PLAN DE INSPECCIÓN DE MANTENIMIENTO MECÁNICO PARA EQUIPOS ROTATIVOS EN CALDERA DE LECHO FLUIDIZADO

JOHAN SEBASTIAN BENAVIDEZ GONZÁLEZ
DAVID STEVEN MUÑOZ OSUNA

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ, D.C.
2025

PLAN DE INSPECCIÓN DE MANTENIMIENTO MECÁNICO PARA EQUIPOS ROTATIVOS EN CALDERA DE LECHO FLUIDIZADO

JOHAN SEBASTIAN BENAVIDEZ GONZÁLEZ
DAVID STEVEN MUÑOZ OSUNA

Trabajo de grado presentado para optar al título de:
Ingeniero Mecánico

Director:
ING. ALEXANDER ALVARADO MORENO

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ, D.C.
2025

AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS DE JOHAN SEBASTIAN BENAVIDEZ

Agradezco de todo corazón a mi familia, cuyo amor y apoyo han hecho posible este logro. A mi papá, por acompañarme y creer en mí desde los primeros días; a mi mamá, por ser mi aval y estar siempre presente cuando más lo necesitaba; a mi abuela, por su incondicionalidad y por enseñarme a no rendirme; a mi hermano, por su fuerza y por empujarme a seguir adelante; a mi novia, por ser una parte esencial de mi crecimiento y por compartir este sueño conmigo; y a cada profesor que a lo largo de la carrera me ha aportado en mi crecimiento profesional. Este proyecto es también una prueba de su paciencia, dedicación y cariño.

AGRADECIMIENTOS DE DAVID STEVEN MUÑOZ OSUNA

Deseo expresar mi más sincera gratitud a mi familia, por su invaluable acompañamiento a lo largo de mi formación académica. En particular, a mis padres y a mi hermano, por su constante aliento, su ejemplo y su inquebrantable confianza en mí. A ellos dedico, con todo mi cariño, la culminación de este proyecto.

Finalmente, agradezco profundamente a Ingrit Gómez. Su paso por mi vida, aunque breve, dejó una huella imborrable que hizo posible este logro. Gracias por haber sido mi motivación y por ayudarme a sacar la mejor versión de mí en todos los ámbitos de mi vida.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN **12**

ABSTRACT **13**

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA **14**

2 OBJETIVOS **16**

2.1 OBJETIVO GENERAL 16

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 16

3 JUSTIFICACIÓN **17**

4 ANTECEDENTES **18**

4.1 PROYECTOS DE APLICACIÓN DE RCM Y ANÁLISIS DE CRITICIDAD 18

4.2 FUNDAMENTACIÓN DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN EQUIPOS ROTATIVOS 19

4.2.1 Sinergia con Lubricación y Termografía 19

4.3 IMPORTANCIA DE LA TRAZABILIDAD Y LA GESTIÓN DE DATOS . . 19

4.4 VISIÓN HACIA EL FUTURO: INDUSTRIA 4.0 20

5 MARCO TEÓRICO **21**

5.1 TECNOLOGÍA DE GENERACIÓN DE VAPOR EN LECHO FLUIDIZADO 21

5.1.1 Principio de Fluidización 21

5.1.2 Criticidad de los Equipos Rotativos Auxiliares 22

5.2 GESTIÓN ESTRATÉGICA DEL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL 23

5.2.1 Evolución de las Estrategias de Mantenimiento 23

5.3 INGENIERÍA DE CONFIABILIDAD Y METODOLOGÍA RCM 23

5.3.1 Principios Fundamentales del RCM 24

5.3.2 La Curva P-F y el Intervalo de Detección 24

5.4 DIAGNÓSTICO TÉCNICO Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES 25
5.4.1 Parámetros de Medición 25
5.4.2 Análisis Espectral (FFT) y Envolvente 26
5.5 OTRAS TÉCNICAS DE INSPECCIÓN PARAMÉTRICA 27
5.5.1 Termografía Infrarroja 27
5.5.2 Inspección Sensorial 27
5.6 INDICADORES DE DESEMPEÑO (KPIs) 27
5.6.1 Disponibilidad (A) 27
5.6.2 Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) 27
5.6.3 Tiempo Medio Para Reparar (MTTR) 27
5.7 ESTANDARIZACIÓN DE DATOS: NORMA ISO 14224 28

6 METODOLOGÍA 29

6.1 FASE 1: DIAGNÓSTICO Y RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN (Objetivo Específico 1) 29
6.1.1 Revisión Documental y Técnica 29
6.1.2 Análisis del Historial de Fallas (2023-2024) 29
6.1.3 Inspección en Planta y Categorización de Activos 29
6.2 FASE 2: DISEÑO DE ESTRATEGIAS RCM (Objetivo Específico 2) 30
6.2.1 Desarrollo de AMEF 30
6.2.2 Selección de Técnicas de Monitoreo 30
6.3 FASE 3: DISEÑO DE FORMATOS Y PROCEDIMIENTOS (Objetivo Específico 3) 30
6.3.1 Diseño de Formatos de Inspección 30
6.3.2 Protocolos de Trazabilidad y Reporte 31
6.3.3 Definición de Frecuencias 31
6.4 FASE 4: CONSOLIDACIÓN E IMPLEMENTACIÓN (Objetivo Específico 4) 31
6.4.1 Consolidación del Plan General 31
6.4.2 Implementación Controlada 31
6.5 FASE 5: EVALUACIÓN DE RESULTADOS (Objetivo Específico 4) 31
6.5.1 Cálculo de Indicadores 32
6.5.2 Análisis Comparativo 32

7 FASE 1 33

7.1 Revisión de Manuales y Documentación Técnica 33
7.2 Definición del Contexto Operacional 35
7.2.1 Régimen de Operación y Disponibilidad Requerida 35
7.2.2 Parámetros Termodinámicos y de Carga 35
7.2.3 Perfil de Operación de Equipos Rotativos 36

