

“Diseño de un plan de mantenimiento basado en RCM para la mejora de la disponibilidad operacional de un motogenerador de gas Jenbacher en la empresa Oben Group”

Cristian Alberto Lamus Ortega

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

Director Daniel Escamilla Soto

Máster en Gerencia de Activos

Universidad Industrial de Santander Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de

Ingeniería Mecánica

Especialización en Gerencia de Mantenimiento

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

La presente monografía está dedicada, en primer lugar, a mis padres y a mi pareja, quienes han sido el pilar fundamental en cada etapa de mi formación personal y profesional. Su esfuerzo constante, sus enseñanzas y su apoyo incondicional han sido el motor que ha impulsado cada uno de mis logros, brindándome la fortaleza necesaria para superar los desafíos inherentes a este proceso académico.

De igual manera, extendiendo esta dedicatoria a mi familia, quienes, con su comprensión, acompañamiento y motivación permanente, han contribuido de manera significativa al desarrollo y culminación de este proceso. Su confianza en mis capacidades y su presencia constante han sido determinantes para mantener la disciplina y el compromiso requeridos a lo largo de este camino.

A todos ellos, mi más profundo agradecimiento por ser fuente de inspiración, apoyo y ayuda en la consecución de este objetivo.

Agradecimientos

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi equipo de trabajo dentro de la organización, cuyo acompañamiento y aporte fueron fundamentales durante el desarrollo de este proceso académico.

De manera especial, agradezco al gerente, por su direccionamiento estratégico y su visión, los cuales permitieron orientar este trabajo hacia un enfoque alineado con los objetivos organizacionales. Asimismo, al jefe de activos, por compartir sus conocimientos y experiencia, los cuales fueron clave para fortalecer el análisis y la estructuración del presente estudio.

De igual forma, extendiendo mi agradecimiento al equipo de RCM, conformado por el ingeniero de confiabilidad, el operador de la máquina y el supervisor de mantenimiento, quienes, desde su experiencia técnica y operativa, aportaron información valiosa, criterio profesional y acompañamiento constante, contribuyendo de manera significativa al desarrollo y consolidación de este trabajo.

A todos ellos, mi reconocimiento por su disposición, colaboración y compromiso.

Tabla de Contenido

Introducción	12
1. Descripción de la empresa.....	14
1.1. Misión	15
1.2. Vision	15
2. Objetivos	16
2.1. Objetivo General	16
2.2. Objetivos Específicos	16
3. Marco Teórico	16
4. Marco Conceptual	20
4.1. Mantenimiento.....	20
4.2. Tipo de estrategias de mantenimiento	20
4.3. RCM	21
4.4. Jerarquía de activos	21
4.5. Análisis de criticidad	22
4.6. AMEF.....	22
4.7. Función y falla funcional de un activo	22
4.8. Modo de falla	23
4.9. Efectos de falla.....	23
4.10. Motor de combustión interna	23
4.11. Cogeneración.....	23
5. Justificación.....	25

6.	Metodología	26
6.1.	Organización de la información	28
6.2.	Delimitación de fronteras del sistema	32
6.3.	Levantamiento de árbol de equipos.....	33
6.4.	Análisis de criticidad	35
7.	AMEF.....	37
7.1.	Definición de funciones y fallas funcionales.....	37
7.2.	Definición de modos y efectos de fallas.....	39
7.3.	Evaluar consecuencias de fallas	41
7.4.	Selección de estrategias de mantenimiento	43
8.	Resultados	45
8.1.	Estructuración y criticidad del sistema de generación.....	45
8.2.	Análisis funcional del motogenerador.	47
8.3.	Identificación de modos y efectos de falla.....	48
8.4.	Clasificación de consecuencias y nivel de riesgo.	49
8.5.	Plan de mantenimiento estructurado.	50
8.6.	Análisis de resultados e impacto esperado.....	53
9.	Conclusiones	54
	Referencias Bibliográficas	56
	Apéndices	

Lista de Tablas

Tabla 1. Datos históricos.....	25
Tabla 2. Matriz de riesgos.....	29
Tabla 3. Hoja de plan de mantenimiento	30
Tabla 4. Tabla de criterios de criticidad.....	37
Tabla 5. Listado de equipos	45
Tabla 6. Árbol jerárquico de activos.....	46
Tabla 7. Consolidado de AMEF	47
Tabla 8. Consolidad AMEF/ modo y efectos de falla.....	48
Tabla 9. Consolidado de evaluación de consecuencias	49
Tabla 10. Consolidado de selección de tareas	51
Tabla 11. Consolidada planeación de tareas	52
Tabla 12. Listado de inventario crítico	53

Lista de Figuras

Figura 1. Jerarquía de activos ISO 14224.....	22
Figura 2. Árbol de decisión SAE JA 1011.....	31
Figura 3. Delimitación de fronteras (tomada de Jenbacher, 2026).....	33
Figura 4. Flujograma de desicion de criticidad.....	36

Apéndices

Los apéndices están disponibles en el Repositorio Institucional

Apéndice 1. RCM de motogenerador Jenbacher J624, 2026.

Glosario

AMEF: análisis de modo y efecto de fallas.

BOPET (siglas en inglés): tereftalato de polietileno orientado biaxialmente.

BOPP (siglas en inglés): polipropileno orientado biaxialmente.

MCI: motor de combustión interna.

MTBF (siglas en inglés): tiempo medio entre fallas.

MTTR (siglas en inglés): tiempo medio para reparar.

RCM (siglas en inglés): mantenimiento Centrado en Confiabilidad.

Resumen

Título: Diseño de un plan de mantenimiento basado en RCM para la mejora de la disponibilidad operacional de un motogenerador de gas Jenbacher en la empresa Oben Group.¹

Autor: Cristian Lamus Ortega.²

Palabras Clave: RCM, AMEF, Motogenerador.

Descripción: El presente trabajo desarrolla el diseño de un plan de mantenimiento basado en la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) aplicado a motogeneradores a gas Jenbacher en la planta de OBEN Group Colombia, con el propósito de mejorar la disponibilidad operacional, reducir fallas no planificadas y garantizar la continuidad energética del proceso productivo. La investigación parte del análisis de criticidad del sistema de generación, lo que permitió identificar los componentes y subsistemas con mayor impacto en la operación. Posteriormente, se definió el contexto operacional del motogenerador y se realizó el análisis funcional de sus principales sistemas, incluyendo combustión, lubricación, refrigeración, control y generación eléctrica. A partir de esta base, se desarrolló un análisis de modos y efectos de falla (AMEF), mediante el cual se identificaron las fallas potenciales, sus causas y consecuencias, evaluándolas en función de criterios de seguridad, impacto ambiental y costos. Con base en los resultados obtenidos, se aplicó el árbol de decisión de la metodología RCM para la selección de estrategias de mantenimiento, definiendo tareas preventivas, basadas en condición y correctivas planificadas. Finalmente, se estructuró un plan de mantenimiento integral que incluye frecuencias, recursos y lineamientos para su implementación en el sistema de gestión de mantenimiento.

¹ Trabajo de grado

² Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Daniel Escamilla Soto.

Abstract

Title: Design of a maintenance plan based on RCM to improve the operational availability of a Jenbacher gas engine-generator at Oben Group.³

Author(s): Cristian Lamus Ortega.⁴

Key Words: RCM, AMEF, Motogenerador.

Description: The present work develops the design of a maintenance plan based on the Reliability-Centered Maintenance (RCM) methodology, applied to Jenbacher gas engine-generators at the OBEN Group Colombia plant, with the aim of improving operational availability, reducing unplanned failures, and ensuring the energy continuity of the production process. The study begins with a criticality analysis of the power generation system, which allowed the identification of the components and subsystems with the greatest impact on operation. Subsequently, the operational context of the engine-generator was defined, and a functional analysis of its main systems was carried out, including combustion, lubrication, cooling, control, and power generation. Based on this, a Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) was developed, through which potential failures, their causes, and consequences were identified and evaluated according to safety, environmental, and cost criteria. Based on the results obtained, the RCM decision tree was applied for the selection of maintenance strategies, defining preventive, condition-based, and planned corrective tasks. Finally, a comprehensive maintenance plan was structured, including frequencies, resources, and guidelines for its implementation within the maintenance management system.

³ Bachelor Thesis

⁴ Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Daniel Escamilla Soto.

Introducción

Oben Group Colombia es una empresa de manufactura reconocida a nivel mundial en el sector de la extrusión de película plástica, cuenta con una sede de aproximadamente 10 hectáreas de área ubicada en la zona franca internacional del atlántico. Actualmente se cuenta con dos líneas de extrusión de BOPP, dos líneas de extrusión de BOPET, una línea de PET-S y tres líneas de Termoformado las cuales trabajan 24 horas del día. La sede cuenta con una ubicación geográfica muy beneficiosa debido a su cercanía con varios puertos, sin embargo, esta misma sede trae consigo una problemática: La baja confiabilidad de la red eléctrica pública.

Debido a esta problemática, Oben Group ejerció el proyecto de tener su propia planta de generación eléctrica. Para esto, esta planta debía tener como mínimo una potencia máxima de 1440 kW, que es lo que se consume con todas las líneas en operación más una carga base (luces, oficinas, sistemas de seguridad, etc). Para este reto se realizó el levantamiento de 4 generadores a gas de la marca Jebanacher, con una capacidad de 4400 kW cada uno, cumpliendo así con la meta propuesta y generando una mayor estabilidad a la empresa.

Con esta solución surge otro inconveniente, ahora que no se hace uso prácticamente de la red pública, estos generadores pasan a ser los activos más críticos para la operación de la empresa, una baja confiabilidad de estas máquinas supone una baja disponibilidad de las líneas de producción.

Una parada no programada de estos equipos no solo implica un incremento significativo en los costos de mantenimiento, sino también una pérdida sustancial de producción derivada de la indisponibilidad operativa del motor ante la ocurrencia de fallas emergentes. Adicionalmente, este tipo de eventos puede generar afectaciones en los sistemas electrónicos asociados,

especialmente debido a picos de corriente ocasionados por interrupciones súbitas del suministro eléctrico (blackout).

El diseño e implementación de un plan de mantenimiento basado en RCM para los motogeneradores de gas Jenbacher reviste una importancia estratégica para Oben Group Colombia, ya que impacta directamente en tres dimensiones fundamentales:

- **Confiabilidad operativa:** al identificar las funciones críticas y modos de falla más relevantes, se podrán definir tareas que prevengan interrupciones imprevistas, incrementando el tiempo medio entre fallas (MTBF).
- **Seguridad en las máquinas:** Una alimentación constante reduciría el daño en equipos electrónicos de los activos que se encuentran en producción.
- **Sostenibilidad económica y ambiental:** una mayor disponibilidad evita la necesidad de recurrir a energía externa más costosa y reduce las emisiones por arranques repetitivos o desbalance de carga.

