

Estrategia de Gestión de Mantenimiento en una Planta de Generación de Energía Eléctrica a  
Partir de Biogás

Juan Pablo Ortiz Romero

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

Director

Yesid Javier Rueda Ordoñez

Doctor en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Especialización en Gerencia de Mantenimiento

Bucaramanga

2025

**Dedicatoria**

Para todos los que me apoyaron en el camino.

### **Agradecimientos**

A la Universidad Industrial de Santander por la formación que me ha brindado.

**Tabla de Contenido**

Introducción .....	13
1. Justificación .....	14
2. Objetivos .....	15
2.1. Objetivo general.....	15
2.2. Objetivos específicos .....	15
3. Marco teórico, conceptual y legal.....	16
3.1. Fundamentos de la gestión de mantenimiento.....	16
3.2. Estrategias de mantenimiento en la industria.....	16
3.2.1. Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM).....	16
3.2.2. Mantenimiento productivo total (TPM).....	17
3.2.3. Mantenimiento predictivo o basado en condición (CBM).....	17
3.2.4. Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (FMECA) .....	17
3.2.5. Análisis crítico comparativo .....	18
3.3. Gestión de activos y normatividad internacional.....	18
3.4. Indicadores de desempeño en mantenimiento .....	18
3.5. Marco legal y regulatorio en Colombia .....	19
4. Materiales y métodos .....	20
4.1. Enfoque metodológico .....	20
4.2. Recopilación de información .....	20
4.3. Clasificación y criticidad de activos .....	20
4.4. Diseño del plan de mantenimiento preventivo.....	22

4.5. Estrategias de mantenimiento predictivo / basado en condición .....	22
4.6. Definición de indicadores de gestión (KPI).....	22
4.7. Propuesta de implementación de CMMS .....	23
4.8. Estrategia de validación y seguimiento.....	23
5. Resultados y discusión.....	24
5.1. Contexto de la planta (estado inicial).....	24
5.2. Listado de equipos, criticidad y plan inicial de mantenimiento.....	30
5.3. Resultados iniciales de la operación .....	33
5.4. Ajustes y mejoras en la operación .....	36
5.5. Implementación de predictivo y CBM.....	38
5.6. Indicadores de mantenimiento .....	40
5.7. Discusión y análisis crítico .....	42
6. Conclusiones.....	43
7. Recomendaciones .....	44
Referencias Bibliográficas .....	46
Apéndices.....	48

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1 Matriz de criticidad.....	21
Figura 2 Diagrama funcional del sistema (SCADA).....	25
Figura 3 Panel de generación (SCADA).....	25
Figura 4 Salida de biodigestores hacia tren de calibración.....	26
Figura 5 Sopladores del tren de calibración.....	27
Figura 6 Cuarto de generadores.....	27
Figura 7 Cilindro colector y líneas de deshumificadores.....	28
Figura 8 Grupos electrógenos.....	28
Figura 9 Analizador AWIFLEX y módulo de desulfuración.....	29
Figura 10 Antorcha para quema de biogás.....	29
Figura 11 Inventario de equipos.....	30
Figura 12 Hoja de vida grupo electrógeno.....	31
Figura 13 Asignación de criticidad a equipos.....	31
Figura 14 Mantenimiento preventivo mensual generadores.....	32
Figura 15 Mantenimiento preventivo por horas generadores.....	32
Figura 16 Disponibilidad Primeros dos meses.....	33
Figura 17 Registro de fallas durante el periodo inicial de operación.....	34
Figura 18 Evidencia fotográfica de la falla presentada en Rotor de excitatriz.....	35
Figura 19 Intervención correctiva realizada sobre Rotor de excitatriz.....	35

Figura 20 Rutina diaria en la operación .....	36
Figura 21 Control de horas de operación de los grupos electrógenos .....	37
Figura 22 Relación de repuestos críticos definidos para grupos electrógenos .....	37
Figura 23 Resultados del análisis de tribología aplicado al aceite de los generadores.....	38
Figura 24 Panel de seguimiento presión de aceite y temperatura de refrigerante .....	39
Figura 25 Evolución del MTBF mensual durante el periodo de análisis.....	40
Figura 26 Variación del MTTR en los primeros ocho meses de operación.....	41
Figura 27 Tendencia de la disponibilidad.....	41
Figura 28 Cumplimiento del plan de mantenimiento .....	42

**Lista de Apéndices**

	Pág.
Apéndice A. Inventario y matrices de criticidad .....	48
Apéndice B. Plan de mantenimiento y hojas de vida.....	48

## Glosario

**RCM (siglas en inglés):** Mantenimiento Centrado en Confiabilidad

**TPM:** mantenimiento productivo total.

**CBM:** mantenimiento basado en condición.

**FMECA:** análisis de modos de falla, efectos y criticidad.

**MTBF:** tiempo medio entre fallas.

**MTTR:** tiempo medio de reparación.

**KPI:** indicadores clave de desempeño.

**CMMS:** sistema computarizado de gestión de mantenimiento.

**RETIE:** reglamento técnico de instalaciones eléctricas.

**CREG:** comisión de regulación de energía y gas.

**ISO 55000:** gestión de activos (marco).

**ISO 17359:** monitoreo de condición de maquinaria.

**ISO 13373:** análisis de vibraciones en maquinaria rotativa.

## Resumen

**Título:** Estrategia de gestión de mantenimiento en una planta de generación de energía eléctrica a partir de biogás\*

**Autor:** Juan Pablo Ortiz Romero\*\*

**Palabras Clave:** mantenimiento, biogás, disponibilidad, confiabilidad, sostenibilidad.

**Descripción:** La empresa GREMCA S.A., dedicada a la agroindustria de la palma de aceite, ha incorporado dentro de su estrategia de sostenibilidad una planta de biogás que aprovecha los residuos del proceso de extracción de aceite para la generación de energía eléctrica. Esta planta, que recientemente inició operación, requiere garantizar altos niveles de disponibilidad y confiabilidad en sus equipos, dado que una gestión de mantenimiento deficiente puede generar fallos tempranos, paradas no programadas y elevados costos de operación. El propósito de este trabajo es establecer una estrategia de gestión de mantenimiento que permita alcanzar y sostener una disponibilidad operativa superior al 95 %, optimizando costos y reforzando el posicionamiento de la empresa como referente en sostenibilidad energética. Para ello, se propone una metodología que contempla la recopilación de información técnica de los equipos, la evaluación del estado actual de la planta, la elaboración de matrices de criticidad, el diseño de planes de mantenimiento preventivo y predictivo, la definición de indicadores clave de

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Director: Nombres y Apellidos completos. Título académico completo de mayor rango. Codirector: Nombres y Apellidos completos. Título académico completo de mayor rango

desempeño (MTBF, MTTR, disponibilidad) y la implementación de un sistema de gestión de mantenimiento asistido por computadora (CMMS).

**Abstract****Title: Strategy for Maintenance Management in a Biogas Power Generation Plant \*****Author(s): Juan Pablo Ortiz Romero \*\*****Key Words: maintenance, biogas, availability, reliability, sustainability**

**Description:** GREMCA S.A., a palm oil agro-industrial company, has incorporated a biogas plant into its sustainability strategy. This facility, which recently began operations, converts palm oil extraction residues into electrical energy. Ensuring high levels of availability and reliability of the equipment is essential, as inadequate maintenance management could lead to early failures, unplanned shutdowns, and high operating costs. The purpose of this work is to establish a maintenance management strategy to achieve and sustain an operational availability greater than 95 %, optimizing costs and strengthening the company's position as a benchmark in energy sustainability. The proposed methodology includes the collection of technical information from equipment, the assessment of the plant's current condition, the development of criticality matrices, the design of preventive and predictive maintenance plans, the definition of key performance indicators (MTBF, MTTR, availability), and the implementation of a Computerized Maintenance Management System (CMMS).

---

\* Degree Work

\*\* School of Mechanical Engineering. Specialization in Maintenance Management. Advisor: xxxxx, Co-advisor: xxxxx.

## **Introducción**

GREMCA S.A. es una empresa agroindustrial dedicada al aprovechamiento de los cultivos de palma para la producción de aceite crudo de palma, aceite crudo de palmiste y torta de palmiste. Como parte de su estrategia de expansión hacia prácticas más sostenibles y renovables, la compañía ha invertido en la construcción de una planta de biogás que aprovecha los residuos orgánicos derivados del proceso de extracción de aceite para la generación de energía eléctrica.

La planta de biogás inició recientemente su operación y constituye un elemento clave en el crecimiento energético de la empresa. En este escenario, garantizar la disponibilidad y confiabilidad de los equipos resulta prioritario, ya que una gestión de mantenimiento inadecuada desde el inicio puede ocasionar fallos tempranos, paradas no programadas y un incremento considerable en los costos operativos a largo plazo (Solís, 2022; Ortiz, Rodríguez & Izquierdo, 2013).

Las plantas de generación de energía eléctrica a partir de biogás son reconocidas internacionalmente por su capacidad de transformar residuos en energía limpia y renovable. Sin embargo, debido a la complejidad de sus procesos, requieren un sistema de mantenimiento estructurado que prevenga fallas, reduzca los tiempos de indisponibilidad y garantice la confiabilidad operativa (INTECO, 2020).

La literatura técnica documenta diversas estrategias aplicadas en plantas de generación eléctrica y procesos industriales similares. Enfoques como el mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM), el mantenimiento productivo total (TPM) y las técnicas predictivas basadas en condición han mostrado ventajas en la anticipación de fallas y la reducción de costos. No obstante, también presentan limitaciones, como altos requerimientos de inversión tecnológica

o dependencia de personal especializado (López & Salvatore, 2014). Este contraste evidencia la necesidad de adaptar y combinar enfoques de acuerdo con las condiciones y recursos disponibles en cada planta.