7.2.4 Perfil Térmico del Hogar 36
7.3 Análisis de historiales de fallas 37
7.3.1 Historial de fallas mecánicas 38
7.3.2 Historial de fallas eléctricas y de control 39
7.4 Inspección en Planta y Levantamiento de Datos 41
7.4.1 Hallazgos en el Ventilador de Tiro Inducido (D235) 41
7.4.2 Estado General de Equipos Auxiliares 42
7.4.3 Integración con el Sistema de Control (DCS) 46
7.4.4 Listado de Equipos 46

8 FASE 2 **50**

8.1 Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF) 50
8.2 Selección de Técnicas de Monitoreo y Diagnóstico 51
8.2.1 Justificación Técnica del Análisis de Vibraciones 52
8.2.2 Justificación Técnica de la Inspección Visual y Temperatura 52

9 FASE 3 **54**

9.1 Diseño de Herramientas de Recolección y Gestión de Datos 54
9.1.1 Formato de Inspección de Parámetros Operativos 54
9.1.2 Formato de Reporte de Análisis de Vibraciones 57
9.1.3 Procedimiento de Reporte de Novedades y Trazabilidad 58
9.2 Configuración de Rutas y Medios de Recolección 59
9.2.1 Implementación de Rutinas de Inspección Visual 59
9.2.2 Configuración de la Ruta de Vibraciones 61
9.3 Definición de Frecuencias Óptimas 61

10 FASE 4 **64**

10.1 Consolidación del Plan de Mantenimiento 64
10.2 Cronograma de Ejecución y Evaluación 68

11 FASE 5 **70**

11.1 Análisis y Discusión de Resultados 70
11.1.1 Impacto en la Disponibilidad Operacional (2024 vs. 2025) 70
11.1.2 Validación de la Ejecución Técnica en Campo 70
11.2 Conclusiones 72