Además, este trabajo aporta un modelo replicable para los demás equipos críticos de la planta, fortaleciendo la cultura de confiabilidad y la integración con la gestión de activos bajo los lineamientos ISO 55000⁵. A nivel académico y profesional, el estudio contribuye al desarrollo de metodologías aplicadas de ingeniería mecánica y mantenimiento industrial, combinando análisis técnico, gestión de información y toma de decisiones estratégicas basadas en datos.

Dejando así la pregunta, ¿Cómo diseñar e implementar un plan de mantenimiento basado en la metodología RCM que incremente la disponibilidad operacional de los motogeneradores

⁵ ISO 55000 (2014). Asset management — Overview, principles and terminology.

de gas Jenbacher en la planta de Oben Group Colombia, garantizando la continuidad energética del proceso productivo y optimizando el uso de recursos técnicos y económicos?

1. Descripción de la empresa.

Oben Group inicia su proceso de consolidación en América Latina a partir de la década de los noventa, orientando sus operaciones a la producción de películas plásticas para empaques flexibles, mediante la implementación de tecnologías avanzadas como BOPP y BOPET. En Colombia, su presencia se enmarca en esta estrategia de expansión regional, estableciendo capacidades productivas que le permiten atender tanto el mercado local como el internacional, garantizando altos estándares de calidad y eficiencia en sus procesos industriales.

Las películas plásticas producidas por la compañía constituyen insumos fundamentales en la industria del empaque flexible, debido a sus propiedades de resistencia, barrera y versatilidad en aplicaciones industriales. En este sentido, Oben Group ha enfocado sus esfuerzos en el desarrollo de soluciones innovadoras que respondan a las exigencias del mercado, integrando procesos productivos con tecnología de punta y asegurando el cumplimiento de estándares internacionales en calidad, sostenibilidad y desempeño.

En Colombia, la compañía se ha posicionado como un actor relevante dentro del sector, gracias a su infraestructura industrial, su enfoque en la mejora continua y su capacidad de adaptación a las necesidades del entorno productivo. De esta manera, Oben Group se consolida como una organización que no solo participa activamente en la cadena de valor del empaque flexible, sino que también impulsa el desarrollo tecnológico y competitivo de la industria a nivel regional.

1.1. Misión

Desarrollar, producir y comercializar películas plásticas para empaques flexibles y productos complementarios con compromiso, calidad y eficiencia.

1.2. Vision

Ser líder mundial en la producción de películas plásticas para empaques flexibles.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Diseñar un plan de mantenimiento basado en la metodología del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) para los motogeneradores de gas Jenbacher de la planta OBEN Group Colombia, con el fin de incrementar la disponibilidad operacional, reducir las fallas no planificadas y asegurar la continuidad energética del proceso productivo.

2.2. Objetivos Específicos

Analizar la criticidad del sistema de generación eléctrica de la planta, identificando los componentes y subsistemas más relevantes del motogenerador Jenbacher que afectan la disponibilidad y la confiabilidad del suministro de energía.

Realizar el análisis funcional del motogenerador, definiendo las funciones primarias y secundarias de sus sistemas principales (combustión, lubricación, refrigeración, control, y alternador).

Identificar y evaluar los modos y efectos de falla (AMEF/FMEA) de los componentes críticos, determinando sus causas, consecuencias y frecuencia de ocurrencia.

Clasificar las consecuencias de las fallas en función de su impacto sobre la seguridad, el ambiente, la operación y los costos, de acuerdo con los lineamientos de la metodología RCM.

Establecer un plan de mantenimiento estructurado, definiendo las tareas de mantenimiento óptimas, indicando las frecuencias, recursos, tiempos estándar y responsabilidades, integrándolo al sistema de gestión de mantenimiento (CMMS) de la empresa.

3. Marco Teórico

El mantenimiento, como función dentro de los sistemas productivos, ha evolucionado de manera paralela al desarrollo de la industria. En sus inicios, las actividades de mantenimiento

estaban orientadas únicamente a la reparación de fallas una vez estas ocurrían; sin embargo, con el aumento en la complejidad de los sistemas industriales y la necesidad de garantizar continuidad operativa, el mantenimiento pasó a convertirse en un elemento estratégico dentro de las organizaciones. Actualmente, no solo se enfoca en restablecer condiciones operativas, sino en asegurar que los activos cumplan de manera sostenida las funciones para las cuales fueron diseñados (Moubray, 1997)⁶.

En este contexto, la gestión moderna del mantenimiento se encuentra alineada con los principios de la gestión de activos, definidos por la norma ISO 55000, la cual establece que las organizaciones deben gestionar sus activos considerando el equilibrio entre desempeño, costo y riesgo. Esto implica que las decisiones de mantenimiento deben estar fundamentadas en criterios técnicos y orientadas a maximizar el valor generado por los equipos a lo largo de su ciclo de vida.

A nivel industrial, uno de los principales desafíos en la gestión del mantenimiento es la persistencia de enfoques reactivos, donde la intervención ocurre únicamente después de la falla. Este tipo de gestión genera impactos negativos como altos costos de reparación, pérdidas de producción y disminución de la confiabilidad de los equipos. Adicionalmente, la ausencia de análisis estructurados de fallas conlleva a la repetición de eventos, afectando la estabilidad operacional (Mobley, 2002)⁷.

Por otra parte, también se presentan deficiencias en los planes de mantenimiento preventivo, los cuales en muchos casos incluyen actividades que no están directamente relacionadas con los modos de falla reales de los equipos. Esta situación se origina

⁶ Moubray, J. (1997). *Reliability-Centered Maintenance* (2nd ed.). Industrial Press Inc.

⁷ Mobley, R. K. (2002). *An Introduction to Predictive Maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

principalmente por la falta de actualización de los planes y por la inexistencia de metodologías que permitan establecer una relación clara entre las tareas de mantenimiento y la confiabilidad del sistema. Como consecuencia, se generan sobrecostos sin obtener mejoras significativas en el desempeño de los activos.

Dentro de este panorama, los sistemas de generación de energía, como los motogeneradores a gas, adquieren un nivel elevado de criticidad. En el caso de la empresa Oben Group, estos equipos cumplen una función esencial al garantizar el suministro energético requerido para la operación de los procesos productivos. Por lo tanto, su indisponibilidad no solo afecta la continuidad operativa, sino que también impacta directamente los indicadores económicos de la organización.

Los motogeneradores a gas, particularmente los desarrollados por INNIO Jenbacher, están compuestos por múltiples subsistemas que interactúan entre sí, incluyendo sistemas de combustión, lubricación, enfriamiento y generación eléctrica. Debido a esta complejidad, estos equipos están expuestos a diversos mecanismos de falla como desgaste, fatiga mecánica, contaminación de lubricantes y degradación térmica (Pulkrabek, 2004)⁸, lo cual exige la implementación de estrategias de mantenimiento más avanzadas.

En este sentido, surge la necesidad de adoptar metodologías que permitan estructurar de manera eficiente la gestión del mantenimiento, orientándola hacia la confiabilidad. Para ello, es fundamental comprender el concepto de confiabilidad, definido como la probabilidad de que un activo cumpla su función requerida durante un periodo de tiempo determinado bajo condiciones

⁸ Pulkrabek, W. W. (2004). Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.

específicas de operación (Smith & Hawkins, 2004)⁹. Este concepto, junto con la mantenibilidad y la disponibilidad, conforma la base para evaluar el desempeño de los sistemas industriales.

La disponibilidad operacional, indicador clave en sistemas de generación de energía, se encuentra directamente relacionada con la confiabilidad del equipo y la eficiencia en las actividades de mantenimiento.

A partir de esta relación, se evidencia que la mejora en la disponibilidad depende tanto de la reducción en la frecuencia de fallas como de la optimización de los tiempos de intervención.

Frente a estas necesidades, el Reliability-Centered Maintenance se presenta como una metodología estructurada que permite definir las estrategias de mantenimiento más adecuadas en función del contexto operacional de los activos. De acuerdo con Moubray (1997), el RCM busca asegurar que los equipos continúen cumpliendo las funciones requeridas por sus usuarios, mediante la identificación de fallas funcionales, modos de falla y sus consecuencias.

La aplicación del RCM en motogeneradores a gas permite establecer planes de mantenimiento enfocados en la mitigación de fallas críticas, priorizando aquellas intervenciones que realmente aportan valor a la confiabilidad del sistema. Esto incluye la implementación de técnicas predictivas, la optimización de tareas preventivas y la eliminación de actividades innecesarias.

En consecuencia, la adopción de un enfoque basado en RCM contribuye significativamente a la mejora de la disponibilidad operacional, reduciendo las paradas no programadas y optimizando el uso de los recursos de mantenimiento. De esta manera, se

⁹ Smith, A. M., & Hawkins, B. (2004). *Lean Maintenance: Reduce Costs, Improve Quality, and Increase Market Share*. Elsevier Butterworth-Heinemann.

fortalece la competitividad de la organización y se garantiza la sostenibilidad de sus procesos productivos en el tiempo.

4. Marco Conceptual

4.1. Mantenimiento

El mantenimiento se define como el conjunto de actividades técnicas, administrativas y de gestión destinadas a conservar o restablecer un activo en un estado en el cual pueda cumplir la función requerida. Desde una perspectiva moderna, el mantenimiento no solo busca reparar fallas, sino garantizar la confiabilidad, disponibilidad y seguridad de los sistemas productivos a lo largo de su ciclo de vida (Moubray, 1997). Asimismo, la norma ISO 55000 lo integra como un elemento fundamental dentro de la gestión de activos.

4.2. Tipo de estrategias de mantenimiento

Las estrategias de mantenimiento corresponden a los enfoques utilizados para gestionar la integridad de los activos. Entre las principales se encuentran:

Mantenimiento correctivo: intervención posterior a la falla.

Mantenimiento preventivo: basado en tiempo o uso.

Mantenimiento predictivo: basado en condición mediante monitoreo.

Mantenimiento proactivo: enfocado en eliminar causas raíz.

La correcta selección de la estrategia depende del análisis de criticidad y del comportamiento de falla de los equipos (Mobley, 2002).

4.3. RCM

El Reliability-Centered Maintenance es una metodología estructurada que permite determinar las tareas de mantenimiento más adecuadas para asegurar que un activo continúe cumpliendo sus funciones en su contexto operacional. Según Moubray (1997), el RCM se basa en el análisis de funciones, fallas y consecuencias, permitiendo optimizar recursos y mejorar la disponibilidad de los sistemas.