De esta manera, surge la pregunta de investigación: ¿Es posible mantener una disponibilidad superior al 95 % en la planta de biogás de GREMCA mediante la implementación de una estrategia adecuada de gestión de mantenimiento?

El propósito de este trabajo es establecer una estrategia integral de gestión de mantenimiento que permita garantizar una disponibilidad operativa mayor al 95 %, sostenida en el tiempo, reduciendo costos operativos y fortaleciendo el posicionamiento de la empresa como referente en sostenibilidad y eficiencia energética.

## **1. Justificación**

La justificación de este trabajo se fundamenta en la necesidad de implementar una estrategia de mantenimiento integral que permita afrontar los retos técnicos de la operación de una planta de biogás, donde los equipos están expuestos a fallas severas como corrosión, incrustaciones y desgastes mecánicos. Desde el punto de vista económico, cada punto porcentual de disponibilidad representa un impacto significativo en la generación de energía y en los costos de operación, de modo que una gestión de mantenimiento adecuada contribuye a reducir el tiempo medio de reparación, incrementar el tiempo medio entre fallos y mejorar la eficiencia financiera del proceso.

En el ámbito social y ambiental, la confiabilidad en la operación de la planta aporta a la sostenibilidad al evitar emisiones no controladas de metano, sustituir generación eléctrica a partir de fuentes fósiles y aprovechar residuos agroindustriales, alineándose con los compromisos

ambientales y climáticos del país. Finalmente, en el contexto regional, este proyecto fortalece la competitividad del sector palmicultor y contribuye a la diversificación de la matriz energética en Colombia, al mismo tiempo que promueve el desarrollo de capacidades técnicas y la transferencia de conocimiento en el sector de la bioenergía (Ministerio de Minas y Energía, 2020).

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo general**

Establecer una estrategia de gestión de mantenimiento para asegurar una disponibilidad de una planta de generación de energía eléctrica a partir de biogás por encima del 95 %.

### **2.2. Objetivos específicos**

Documentar las especificaciones técnicas, manuales de operación, y criticidad de los equipos de la planta de biogás, para establecer una base de datos que permita planificar y priorizar las actividades de mantenimiento desde el inicio de la operación.

Diseñar un plan de mantenimiento preventivo, con el fin de establecer rutinas de intervención programadas que minimicen fallos imprevistos y garanticen la continuidad en la generación de energía.

Definir estrategias de mantenimiento predictivo y/o basado en condición para anticipar fallos potenciales en los equipos críticos, con el fin de incrementar la confiabilidad operativa y sosteniendo una disponibilidad superior al 95 %.

Establecer y monitorear indicadores clave de desempeño (KPI) como MTBF, MTTR y disponibilidad, con el propósito de medir la efectividad de la estrategia de mantenimiento y orientar acciones de mejora continua que fortalezcan la eficiencia de la planta.

### **3. Marco teórico, conceptual y legal**

#### **3.1. Fundamentos de la gestión de mantenimiento**

El mantenimiento industrial comprende el conjunto de actividades técnicas y de gestión orientadas a conservar o restituir un activo a un estado en el que pueda cumplir la función para la cual fue diseñado. Tradicionalmente se distinguen tres enfoques principales: mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo. El mantenimiento correctivo actúa una vez que se ha producido la falla; el preventivo consiste en intervenciones programadas de acuerdo con tiempos o frecuencias establecidas; y el predictivo, también denominado basado en condición, se fundamenta en la observación de parámetros que anticipan el deterioro de los equipos (Solís, 2022).

En el contexto de plantas de generación de energía a partir de biogás, la gestión de mantenimiento cobra especial relevancia por la presencia de equipos sometidos a condiciones severas, como motores de combustión interna, sistemas de desulfurización de gas y equipos de compresión. La continuidad en la operación depende directamente de la confiabilidad de estos activos, lo cual justifica la necesidad de contar con estrategias integrales que combinen distintos enfoques de mantenimiento.

#### **3.2. Estrategias de mantenimiento en la industria**

Diversos enfoques han sido documentados en la literatura técnica para mejorar la confiabilidad de sistemas de generación eléctrica e industrial.

##### ***3.2.1. Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)***

Propuesto formalmente en la industria aeronáutica, el RCM establece una metodología para identificar las funciones críticas de un activo, sus modos de falla y las consecuencias de

estas. Su principal fortaleza radica en priorizar actividades de mantenimiento según impacto en seguridad, ambiente y operación. Sin embargo, su implementación completa requiere de información detallada de fallas históricas y un alto grado de experticia, lo que puede representar una limitación para empresas con recursos limitados (Moubray, 1997).

### ***3.2.2. Mantenimiento productivo total (TPM)***

Desarrollado en Japón, el TPM busca maximizar la efectividad de los equipos a través de la participación activa de todo el personal. Entre sus aportes están la reducción de paradas menores y la creación de cultura organizacional orientada al cuidado de los activos. No obstante, sin una adecuada integración con criterios de criticidad, puede dar lugar a actividades de bajo impacto en términos de confiabilidad (Nakajima, 1988).

### ***3.2.3. Mantenimiento predictivo o basado en condición (CBM)***

Fundamentado en normas como la ISO 17359, este enfoque utiliza el monitoreo de variables de operación (vibraciones, temperatura, análisis de aceite, ultrasonido, termografía, entre otras) para anticipar fallas. Entre sus ventajas se destacan la optimización de los tiempos de intervención y la extensión de la vida útil de los equipos. Sus limitaciones están relacionadas con la inversión inicial en sensorica, capacitación y la necesidad de disciplina en la gestión de datos (INTECO, 2020).

### ***3.2.4. Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (FMECA)***

Según la norma IEC 60812, este método permite identificar y jerarquizar los modos de falla de un sistema, asignando una valoración de criticidad que ayuda a definir prioridades de intervención. Su aplicación es especialmente útil en plantas de biogás, donde la identificación temprana de fallas potenciales en motores, sistemas de gas y compresores puede evitar paradas prolongadas.

### ***3.2.5. Análisis crítico comparativo***

Cada enfoque presenta fortalezas y limitaciones. Mientras el RCM aporta rigurosidad en la priorización, el TPM fomenta la cultura organizacional, el CBM facilita la anticipación de fallas y el FMECA aporta herramientas de clasificación de riesgos. En la práctica, resulta más efectivo integrar elementos de cada estrategia en lugar de aplicar una sola metodología de manera aislada. Para el caso de GREMCA, la combinación de planes preventivos, técnicas predictivas y herramientas de criticidad se ajusta mejor a la realidad de operación y recursos disponibles.

### **3.3. Gestión de activos y normatividad internacional**

La gestión de activos, bajo el marco de la norma ISO 55000, busca alinear las decisiones de operación y mantenimiento con los objetivos estratégicos de la organización. Este estándar enfatiza la importancia de la trazabilidad de la información, la evaluación del riesgo y la mejora continua en el ciclo de vida de los activos (ISO, 2014).

En cuanto a normatividad internacional aplicable al mantenimiento predictivo, la ISO 17359 establece lineamientos generales para el monitoreo de condición, mientras que la ISO 13373 se centra en el análisis de vibraciones en maquinaria rotativa. Estas normas ofrecen guías prácticas que pueden adaptarse a los requerimientos de una planta de biogás.

### **3.4. Indicadores de desempeño en mantenimiento**

El desempeño de la gestión de mantenimiento se evalúa mediante indicadores clave que permiten medir y comparar resultados:

MTBF (Mean Time Between Failures): tiempo medio entre fallas, asociado a la confiabilidad del equipo.

MTTR (Mean Time To Repair): tiempo medio para reparar, relacionado con la rapidez de respuesta y la eficiencia del mantenimiento.

Disponibilidad: proporción del tiempo en que un equipo está en condiciones de cumplir su función. Puede calcularse como disponibilidad intrínseca (solo fallas y reparaciones) u operacional (incluye tiempos de parada planificada).

Confiabilidad: probabilidad de que un activo desempeñe su función durante un intervalo de tiempo bajo condiciones establecidas.

La combinación de estos indicadores ofrece una visión integral del desempeño del mantenimiento, permitiendo orientar decisiones de mejora continua (Ramírez & Manotas, 2014).

### **3.5. Marco legal y regulatorio en Colombia**

La operación de plantas de generación de energía a partir de biogás en Colombia se encuentra enmarcada por la normativa nacional:

RETIE (Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas): establece los requisitos de seguridad en el diseño, construcción y operación de instalaciones eléctricas, aplicables a la planta de generación.

Ley 1715 de 2014: promueve el uso de fuentes no convencionales de energía, incluyendo el biogás, y fomenta la integración de estas a la matriz energética nacional.

Resoluciones de la CREG: regulan aspectos técnicos y económicos de la conexión y operación de plantas de generación distribuida, relevantes para GREMCA.

Políticas energéticas nacionales: el Ministerio de Minas y Energía impulsa la transición energética, donde la bioenergía ocupa un papel estratégico como fuente renovable y descentralizada (Ministerio de Minas y Energía, 2020).

## **4. Materiales y métodos**

### **4.1. Enfoque metodológico**

El presente trabajo corresponde a un estudio de tipo aplicado, con enfoque descriptivo y orientado al diseño y validación progresiva de una propuesta técnica. La estrategia metodológica se orienta a construir un plan de mantenimiento preventivo a partir de la recopilación de información de la planta, la medición de la disponibilidad en los primeros meses de operación y el análisis de las fallas presentadas. A partir de estos resultados iniciales, se desarrolla y ajusta progresivamente un plan de mantenimiento con el fin de alcanzar la meta de disponibilidad superior al 95 %.