12 RECOMENDACIONES **73**

12.1 Recomendaciones para la Consolidación Inmediata 73

12.2 Recomendaciones para la Gestión del Ciclo de Vida 73
12.3 Recomendaciones hacia la Industria 4.0 74

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS **75**

A Tabla de Fallas Mecánicas Registradas (2023-2025) **78**

B Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF) por Equipo **80**

C Tabla de Criticidad de Equipos Rotativos **105**

LISTA DE FIGURAS

1 Vista general de la caldera de lecho fluidizado 14

2 Esquema de funcionamiento de una caldera de Lecho Fluidizado Circulante (CFB) 22

3 Curva D-I-P-F (Diseño-Instalación-Falla Potencial-Falla) 25

4 Representación de la transformación de señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia (FFT) 26

5 Jerarquía taxonómica para la recolección de datos de confiabilidad 28

6 Diagrama P&ID del sistema de aire y gases de la caldera 33

7 Ejemplo del Dosier de Montaje de Equipos 34

8 Visualización de documentos técnicos en software Vault (Autodesk) 35

9 Parámetros operativos en tiempo real: Carga de vapor, Frecuencia de VTI y Apertura de Damper 36

10 Tendencia de estabilidad de la temperatura promedio del hogar (niveles 1, 2 y 3) 37

11 Registro de novedades en bitácoras de mantenimiento mecánico 38

12 Modificaciones estructurales y gatos de alineación en el VTI 42

13 Ventilador de Aire Primario (VAP) en planta 43

14 Ventilador de Aire Secundario (VAS) en planta 44

15 Ventilador de Recirculación de Gases (FGR) en planta 44

16 Bomba de Alimentación Norte 45

17 Bomba de Alimentación Sur 46

18 Ejemplo del formato de Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF) 50

19 Diseño del formato de rutina de inspección visual y temperatura 55

20 Trazabilidad ruta vibraciones 56

21 Formato estandarizado para reporte de análisis de vibraciones 57

22 Formato de trazabilidad y gestión de novedades de inspección 58

23 Formatos de inspección llenos en el sistema 60

24 Visualización de la ruta de vibraciones configurada en software Omnitrend . . 61

25 Formatos de inspección visual plastificados para uso en planta 65

26 Ejemplo de una Orden de Trabajo generada en el sistema para una rutina de inspección 65

27 Ejemplo de un informe técnico de vibraciones con diagnóstico y recomendación 67

28 Ejecución técnica de la rutina de inspección visual y sensorial en los equipos rotativos de la caldera 71

LISTA DE TABLAS

1 Historial de fallas mecánicas registradas (2023-2025) 38

2 Historial de fallas eléctricas y de instrumentación (2023-2025) 40

3 Clasificación taxonómica de bombas (ISO 14224 - Clase PU) 47

4 Clasificación taxonómica de ventiladores y sopladores (ISO 14224 - Clase BL) 48

5 Clasificación de sistemas de limpieza y manejo de materiales 49

6 Matriz de selección de técnicas de monitoreo por modo de falla 52

7 Frecuencias de Inspección para Equipos Críticos 62

8 Cronograma de Implementación del Plan de Mantenimiento (2025) 68

9 Historial de Fallas Registradas en Caldera 6 78

10 AMEF para Ventilador de Tiro Inducido (D235) 81

11 AMEF para Ventilador Aire Primario (D236) 82

12 AMEF para Ventilador Aire Secundario (D237) 83

13 AMEF para Ventilador Gas FGR (D238) - Recirculación de Gases 84

14 AMEF para Soplador Loop Seal (D255) 85

15 AMEF para Soplador Retráctil (D258) 86

16 AMEF para Soplador Rotatorio (D266) 87

17 AMEF para Soplador Hogar (D298) 88

18 AMEF para Ventilador de Presurización (D302) 89
19 AMEF para Bomba de Alimentación (P767) 90
20 AMEF para Bomba de Recirculación (P861) 91
21 AMEF para Bomba Desaireador (P571) 92
22 AMEF para Bomba de Refrigeración (P873) 93
23 AMEF para Tornillo Alimentador (SC-110) 94
24 AMEF para Bomba Planta Diesel (P878) 95
25 AMEF para Bomba Patín Analítica (P879) 96
26 AMEF para Bomba ACPM (P881) 97
27 AMEF para Compresor de Instrumentos (K-910) 98
28 AMEF para Bomba Neumática de Recepción (P884) 99
29 AMEF para Bomba Dosificadora de Químicos (P901) 100
30 AMEF para Bomba Dosificadora Polímero (P904) 101
31 AMEF para Bomba Dosificadora Eritorato (P906) 102
32 AMEF para Bomba Dosificadora Amina (P907) 103
33 AMEF para Bomba Agua Industrial (P911) 104
34 Clasificación de Criticidad de Equipos Rotativos 105

LISTA DE ANEXOS

Tabla de Fallas Mecánicas Registradas (2023-2025) **78**

Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF) por Equipo **80**

Tabla de Criticidad de Equipos Rotativos **105**

RESUMEN

El presente proyecto se desarrolla bajo el contexto de una empresa del sector químico ubicada entre los municipios de Cajicá y Zipaquirá, dicha empresa posee en su proceso una caldera de lecho fluidizado la cual constituye un activo fundamental para la operación continua. La clasificación de este equipo como crítico se fundamenta en los análisis de una matriz de riesgos y estudios de seguridad de procesos realizados en conjunto con las áreas operativas, los cuales determinan el impacto severo de una falla funcional en la seguridad y la producción.

El objetivo principal del trabajo se centra en la implementación de la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) aplicada específicamente a los equipos rotativos auxiliares de la caldera. Para ello, se elaboraron los Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF), focalizando el estudio en los modos de falla de mayor criticidad y probabilidad de ocurrencia. Estos análisis fueron validados y aprobados por el área de Seguridad de Procesos, asegurando la alineación con los estándares de riesgo de la compañía.

A partir de los resultados del RCM, se determinó que la estrategia óptima para el control de las fallas identificadas consiste en la combinación del monitoreo de condición mediante análisis de vibraciones y la ejecución de rutinas rigurosas de inspección de parámetros operativos por parte del personal de mantenimiento. En consecuencia, el proyecto establece los métodos de inspección adecuados, define las periodicidades óptimas de intervención y presenta el diseño de los formatos de seguimiento, trazabilidad y reporte necesarios para garantizar el cumplimiento del plan.

Para evaluar la efectividad de la implementación, se definió como métrica principal el indicador de disponibilidad de la caldera. El estudio estableció su línea base a partir de la recolección y análisis de los datos de fallas e indicadores correspondientes a los años 2023 y 2024. Posteriormente, se llevó a cabo la implementación de las estrategias diseñadas durante el año 2025. Los resultados obtenidos evidenciaron una disminución en las paradas no programadas generadas por los equipos rotativos y, por ende, un aumento efectivo en la disponibilidad del activo.

Palabras clave: Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), Caldera de Lecho Fluidizado, Equipos Rotativos, Análisis de Vibraciones, AMEF, Disponibilidad.

ABSTRACT

This project is developed within the context of a chemical sector company located between the municipalities of Cajicá and Zipaquirá. This company possesses a fluidized bed boiler in its process, which constitutes a fundamental asset for continuous operation. The classification of this equipment as critical is founded on risk matrix analyses and process safety studies conducted in conjunction with operational areas, which determine the severe impact of a functional failure on safety and production.

The main objective of this work focuses on the implementation of the Reliability-Centered Maintenance (RCM) methodology applied specifically to the boiler's auxiliary rotating equipment. To this end, Failure Modes and Effects Analyses (FMEA) were developed, focusing the study on failure modes with the highest criticality and probability of occurrence. These analyses were validated and approved by the Process Safety area, ensuring alignment with the company's risk standards.

Based on the RCM results, it was determined that the optimal strategy for controlling the identified failures consists of combining condition monitoring via vibration analysis with the execution of rigorous operational parameter inspection routines by maintenance personnel. Consequently, the project establishes appropriate inspection methods, defines optimal intervention frequencies, and presents the design of tracking, traceability, and reporting formats necessary to guarantee the fulfillment of the plan.

To evaluate the effectiveness of the implementation, the boiler availability indicator was defined as the primary metric. The study established its baseline through the collection and analysis of failure data and indicators corresponding to the years 2023 and 2024. Subsequently, the designed strategies were implemented during the year 2025. The obtained results evidenced a decrease in unscheduled shutdowns generated by rotating equipment and, therefore, an effective increase in asset availability.

Keywords: Reliability-Centered Maintenance (RCM), Fluidized Bed Boiler, Rotating Equipment, Vibration Analysis, FMEA, Availability.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el contexto operativo de una empresa del sector químico, ubicada geográficamente entre los municipios de Cajicá y Zipaquirá, la caldera de lecho fluidizado (ver Figura 1) constituye un activo fundamental para el suministro de energía térmica al proceso productivo. A pesar de su criticidad, establecida mediante matrices de riesgo y estudios de seguridad de procesos, la operación de este equipo se ha visto afectada recurrentemente por una alta tasa de intervenciones de mantenimiento correctivo no programado, según se evidencia en los indicadores de los periodos 2023 y 2024.

Figura 1. Vista general de la caldera de lecho fluidizado



Fuente: Elaboración propia.

Estas interrupciones operativas son consecuencia directa de fallos funcionales en los equipos rotativos auxiliares, tales como ventiladores de tiro, sopladores y bombas de alimentación. La revisión de los Análisis de Causa Raíz (RCA) previamente ejecutados por la organización determinó que la mayoría de estos eventos fallidos pudieron ser prevenidos o mitigados. Estos estudios históricos concluyeron que, si bien las fallas físicas eran mecánicas (rodamientos, desalineación), la causa latente era la falta de detección oportuna.