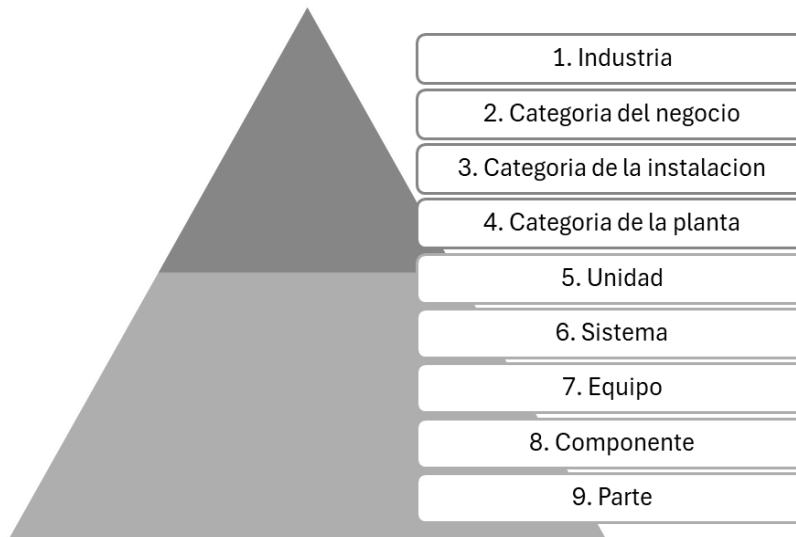
4.4. Jerarquía de activos

La jerarquía de activos constituye una estructura sistemática de descomposición de los sistemas físicos en niveles organizados, permitiendo una adecuada gestión de la información de mantenimiento y confiabilidad. En el contexto industrial, esta jerarquización es fundamental para la identificación, análisis y trazabilidad de fallas, así como para la toma de decisiones basada en datos.

La norma ISO 14224¹⁰ establece lineamientos específicos para la recopilación e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento, proponiendo una estructura jerárquica estandarizada de los activos. Esta estructura permite clasificar los equipos en diferentes niveles, facilitando el análisis sistemático de fallas y la implementación de metodologías como el RCM.

De acuerdo con esta norma, la jerarquía de activos se organiza típicamente en los siguientes niveles:

¹⁰ International Organization for Standardization. (2016). ISO 14224: Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment.

*Figura 1.**Jerarquía de activos ISO 14224*

4.5. Análisis de criticidad

El análisis de criticidad es una metodología utilizada para priorizar activos en función del riesgo asociado a sus fallas. Este riesgo se evalúa considerando variables como frecuencia de falla, impacto operacional, impacto económico y consecuencias en seguridad o medio ambiente (Smith & Hawkins, 2004).

4.6. AMEF

El AMEF, basado en la norma IEC 60812¹¹, es una herramienta sistemática que permite identificar los posibles modos de falla de un sistema, analizar sus efectos y establecer acciones de mitigación. Es ampliamente utilizado dentro del RCM para estructurar el análisis de fallas.

4.7. Función y falla funcional de un activo

La función de un activo corresponde a lo que se espera que este haga dentro de un

¹¹ IEC 60812:2018, Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA), International Electrotechnical Commission, 2018.

contexto operacional específico. Por su parte, la falla funcional se define como la incapacidad del activo para cumplir dicha función bajo los estándares requeridos (Moubray, 1997).

4.8. Modo de falla

El modo de falla describe la forma específica en la que ocurre una falla funcional. Este puede estar asociado a fenómenos físicos como desgaste, fatiga, corrosión o errores operacionales (IEC 60812, 2018).

4.9. Efectos de falla

Los efectos de falla corresponden a las consecuencias inmediatas que se generan cuando ocurre un modo de falla. Estos pueden manifestarse en términos de pérdida de producción, daños a otros componentes, riesgos de seguridad o impactos ambientales (Smith & Hawkins, 2004).

4.10. Motor de combustión interna

Un motor de combustión interna es un sistema térmico que convierte la energía química de un combustible en energía mecánica mediante procesos de combustión dentro de una cámara cerrada. Estos motores operan bajo ciclos termodinámicos como el ciclo Otto o Diesel, y son ampliamente utilizados en aplicaciones industriales y de generación de energía (Pulkrabek, 2004).

4.11. Cogeneración

La cogeneración es un proceso mediante el cual se produce simultáneamente energía eléctrica y energía térmica útil a partir de una misma fuente de combustible. Este sistema permite mejorar significativamente la eficiencia energética en comparación con la generación

convencional, alcanzando valores superiores al 70% (U.S. Department of Energy, 2012)¹².

En aplicaciones industriales, los sistemas de cogeneración suelen emplear motogeneradores a gas, como los desarrollados por INNIO Jenbacher, los cuales permiten aprovechar el calor residual del proceso de combustión.

¹² U.S. Department of Energy. (2012). Operations & Maintenance Best Practices: A Guide to Achieving Operational Efficiency (Release 3.0). Federal Energy Management Program (FEMP).

5. Justificación

Los sistemas industriales requieren condiciones operativas adecuadas para garantizar su desempeño, siendo los activos físicos los elementos fundamentales que permiten la transformación de recursos en productos. En este contexto, los motogeneradores a gas representan un componente crítico dentro del proceso productivo, ya que son responsables de asegurar la disponibilidad energética necesaria para la continuidad de la operación. Al igual que otros sistemas complejos, estos equipos requieren estrategias de mantenimiento adecuadas para evitar degradación, fallas inesperadas y pérdidas de eficiencia.

En el caso de la empresa Oben Group, durante el último periodo se evidenció el incumplimiento de los objetivos operacionales asociados a la disponibilidad del sistema de generación. Esta situación estuvo directamente relacionada con la ocurrencia de paradas no programadas en el motogenerador a gas, las cuales impactaron significativamente la continuidad del proceso productivo. Como consecuencia, se generaron pérdidas en la producción, afectaciones en la eficiencia operativa y un impacto negativo en los indicadores de desempeño de la organización. Al realizar un análisis revisando los datos históricos de las 4 máquinas de los últimos 8 meses de operación se resumió en la siguiente tabla:

Tabla 1.

Datos históricos

Máquina	Tiempo de operación [h]	Número de fallas	Tiempo acumulado de fallas [h]
Motogenerador J624 #1	2547	2	1
Motogenerador J624 #2	2094	3	127
Motogenerador J624 #3	3099	0	0
Motogenerador J624 #4	2060	1	4
Planta	3624	43	113,55

Como se observa, la planta en los últimos 8 meses contó con una disponibilidad del 97%, con un número de apagones totales de 43 y un tiempo total acumulado sin fluido energético de 113,5 horas, algunos de estos apagones fueron ocasionados por fallas de los equipos y otros por mala operación, esta última debido a que las máquinas no están en su estándar operacional.

A partir del análisis de la información operativa y de mantenimiento, se identificó que una de las principales causas de esta problemática radica en la ausencia de una estructuración formal de los activos basada en criticidad, así como en la falta de una estrategia de mantenimiento alineada con la importancia funcional de los equipos. Esta condición limita la capacidad de priorizar recursos y de enfocar los esfuerzos en aquellos activos cuyo impacto en la operación es más significativo, evidenciando la necesidad de implementar metodologías como el análisis de criticidad y el mantenimiento centrado en confiabilidad para mejorar la disponibilidad operacional del sistema.

6. Metodología

El desarrollo del presente proyecto se fundamenta en un enfoque metodológico de carácter aplicado, con orientación técnico-analítica, cuyo propósito es diseñar un plan de mantenimiento basado en la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), orientado a la mejora de la disponibilidad operacional de un motogenerador a gas.

El diseño metodológico se estructuró en fases secuenciales que reproducen de manera ordenada las siete preguntas básicas establecidas por el estándar SAE JA1011, las cuales constituyen las etapas clásicas del RCM (Moubray, 1997; SAE JA1011, 2009):

1. ¿Cuáles son las funciones y los estándares de desempeño del activo en su contexto operacional actual?
2. ¿De qué manera puede dejar de cumplir sus funciones (fallas funcionales)?

3. ¿Qué causa cada falla funcional (modos de falla)?
4. ¿Qué sucede cuando se produce cada falla (efectos de falla)?
5. ¿De qué manera importa cada falla (consecuencias de falla)?
6. ¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir cada falla (tareas proactivas y sus frecuencias)?
7. ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada (acciones por defecto)?

Con el fin de garantizar la trazabilidad del análisis y atender la necesidad de diferenciar el diseño metodológico de los hallazgos, este capítulo describe exclusivamente los procedimientos, criterios e instrumentos empleados en cada fase. La secuencia metodológica adoptada, alineada con las preguntas anteriores y con las buenas prácticas de gestión de activos (ISO 55000), comprende las siguientes fases: (i) organización de la información y diseño de instrumentos; (ii) definición del contexto operacional y delimitación de fronteras; (iii) levantamiento del árbol jerárquico de equipos; (iv) análisis de criticidad; (v) análisis de modos y efectos de falla (AMEF); (vi) evaluación de consecuencias de falla; y (vii) selección de estrategias y estructuración de las tareas de mantenimiento.

6.1. Organización de la información

La fase de organización de la información constituye una etapa fundamental dentro del desarrollo metodológico del presente proyecto, ya que permite transformar los datos recolectados en insumos estructurados, confiables y útiles para la toma de decisiones en la gestión del mantenimiento. Esta etapa tiene como propósito principal garantizar la trazabilidad, consistencia y estandarización de la información, facilitando su análisis bajo los principios del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM).

En primer lugar, se procede a la consolidación y depuración de la información proveniente de diversas fuentes, tales como historiales de fallas, órdenes de trabajo, reportes operacionales y registros técnicos del motogenerador. Este proceso implica la validación de datos, eliminación de inconsistencias y clasificación de la información en función de su relevancia para el análisis de confiabilidad, lo cual permite establecer una base sólida para el desarrollo de las herramientas posteriores.

Como etapa previa al análisis de riesgos, se diseña e implementa una plantilla para el análisis de criticidad de activos, la cual permite evaluar y jerarquizar los sistemas, subsistemas y componentes del motogenerador en función de su impacto dentro de la operación. Esta plantilla considera criterios técnicos tales como: impacto en la producción, consecuencias en seguridad y medio ambiente, frecuencia de fallas, costos de mantenimiento, mantenibilidad y confiabilidad inherente del equipo. Cada uno de estos factores es ponderado de acuerdo con su relevancia, obteniendo como resultado un índice de criticidad que facilita la priorización de los activos más importantes. Esta herramienta resulta clave, ya que orienta los esfuerzos del análisis posterior hacia aquellos elementos cuyo fallo genera mayores consecuencias para la organización.