### **4.2. Recopilación de información**

La primera etapa consistió en la obtención de información técnica a partir de manuales de operación y mantenimiento suministrados por los fabricantes, fichas técnicas de equipos, registros de fallas iniciales y observaciones realizadas en los primeros meses de operación. También se llevaron a cabo entrevistas e inspecciones de campo con el personal de mantenimiento, con el fin de complementar los datos y validar la información recolectada.

### **4.3. Clasificación y criticidad de activos**

Con base en la información obtenida, se construyeron matrices de criticidad aplicando criterios de impacto en la producción, impacto en la seguridad, costo de reparación o reemplazo, tiempo de parada por falla y disponibilidad de repuestos. Cada uno de estos factores se valoró en una escala de 1 a 5, donde 5 representa la condición más desfavorable (mayor impacto o menor disponibilidad). La criticidad total de cada equipo se obtuvo mediante el promedio de los puntajes asignados a cada criterio. En la Figura 1 se presenta la escala de valoración utilizada.

**Figura 1**

## Matriz de criticidad

Item	Impacto en la Producción	Impacto en la Seguridad	Costo de Reparación o Reemplazo	Tiempo de Parada por Falla	Disponibilidad de Repuestos
5	Detiene completamente la planta o genera pérdida mayor.	Riesgo extremo, lesiones graves o muerte.	Crítico: supera presupuesto mensual de mantenimiento.	Parada crítica, más de un día.	Obsoleto o sin proveedor directo.
4	Detiene sistemas importantes por tiempo considerable.	Riesgo alto, posibilidad de accidente grave.	Muy alto costo o tiempo largo de entrega.	Parada prolongada, más de 4 horas hasta 1 día.	Especial, más de una semana o importación.
3	Interrumpe parcialmente, pero se puede continuar operando.	Riesgo moderado, accidentes menores posibles.	Alto costo, técnicos externos o piezas costosas.	Parada intermedia, 1 a 4 horas.	Pedido nacional, 2 a 5 días.
2	Afecta levemente la eficiencia, sin detener procesos.	Riesgo bajo, consecuencias menores.	Costo moderado, repuestos básicos.	Parada menor, menos de 1 hora.	Común en mercado local, 1 día.
1	No afecta la producción. Equipo redundante o de soporte.	Sin riesgo para personas ni entorno.	Bajo costo, reparación interna.	Sin parada, corrección en operación.	Siempre disponible en inventario.

Criticidad	Significado
3-5	Riesgo Alto - Atención Prioritaria
2-3	Riesgo Medio - Monitoreo Regular
0-2	Riesgo Bajo - Mantenimiento Básico

Este análisis permitió clasificar los equipos en tres rangos: riesgo alto (3–5), riesgo medio (2–3) y riesgo bajo (0–2). Los equipos con mayor puntaje fueron considerados de atención prioritaria y requirieron un plan de mantenimiento más riguroso, combinando rutinas preventivas con técnicas predictivas. Aquellos con criticidad media se sometieron a monitoreo regular y actividades preventivas programadas, mientras que los de criticidad baja se gestionaron con tareas básicas de mantenimiento.

De esta forma, la criticidad definida condicionó directamente el desarrollo del plan de mantenimiento para cada equipo, garantizando que los recursos y esfuerzos se concentraran en los activos de mayor impacto para la confiabilidad de la planta.

#### **4.4. Diseño del plan de mantenimiento preventivo**

A partir de los resultados de disponibilidad obtenidos en los primeros meses y del análisis de criticidad, se elaboró un plan de mantenimiento preventivo inicial, que incluyó rutinas de inspección, lubricación, sustitución de componentes y pruebas de funcionamiento. Con el seguimiento de los indicadores y la ocurrencia de fallas reales, este plan fue objeto de ajustes progresivos, incorporando nuevas rutinas, cambios en frecuencias y la inclusión de repuestos críticos.

#### **4.5. Estrategias de mantenimiento predictivo / basado en condición**

De acuerdo con la criticidad de los equipos, se seleccionaron técnicas predictivas de aplicación inmediata en la planta, como el monitoreo de temperatura, la inspección mediante termografía infrarroja y el análisis de aceite lubricante. La priorización se realizó considerando la viabilidad técnica y los recursos disponibles en GREMCA, con el fin de implementar progresivamente estas herramientas en los activos más sensibles.

#### **4.6. Definición de indicadores de gestión (KPI)**

Se establecieron indicadores clave de desempeño para evaluar la efectividad de la estrategia de mantenimiento. A continuación, se presentan junto con sus fórmulas de cálculo:

MTBF (Mean Time Between Failures): tiempo medio entre fallas, asociado a la confiabilidad de los equipos.

$$\text{MTBF} = \text{Tiempo total de operación} / \text{Numero de fallas}$$

MTTR (Mean Time To Repair): tiempo medio de reparación, asociado a la rapidez y eficiencia de respuesta.

$$\text{MTTR} = \text{Tiempo total de reparación} / \text{Numero de fallas}$$

Disponibilidad: proporción del tiempo en que los equipos permanecen operativos.

$$\text{Disponibilidad} = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR})$$

Cumplimiento del plan de mantenimiento: porcentaje de actividades programadas que se ejecutan en el periodo.

$$\% \text{Cumplimiento} = (\text{Actividades Ejecutadas} / \text{Actividades Programadas}) * 100$$

La recopilación y análisis de estos KPI se realiza actualmente en hojas de cálculo de Excel, herramienta que permite suplir la ausencia de un CMMS y consolidar la información en reportes periódicos.

#### **4.7. Propuesta de implementación de CMMS**

Si bien la planta utiliza actualmente hojas de cálculo de Excel para la planificación, ejecución y control de mantenimiento, se recomienda la adopción futura de un sistema computarizado de gestión de mantenimiento (CMMS). Esta herramienta permitiría centralizar la información, generar órdenes de trabajo automáticas, gestionar inventarios de repuestos y mejorar la trazabilidad de las intervenciones.

#### **4.8. Estrategia de validación y seguimiento**

El cumplimiento del objetivo general se validó a través del monitoreo de los KPI, en particular de la disponibilidad, con la meta de mantenerla por encima del 95 %. Para ello, se realizaron análisis mensuales de los registros de mantenimiento, evaluando la efectividad de las acciones preventivas y predictivas. Esta retroalimentación permitió ajustar frecuencias, mejorar procedimientos y reforzar las prácticas que aportaron mayor impacto en la confiabilidad.

## **5. Resultados y discusión**

### **5.1. Contexto de la planta (estado inicial)**

En esta sección se presenta una visión global del sistema de generación a partir de biogás, desde la producción y acondicionamiento del gas hasta la conversión final en energía eléctrica.

El biogás es captado en los biodigestores y transportado a través del tren de calibración, donde sopladores aseguran el caudal y la presión adecuados para su conducción. Posteriormente, el gas pasa por unidades de deshumidificación que reducen la humedad y eliminan arrastres de condensados. Una vez acondicionado, se impulsa hacia los grupos electrógenos, donde atraviesa los elementos de mezcla y regulación antes de ingresar a los motores de combustión interna. La energía mecánica generada acciona los alternadores, que convierten la potencia en energía eléctrica.

El sistema cuenta además con dispositivos de seguridad destinados a garantizar una operación confiable. La tea de quemado permite disponer el biogás excedente o de baja calidad de manera controlada, evitando acumulaciones que representen riesgos de sobrepresión o explosividad. De forma complementaria, las válvulas automáticas de alivio instaladas en la línea de gas actúan por diferencia de presión, aliviando la presión del biodigestor cuando excede el límite calibrado.

Previo al arranque inicial se realizaron inspecciones visuales y pruebas básicas de funcionamiento, verificando el estado de los equipos principales. No se evidenciaron fugas, fijaciones sueltas ni anomalías. Las conexiones eléctricas y mecánicas se encontraron firmes, los