Por lo tanto, la problemática central no radica en la incapacidad de diagnosticar la falla post-mortem (ya resuelta por los RCA existentes), sino en la ausencia actual de un sistema de rutinas de inspección sistemáticas y un plan de mantenimiento estandarizado que prevenga la recurrencia. Actualmente, la gestión se mantiene en un esquema reactivo, lo que impide detectar condiciones anómalas incipientes antes de que evolucionen hacia la falla funcional completa, contraviniendo los principios modernos de la gestión de activos (Moubray, 1997).

El impacto de esta deficiencia estratégica es multidimensional. En el aspecto económico, los costos operativos se incrementan exponencialmente a medida que los equipos operan hasta la falla catastrófica, sumado al lucro cesante por la interrupción de la producción. En cuanto a la seguridad industrial, la operación de equipos rotativos en condiciones subestándar eleva el riesgo de incidentes, lo cual exige el cumplimiento estricto de normativas de seguridad como la Resolución 5018 de 2019 (Ministerio de Trabajo de Colombia, 2019).

En consecuencia, surge la necesidad técnica de desarrollar e implementar un plan de mantenimiento optimizado para la caldera y sus equipos rotativos. La propuesta se fundamenta en la aplicación de la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) para estructurar las tareas de inspección y monitoreo de condición (vibraciones y parámetros operativos), utilizando los hallazgos de los RCA previos como base para la priorización de los modos de falla, tal como sugieren los estándares de confiabilidad (Valencia et al., 2024).

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un plan de mantenimiento predictivo fundamentado en la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) para los equipos rotativos de la caldera de lecho fluidizado, con el fin de aumentar la disponibilidad operativa del activo mediante la detección temprana y mitigación de fallos funcionales.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar el diagnóstico técnico de la gestión de mantenimiento actual, mediante la revisión de los Análisis de Causa Raíz (RCA) existentes, la categorización taxonómica de los activos bajo la norma ISO 14224 y el análisis de la información técnica (dosieres, planos) y bitácoras del periodo 2023-2024, para consolidar la información base requerida en el desarrollo de los modos de falla.
2. Determinar las estrategias de mantenimiento óptimas aplicando la metodología RCM, a través del desarrollo de los Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF) para cada equipo crítico y utilizando la norma ISO 14224 como guía, con el propósito de establecer los métodos de inspección de variables adecuados para prevenir los fallos funcionales identificados.
3. Diseñar los formatos de registro y trazabilidad que permitan al área de Confiabilidad el análisis de tendencias y parámetros operativos, con el fin de generar las órdenes de trabajo hacia el área de Planeación para la intervención oportuna de los activos ante la detección de fallas funcionales potenciales.
4. Evaluar el impacto del proyecto mediante el análisis de la variación en la disponibilidad de la caldera, realizando un comparativo entre los indicadores de confiabilidad previos a la implementación y los obtenidos tras la ejecución del plan de mantenimiento.

3. JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto surge como una respuesta técnica imperativa ante las necesidades operativas de una organización industrial. El proceso productivo de esta planta depende intrínsecamente de la disponibilidad continua de la caldera de lecho fluidizado, un activo catalogado como crítico por los estudios de seguridad de procesos. Sin embargo, el análisis de los indicadores de mantenimiento correspondientes a los periodos 2023 y 2024 evidenció una brecha significativa en la confiabilidad de los equipos rotativos auxiliares, tales como bombas y ventiladores, cuya alta tasa de fallo funcional ha comprometido la estabilidad de la operación (Baque-Ballesteros et al., 2023).

La persistencia de un enfoque reactivo frente a estas fallas ha generado consecuencias multidimensionales. En el ámbito económico, se ha observado un incremento en los costos operativos (OPEX) debido a reparaciones de emergencia y al lucro cesante asociado a las paradas no programadas. Desde la perspectiva de la seguridad industrial, la operación de equipos rotativos en condiciones de degradación no detectada eleva el nivel de riesgo, afectando potencialmente la integridad del personal y las instalaciones, lo cual justifica la implementación de controles más rigurosos (Gómez Rodas, 2015).

En este contexto, la implementación de un plan de mantenimiento fundamentado en la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) resulta necesaria para transitar hacia un modelo de gestión proactivo. Al basar la toma de decisiones en el monitoreo de condición —específicamente mediante análisis de vibraciones e inspección de parámetros—, se faculta al área de Confiabilidad para detectar fallas potenciales dentro del intervalo P-F. Esto permite generar órdenes de trabajo preventivas hacia el área de Planeación, optimizando el uso de recursos y evitando la ocurrencia del fallo funcional (Canales Aguilar, 2019).

Finalmente, la justificación de este proyecto trasciende la solución de problemas mecánicos inmediatos; su valor radica en la validación de un modelo de gestión escalable. La comparación de los indicadores de disponibilidad antes y después de la implementación (2025) proporcionará evidencia tangible sobre la efectividad de las estrategias predictivas diseñadas, estableciendo un estándar técnico que promueve la sostenibilidad operativa, la seguridad del proceso y la maximización del ciclo de vida de los activos críticos de la compañía.

4. ANTECEDENTES

4.1 PROYECTOS DE APLICACIÓN DE RCM Y ANÁLISIS DE CRITICIDAD

La selección de la estrategia de mantenimiento para un activo crítico como la caldera de lecho fluidizado no puede basarse en la intuición, sino que requiere metodologías validadas que garanticen la optimización de recursos y la seguridad del proceso. En este contexto, la revisión de la literatura confirma que el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) es el estándar técnico más robusto para transitar de un esquema reactivo a uno proactivo.