Una vez definidos los niveles de criterios de criticidad, se procede a diseñar e implementar una matriz de riesgos, orientada a la identificación, análisis y evaluación de los diferentes modos de falla asociados al sistema. Esta matriz considera criterios como la probabilidad de ocurrencia, la severidad de las consecuencias (en términos de impacto económico, de seguridad y ambiental) y la capacidad de detección de las fallas. A partir de la combinación de estos factores, se obtiene un nivel de riesgo que permite jerarquizar los eventos de falla y priorizar aquellos que requieren una intervención más rigurosa. Esta herramienta no solo facilita la toma de decisiones, sino que también alinea el análisis con enfoques modernos de gestión de riesgos en activos industriales. Quedando finalmente la matriz de riesgos con sus respectivos criterios, adaptada al contexto operacional, de la siguiente manera:

Tabla 2.

Nivel de Consecuencias

Matriz de riesgos

Consecuencias					Nivel de Probabilidad					
Humanas	Ambientales	Costos [COL]			Imposible	Improbable	Remoto	Ocasional	Moderado	Frecuente
Mas de un muerto	Efectos irreversibles	>300M	Catastrofico	5						
Incapacidad permanente	Efectos irreversibles en menos de 2 años	ENTRE 300M - 100M	Critico	4						
Incapacidad temporal	Efectos reversibles en menos de 6 meses	ENTRE 100 M- 10M	Marginal	3						
Lesiones	Efectos pueden ser controlados	ENTRE 10M-1M	Insignificante	2						
Ninguna	No afecta el medio ambiente	<1M	Ninguno	1						
					1 > 10 Años	2 < 5 Años	3 < 1 Años	4 < 6 meses	5 < 3 Meses	6 >1 Mes

De manera complementaria, se desarrolla una plantilla estandarizada para la creación de actividades de mantenimiento, la cual permite estructurar de forma homogénea todas las tareas derivadas del análisis RCM. En esta plantilla se incluyen elementos clave como la identificación del activo, descripción detallada de la actividad, tipo de mantenimiento (preventivo, predictivo o correctivo), frecuencia de ejecución, recursos necesarios (humanos, técnicos y materiales),

Tabla 3.

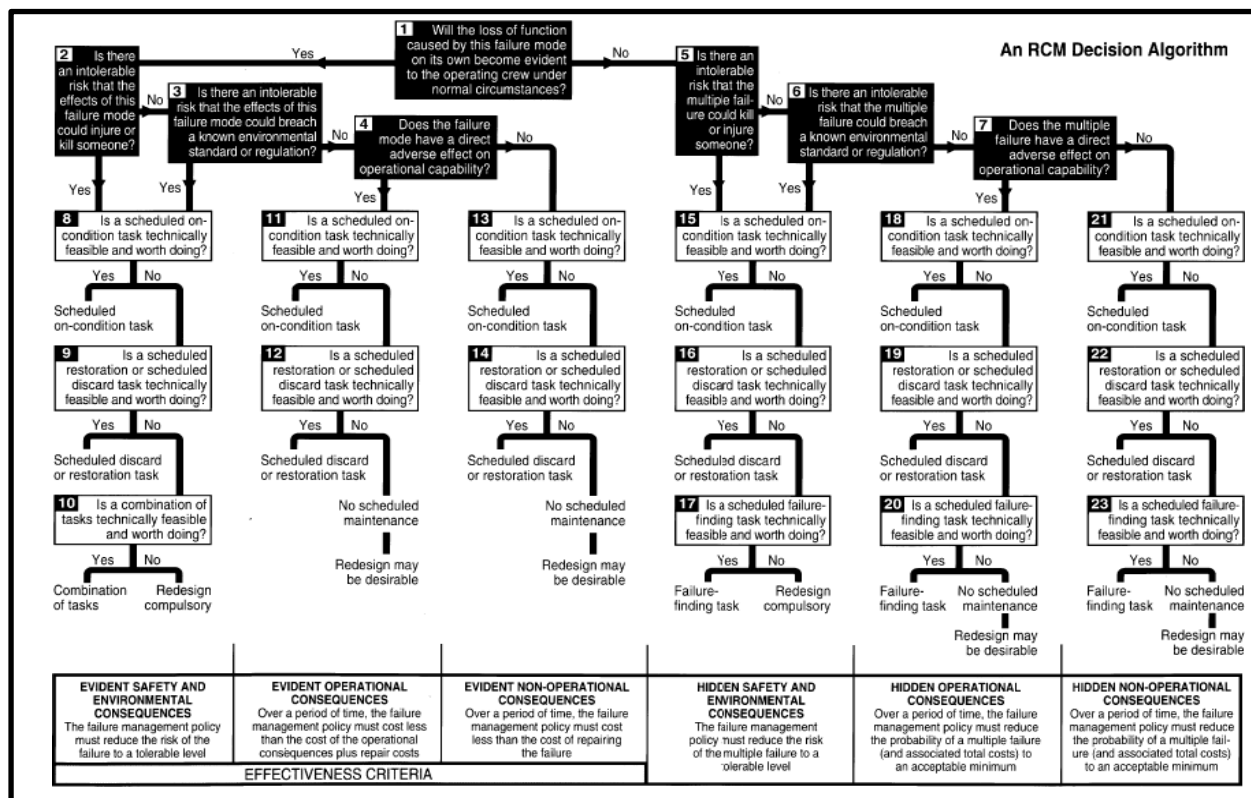
Hoja de plan de mantenimiento

[illegible]

Adicionalmente, se incorpora un árbol de decisión para la definición de estrategias de mantenimiento, fundamentado en la lógica del RCM, el cual permite seleccionar de manera sistemática las acciones más adecuadas para cada modo de falla identificado. Este árbol de decisión evalúa aspectos como la criticidad de la falla, su impacto en la operación, la existencia de tareas de mantenimiento proactivo técnicamente factibles, la detectabilidad de la falla y la relación costo-beneficio de las intervenciones. Como resultado, se establecen estrategias de mantenimiento alineadas con las condiciones reales de operación del activo, evitando tanto el mantenimiento innecesario como la exposición a fallas críticas no gestionadas.

Figura 2.

Árbol de decisión SAE JA 1011



En conjunto, la implementación de estas herramientas permite integrar la información de manera estructurada y coherente, facilitando la transición hacia un modelo de mantenimiento

basado en confiabilidad. Asimismo, esta fase asegura que las decisiones tomadas estén soportadas en criterios técnicos y cuantificables, contribuyendo a la mejora de la disponibilidad operacional, la reducción de fallas no programadas y el fortalecimiento de la gestión de activos dentro de la organización.

6.2. Delimitación de fronteras del sistema

La delimitación de fronteras del sistema constituye un elemento fundamental dentro del desarrollo del presente estudio, ya que permite establecer con claridad el alcance técnico del análisis y definir los límites operacionales sobre los cuales se aplicará la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM). Esta definición resulta clave para evitar ambigüedades en la evaluación de los activos y garantizar la coherencia en la recopilación y análisis de la información.

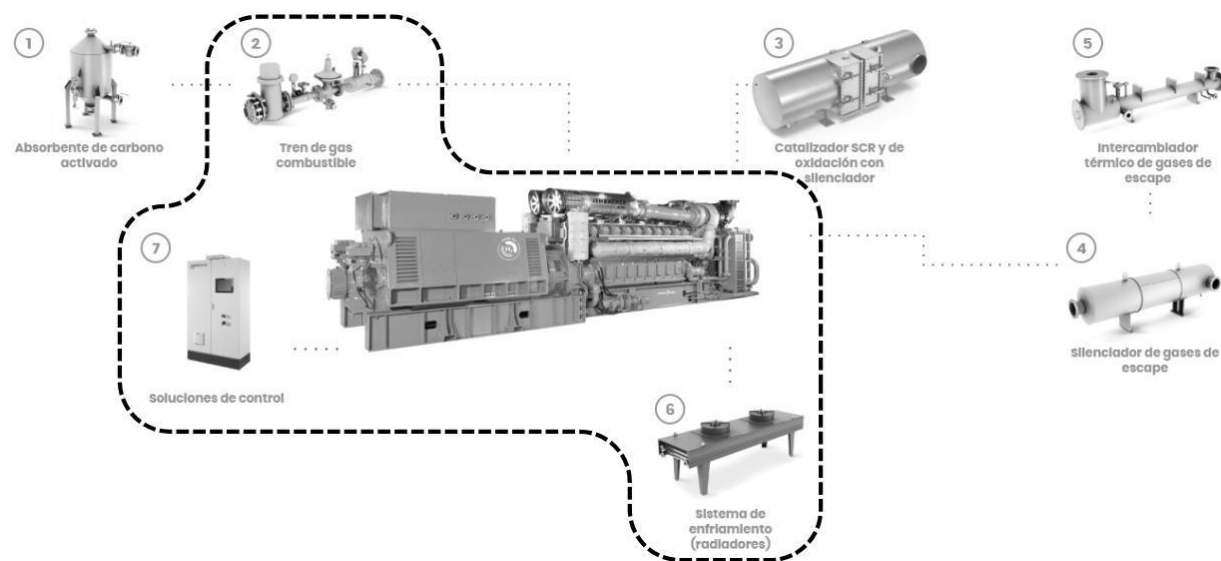
El sistema de cogeneración objeto de estudio está conformado por un conjunto de equipos y subsistemas interrelacionados, cuyo propósito es la generación simultánea de energía eléctrica y aprovechamiento de la energía térmica residual. Dentro de este sistema se incluyen componentes tales como el motogenerador a gas, los sistemas de recuperación de calor, los chillers de absorción, los calderines, así como las bombas de transporte de fluidos térmicos, encargadas de garantizar la circulación y transferencia de energía dentro del proceso.

No obstante, debido a criterios de viabilidad técnica, disponibilidad de información y enfoque del análisis, el alcance del presente trabajo se delimita específicamente al motogenerador a gas y sus sistemas auxiliares asociados, particularmente los circuitos de enfriamiento de alta y baja temperatura (HT – High Temperature y LT – Low Temperature). Esta

decisión permite concentrar el análisis en el activo con mayor impacto en la disponibilidad operacional del sistema, así como en los subsistemas directamente relacionados con su desempeño térmico y funcional.

Figura 3.