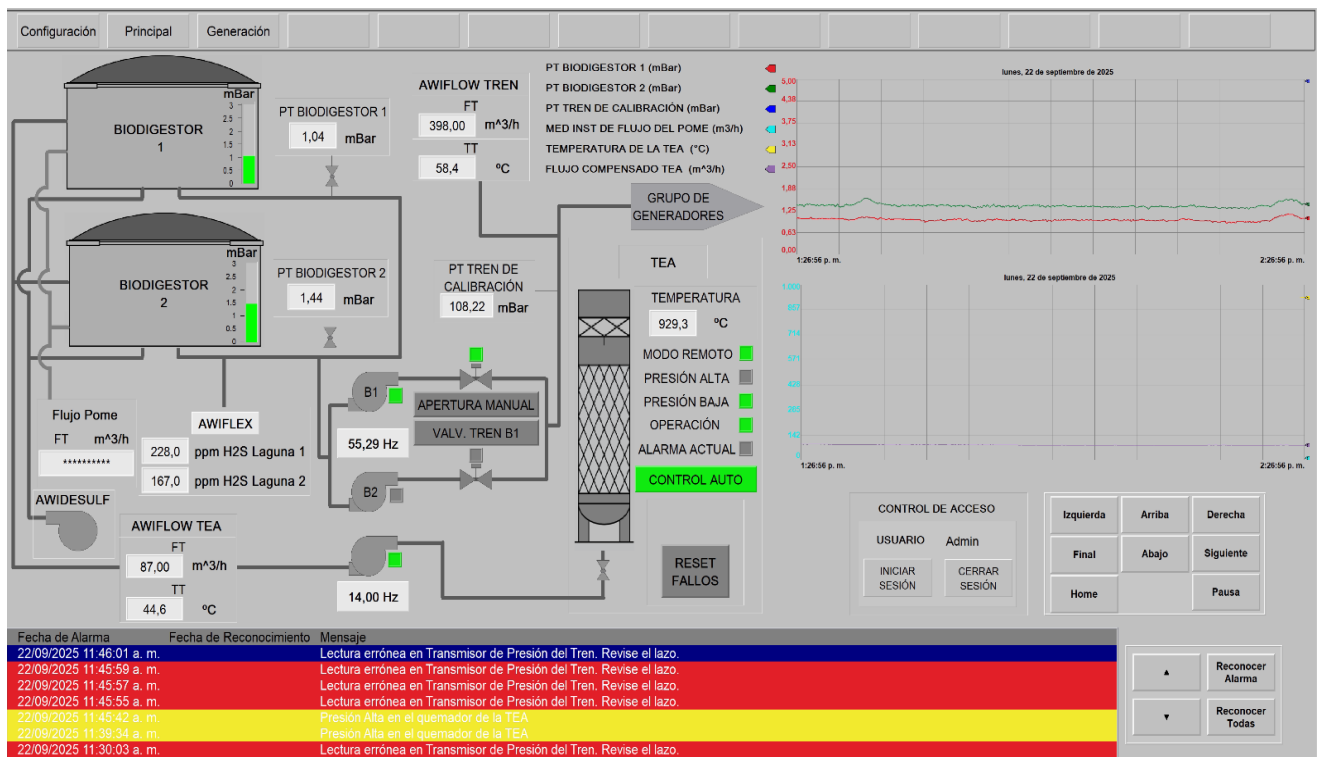
accesorios completos y las lecturas del sistema SCADA dentro de parámetros normales, lo que confirmó condiciones adecuadas para la puesta en marcha.

Como apoyo, se incluyen referencias visuales que permiten identificar los equipos dentro del flujo descrito y comprender su estado inicial de operación:

En la Figura 2 se muestra el diagrama funcional del sistema en el SCADA, donde se observa la interconexión general entre los biodigestores, el tren de gas y los grupos electrógenos.

**Figura 2**

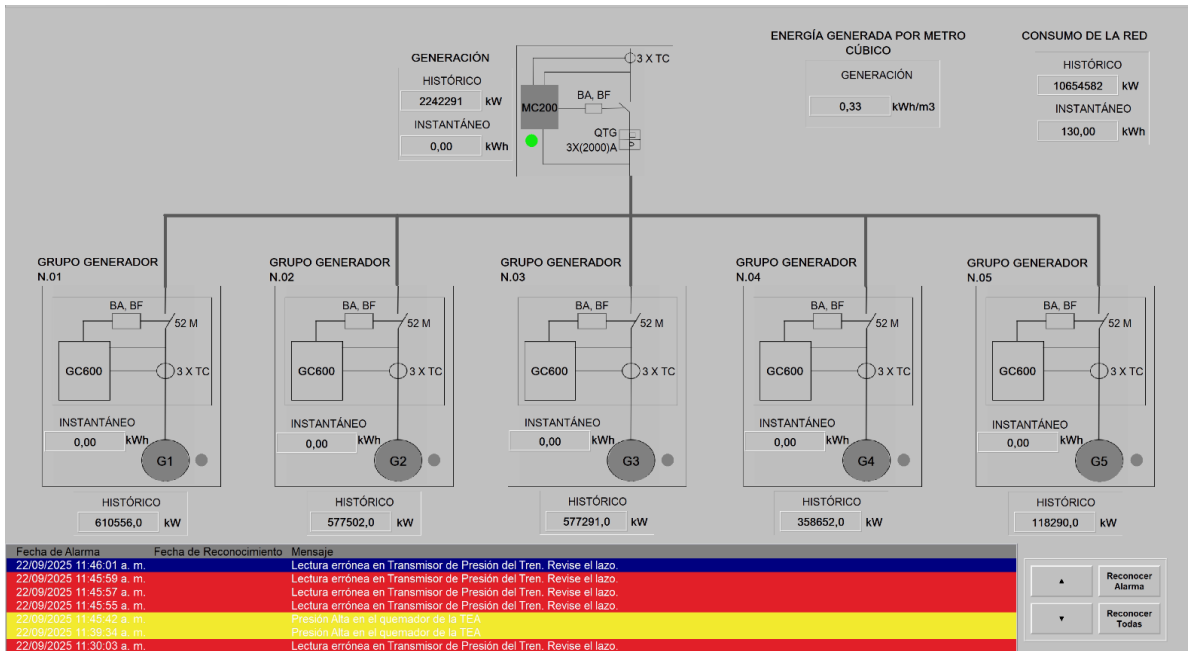
Diagrama funcional del sistema (SCADA).



En la Figura 3 se presenta el panel de generación del SCADA para el monitoreo en tiempo real de las variables eléctricas y operativas.

**Figura 3**

Panel de generación (SCADA).



En la Figura 4 se observa la salida de los biodigestores hacia el tren de calibración, punto inicial del acondicionamiento del biogás.

**Figura 4**

Salida de biodigestores hacia tren de calibración



En la Figura 5 se muestran los sopladores del tren de calibración, encargados de mantener el caudal y la presión del gas.

### Figura 5

Sopladores del tren de calibración.



En la Figura 6 se ilustra el cuarto de generadores, donde se alojan los motores de combustión interna y los alternadores.

### Figura 6

Cuarto de generadores.



En la Figura 7 se evidencia el cilindro colector y las líneas de deshumidificación, que eliminan la humedad del gas antes de ingresar al sistema de combustión.

### Figura 7

Cilindro colector y líneas de deshumificadores.



En la Figura 8 se presentan los grupos electrógenos principales de la planta, responsables de convertir la energía del biogás en potencia eléctrica.

### Figura 8

Grupos electrógenos.



En la Figura 9 se muestra el analizador AWIFLEX y el módulo de desulfuración, que aseguran la calidad del biogás mediante la reducción de  $H_2S$ .

### Figura 9

Analizador AWIFLEX y módulo de desulfuración



Finalmente, en la Figura 10 se observa la antorcha para la quema controlada del biogás excedente, elemento esencial para la seguridad de la planta.

### Figura 10

Antorcha para quema de biogás.



## 5.2. Listado de equipos, criticidad y plan inicial de mantenimiento

Se elaboró un inventario detallado de los equipos de la planta, al igual que sus hojas de vida, las cuales incluyen información técnica como fabricante, modelo, capacidad nominal, etc. Dado el volumen de información, el inventario completo se presenta en el Apéndice A, mientras que en el cuerpo del documento se expone únicamente una muestra representativa de los equipos principales. En la Figura 11 se presenta una parte del inventario de equipos de la planta, a modo ilustrativo.

**Figura 11**

Inventario de equipos


Codigo	Equipo	Ficha tecnica	Hoja de vida	Especificaciones	
	Antorcha	TEA FAII750_FICHA TÉCNICA	Excel: Plan MTTO y Hojas de vida / TEA	Marca:	Bilgeri EnvironTec GmbH
				Proovedor:	Biomethan
				Presion:	55 [mbar]
				Capacidad:	700 [Nm3/h]
				Opc1:	N/A
				Opc2:	N/A
				Opc3:	N/A
	Blower 1	FICHA TÉCNICA SOPLADOR CL 84_1 (3)	Excel: Plan MTTO y Hojas de vida / BA1	Marca:	Maprobiogas
				Proovedor:	Biomethan
				Tension:	220 [V]
				Potencia:	13.2 [kW]
				Capacidad:	1300 m <sup>3</sup> /h
				Opc2:	250 [mbar]
				Opc3:	3500 rpm – IP55 – Clase
Codigo	Equipo	Ficha tecnica	Hoja de vida	Especificaciones	
	Grupo Electrogeno 1	4.12. GENERADOR-FINCHA TÉCNICA.chp400.br.pt.es	Excel: Plan MTTO y Hojas de vida / G1	Marca:	WEG/SCANIA
				Proovedor:	CHP BRASIL
				Tension:	440 [V]
				Capacidad:	250 [kW]
				Consumo Biogas:	107 [m3/h]
				Velocidad:	1800 [RPM]
				Aceite:	39-45 [Litros]
	Grupo Electrogeno 2	4.12. GENERADOR-FINCHA TÉCNICA.chp400.br.pt.es	Excel: Plan MTTO y Hojas de vida / G2	Marca:	WEG/SCANIA
				Proovedor:	CHP BRASIL
				Tension:	440 [V]
				Capacidad:	250 [kW]
				Consumo Biogas:	107 [m3/h]
				Velocidad:	1800 [RPM]
				Aceite:	39-45 [Litros]

*Nota.* Extracto del inventario de equipos; el inventario completo se encuentra en el Apéndice A.

En la Figura 12 se presenta el formato de hoja de vida de los equipos.

**Figura 12**

Hoja de vida grupo electrógeno.

Logo Gremca		HOJA DE VIDA EQUIPO					Codigo			
							Elaborado			
							Revisado y Aprobado			
							Version	1		
NOMBRE DEL EQUIPO: GRUPO ELECTROGENO BIOGAS #1										
IMAGEN			INFORMACION GENERAL							
			No. Identificación	GENERADOR CHP SERIE OC13W20220242						
			Ubicación	CENTRO GENERACION GREMCA SA						
			Marca Motor	SCANIA						
			Modelo	OC13						
			Serie	8.744.448						
			Marca Generador	ABB						
			Modelo							
			Serie							
			Fecha de recepcion	20/10/2022						
			Fecha de inicio en servicio	1/03/2024						
Proveedor	BME SAS									
HISTORIAL DEL EQUIPO										
FECHA	OPERACION				DURACION	REALIZADO POR:	DESCRIPCION DE OPERACION	OT	HOROMETRO DE INTERVENCION.	OBSERVACIONES
	Preventivo	MITO	Calibración	Otros						
07-06-24	X				-	-	Mantenimiento 500 horas	-	459	
14 01 2025	x				1 hora	Omar Orozco	Se realiza inspeccion de mangueras, abrazaderas, sistema de escape, cables de bujias, bobinas, sistema de admision	007	580	Todo ok

Con base en el inventario se aplicó una matriz de criticidad que permitió priorizar los activos según el impacto de su falla en la operación. En la Figura 13 se muestra la asignación de criticidad de los equipos analizados.