La viabilidad de aplicar estas metodologías en sistemas de generación de vapor ha sido demostrada por Baque-Ballesteros et al. (2023), quien desarrolló un plan de mantenimiento para una caldera pirotubular en una refinería. El aporte significativo de este trabajo para nuestro proyecto radica en su demostración de cómo el análisis funcional permite identificar componentes críticos que, aunque auxiliares, pueden detener la producción total. De manera similar, Sanabria Hernández (2017) integró la gestión basada en riesgo (RBM) con el monitoreo de vibraciones. Este enfoque dual es fundamental para el presente trabajo, ya que justifica por qué no todos los equipos rotativos de la caldera recibirán el mismo trato: la intensidad del monitoreo dependerá directamente del nivel de riesgo asociado a la falla funcional.

En el ámbito de la industria química, donde los procesos son continuos y peligrosos, Salguero y Gómez (2022) validó el uso de herramientas estadísticas como el diagrama de Pareto para segregar los "actores críticos". Esta metodología se adopta en nuestra Fase 1 para filtrar el historial de fallas y focalizar los esfuerzos en los equipos que más impactan la disponibilidad. Complementariamente, Boulangger et al. (2024) establece que el cálculo del Número de Prioridad de Riesgo (NPR) es esencial para jerarquizar las tareas de mantenimiento. La aplicación de este concepto en nuestros AMEF permitirá argumentar técnicamente ante la gerencia por qué se priorizan recursos en el Ventilador de Tiro Inducido (VTI) sobre otros activos menos críticos.

A nivel de herramientas específicas, Chaparro Pedraza (2023) y Martínez Páez (2024) proporcionan la base metodológica para el desarrollo de los AMEF. Sus trabajos demuestran que descomponer el equipo en subsistemas y modos de falla es la única vía para determinar la causa raíz física de las averías recurrentes. Para nuestro proyecto, esto implica que no basta con reportar "falla de bomba", sino que es necesario llegar al nivel de detalle de "desgaste de impulsor por cavitación" para prescribir la tarea predictiva correcta.

Finalmente, la estandarización de estos datos se fundamenta en Valencia et al. (2024), quien detalla la aplicación de la norma ISO 14224. Este antecedente es crucial, ya que justifica la reestructuración taxonómica que realizaremos en el listado de equipos, asegurando que la información recolectada sea compatible con estándares internacionales de confiabilidad.

4.2 FUNDAMENTACIÓN DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN EQUIPOS ROTATIVOS

El núcleo técnico de esta propuesta es la detección temprana de fallas. La literatura revisada respalda contundentemente la selección del análisis de vibraciones como la técnica diagnóstica primaria para la maquinaria rotativa de la caldera.

Fonseca et al. (2015) evidenciaron que la implementación de rutas predictivas en plantas termoeléctricas tiene un impacto directo en la eficiencia energética. Esto es relevante para nuestro caso, ya que un ventilador desbalanceado no solo corre riesgo de falla mecánica, sino que consume más energía, afectando los costos operativos. Miranda Rojas (2020) y Chang Arreaga (2020) validaron mediante casos de estudio que el monitoreo espectral permite detectar fallas en estadios tempranos, reduciendo significativamente el tiempo medio de reparación (MTTR) al permitir la planificación de repuestos antes de la parada.

Específicamente para el diagnóstico, Porras A (2015) y Aguirre Tovar et al. (2024) establecen que el análisis de vibraciones es superior a otras técnicas para identificar desalineación y defectos en rodamientos. Dado que nuestros hallazgos preliminares en el VTI indican problemas estructurales y de alineación, estos antecedentes confirman que la estrategia de monitoreo vibracional trimestral propuesta es la técnicamente correcta para mitigar el riesgo de falla catastrófica en dicho equipo.

4.2.1 Sinergia con Lubricación y Termografía

La confiabilidad no depende de una sola variable. El trabajo de Esquivel y Torres (2020) resalta que la gestión de la lubricación es la primera barrera de defensa. Este aporte justifica nuestra decisión operativa de alinear las rutas de inspección visual con los cronogramas de lubricación, optimizando la mano de obra. Adicionalmente, Socha Rueda (2020) valida el uso de la termografía infrarroja como complemento indispensable para detectar fricción y problemas eléctricos que la vibración podría no revelar inmediatamente, fundamentando la inclusión del pirómetro en nuestras rutinas de inspección sensorial.

4.3 IMPORTANCIA DE LA TRAZABILIDAD Y LA GESTIÓN DE DATOS

Un plan de mantenimiento técnicamente perfecto falla si no existe una estructura de gestión que lo soporte. Los antecedentes en esta área justifican el diseño de los formatos de trazabilidad y reporte.

Montenegro Díaz y Quiñones Vásquez (2025) enfatiza que la integración de los planes en un sistema CMMS es vital para la sostenibilidad. Esto respalda nuestra Fase 4, donde los ha-

llazgos de campo se transforman en órdenes de trabajo digitales. Por su parte, Pasquali Luis (2024) demuestra que sin registros robustos no es posible calcular KPIs como la Disponibilidad. Este antecedente fundamenta el diseño de nuestros formatos de control, los cuales no son meros trámites burocráticos, sino la fuente de datos necesaria para evaluar el éxito del proyecto en el año 2025.

Asimismo, trabajos como los de Canales Aguilar (2019) y Camargo Sánchez y Caro Garzón (2015) refuerzan la necesidad de contar con procedimientos estandarizados. En nuestro proyecto, esto se traduce en que las inspecciones no dependan de la subjetividad del técnico de turno, sino que se rijan por parámetros claros definidos en las fichas que hemos diseñado, reduciendo la variabilidad humana en el proceso.