Delimitación de fronteras (tomada de Jenbacher, 2026)



En consecuencia, aunque los sistemas de absorción, almacenamiento y transporte de calor forman parte integral del sistema de cogeneración, estos no serán considerados dentro del análisis detallado de RCM, sino únicamente como elementos de contexto operacional. Esta delimitación asegura un enfoque metodológico más preciso, permitiendo profundizar en el comportamiento del motogenerador y optimizar las estrategias de mantenimiento sobre los componentes críticos que influyen directamente en su confiabilidad y disponibilidad.

6.3. Levantamiento de árbol de equipos

El levantamiento del árbol de equipos constituye una etapa fundamental dentro del desarrollo del presente proyecto, ya que permite estructurar de manera organizada y jerárquica

todos los activos que conforman el sistema objeto de estudio. Esta descomposición facilita la identificación de relaciones funcionales entre los diferentes niveles del sistema, así como la correcta aplicación de metodologías de análisis como el RCM y el AMEF.

En esta fase, se realiza la identificación, recopilación y clasificación de todos los equipos asociados al sistema de cogeneración, considerando tanto el activo principal como sus subsistemas y componentes. Este proceso se lleva a cabo a partir de fuentes de información como listados de activos, planos técnicos, diagramas de proceso (P&ID), historiales de mantenimiento y validación en campo, con el fin de garantizar la integridad y confiabilidad de la información recopilada.

Se consolida un inventario general de equipos, el cual incluye la identificación de cada activo y un código de tipo de equipo. Este inventario constituye la base para la estructuración jerárquica del sistema y el posterior análisis de criticidad y confiabilidad.

Posteriormente, se procede a la construcción del árbol jerárquico de equipos, en el cual se organiza el sistema en diferentes niveles estructurales, tales como sistema, subsistema, equipo y componente. Esta jerarquización permite visualizar de manera clara la descomposición del sistema, facilitando la identificación de los elementos mantenibles y su relación dentro del proceso productivo.

El árbol de equipos se desarrolla siguiendo criterios de funcionalidad, mantenibilidad y coherencia operativa, permitiendo establecer una estructura alineada con buenas prácticas de gestión de activos. Esta representación jerárquica resulta esencial para la correcta aplicación del RCM, ya que define el nivel adecuado de análisis y evita redundancias o vacíos en la identificación de fallas.

En consecuencia, el levantamiento del árbol de equipos no solo permite organizar la información técnica del sistema, sino que también constituye una ayuda clave para las etapas posteriores del proyecto, tales como el análisis de criticidad, la identificación de funciones y fallas funcionales, y la definición de estrategias de mantenimiento. De esta manera, se garantiza un enfoque estructurado y coherente en la gestión del mantenimiento, orientado a la mejora de la confiabilidad y disponibilidad operacional del activo.

6.4. Análisis de criticidad

En esta etapa de la metodología se desarrolló el análisis de criticidad del sistema de generación eléctrica con el propósito de jerarquizar los equipos, subsistemas y componentes del motogenerador en función de su impacto sobre la operación, la seguridad y los costos asociados. Este análisis constituye una base fundamental para la toma de decisiones dentro del enfoque RCM, permitiendo focalizar los recursos de mantenimiento en los activos que representan mayor riesgo para la continuidad del proceso productivo (Moubray, 1997).

Debido a la limitada disponibilidad de datos históricos confiables relacionados con fallas, tiempos de reparación y frecuencias de ocurrencia, se adoptó un enfoque cualitativo basado en criterio de experto, apoyado en la experiencia del personal técnico y operativo. Este enfoque es consistente con los lineamientos de la gestión de riesgos, donde la evaluación puede realizarse mediante juicio experto cuando no se dispone de información cuantitativa suficiente (Department of Energy, 2012).

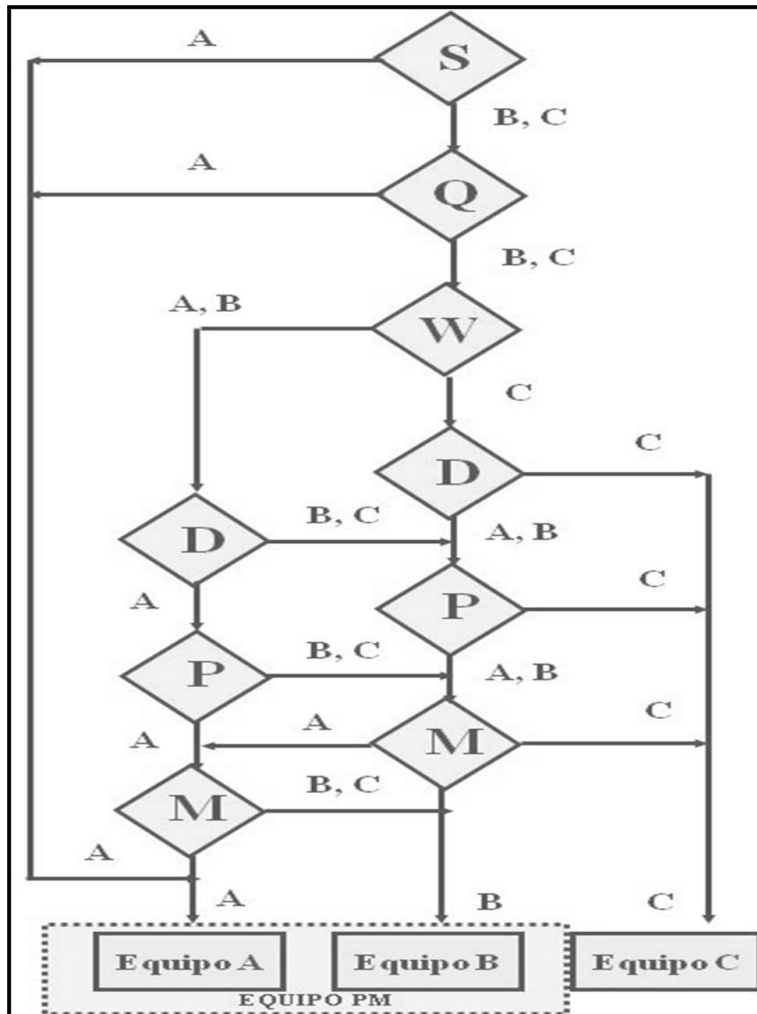
Para la clasificación de los equipos se empleó un árbol de decisión de criticidad, el cual permitió asignar niveles de importancia en función de criterios previamente definidos. En este esquema, los activos fueron categorizados de la siguiente manera:

A: Criticidad alta (equipos críticos) B: Criticidad media

C: Criticidad baja

Figura 4.

Flujograma de desicion de criticidad.



Asimismo, se definieron los criterios de evaluación que sustentan la clasificación, los cuales pueden incluir aspectos como seguridad, impacto ambiental, costos operacionales y

afectación a la producción¹³:

Tabla 4.

Tabla de criterios de criticidad.

Elementos de Evaluación	Grado A	Grado B	Grado C
S			
Seguridad, Polución & Entorno	Una falla podría causar serios problemas de seguridad y entorno en el área circundante	Una falla podría causar algunos problemas de seguridad y entorno en el área circundante	Una falla no causará problemas de seguridad o entorno en áreas circundantes
Q			
Calidad y Rendimiento	Una falla podría causar productos defectuosos o afectar seriamente al rendimiento	Una falla podría causar variaciones de calidad o afectar moderadamente el rendimiento	Una falla no podría afectar ni a la calidad ni al rendimiento
W			
Status de operación	24 hs. de operación	de 7 a 14 hs. de operación	Operación intermitente
D			
Factor de retraso (costos de oportunidad)	Una falla pararía la planta entera	Una falla pararía solamente el sistema afectado	Está disponible una unidad de reserva. Es más económico esperar el fallo y repararlo.
P			
Periodo (intervalo de falla)	Paradas frecuentes (cada 6 meses o más)	Paradas ocasionales (aprox. 1 vez al año)	Difícilmente se produce una parada (menos de 1 vez al año)
M			
Mantenibilidad	Tiempo reparación: 4 hs. o más. Costo de reparación: aprox. \$ 2000	Tiempo reparación: 1-4 hs. Costo de reparación: aprox. de 400 a \$ 2000	Tiempo reparación: 1 hs. o menos Costo de reparación: menos de \$ 400

El uso de este tipo de árbol de decisión permite estructurar el proceso de jerarquización de activos de forma sistemática y reproducible, alineándose con las buenas prácticas de RCM y análisis de riesgos, donde la priorización de activos es clave para la definición de estrategias de mantenimiento efectivas (Nowlan & Heap, 1978; SAE JA1011, 2009).

7. AMEF

7.1. Definición de funciones y fallas funcionales

La definición de funciones y fallas funcionales constituye una etapa fundamental dentro de la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), ya que permite

¹³ Japan Institute of Plant Maintenance (JIPM). (1995). Diagrama de flujo – Clasificación ABC. Japan Institute of Plant Maintenance.

establecer con precisión el propósito operativo de los activos y las condiciones bajo las cuales se considera que estos dejan de cumplir con su desempeño esperado. Este análisis es esencial para garantizar que las estrategias de mantenimiento estén orientadas a preservar la funcionalidad del sistema y no únicamente la integridad física de sus componentes (Moubray, 1997).

En primera instancia, se identifican las funciones del sistema, entendidas como las acciones que el activo debe cumplir dentro de su contexto operacional. Estas funciones deben formularse de manera clara y, en lo posible, cuantificable, incorporando parámetros como capacidad, eficiencia, presión, temperatura o cualquier variable crítica para la operación. En el caso del motogenerador a gas, las funciones principales están asociadas a la generación continua de energía eléctrica dentro de rangos de desempeño definidos, así como a la adecuada gestión térmica mediante los sistemas de enfriamiento de alta y baja temperatura (HT y LT).

Posteriormente, se establecen las fallas funcionales, definidas como la incapacidad total o parcial del activo para cumplir con sus funciones bajo los estándares establecidos. De acuerdo con la lógica del RCM, una falla funcional no necesariamente implica la detención total del equipo, sino que puede presentarse como una desviación en el rendimiento esperado, pérdida de capacidad, incumplimiento de parámetros operativos o degradación progresiva del desempeño (Nowlan & Heap, 1978)¹⁴. Esta distinción es clave, ya que permite enfocar el análisis en condiciones que realmente impactan la operación.

La correcta relación entre funciones y fallas funcionales garantiza la trazabilidad del análisis, asegurando que cada función tenga asociada al menos una condición de falla que represente su incumplimiento. Este enfoque es coherente con los criterios establecidos en los

¹⁴ Nowlan, F. S., & Heap, H. F. (1978). Reliability-Centered Maintenance. United Airlines / U.S. Department of Defense.

estándares de RCM, los cuales indican que el análisis debe centrarse en lo que el activo debe hacer antes de evaluar cómo puede fallar (SAE JA1011, 2009)¹⁵.