**Figura 13**

Asignación de criticidad a equipos

Equipo	Impacto en la producción	Impacto en la seguridad	Costo de reparación o reemplazo	Tiempo de parada por falla	Disponibilidad de repuestos	Criticidad Total
Grupos electrogenos	5	2	4	5	3	3,9
Deshumidificadores	5	2	3	5	4	3,7
Sopladores	5	2	2	5	2	3,2
Bomba trash	2	1	2	0	2	1,6
Blowers generación	5	2	2	5	2	3,2
Blower Tea	1	5	1	0	2	1,2
TEA	1	5	2	0	3	1,5
Valvulas automaticas	0	5	1	0	0	0,7
Awiflex	4	1	5	0	5	2,8
Awidesulf	4	1	3	0	3	2,2

A partir de esta clasificación se definió el plan de mantenimiento inicial, que incluyó actividades preventivas y predictivas. El plan completo, junto con las hojas de vida técnicas de cada equipo, se encuentra documentado en el Apéndice B. Como referencia, en la Figura 14 y Figura 15, se muestra un extracto del plan de mantenimiento aplicado a los equipos de generación, donde se ilustran algunas de las actividades preventivas programadas.

**Figura 14**

Mantenimiento preventivo mensual generadores

PIAN PREVENTIVO DE MANTENIMIENTO PLANTA DE BIOGAS												
Actividad	2025											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>Generadores</b>												
Inspeccionar si hay puntos de fuga de aceite o refrigerante en el motor	14	18	21	11	9	10	17	17				
Inspeccionar mangueras, abrazaderas y tuberías del motor	14	18	21	11	9	10	17	17				
Inspeccionar el sistema de escape del motor	14	18	21	11	9	10	17	17				
Inspeccionar las correas del motor	14	18	21	11	9	10	17	17				
Inspeccionar cables de bujías, bobinas y conexiones eléctricas del motor	14	18	21	11	9	10	17	17				
Inspeccionar sistema de admisión de aire del motor	14	18	21	11	9	10	17	17				
Inspeccionar el radiador del motor	14	18	21	11	9	10	17	17				
Inspeccionar el estado y verificar nivel de carga de las baterías del generador	14	18	21	11	9	10	17	17				
Inspeccionar la tubería de suministro de gas, válvulas y estanqueidad del sistema	14	18	21	11	9	10	17	17				
Cambio de aceite carter.						10						
Cambio de filtros de aceite Scania PN 20 22 275.						10						
Limpieza filtro centrífugo de aceite. Medida del espesor de la película y cambio de camisa de papel						10						
Sustituir los elementos del filtro de aire						10						
Verificación de sensores del motor (Presion, Temperatura, etc)							17					
Realizar limpieza de tableros y hacer termografías de equipos y tableros	14			11			17					
Sustituir el refrigerante						10						

**Figura 15**

Mantenimiento preventivo por horas generadores

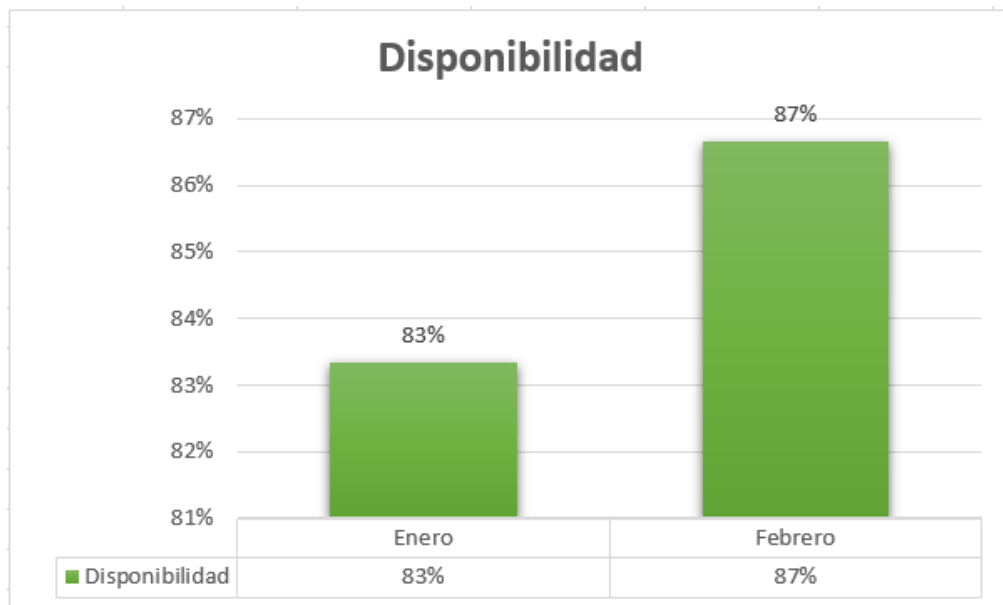
Generadores	Alternadores
<b>Mantenimiento de 500 horas</b>	<b>Mantenimiento de 500 horas</b>
Compruebe el nivel de electrolito de la batería	Revisar resistencia de aislamiento
Verificación de conexión de baterías y motor de arranque.	Revisar y ajustar los tornillos y terminales de conexión
Verificación de filtros de aire. Limpiar	Revisar vibración y nivel de ruidos
Cambiar el aceite lubricante del motor	Inspeccionar rodamientos
Sustitución del filtro de aceite lubricante	Inspeccionar conexiones de regulador de voltaje
Limpieza filtro centrífugo de aceite. Medida del espesor de la película y cambio de camisa de papel.	
Compruebe la tensión de las correas del motor	<b>Mantenimiento 1000 horas</b>
Limpieza de las baterías	Limpiar el alternador adentro y afuera
	Inspeccionar las conexiones y accesorios de operación.
<b>Mantenimiento de 1000 horas</b>	Inspeccionar diodos
Cambiar el elemento del filtro de aire	Inspeccionar varistores
Reemplace las bujías	Inspeccionar capacitor ( Si lo Hay)
Reemplace los cables de la vela	
Compruebe el sensor de presión de aceite	<b>Mantenimiento de 4500 horas</b>
Compruebe el sensor de temperatura del refrigerante	Lubrique los rodamientos
Verificar y ajustar la holgura de las valvulas del motor	
Verificar torque y apriete tornillos de modo general	
Comprobar el estado de las mangueras y abrazaderas	
Compruebe el estado de aislamiento y sequedad de los mazos de cables	

### 5.3. Resultados iniciales de la operación

Durante los dos primeros meses de operación, la disponibilidad promedio se mantuvo por debajo de la meta establecida (superior al 95 %). Esto se debió principalmente a fallas imprevistas en equipos críticos, las cuales ocasionaron paradas no programadas y tiempos de indisponibilidad superiores a los previstos. En la Figura 16 se muestra la disponibilidad de los dos primeros meses.

**Figura 16**

Disponibilidad Primeros dos meses



El registro de estas incidencias permitió documentar de manera detallada los equipos afectados, la naturaleza de las averías, los tiempos fuera de servicio y las acciones correctivas implementadas. Este análisis inicial evidenció la necesidad de fortalecer las rutinas de inspección y diagnóstico temprano, con el fin de prevenir la recurrencia de fallas similares. En la Figura 17 se resumen las fallas presentadas durante este periodo.

**Figura 17**

Registro de fallas durante el periodo inicial de operación

Enero					
#	Equipo	Falla	Causa	Acción correctiva	Acción preventiva
1	Motor grupo electrógeno #2	Paso de aceite	Desgaste en eje y bujes	Relleno de eje, cambio de bujes	Inspección visual mensual
2	Blower #1	Sobrecarga eléctrica	Agua en aspas	Drenado de agua	Revisión semanal de drenajes
3	Blower #1	Sobrecarga eléctrica	Condensados en tubería	Drenado de condensados	Flushing diario antes de encender
4	Blower #1	Freno en aspas	Sulfatación	Desarme y limpieza	Limpieza mensual de filtros
5	Motor grupo electrógeno #1	Falta de combustible	Válvula ZPR defectuosa	Limpieza y cambio de sellos	Verificación mensual de válvula
6	Motor grupo electrógeno #1	Paso de aceite	Desgaste en eje y bujes	Relleno de eje, cambio de bujes	Inspección visual mensual
7	Generador grupo electrógeno #1	Inversión de potencia	Daño en rotor de excitatriz	Rebobinado del rotor	Revisión cada 500 h
8	Blower verde #3	Vibración excesiva	Desgaste en rodamientos	Cambio de rodamientos	Monitoreo trimestral
9	Blower #2	Sobrecalentamiento del variador	Falta de ventilación en tablero	Apertura y limpieza de tablero	Revisión semanal de ventilación
10	Blower #2	Pérdida de caudal	Impulsor sucio	Limpieza de impulsor	Inspección quincenal
11	Generador grupo electrógeno #5	Inversión de potencia	Daño en rotor de excitatriz	Rebobinado del rotor	Revisión cada 500 h

