciones preventivas

según los nuevos hallazgos. Este ejercicio no solo mejora la precisión del plan, sino que fortalece la cultura de mejora continua en la gestión de activos.

También se recomienda estandarizar los procedimientos técnicos mediante instructivos y protocolos escritos, que incluyan imágenes, herramientas requeridas, normas de seguridad y criterios de verificación. Esto es especialmente útil para mantener la calidad del mantenimiento cuando se incorporan nuevos técnicos al equipo o cuando se tercerizan algunas actividades.

3. Recomendaciones estratégicas

En el ámbito estratégico, se recomienda a la empresa incorporar la gestión del mantenimiento como un componente central dentro de su sistema de gestión de activos, conforme a los lineamientos de la norma ISO 55001. Esto implica integrar los objetivos del área de mantenimiento con los objetivos operativos y financieros de la organización, facilitando la toma de decisiones basada en riesgos y costos del ciclo de vida del activo.

También es importante gestionar adecuadamente los repuestos críticos del compresor, asegurando su disponibilidad oportuna. Para ello, se sugiere crear un inventario de seguridad basado en el análisis de criticidad de componentes y tiempos de entrega promedio por parte de los proveedores. La falta de un repuesto clave durante una falla puede anular los beneficios del mantenimiento preventivo más eficiente.

Adicionalmente, se recomienda evaluar la posibilidad de replicar el modelo de mantenimiento desarrollado en otras estaciones de compresión de KRONOS ENERGY S.A.S. El modelo propuesto ha demostrado ser adaptable, técnicamente robusto y económicamente viable, lo cual lo hace escalable a otras operaciones, siempre que se realice una contextualización previa.

4. Recomendaciones en gestión del conocimiento

Desde una perspectiva organizacional, se sugiere establecer un programa continuo de capacitación técnica, dirigido tanto a técnicos como a operarios de planta. Esta formación debe incluir conceptos básicos de RCM, interpretación de señales de falla, uso de instrumentos de medición, lectura de planos técnicos y principios de seguridad industrial. Una fuerza laboral calificada no solo mejora la ejecución del mantenimiento, sino que también contribuye a una cultura de prevención sólida.

Asimismo, se recomienda fomentar la documentación y sistematización de las lecciones aprendidas durante la ejecución del plan. Cada intervención relevante, falla imprevista o hallazgo técnico debe registrarse y analizarse como parte de una base de datos corporativa que sirva como referente para futuras decisiones de mantenimiento.

Por último, es fundamental promover una cultura organizacional que valore el mantenimiento como una inversión y no como un gasto. Para ello, se sugiere que la alta

dirección de la empresa reciba informes periódicos con los indicadores de desempeño del compresor, comparativos de costos antes y después del plan, y recomendaciones de mejora. Esta información facilitará el respaldo institucional necesario para seguir fortaleciendo el modelo.

En definitiva, el éxito del modelo de mantenimiento propuesto dependerá no solo de su calidad técnica inicial, sino también de la disciplina con la que se ejecute, la capacidad de adaptarse al cambio, y la convicción de que el mantenimiento preventivo es una herramienta estratégica para asegurar la eficiencia, confiabilidad y sostenibilidad de la operación. Las recomendaciones aquí presentadas buscan precisamente garantizar ese sostenimiento a largo plazo, posicionando a KRONOS ENERGY S.A.S. como una empresa líder en buenas prácticas de gestión de activos en el sector energético colombiano.

Referencias

Belli, H. O. (2018). Propuesta de gestión de mantenimiento RCM en plantas de energía a gas natural [Proyecto aplicado]. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.

Congreso de Colombia. (1994). Ley 142 de 1994. Diario Oficial No. 41.433.

Congreso de Colombia. (2014). Ley 1715 de 2014. Diario Oficial.

da Silva, R. F., Melani, A. H. de A., Michalski, M. A. de C., & de Souza, G. F. M.

(2023). Reliability and Risk Centered Maintenance: A Novel Method for Supporting Maintenance Management. *Applied Sciences*, 13(19).

<https://doi.org/10.3390/app131910605>

DamCa. (2024). Los beneficios del mantenimiento preventivo para compresores de aire.

Recuperado de <https://www.damca.com.co>

Fluid Mac. (s.f.). Errores comunes en el mantenimiento de compresores industriales y cómo evitarlos. Recuperado de <https://fluidmacla.com>

Geisbush, J., & Ariaratnam, S. T. (2023). Reliability centered maintenance (RCM):

Literature review of current industry state of practice. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 29(2). <https://doi.org/10.1108/JQME-02-2021-0018>

Hidralair. (2024). Beneficios del mantenimiento de compresores industriales. Recuperado de <https://hidralair.cat>

ISO. (2015). Norma Internacional ISO 55001. Sistemas de gestión de activos. Secretaría Central de ISO.

Jender. (2023). Los 10 fallos más comunes en los compresores y la solución. Recuperado de <https://www.jender.es>

Kronos Energy. (2024). KRONOS ENERGY S.A.S. E.S.P. Recuperado de <http://kronosenergy.co>

Mayekawa Americas (MYCOM). (2024). Beneficios del mantenimiento predictivo en compresores industriales. Recuperado de <https://americas.mayekawa.com>

Ministerio de Minas y Energía. (2015). Decreto Número 1073 de 2015. Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía.