Para el desarrollo de esta fase, se elabora una tabla estructurada que permite organizar la información de manera sistemática, relacionando cada función con su respectiva falla funcional, así como los parámetros de desempeño asociados. Esta herramienta constituye la base para la identificación de modos de falla en etapas posteriores del análisis.

En consecuencia, la adecuada definición de funciones y fallas funcionales permite establecer un marco claro para el análisis de confiabilidad, facilitando la identificación de eventos críticos y contribuyendo al diseño de estrategias de mantenimiento alineadas con los requerimientos operacionales del sistema.

7.2. Definición de modos y efectos de fallas

La identificación y análisis de los modos y efectos de falla constituye una de las etapas centrales dentro de la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), ya que permite comprender de manera estructurada cómo fallan los activos, cuáles son las causas asociadas y qué consecuencias generan sobre el sistema. Este análisis se desarrolla mediante la aplicación del Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF), herramienta ampliamente utilizada en la gestión de mantenimiento y respaldada por estándares internacionales.

En primera instancia, se definen los modos de falla, entendidos como las formas específicas en que un activo o componente puede dejar de cumplir una función determinada. Estos modos de falla están directamente relacionados con las fallas funcionales previamente

¹⁵ SAE International. (2009). JA1011: Evaluation criteria for reliability-centered maintenance (RCM) processes. SAE.

identificadas y describen el mecanismo físico o técnico mediante el cual ocurre la pérdida de desempeño. Ejemplos de modos de falla en un motogenerador pueden incluir desgaste de componentes, sobrecalentamiento, fugas, fallas eléctricas o contaminación de fluidos, entre otros (Moubray, 1997).

Posteriormente, se analizan los efectos de falla, los cuales corresponden a las consecuencias inmediatas que genera la ocurrencia de un modo de falla sobre el sistema, el proceso productivo o la operación en general. Estos efectos deben describirse de manera clara y objetiva, considerando aspectos como la pérdida de función, impacto en la producción, afectaciones a la seguridad, consecuencias ambientales y costos asociados. De acuerdo con la metodología RCM, es fundamental diferenciar entre efectos locales (a nivel de componente) y efectos sistémicos (a nivel del proceso) (Nowlan & Heap, 1978).

El desarrollo del AMEF permite establecer una relación lógica entre funciones, fallas funcionales, modos de falla y efectos, facilitando la identificación de eventos críticos que requieren estrategias de mantenimiento específicas. Asimismo, este análisis constituye la base para la posterior evaluación de consecuencias y la selección de tareas de mantenimiento más adecuadas, en coherencia con los lineamientos establecidos por normas como la IEC 60812.

Para la ejecución de esta fase, se construye una tabla estructurada que permite organizar de manera sistemática la información correspondiente a cada elemento analizado, incluyendo el activo, la función, la falla funcional, el modo de falla, sus causas y los efectos asociados. Esta herramienta facilita la trazabilidad del análisis y asegura la coherencia en la identificación de riesgos.

En consecuencia, la correcta identificación de los modos y efectos de falla permite

comprender el comportamiento del sistema ante condiciones de falla, priorizar los eventos críticos y establecer estrategias de mantenimiento orientadas a la prevención y mitigación de sus consecuencias, contribuyendo así a la mejora de la confiabilidad y disponibilidad operacional del motogenerador.

7.3. Evaluar consecuencias de fallas

La evaluación de consecuencias constituye una etapa fundamental dentro del proceso de aplicación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), ya que permite determinar el impacto real que generan los diferentes modos de falla sobre la operación del activo y, en función de ello, establecer criterios técnicos para la toma de decisiones en mantenimiento. Esta fase se enfoca en analizar los efectos derivados de las fallas, priorizando su impacto sobre la seguridad, el entorno y los recursos económicos de la organización, en concordancia con lineamientos de gestión del riesgo establecidos en la ISO 31000¹⁶.

A partir de la información obtenida en el análisis funcional y el AMEF, se identifican los modos de falla y sus efectos asociados, los cuales son posteriormente evaluados bajo tres criterios principales: seguridad, medio ambiente y costos. Este enfoque permite simplificar el análisis sin perder rigurosidad técnica, concentrando la evaluación en los aspectos más críticos para la organización.

En primer lugar, las consecuencias en seguridad consideran el impacto potencial de las fallas sobre la integridad de las personas y las instalaciones. En el contexto de un motogenerador a gas, estas consecuencias pueden incluir riesgos de explosión, incendio, liberación de gases peligrosos o fallas catastróficas de componentes mecánicos. La adecuada evaluación de este

¹⁶ ISO 31000 (2018). Risk management — Guidelines.

criterio es prioritaria, dado que cualquier evento que comprometa la seguridad debe ser gestionado bajo un enfoque preventivo riguroso, independientemente de su frecuencia de ocurrencia.

En segundo lugar, se analizan las consecuencias ambientales, las cuales están asociadas a los efectos negativos que una falla puede generar sobre el entorno. Esto incluye emisiones no controladas, fugas de combustibles o lubricantes, y cualquier evento que pueda afectar el cumplimiento de la normativa ambiental vigente. En sistemas de generación a gas, este aspecto adquiere especial relevancia debido a la naturaleza del combustible y a las posibles implicaciones regulatorias y reputacionales para la organización.

En tercer lugar, se evalúan las consecuencias económicas o de costo, las cuales integran tanto los costos directos como indirectos derivados de la ocurrencia de una falla. Dentro de este criterio se incluyen los costos de reparación, reemplazo de componentes, mano de obra, así como las pérdidas asociadas a la indisponibilidad del equipo, tales como interrupciones en la producción y disminución de la eficiencia operativa. Este análisis permite cuantificar el impacto financiero de las fallas y establecer prioridades de intervención basadas en la relación costo-beneficio, en línea con los principios de gestión de activos definidos en la ISO 55000.

La evaluación de consecuencias bajo estos tres criterios permite establecer una base sólida para la priorización de los modos de falla y la posterior aplicación del árbol de decisión del RCM. Tal como lo plantea John Moubray, las decisiones de mantenimiento deben estar fundamentadas en las consecuencias de las fallas, más que en su ocurrencia, lo que garantiza una asignación eficiente de los recursos y un enfoque orientado a la mitigación de riesgos críticos.

En conclusión, esta etapa permite enfocar la gestión del mantenimiento hacia los aspectos

que realmente generan valor y riesgo para la organización, asegurando que las estrategias implementadas contribuyan a la mejora de la confiabilidad, disponibilidad y sostenibilidad operacional del motogenerador.

7.4. Selección de estrategias de mantenimiento

La selección de estrategias y la definición de actividades de mantenimiento se desarrollan a partir de la aplicación sistemática del árbol de decisión del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), el cual permite establecer, de manera estructurada, las acciones más adecuadas para gestionar cada modo de falla identificado. Este enfoque garantiza que las decisiones de mantenimiento no se basen únicamente en la ocurrencia de fallas, sino en sus consecuencias, su comportamiento y la viabilidad técnica de su mitigación, tal como lo plantea John Moubray en el desarrollo conceptual del RCM moderno.

A través del uso del árbol de decisión del RCM, se evalúan aspectos clave como la criticidad de la falla, su impacto en la seguridad, el medio ambiente y los costos, así como la posibilidad de detectar la falla antes de que ocurra una pérdida funcional. Este proceso se encuentra alineado con los criterios establecidos en las normas SAE JA1011 y SAE JA1012¹⁷, las cuales definen los lineamientos para la correcta aplicación de la metodología RCM en entornos industriales.

Con base en este análisis, se determinan las estrategias más apropiadas, tales como mantenimiento preventivo, mantenimiento predictivo basado en condición, tareas de búsqueda de fallas ocultas, rediseños o, en algunos casos, la no intervención cuando el riesgo es aceptable. Este enfoque permite asegurar que cada decisión esté técnicamente justificada y orientada a la

¹⁷ SAE JA1012 (2011). A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard. SAE International.

mitigación de consecuencias relevantes dentro del sistema.

Una vez definidas las estrategias, se procede a la estructuración de las actividades de mantenimiento, considerando el tipo de intervención requerido para cada modo de falla. En este sentido, las actividades se clasifican en diferentes tipos, tales como inspecciones, limpieza, lubricación, ajustes, calibraciones, reemplazos programados y pruebas funcionales, entre otras. Esta clasificación permite estandarizar las tareas y facilitar su implementación dentro del plan de mantenimiento. Adicionalmente, para asegurar la correcta ejecución de las actividades, se incorporan los datos necesarios para la planeación del mantenimiento, los cuales incluyen la frecuencia de intervención, tiempos estimados de ejecución, recursos humanos requeridos, herramientas y equipos necesarios, condiciones operativas para su realización, y criterios de aceptación o finalización de la tarea. La adecuada estructuración de esta información permite mejorar la gestión de órdenes de trabajo y la eficiencia en la ejecución del mantenimiento, apoyándose en lineamientos de gestión de datos establecidos en la ISO 14224.

De igual manera, la definición de estas actividades se integra con la gestión de repuestos y la disponibilidad de recursos, asegurando que cada intervención pueda ser ejecutada sin retrasos asociados a la falta de materiales o información técnica. Este enfoque integral permite mejorar los indicadores de mantenibilidad, reducir los tiempos de intervención y aumentar la disponibilidad operacional del motogenerador.

En conclusión, el uso del árbol de decisión del RCM, junto con la adecuada clasificación y planeación de las actividades de mantenimiento, permite establecer un plan estructurado, técnicamente justificado y alineado con los objetivos de confiabilidad y desempeño del activo, contribuyendo a la optimización de la gestión del mantenimiento dentro de la organización.

8. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología descrita al motogenerador a gas Jenbacher J624 de la planta de OBEN Group Colombia, organizados en función de los objetivos específicos del trabajo. El desarrollo completo del análisis RCM se incluye en el Apéndice 1.

8.1. Estructuración y criticidad del sistema de generación.

Como producto del levantamiento del árbol de equipos se consolidó el inventario general de activos del sistema, identificando cada equipo con su taxonomía y tipo (Tabla 4).

Tabla 5.