Febrero					
#	Equipo	Falla	Causa	Acción correctiva	Acción preventiva
1	Deshumificador #1	Reducción de eficiencia	Filtros obstruidos	Limpieza de filtros	Cambio cada 3 meses
2	Blower verde #4	Vibración excesiva	Desgaste en rodamientos	Cambio de rodamientos	Engrase mensual
3	Generador grupo electrógeno #2	Inversión de potencia	Rotor excitatriz dañado	Rebobinado del rotor	Revisión cada 500 h
4	Motor grupo electrógeno #3	Paso de aceite	Desgaste en eje y bujes	Cambio de bujes, relleno de eje	Inspección mensual
5	Motor grupo electrógeno #4	Paso de aceite	Desgaste en eje y bujes	Cambio de bujes, relleno de eje	Inspección mensual
6	Blower #1	Vibración excesiva	Desbalanceo de aspas	Balanceo dinámico	Inspección mensual de aspas
7	Deshumificador #3	Baja capacidad de secado	Ventilador interno dañado	Cambio de ventilador	Limpieza mensual y monitoreo amperaje
8	Generador grupo electrógeno #4	Sobrecalentamiento	Radiador sucio	Limpieza de radiador	Inspección cada 500 h
9	Motor grupo electrógeno #5	Pérdida de potencia	Desajuste de válvulas	Ajuste de válvulas	Revisión cada 1000 h

La Figura 18 muestra una de las fallas más representativas, mientras que la Figura 19 ilustra la intervención realizada para restablecer la operación.

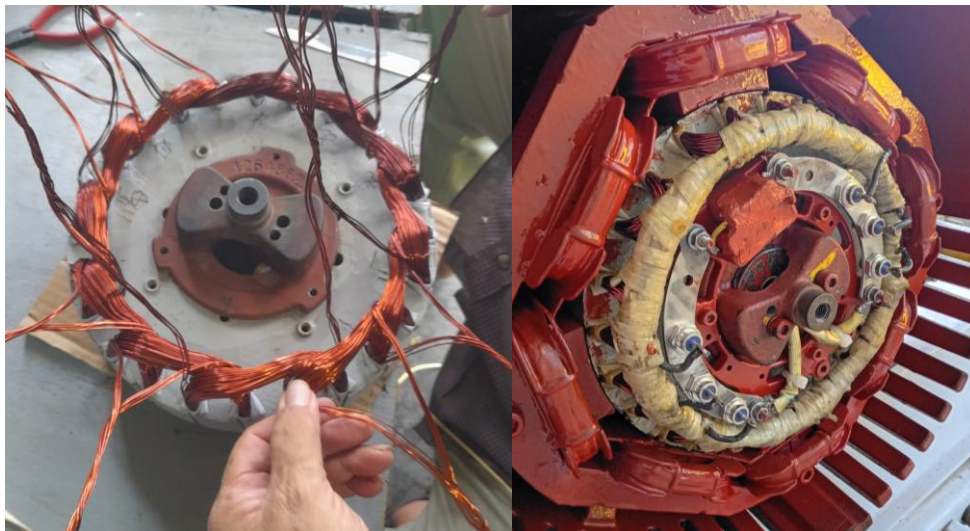
**Figura 18**

Evidencia fotográfica de la falla presentada en Rotor de excitatriz



**Figura 19**

Intervención correctiva realizada sobre Rotor de excitatriz



#### 5.4. Ajustes y mejoras en la operación

A partir del tercer mes se implementaron ajustes al plan de mantenimiento, con el propósito de elevar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos. Estos cambios respondieron a la experiencia adquirida en la fase inicial y al análisis de las fallas registradas.

Entre las principales acciones destacan la instauración de rutinas diarias de inspección realizadas por el personal operativo, la implementación de un sistema de control de horas de trabajo de los generadores, la aplicación de mantenimientos predictivos, mantenimientos basados en condición y la asignación de repuestos críticos en inventario. La combinación de estas medidas permitió anticipar fallas, reducir tiempos de reparación y mejorar la gestión de recursos. En la Figura 20 se presenta la rutina diaria de inspección instaurada en la operación.

**Figura 20**

Rutina diaria en la operación

Diario	
Actividad	Equipo
Verificar nivel de aceite y refrigerante de motor	GENERADOR
Inspeccionar el indicador de restricción del filtro de aire del motor	GENERADOR
Observar cualquier sonido extraño con el alternador en movimiento	GENERADOR
Inspeccionar la Ventilación (flujo de aire) en alternador	GENERADOR
Purgar condensados en TEA	TEA
Revisar que no halla presencia de material inflamable en los quemadores	TEA
Purgar condensaciones en trampas de cajas	TUBERIA BIOGAS
Purgar condensaciones en bota deshumidificador	TUBERIA BIOGAS
Comprobar si hay obstrucciones en el condensador del Deshumidificador	DESHUMIDIFICADOR
Comprobar el nivel de aceite del compresor del deshumidificador	DESHUMIDIFICADOR
Comprobar que el compresor no este funcionando en vacio del deshumidificador	DESHUMIDIFICADOR
Comprobar si hay obstrucción del flujo de aire del deshumidificador	DESHUMIDIFICADOR
Controlar nivel de agua	DESHUMIDIFICADOR
Verificar que el nivel de agua de las valvulas de seguridad este por encima del nivel minimo	VALVULAS SEGURIDAD
Verificar que no halla errores en el AWIFLEX	AWIFLEX
Verificar operación de Awidesulf	AWIDESULF
Revisar estaado general y del manometro	BLOWERS
Semanal	
Actividad	Equipo
Limpieza de cuarto de Generadores y entorno	PLANTA GENERAL
Limpieza de cuarto de control.	PLANTA GENERAL
Limpieza en tren de calibracion	PLANTA GENERAL
Limpieza en Cuarto Awidesulf	PLANTA GENERAL

En la Figura 21 se muestra el control de horas de operación de los grupos electrógenos.

**Figura 21**

Control de horas de operación de los grupos electrógenos

Generador	Horometro Actual	Horometro Anterior	Fecha ultimo MTO	Horas de trabajo	Generador	Horometro
Generador 1	2295	1864	10-08-25	431	1	2295
Generador 2	2157	1749	10-08-25	408	2	2157
Generador 3	2191	1846	10-08-25	345	3	2191
Generador 4	1534	1512	10-08-25	22	4	1534
Generador 5	463	463		0	5	463
Alternador 1	2295	1864	10-08-25	431		
Alternador 2	2157	1749	10-08-25	408		
Alternador 3	2191	1846	10-08-25	345		
Alternador 4	1534	1512	10-08-25	22		
Alternador 5	463	463		0		

En la Figura 22 se relacionan los repuestos críticos asignados para los grupos electrógenos, siendo los equipos de mayor relevancia y criticidad, cuya disponibilidad en inventario redujo los tiempos de indisponibilidad ante fallas imprevistas.

**Figura 22**

Relación de repuestos críticos definidos para grupos electrógenos

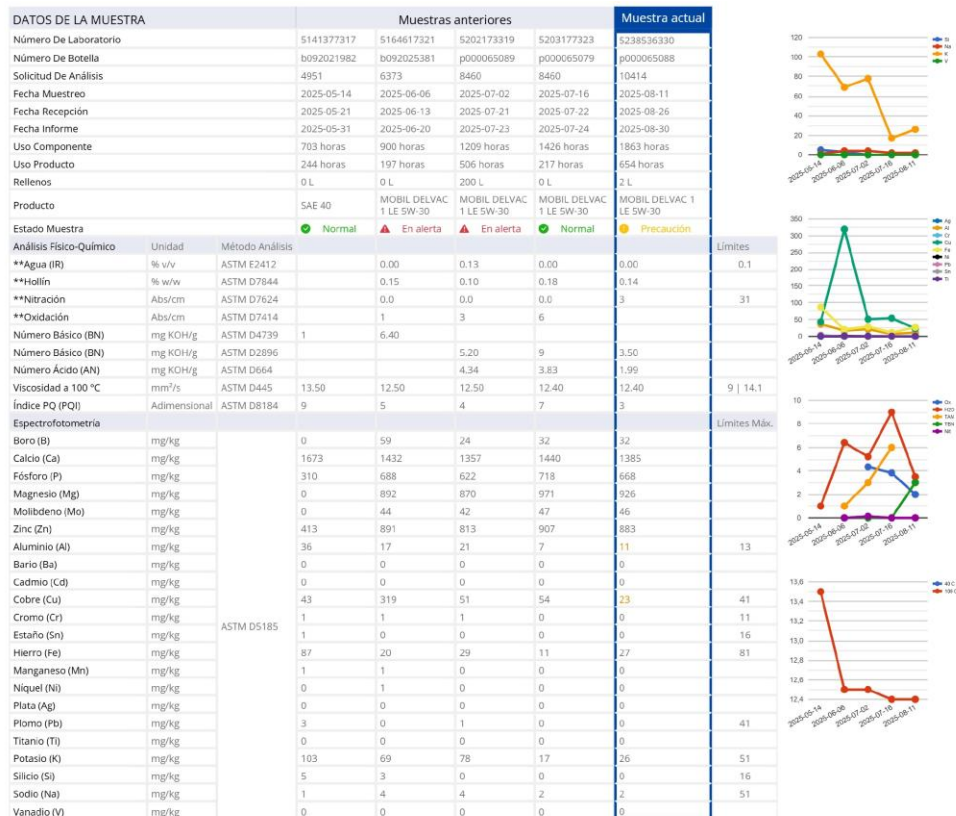
Repuestos obligatorios por mantenimiento de horas motores				Repuestos obligatorios para tener en stock ( se cambian por fallo)	
Repuestos	MTTO 500 horas	MTTO 1000 horas	MTTO 2000 horas	Repuesto	Cantidad
Buja iridium [Unidad]	0	6	6	Bobinas	6
Cables de bujia [Unidad]	0	6	6	Sensor de temperatura	1
Filtro de aceite [Unidad]	1	1	1	Sensor de rotación	1
Filtro de aire primario [Unidad]	1	1	1	Sensor de presion de aceite	1
Filtro de aire secundario [Unidad]	1	1	1	Sensor T-map	1
Aceite lubricante [Galones]	12	12	12	Sensor cam	1
Refrigerante [Galones]	0	0	13	Baterías	2
				Sonda lambda	2
				Valvula L-Series	1
				Valvula ZPR	1
				Turbocompresor	1
				Tarjeta AVR	1
				Cargador de baterias	1

### 5.5. Implementación de predictivo y CBM

Uno de los mantenimientos predictivos más importantes implementados fue el análisis de aceites en los generadores, ya que esto permitió conocer el estado real del motor de acuerdo con los niveles de desgaste evidenciados en los resultados de los análisis, permitiendo extender la vida útil del aceite aproximadamente 100 horas, así como alargar la vida útil del motor.