4.4 VISIÓN HACIA EL FUTURO: INDUSTRIA 4.0

Aunque el alcance de ejecución de este proyecto se centra en la implementación del RCM y técnicas predictivas convencionales, es fundamental reconocer hacia dónde evoluciona la industria para asegurar que nuestro trabajo deje bases sólidas para el futuro.

Investigaciones recientes de Wu et al. (2023) y Li et al. (2025) indican que el análisis de datos mediante Inteligencia Artificial (IA) y *Deep Learning* representa el siguiente nivel para predecir la vida útil remanente (RUL) de los activos. Si bien no aplicaremos algoritmos de IA en esta etapa, nuestro proyecto es el prerrequisito indispensable para ello: la IA requiere datos históricos de calidad. Al estandarizar la recolección de datos bajo normas ISO y asegurar la trazabilidad hoy, estamos construyendo el "dataset" que permitirá a la empresa implementar modelos de mantenimiento 4.0 o Gemelos Digitales (Díaz et al., 2023) en el mediano plazo, otorgando a este trabajo de grado una proyección tecnológica y sostenibilidad futura.

5. MARCO TEÓRICO

El presente marco teórico establece las bases conceptuales, técnicas y normativas que sustentan el desarrollo del plan de mantenimiento predictivo. Se aborda la tecnología de generación de vapor, los principios de la ingeniería de confiabilidad, las metodologías de gestión de activos y las técnicas de diagnóstico avanzado aplicables a maquinaria rotativa.

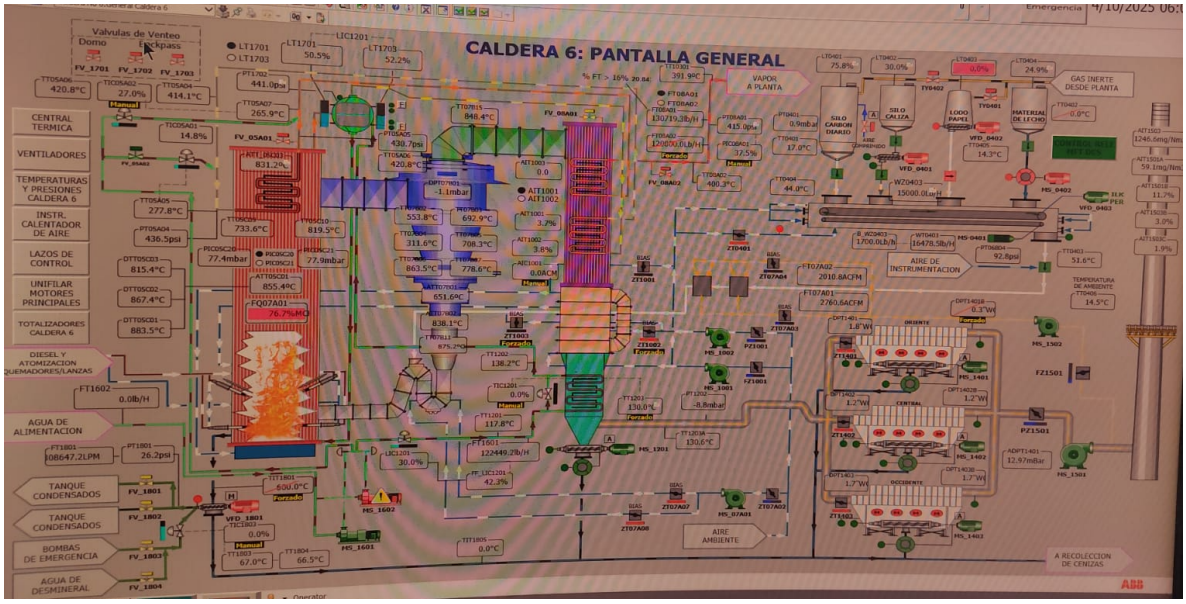
5.1 TECNOLOGÍA DE GENERACIÓN DE VAPOR EN LECHO FLUIDIZADO

La caldera objeto de estudio corresponde a una unidad de tecnología de Lecho Fluidizado Circulante (CFB - *Circulating Fluidized Bed*) (ver Figura 2), diseñada para una capacidad de generación de vapor superior a las 180.000 libras/hora. Esta tecnología representa una evolución significativa respecto a las calderas convencionales de parrilla o carbón pulverizado, caracterizándose por su alta eficiencia térmica y flexibilidad en el uso de combustibles sólidos.

5.1.1 Principio de Fluidización El principio fundamental de operación consiste en la suspensión de partículas sólidas (combustible y material inerte como arena o caliza) en una corriente ascendente de aire. Cuando la velocidad del aire supera la velocidad mínima de fluidización, el lecho de sólidos se expande y se comporta físicamente como un fluido, permitiendo una mezcla íntima entre el combustible y el comburente.

En el diseño CFB, la velocidad del aire es suficientemente alta (velocidad de transporte) para arrastrar los sólidos fuera del hogar. Estos sólidos son capturados por ciclones de alta eficiencia y reinjectados al lecho a través de un sistema de retorno no mecánico denominado “Loop Seal”. Este ciclo continuo de recirculación garantiza un tiempo de residencia prolongado para la combustión completa y una transferencia de calor eficiente a las paredes de agua (Baque-Ballesteros et al., 2023).