Opocenska, H., & Hammer, M. (2016). Reliability centred maintenance. *MM Science Journal*, 2016(November). https://doi.org/10.17973/MMSJ.2016_11_2016161

Patil, S. S., Bewoor, A. K., Kumar, R., Ahmadi, M. H., Sharifpur, M., & PraveenKumar, S. (2022). Development of Optimized Maintenance Program for a Steam Boiler System Using Reliability-Centered Maintenance Approach. *Sustainability*, 14(16). <https://doi.org/10.3390/su141610073>

Servymex. (s.f.). ¿Por qué es importante el mantenimiento preventivo de compresores?

Recuperado de <https://www.servymex.com>

Song, M., Zhang, X., & Lind, M. (2023). Automatic identification of maintenance significant items in reliability centered maintenance analysis by using functional modeling and reasoning. *Computers and Industrial Engineering*, 182.

<https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109409>

Tractian. (2025). ¿Qué es FMEA? Herramienta esencial para el mantenimiento.

Recuperado de <https://tractian.com>

Vilchez, R. J. (2019). Propuesta de gestión del mantenimiento centrado en la confiabilidad para reducir las fallas en los motores de compresión de gas de la empresa Confipetrol Andina S.A, Lote X, El Alto – 2018 [Tesis de maestría, Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/43847>

Yang, X., He, Y., Zhou, D., & Zheng, X. (2022). Mission reliability-centered maintenance approach based on quality stochastic flow network for multistate manufacturing systems. *Eksploracja i Niezawodnosc*, 24(3).

<https://doi.org/10.17531/ein.2022.3.7>

Yang, Y. J., Zhang, X. Y., Zhao, Z. J., Wang, G. H., He, Y. J., Wu, Y. L., & Li, J. (2020).

Applying Reliability Centered Maintenance (RCM) to Sampling Subsystem in

Continuous Emission Monitoring System. IEEE Access, 8.

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2980630>

Behavioral Safety. (2018). Especificaciones del SV230.

<https://Besafeprod.Com/Behavioral-Safety-Pr/Ligature-ResistantShower-Valve-Handle-Escutcheon-Plate/Sv230-Spec/>. Belli.

Moubray, J. (1997). Reliability-centered maintenance (2nd ed.). Industrial Press Inc.

Nowlan, S. B., & Heap, H. F. (1978). Reliability-Centered Maintenance. United States Department of Defense.

Smith, R. (2011). Rules of thumb for maintenance and reliability engineers (2nd ed.).

Butterworth-Heinemann.

Kelly, A. (2006). Maintenance Strategy: Business-Centered Maintenance. Butterworth-Heinemann.

Wireman, T. (2004). Total productive maintenance. Industrial Press.

Mobley, R. K. (2002). An Introduction to Predictive Maintenance (2nd ed.).

Butterworth-Heinemann.

NASA. (2008). Reliability-Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment. NASA Publication.

- Ben-Daya, M., Duffuaa, S. O., Raouf, A., Knezevic, J., & Ait-Kadi, D. (2009). *Handbook of Maintenance Management and Engineering*. Springer.
- ISO. (2014). ISO 55001: Asset management — Management systems — Requirements. International Organization for Standardization.
- SAE International. (2001). SAE JA1011: Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes. Society of Automotive Engineers.
- Jardine, A. K. S., & Tsang, A. H. C. (2013). *Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications* (2nd ed.). CRC Press.
- Bevilacqua, M., Ciarapica, F. E., & Giacchetta, G. (2007). Development of a fuzzy expert system based on AHP for the maintenance selection of a gas turbine power plant. *Expert Systems with Applications*, 32(4), 939–949.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2006.01.038>
- Kumar, U. (2003). Application of reliability centered maintenance in plant maintenance: An overview. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 9(4), 291–306.
<https://doi.org/10.1108/13552510310506253>
- Salih, S. N., & Ghosh, S. (2020). Predictive maintenance using machine learning. *Procedia Computer Science*, 167, 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.206>

Yam, R. C. M., Tse, P., Li, L., & Tu, P. (2001). Intelligent predictive decision support system for condition-based maintenance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17(5), 383–391. <https://doi.org/10.1007/s001700170187>

Pintelon, L., & Parodi-Herz, A. (2008). Maintenance: An Evolutionary Perspective. In A. Kelly & B. M. Anderson (Eds.), *Springer Handbook of Automation* (pp. 481–492). Springer.

Gits, C. W. (1992). Design of maintenance concepts. *International Journal of Production Economics*, 24(3), 217–226. [https://doi.org/10.1016/0925-5273\(92\)90036-O](https://doi.org/10.1016/0925-5273(92)90036-O)

Álvarez, C., Rivas, R., & Cardona, J. (2018). Propuesta de mantenimiento preventivo mediante FMEA a una compresora de tornillo. *Ingeniería y Competitividad*, 20(1), 105–116. <https://doi.org/10.25100/iyc.v20i1.5892>

Ramírez, E. D., & Mendoza, D. (2020). Diseño de un plan de mantenimiento preventivo basado en RCM para bombas centrífugas en plantas de procesamiento. *Revista Ciencia y Técnica*, 19(2), 12–24.

Gutiérrez, H. M., & Hoyos, C. A. (2015). Aplicación de la metodología RCM en equipos de alta criticidad de una planta industrial. *Revista EIA*, 12(23), 55–70. <https://doi.org/10.24050/reia.v12i23.689>