La Figura 23 corresponde a los resultados de tribología aplicados al aceite de los generadores, que facilitaron la detección de partículas de desgaste y el monitoreo del estado de los lubricantes.

**Figura 23**  
Resultados del análisis de tribología aplicado al aceite de los generadores



También se implementaron mantenimientos basados en la condición utilizando los sensores de los generadores, monitoreando la temperatura del refrigerante y la presión del aceite. Esto permitió anticiparse a fallas de altas temperaturas por suciedad en los radiadores o mínimas presiones de aceite por bajo nivel de lubricante. En la Figura 24 se muestran los parámetros a los que se les hacía seguimiento diario.

**Figura 24**

Panel de seguimiento presión de aceite y temperatura de refrigerante

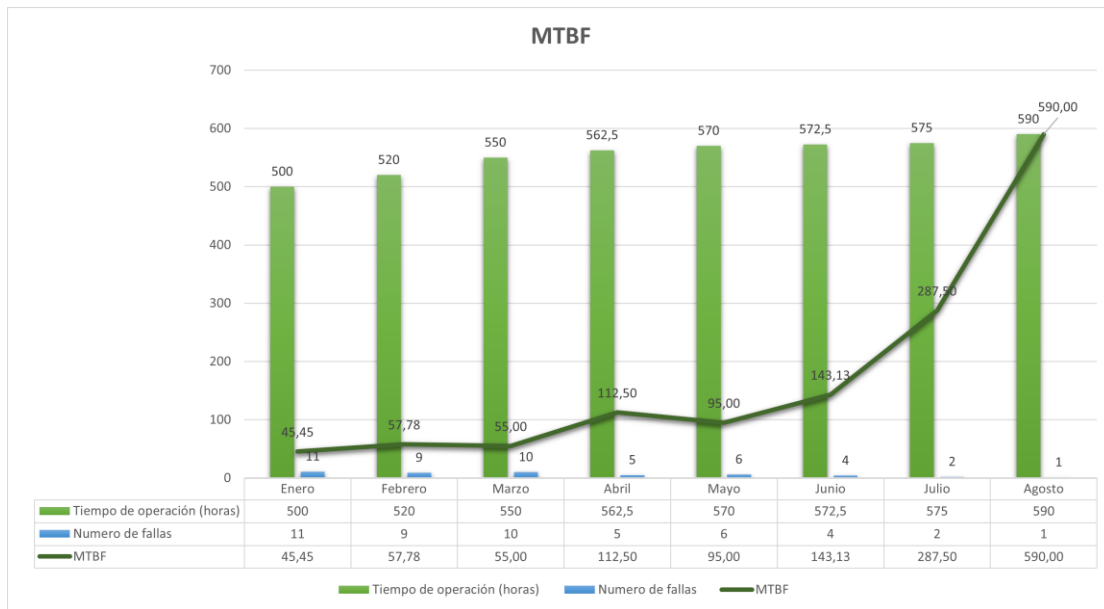


### 5.6. Indicadores de mantenimiento

La evaluación de la estrategia de mantenimiento se realizó a través de indicadores clave de desempeño (KPI), calculados mensualmente: MTBF, MTTR, disponibilidad y cumplimiento del plan de mantenimiento. Estos indicadores permitieron medir la efectividad de las acciones implementadas y su impacto en la operación. Los resultados evidenciaron una tendencia positiva, caracterizada por un aumento del MTBF, una reducción progresiva del MTTR y un incremento sostenido de la disponibilidad, la cual alcanzó niveles superiores al 95%. Las Figura 25, Figura 26, Figura 27 y Figura 28, ilustran la evolución de los indicadores mencionados.