Figura 2. Esquema de funcionamiento de una caldera de Lecho Fluidizado Circulante (CFB)



Fuente: Captura propia

5.1.2 Criticidad de los Equipos Rotativos Auxiliares El balance aerodinámico es el corazón de una caldera CFB. A diferencia de las calderas de tiro natural, estas unidades operan bajo un régimen de tiro balanceado que depende enteramente de la confiabilidad de sus ventiladores:

- **Ventiladores de Aire Primario (PA):** Suministran el aire a alta presión necesario para fluidizar el lecho en la parte inferior del hogar. Una falla en este equipo provoca la defluidización inmediata (colapso del lecho), lo que puede resultar en la sinterización del material (formación de clinker) y daños estructurales graves en las toberas de inyección.
- **Ventiladores de Aire Secundario (SA):** Inyectan aire en niveles superiores del hogar para completar la combustión (etapificación) y controlar la temperatura y las emisiones de NOx.
- **Ventiladores de Tiro Inducido (ID):** Extraen los gases de combustión manteniendo una presión negativa en el hogar. Estos equipos operan en condiciones severas, manejando gases calientes cargados con partículas abrasivas, lo que los hace propensos a desgaste por erosión en los álabes y desbalanceos dinámicos progresivos.
- **Sopladores de Loop Seal:** Proporcionan el aire de fluidización necesario para que el sello de retorno de sólidos funcione, evitando que los gases de combustión se devuelvan por el ciclón.

5.2 GESTIÓN ESTRATÉGICA DEL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

La gestión de activos en la industria de procesos químicos ha transitado desde un enfoque táctico de reparación de averías hacia una disciplina estratégica orientada a la gestión del riesgo y la sostenibilidad del ciclo de vida del activo (*Asset Life Cycle Management*).

5.2.1 Evolución de las Estrategias de Mantenimiento La selección de la estrategia adecuada depende de la criticidad del activo y del modo de falla predominante:

- **Mantenimiento Correctivo (Reactivo):** Se define como la intervención realizada exclusivamente tras la ocurrencia de un fallo funcional (Estrategia *Run-to-Failure*). Según Ávila Martínez (2012), aunque es viable para equipos auxiliares redundantes o de bajo costo, su aplicación en activos críticos como la caldera resulta inaceptable debido a la imprevisibilidad operativa y los costos exponenciales asociados al lucro cesante y riesgos de seguridad (HSE).
- **Mantenimiento Preventivo (Basado en Tiempo):** Consiste en la sustitución de componentes o revisiones mayores a intervalos fijos (calendario o horas de operación). Se basa en la premisa de que la probabilidad de falla aumenta con la edad (desgaste). Sin embargo, estudios de confiabilidad (Nolan & Heap) demostraron que solo el 11 % de los modos de falla en equipos complejos siguen este patrón de desgaste por edad. Montenegro Díaz y Quiñones Vásquez (2025) señala que aplicar esta estrategia indiscriminadamente genera ineficiencias por exceso de mantenimiento y la introducción de fallas infantiles por intervención intrusiva.
- **Mantenimiento Predictivo (Basado en Condición - CBM):** Es la estrategia adoptada en este proyecto. Fundamenta la decisión de intervenir en el estado real y medible del activo. Martínez Páez (2024) destaca que el objetivo es detectar la degradación en una etapa incipiente (intervalo P-F), permitiendo planificar la corrección de manera oportuna, minimizando el tiempo medio de reparación (MTTR) y maximizando la vida útil de los componentes.

5.3 INGENIERÍA DE CONFIABILIDAD Y METODOLOGÍA RCM

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM - *Reliability Centered Maintenance*) es la metodología estándar para determinar los requerimientos de mantenimiento óptimos de cualquier activo físico en su contexto operacional.

5.3.1 Principios Fundamentales del RCM Según la norma SAE JA1011 (SAE International, 1999), un proceso RCM debe responder secuencialmente a siete preguntas para ser considerado como tal:

1. ¿Cuáles son las funciones y los estándares de desempeño del activo en su contexto operacional actual?
2. ¿De qué manera puede fallar en cumplir sus funciones? (Fallas Funcionales).
3. ¿Qué causa cada falla funcional? (Modos de Falla).
4. ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla? (Efectos de Falla).
5. ¿En qué sentido es importante cada falla? (Consecuencias de Falla).
6. ¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir la falla? (Tareas Proactivas).
7. ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada? (Tareas a falta de).

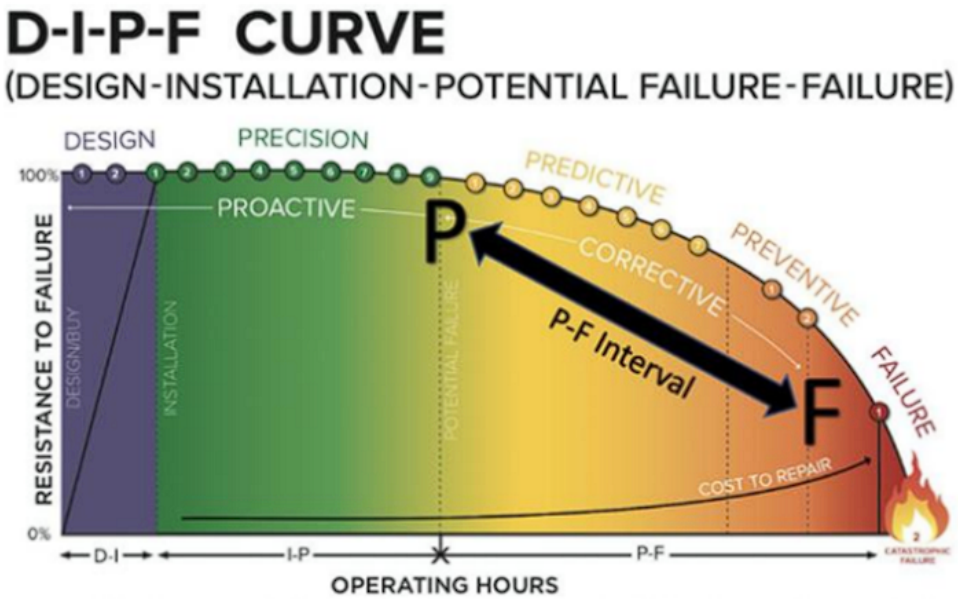
El RCM prioriza los modos de falla basándose en sus consecuencias en cuatro categorías: Seguridad y Medio Ambiente, Operacionales (Producción), No Operacionales (Costos de reparación) y Fallas Ocultas.