Listado de equipos

TAXONOMIA ▼	TIPO DE EQUIPO ▼	EQUIPO ▼
ACOPL	ACOPLE	ACOPLE ELASTICO LADO MOTOR
ACOPL	ACOPLE	ACOPLE ELASTICO LADO GENERADOR
AEROE	AEROENFRIADOR	AEROENDRIADOR AUXILIAR DE AGUA HT 1
AEROE	AEROENFRIADOR	AEROENFRIADOR AUXILIAR DE AGUA HT 2
AEROE	AEROENFRIADOR	AEROENFRIADOR AUXILIAR DE AGUA LT
ARLEV	ARBOL DE LEVAS	ARBOL DE LEVAS
ARRNCA	ARRANCADOR	ARRANCADOR 01
ARRNCA	ARRANCADOR	ARRANCADOR 02
ARRNCA	ARRANCADOR	ARRANCADOR 03
AVR	AVR	AVR
BATER	BATERIA	BATERIAS DE COMPENSACION
BATER	BATERIA	BANCO DE BATERIAS DE ARRANQUE AGM

Sobre este inventario se construyó el árbol jerárquico de activos siguiendo la estructura de la norma ISO 14224, el cual organiza el motogenerador desde el nivel de sistema hasta el de parte (Tabla 5).

Tabla 6.

Árbol jerárquico de activos

COD	INDUSTRIA	COD	NEGOCIO	COD	INSTALACION	COD	PLANTA	COD	UNIDAD	COD	SISTEMA	COD2	EQUIPO	COD3	SUBEQUIPO	COD4	PORTE
1	OGEN GROUP	1	GENERACION	1	GALAPA	1	GENERACION P1	1	MOTOGENERADOR J624 #1								
										1	SISTEMA DE ADMISION						
												1.1	DUCTOS DE ADMISION DE AIRE				
																1.1.a	JUNTA EXPANSIVA
															1.1.1	FILTRO DE AIRE DE ADMISION	
																1.1.1.a	CARTUCHO DE FILTRO GRANDE
																1.1.1.b	CARTUCHO DE FILTRO PEQUEÑO
																1.1.1.c	SENSOR DE TEMPERATURA DE ASPIRACION
																1.1.1.d	SENSOR DE HUMEDAD
												1.2	RED DE TUBERIAS DE ADMISION DE GAS				
															1.2.1	FILTRO DE ENTRADA GAS	
																1.2.1.a	CARTUCHO DE FILTRO
															1.2.2	VALVULA DE SECCIONAMIENTO DE SEGURIDAD	
															1.2.3	REGULADOR DE ALTA PRESION	
															1.2.4	VALVULA DE SEGURIDAD ALIVIO DE ALTA PRESION	
															1.2.5	VALVULA DOSIFICADORA DE GAS Teclat	
												1.3	RED DE TUBERIAS DE PRECAMARA				
															1.3.1	REGULADOR DE PRESION DE GAS DE RECAMARA	
												1.4	COMPRESOR DE GAS DE PRECAMARA				
												1.5	MEZCLADOR ESTATICO DE AIRE/GAS LADO A				
												1.6	MEZCLADOR ESTATICO DE AIRE/GAS LADO B				

La aplicación del análisis de criticidad (clasificación ABC) permitió jerarquizar los activos según su impacto sobre la operación, la seguridad y los costos, asignando a cada uno los niveles A (criticidad alta), B (criticidad media) o C (criticidad baja). De los 144 equipos analizados, 44 resultaron de criticidad A, 49 de criticidad B y 51 de criticidad C. De acuerdo con esta clasificación, el motogenerador y sus circuitos de enfriamiento HT y LT se confirmaron como los activos de mayor criticidad, sobre los cuales se concentró el desarrollo del AMEF. Este resultado da cumplimiento al primer objetivo específico, al identificar los componentes y subsistemas más relevantes para la disponibilidad y la confiabilidad del suministro de energía.

8.2. Análisis funcional del motogenerador.

El análisis funcional permitió definir, para cada sistema del motogenerador, las funciones que debe cumplir dentro de su contexto operacional y las fallas funcionales que representan su incumplimiento. La Tabla 7 presenta el consolidado del análisis funcional. A manera de ilustración, en el sistema de gases de escape se definieron funciones como direccionar los gases de escape hacia los turbocargadores (red de tubería de gases de escape), optimizar la emisión de gases mediante la medición de NOx y temperatura (regulador Lenox), y realizar el barrido de gases en la preparación del arranque (motor ventilador de barrido); para cada una se estableció su correspondiente falla funcional.

Tabla 7.

Consolidado de AMEF

SISTEMA	EQUIPOS/SUBEQUIPOS	Función	Falla Funcional
SISTEMA DE GASES DE ESCAPE	RED DE TUBERIA DE GASES DE ESCAPE	Direccionar los gases de escape hacia los turbocargadores.	El múltiple de escape no logra conducir y sellar correctamente los gases de combustión desde los cilindros hacia el sistema de escape.
	REFULADOR LENOX	Se encarga de optimizar la emisión de gases de escape mediante la medición de la cantidad de óxidos nítricos (NOx) presentes durante la combustión y la temperatura de la mezcla.	Señal errática o fluctuaciones rápidas del sensor Nox y/o de temperatura
	VALVULA MARIPOSA MOTORIZADA	Mantener la contrapresión de escape dentro de los límites definidos	No regula correctamente el flujo de gases de escape
	MOTOR VENTILADOR DE BARRIDO DE GASES DE ESCAPE	Encargado de realizar el barrido de los gases de escape durante la etapa de preparación para el arranque del motor	No logra generar el flujo de aire necesario para barrer y evacuar eficazmente los gases de escape.

El análisis funcional completo de los sistemas de combustión, lubricación, refrigeración, control y generación eléctrica se incluye en el Apéndice 1. Con ello se da cumplimiento al

segundo objetivo específico.

8.3. Identificación de modos y efectos de falla.

A partir de las fallas funcionales se identificaron los modos de falla y sus efectos asociados (Tabla 8). En el sistema de gases de escape, por ejemplo, se identificaron modos como fisuras o grietas por fatiga térmica y fugas en juntas (red de tubería de escape), contaminación o daño térmico del sensor y conexiones defectuosas (regulador Lenox), falla del actuador y atascamiento por hollín (válvula mariposa motorizada), y motor quemado, falla de rodamientos o cableado dañado (motor ventilador de barrido). Entre los efectos se documentaron la pérdida de presión en el escape, el aumento de temperatura del compartimiento, lecturas erráticas de NOx, la pérdida de control de la válvula y el riesgo de retorno de gases calientes (backdraft) o incendio al apagar el motor.

Tabla 8.

Consolidación AMEF/ modo y efectos de falla

SISTEMA	EQUIPOS/SUBEQUIPOS	Modo de falla (causa de la falla)	Efectos de las fallas
SISTEMA DE GASES DE ESCAPE	RED DE TUBERIA DE GASES DE ESCAPE	Fisuras o grietas por fatiga térmica Fugas en juntas o empaques Obstrucción parcial por acumulación de hollín Deformación por sobretemperatura	Pérdida de presión en el escape afecta el turbo. Aumento de temperatura del compartimiento. Entrada de aire falso antes del turbo. Ruidos anormales ("soplidos"). Reducción del flujo hacia el turbo.
	REFULADOR LENOX	Sensor contaminado por hollín Sensor dañado térmicamente Cableado o conector defectuoso Señal errática o fuera de rango Sensor muerto (sin lectura) Conexiones sueltas, corrosión en bornes o conectores	Lectura NOx fluctuante; alarmas intermitentes; comportamiento inestable del control Lectura NOx en 0 ppm o valor máximo constante; alarma fuera de rango Lecturas que se sesgan con el tiempo; calibraciones frecuentes Lecturas atenuadas/erráticas; respuesta lenta; daño por condensado Fallo irreversible del sensor; lecturas erráticas Señal 4–20 mA inválida; comunicación fallida con PLC
	VALVULA MARIPOSA MOTORIZADA	Falla del actuador eléctrico o neumático Pérdida de señal de control desde el sistema de automatización Mariposa atascada por acumulación de hollín o partículas Corrosión por gases de escape o condensados	La válvula no responde a comandos Operación errática o sin control Movimiento incompleto o impreciso Pérdida de integridad mecánica
	MOTOR VENTILADOR DE BARRIDO DE GASES DE ESCAPE	Motor quemado Falla en rodamientos (ruido, bloqueo) Aspas dañadas o desgastadas Acumulación de hollín u obstrucción en la salida Cableado eléctrico dañado Falla de contactor o relé Vibraciones excesivas.	Los gases de escape permanecen atrapados en el sistema. Elevación de la temperatura en silenciador y ductos. Riesgo de backdraft (retorno de gases calientes). Riesgo de incendio al apagar el motor.

El conjunto de modos de falla identificados, con sus causas y efectos para la totalidad de los sistemas analizados, se presenta en el Apéndice 1. Con esto se da cumplimiento al tercer objetivo específico.

8.4. Clasificación de consecuencias y nivel de riesgo.

La evaluación de consecuencias calificó cada falla funcional en los criterios de seguridad (consecuencias humanas), medio ambiente y costos, y la asoció a un nivel de probabilidad, obteniendo el nivel de riesgo correspondiente mediante la matriz de riesgos.

Tabla 9.

Consolidado de evaluación de consecuencias

SISTEMA	EQUIPOS/SUBEQUIPOS	Falla Funcional	Consecuencias humanas	Consecuencias Ambientales	Consecuencias de Costos	Probabilidad de la falla	Nivel de Riesgo
SISTEMA DE REFRIGERANTE	BOMBA DE REFRIGERANTE	La bomba de refrigeración no logra hacer circular el refrigerante con el caudal y la presión necesarios para mantener la temperatura adecuada del sistema o del motor.	1 - Ninguno	1 - Ninguno	3 - Marginal	3 - < 1 año	MEDIO
	RED DE TUBERIAS DE REFRIGERANTE	Lectura errónea o falla de sensor de temperatura de la mezcla.	1 - Ninguno	1 - Ninguno	1 - Ninguno	5 - < 3 meses	BAJO
		Rotura o desprendimiento de mangueras y conexiones flexibles.	2 - Insignificante	2 - Insignificante	2 - Insignificante	3 - < 1 año	MEDIO
		Valvula termostatica tascada/cerrada.	1 - Ninguno	1 - Ninguno	1 - Ninguno	2 - < 5 años	BAJO
		No transporta el refrigerante en el caudal requerido	1 - Ninguno	3 - Marginal	2 - Insignificante	1 - >10 años	MEDIO
	INTERCAMBIADOR DE CALOR DE REFRIGERANTE	Pérdida de capacidad de intercambio/ temperaturas elevadas	1 - Ninguno	1 - Ninguno	3 - Marginal	3 - < 1 año	MEDIO
		Lectura errónea o falla de sensor de temperatura de refrigerante.	1 - Ninguno	1 - Ninguno	1 - Ninguno	5 - < 3 meses	BAJO
	MOTOR DE BOMBA DE REFRIGERANTE	no trasmite movimiento	1 - Ninguno	1 - Ninguno	2 - Insignificante	3 - < 1 año	MEDIO
	VARIADORES ABB	No controla la velocidad del motor.	1 - Ninguno	1 - Ninguno	2 - Insignificante	2 - < 5 años	BAJO

La Tabla 9 presenta el consolidado para el sistema de refrigerante, en el cual los eventos evaluados se distribuyeron entre los niveles de riesgo MEDIO y BAJO; por ejemplo, la pérdida de caudal o presión de la bomba de refrigerante y la rotura de mangueras se clasificaron como riesgo MEDIO, mientras que las fallas de los sensores de temperatura se clasificaron como Bajo.