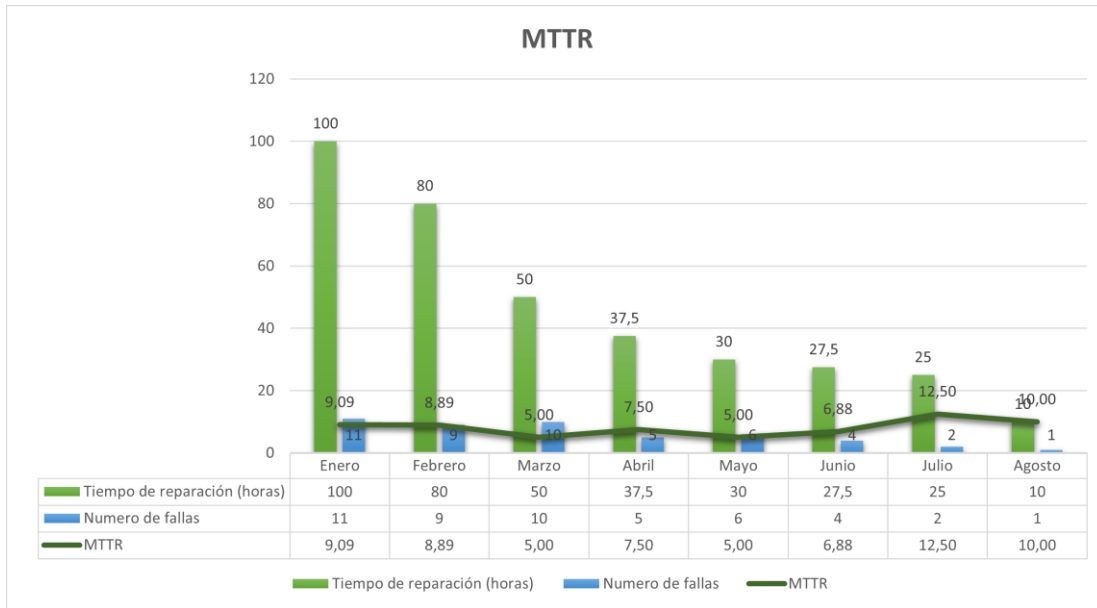
**Figura 25**

Evolución del MTBF mensual durante el periodo de análisis



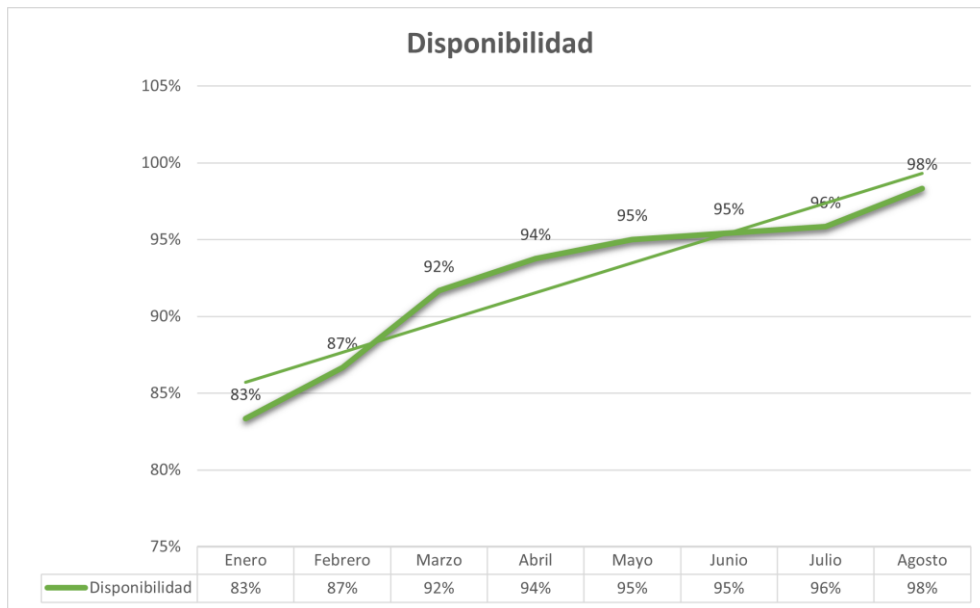
**Figura 26**

Variación del MTTR en los primeros ocho meses de operación



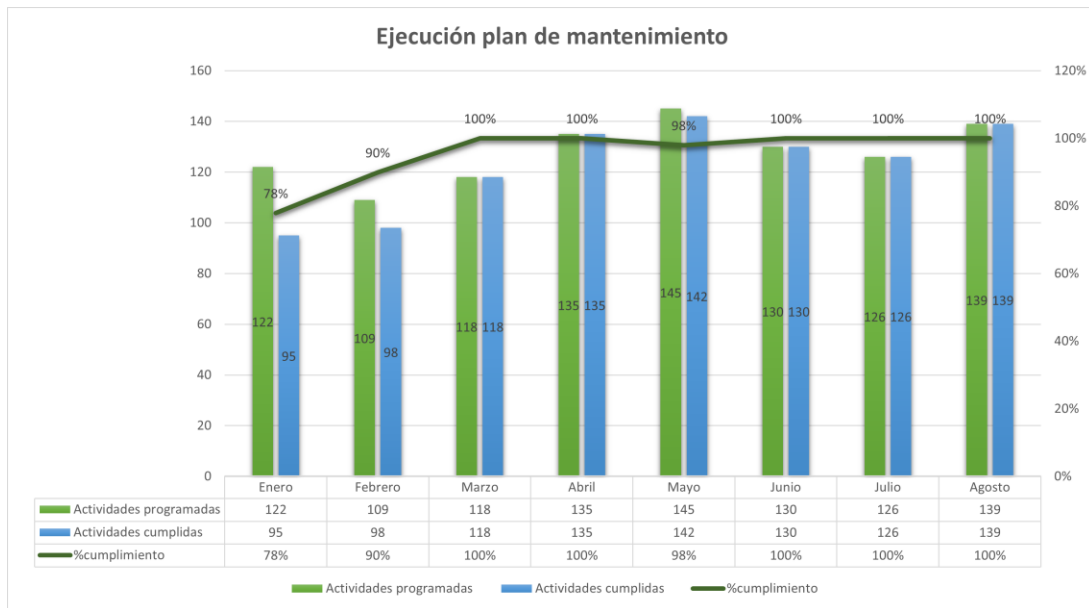
**Figura 27**

Tendencia de la disponibilidad



**Figura 28**

Cumplimiento del plan de mantenimiento



**5.7. Discusión y análisis crítico**

Los resultados obtenidos confirman que la estrategia de mantenimiento implementada fue efectiva para alcanzar la meta de disponibilidad superior al 95%. Las acciones aplicadas en el transcurso de los meses contribuyeron directamente a la mejora de los indicadores operativos y fortalecieron la confiabilidad del sistema.

El proceso demostró, sin embargo, que los planes iniciales requieren ajustes dinámicos basados en la retroalimentación de la operación real. Esto resalta la importancia de aplicar metodologías flexibles y en constante actualización, que permitan adaptarse a las condiciones específicas de la planta.

Como recomendación, se propone consolidar un sistema computarizado de gestión de mantenimiento (CMMS) que centralice la información técnica, facilite la trazabilidad de intervenciones y optimice la toma de decisiones. De igual manera, se sugiere ampliar el uso de

técnicas predictivas mediante monitoreo en línea de parámetros críticos, con el fin de anticipar fallas y sostener la mejora de la confiabilidad en el largo plazo.

Cabe resaltar que, de acuerdo con reportes de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, 2023) y estudios de plantas de biogás en Europa y Latinoamérica (Alsyouf, 2007; INTECO, 2020), los niveles de disponibilidad típicos en instalaciones de generación a partir de biogás oscilan entre el 85 % y el 95 % durante los primeros años de operación. En este contexto, los resultados obtenidos en GREMCA se encuentran dentro de los valores de referencia internacional, validando la pertinencia de la estrategia de mantenimiento propuesta.

## **6. Conclusiones**

El desarrollo de la estrategia de mantenimiento en la planta de biogás de GREMCA permitió validar que un enfoque progresivo, basado en la medición inicial de la disponibilidad y la construcción iterativa del plan de mantenimiento, es efectivo para alcanzar la meta de disponibilidad superior al 95 %. Los resultados obtenidos demuestran que la aplicación de rutinas preventivas, complementadas con acciones predictivas y la gestión de repuestos críticos, redujo de manera significativa las fallas imprevistas y los tiempos de reparación.

La clasificación de criticidad se consolidó como una herramienta fundamental para orientar los recursos hacia los equipos de mayor impacto en la confiabilidad del sistema. Asimismo, los indicadores de gestión (MTBF, MTTR, disponibilidad y cumplimiento del plan) se confirmaron como métricas indispensables para evaluar el desempeño y orientar la toma de decisiones.

El uso de Excel como herramienta de gestión inicial resultó suficiente para consolidar la información y calcular indicadores, aunque presenta limitaciones en términos de trazabilidad y automatización. Por ello, se reconoce la necesidad de implementar en el futuro un sistema computarizado de gestión de mantenimiento (CMMS) que fortalezca la capacidad de control y análisis de la planta.

En conjunto, el trabajo realizado evidencia que la estrategia propuesta no solo garantiza altos niveles de confiabilidad operativa, sino que también contribuye a la sostenibilidad económica, ambiental y social de la planta, en coherencia con los lineamientos de la transición energética nacional.

Como limitación, este trabajo se desarrolló durante la fase inicial de operación de la planta, por lo que los resultados de disponibilidad y confiabilidad se basan en un horizonte de datos breve y en condiciones operativas en proceso de estabilización. Estas circunstancias no invalidan los hallazgos, pero deben considerarse al extrapolar la metodología a periodos más prolongados o a escenarios con plena madurez operativa.

## **7. Recomendaciones**

Se recomienda mantener la disciplina en el seguimiento mensual de los indicadores de mantenimiento, de manera que se asegure la detección temprana de desviaciones y se realicen los ajustes oportunos al plan. La estrategia debe concebirse como un proceso dinámico de mejora continua y no como un esquema rígido.

Es fundamental continuar fortaleciendo el componente predictivo del plan de mantenimiento, incorporando progresivamente técnicas como el análisis de vibraciones y

termografías, especialmente en los equipos clasificados como críticos. Estas prácticas permitirán anticipar fallas y optimizar la planificación de intervenciones.

La gestión oportuna de repuestos críticos debe mantenerse como una prioridad, garantizando su disponibilidad en inventario para reducir los tiempos de reparación y evitar paradas prolongadas. En paralelo, se recomienda capacitar de forma continua al personal de mantenimiento en el uso de herramientas digitales.

Finalmente, se aconseja evaluar la viabilidad de implementar un CMMS en el mediano plazo. Esta herramienta permitirá sistematizar la información, mejorar la trazabilidad de las actividades, gestionar de manera más eficiente los recursos y facilitar la generación de reportes que respalden la toma de decisiones estratégicas.

**Referencias Bibliográficas**

- Alsyouf, I. (2007). *The role of maintenance in improving companies' productivity and profitability*. *International Journal of Production Economics*, 105(1), 70–78. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.06.057>
- Briceño, E., & Onate, E. (2007). *Plan de gestión de inventarios, repuestos e insumos de mantenimiento para empresas industriales*. Universidad Industrial de Santander.
- Espinosa, F., Dias, A., & Salinas, G. (2012). *Un procedimiento para evaluar el riesgo de la innovación en la gestión del mantenimiento industrial*. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 20(2), 242–254. Obtenido de <https://doi.org/10.4067/S0718-33052012000200011>
- INTECO. (2020). *Requisitos mínimos para las plantas de biogás de escala mediana y grande y sus componentes asociados*. In INTE E56:2020.
- IRENA. (2023). *Renewable Power Generation Costs in 2022*.
- ISO. (2014). *ISO 55000: Asset management — Overview, principles and terminology*. International Organization for Standardization.
- López, M., & Salvatore, S. (2014). *Sistemas de información para la gestión del mantenimiento*. *Dyna (Spain)*, 89(2), 144–147. Obtenido de <https://doi.org/10.6036/5739>
- Ministerio de Minas y Energía. (2020). *La transición energética de Colombia. Hablemos de Transición*.
- Mobley, R. (2002). *An introduction to predictive maintenance (2nd ed.)*. Butterworth-Heinemann.

- Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance (RCM II): The new frontier of maintenance management*. Butterworth-Heinemann.
- Nakajima, S. (1998). *Introduction to Total Productive Maintenance (TPM)*. Productivity Press.
- Ortiz, A., C, R., & Izquierdo, H. (2013). *Gestión de mantenimiento en pymes industriales*. *Revista Venezolana de Gerencia*, 18(61). Obtenido de <https://doi.org/10.31876/revista.v18i61.11005>
- Ramírez, G., & Manotas, D. (2014). *Modelo de medición del impacto financiero del mantenimiento de inventario de suministros*. *Scientia Et Technica*, 19(3).
- Shankar, L., Singh, C., & Singh, R. (2023). *Impact of implementation of CMMS for enhancing the performance of manufacturing industries*. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 14(5). Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s13198-021-01480-6>
- Solís, F. (2022). *LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL*. Centro de Información Técnica Para La Industria.
- William, C. M., & Benhur, A. (2010). *Técnicas de mantenimiento predictivo utilizadas en la industria*. *Scientia et Technica Año XVII*, 2(45).

## Apéndices

### **Apéndice A. Inventario y matrices de criticidad**

Contiene el listado completo de equipos, su clasificación por criticidad y las matrices aplicadas.

Hipervínculo a drive:

[https://drive.google.com/drive/folders/1TFo9qjoAkWuzSpLlhZ\\_3wMUMyqDjI\\_dS?usp=drive\\_1](https://drive.google.com/drive/folders/1TFo9qjoAkWuzSpLlhZ_3wMUMyqDjI_dS?usp=drive_1)  
ink

### **Apéndice B. Plan de mantenimiento y hojas de vida**

Incluye los formatos y registros utilizados para la planificación y control de mantenimiento.

Hipervínculo a drive:

[https://drive.google.com/drive/folders/1O5a2uujVBtejkYEaKwEdK8C3GJD8rxXI?usp=drive\\_li](https://drive.google.com/drive/folders/1O5a2uujVBtejkYEaKwEdK8C3GJD8rxXI?usp=drive_li)  
nk