Esta clasificación de consecuencias, conforme a los lineamientos del RCM, constituye la base para priorizar las intervenciones y da cumplimiento al cuarto objetivo específico.

8.5. Plan de mantenimiento estructurado.

La aplicación del árbol de decisión del RCM sobre los modos de falla evaluados condujo a la definición de las tareas de mantenimiento. La Tabla 10 presenta el consolidado de selección de tareas, en el cual predominan las tareas basadas en condición (CBM) e inspecciones, complementadas con tareas preventivas (descarte o reemplazo) y predictivas. A manera de ejemplo, para los filtros de aire de admisión se definió la inspección del indicador de presión diferencial (CBM) y el reemplazo programado (preventivo, referencias 628477 y 628476), y para el sistema de gas se establecieron la verificación de la presión diferencial de la cámara de precombustión y la inspección de los elementos apagallamas.

Tabla 10.

Consolidado de selección de tareas

Nivel de Riesgo	Tipo de Mtto	Tipo de actividad	Descripción Tarea de Mtto
BAJO	CBM	Inspeccion	Realizar inspección del indicador de presión diferencial de los filtros de aire de admisión. En caso de que los valores excedan los límites permisibles reemplazar los filtros crear aviso para programar cambio.
MEDIO	Preventivo	Descarte	Realizar reemplazo de los filtros de aire Ref: 628477; Cantidad: 4 y Ref: 628476; Cantidad: 2 (trabajo en alturas)
MEDIO	CBM	Inspeccion	Inspección de juntas pernaadas en búsqueda de tornillos sueltos; en caso de encontrar solturas, realizar ajuste inmediatamente; empaques deteriorados y aislamiento entre juntas deteriorado, crear aviso para programar corrección o cambio de juntas.
MEDIO	Predictivo	Inspeccion	Realizar inspección con equipo de ultrasonido en búsqueda de fugas de vacío. En caso de evidenciar fuga, realizar reporte para acciones correctivas.
BAJO	CBM	Inspeccion	1. Comprobar si todos los sistemas y componentes están libres de cuerpos extraños, suciedad, piezas y herramientas olvidadas, etcétera. 2. Controlar en cuanto a grietas, roturas, deformaciones de las piezas amovibles y de los componentes. 3. Comprobar la estanqueidad de mangueras, conducciones, accesorios, compensadores, etcétera
MEDIO	CBM	Inspeccion	Conectar manómetro en los puntos de medición, si la presión diferencial supera el valor de 15 mBar se deberá limpiar o sustituir los elementos apagallamas
MEDIO	CBM	Inspeccion	Verificar presión diferencial de la cámara de precombustión, registrar la medición para compararla a través del tiempo

La Tabla 10 detalla la planeación de cada tarea, incluyendo la frecuencia, el estado de la máquina requerido (funcionando o detenida), el ejecutor (recurso propio o servicio externo), la cantidad de técnicos, la duración y las horas-hombre (H.H.).

Tabla 11.

Consolidada planeación de tareas

PLANEACIÓN						
	Estado de la maquina	Ejecutor	Cantidad de Técnicos	Duración [h]	H.H.	ESTRATEGIA
1 mes	Funcionando	Técnico de Mantenimiento	1	0.17	0.17	Propio
3 meses	Detenido	Técnico de Mantenimiento	2	2.00	4.00	Propio
3 meses	Funcionando	Técnico de Mantenimiento	2	2.00	4.00	Propio
6 meses	Detenido	Servicio externo	1	2.00	2.00	Externo
1 mes	Funcionando	Técnico de Mantenimiento	1	0.50	0.50	Propio
1 año y 6 meses	Funcionando	Técnico de Mantenimiento	1	1.00	1.00	Propio

Finalmente, la Tabla 11 presenta el listado de inventario crítico (21 ítems), con su SKU, descripción, stock mínimo y número de parte, el cual asegura la disponibilidad de repuestos para la ejecución del plan.

Tabla 12.

Listado de inventario crítico

ITEM	SKU	NOMBRE	Stock Min	Part Number
1	REG-041-00579	Conector de Bujia	24	657541
2	REG-072-00418	Filtro de gas	1	1241892
3	REG-072-00440	Filtro de aceite de turbocompresor	4	225125
4	REG-072-00445	Filtro de aceite de compresor de gas	2	1228815
5	REG-041-00580	Bujia	24	1214569
6	REG-041-00581	Bobina de encendido	6	487181
7	REG-041-00576	Modulo safi	6	1240991
8	REG-072-00425	Regulador de presion de gas	1	1243197
9	REG-072-00531	Filtro de aire de admision grande	8	628477
10	REG-072-00532	Filtro de aire de admision pequeño	4	628476
11	REG-072-00532	Filtro de Blowby	4	9037052
12	REG-051-00318	Culata	3	1256282
13	REG-041-00622	Bateria de arranque	6	n/a
14	REG-042-00715	Valvula dosificadora de gas Tec-jet	1	638139
15	REG-072-00439	Empujador de valvula de admision/escape	6	1239290
16	REG-041-00588	Valvula de gas de precamara	24	1239066
17	REG-072-00450	Camisa de cilindro	6	9011592
18	REG-042-00710	Arrancador	2	9002162
19	REG-072-00468	Balancin de valvulas de admision	2	9026989
20	REG-072-00469	Balancin de valvula de escape	2	9026994
21	REG-041-00620	Motor de bomba de intercambiador de calor de gearbox	1	303531

El plan resultante, estructurado en la plantilla estandarizada (Tabla 3), es directamente integrable al sistema de gestión de mantenimiento (CMMS) de la organización y da cumplimiento al quinto objetivo específico.

8.6. Análisis de resultados e impacto esperado.

Los resultados anteriores se interpretan a la luz de la situación de partida del sistema de generación. Según los datos históricos de los últimos ocho meses (Tabla 1), la planta operó con una disponibilidad del 97 %, registrando 43 apagones y 113,5 horas acumuladas sin suministro energético; parte de estos eventos se originó en fallas de los equipos y parte en condiciones de

mala operación asociadas a que las máquinas no se encontraban en su estándar operacional.

El plan de mantenimiento diseñado actúa de forma directa sobre los eventos de origen técnico: al privilegiar las tareas basadas en condición y las inspecciones sobre los modos de falla de mayor riesgo, se anticipa la detección de fallas potenciales antes de que evolucionen hacia la pérdida de función. Se espera que ello se traduzca en una reducción de las paradas no programadas, un incremento del tiempo medio entre fallas (MTBF) y una disminución del tiempo de indisponibilidad acumulado. La definición de frecuencias, recursos y horas-hombre, junto con el aseguramiento del inventario crítico, contribuye además a reducir los tiempos de intervención —mejorando la mantenibilidad— y, con ello, la disponibilidad operacional del activo.

Es importante precisar que, dado que el plan se encuentra en fase de diseño y aún no ha sido implementado, su impacto sobre la disponibilidad se plantea como un resultado esperado y no como una medición empírica. La cuantificación de dicho impacto —a través de indicadores como disponibilidad, MTBF y costos de mantenimiento— requiere su implementación en el CMMS y el posterior seguimiento, aspecto que se retoma en las conclusiones como trabajo futuro. Asimismo, la reducción de los apagones por mala operación demanda acciones complementarias de estandarización operativa que exceden el alcance del presente plan.

9. Conclusiones

La aplicación de la metodología propuesta permitió el diseño un plan de mantenimiento basado en el enfoque estratégico del RCM para los motogeneradores Jenbacher de la planta OBEN Group Colombia, con el propósito de mejorar la disponibilidad operacional, reducir fallas no planificadas y asegurar la continuidad energética del proceso.

El análisis de criticidad permitió identificar los componentes y subsistemas más relevantes, mientras que el análisis funcional definió las funciones principales de los sistemas del motogenerador. A partir del AMEF, se determinaron los modos de falla, sus causas y efectos, los cuales fueron evaluados según su impacto en seguridad, ambiente y costos.

Con base en el árbol de decisión del RCM, se establecieron tareas de mantenimiento óptimas (preventivas, basadas en condición y correctivas planificadas), dando lugar a un plan estructurado con frecuencias, recursos y responsables, integrable al CMMS.

Referencias Bibliográficas

- International Electrotechnical Commission (IEC). (2018). IEC 60812: Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA). Ginebra: IEC.
- International Organization for Standardization (ISO). (2014). ISO 55000: Asset management — Overview, principles and terminology. Ginebra: ISO.
- International Organization for Standardization (ISO). (2016). ISO 14224: Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. Ginebra: ISO.
- International Organization for Standardization (ISO). (2018). ISO 31000: Risk management — Guidelines. Ginebra: ISO.
- Japan Institute of Plant Maintenance (JIPM). (1995). *Diagrama de flujo – Clasificación ABC*. Japan Institute of Plant Maintenance.
- Moubray, J. (1997). Reliability-Centered Maintenance II. New York: Industrial Press Inc. Mobley, R. K. (2002). An Introduction to Predictive Maintenance. Burlington: Butterworth-Heinemann.
- Nowlan, F. S., & Heap, H. F. (1978). Reliability-Centered Maintenance. Washington, D.C.: United Airlines / U.S. Department of Defense.
- Pulkrabek, W. W. (2004). Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine. Upper Saddle River: Prentice Hall.
- SAE International. (2009). SAE JA1011: Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes. Warrendale, PA: SAE International.
- SAE International. (2011). SAE JA1012: A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard. Warrendale, PA: SAE International.
- Smith, A. M. (2004). RCM—Gateway to World Class Maintenance. Elsevier Butterworth-Heinemann.
- U.S. Department of Energy. (2012). Operations & Maintenance Best Practices: A Guide to Achieving Operational Efficiency. Washington, D.C.