5.3.2 La Curva P-F y el Intervalo de Detección El concepto técnico que sustenta el mantenimiento predictivo es la curva P-F (ver Figura 3), que ilustra la relación entre la condición del equipo y el tiempo.

- **Punto P (Falla Potencial):** Es el momento en el que un cambio en la condición física es detectable mediante una técnica de monitoreo (ej. aumento de vibración, calor, partículas en aceite).
- **Punto F (Falla Funcional):** Es el momento en el que el equipo ya no cumple su función bajo el estándar requerido (ej. la bomba no entrega flujo, el rodamiento se gripa).

El intervalo P-F es el tiempo neto disponible para tomar acción. La frecuencia de inspección debe ser menor al intervalo P-F (típicamente la mitad) para garantizar la detección (Moubray, 1997).

Figura 3. Curva D-I-P-F (Diseño-Instalación-Falla Potencial-Falla)



Fuente: O'Hanlon (2025)

5.4 DIAGNÓSTICO TÉCNICO Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES

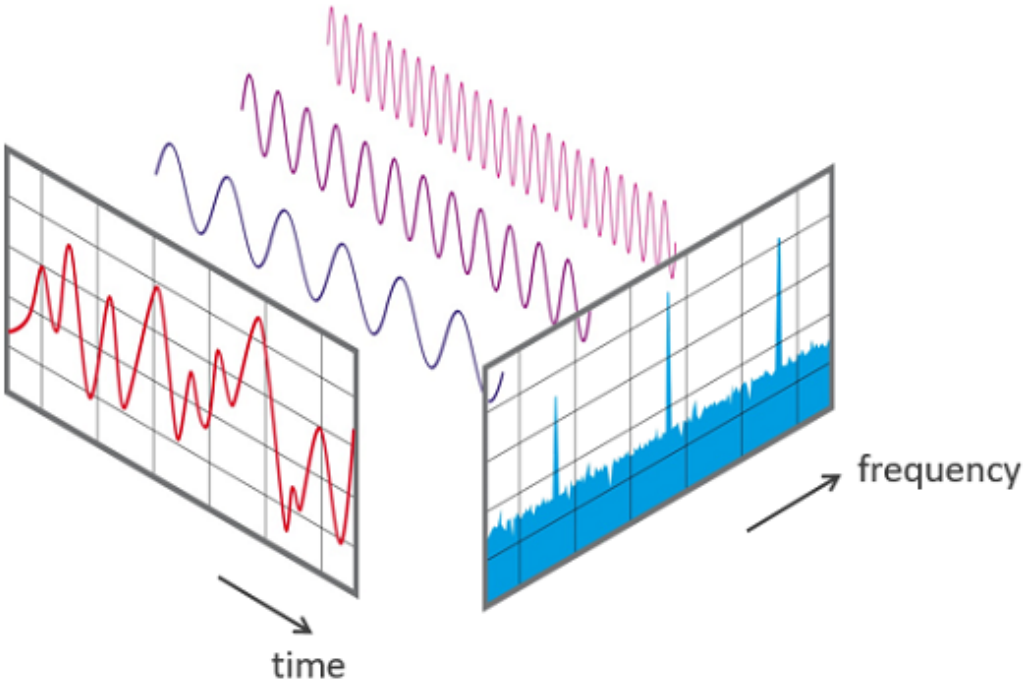
Para maquinaria rotativa, el análisis de vibraciones es la técnica de monitoreo de condición más potente y versátil. Se basa en la captura de señales dinámicas mediante transductores (acelerómetros) y su procesamiento digital.

5.4.1 Parámetros de Medición

- **Desplazamiento (μm):** Mide el movimiento total de la masa. Es sensible a bajas frecuencias y se usa típicamente en cojinetes de película de aceite (babbitt).
- **Velocidad (mm/s RMS):** Es el parámetro estándar según la norma **ISO 20816** para evaluar la severidad vibratoria en el rango de 10 Hz a 1000 Hz. Es directamente proporcional a la energía destructiva y la fatiga mecánica. Es ideal para detectar desbalanceo, desalineación y solturas mecánicas.
- **Aceleración (g):** Es la tasa de cambio de la velocidad. Es altamente sensible a las altas frecuencias, lo que la hace ideal para detectar fuerzas de impacto generadas por defectos en rodamientos y engranajes en etapas tempranas.

5.4.2 Análisis Espectral (FFT) y Envolvente El diagnóstico se realiza transformando la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT) (ver Figura 4). Esta transformación es crucial porque permite descomponer una señal compleja en sus frecuencias componentes, revelando el origen mecánico de la vibración.

Figura 4. Representación de la transformación de señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia (FFT)



Fuente: Adaptado de NTi Audio (s.f.)

Jardine et al. (2006) explican que cada defecto mecánico tiene una "firma" espectral única:

- **Desbalanceo:** Genera un pico dominante a la frecuencia de giro ($1\times$ RPM) en dirección radial.
- **Desalineación:** Genera picos en $1\times$ y $2\times$ RPM, a menudo con alta vibración axial.
- **Defectos de Rodamientos:** Generan frecuencias no sincrónicas calculables basadas en la geometría del rodamiento (BPFO, BPFI, BSF, FTF). Para su detección temprana, se utiliza la técnica de **Envolvente de Aceleración**, la cual demodula la señal de alta frecuencia para aislar los impactos repetitivos del defecto, permitiendo diagnósticos meses antes de la falla funcional.

5.5 OTRAS TÉCNICAS DE INSPECCIÓN PARAMÉTRICA

5.5.1 Termografía Infrarroja La termografía permite visualizar patrones térmicos invisibles al ojo humano. En equipos rotativos, es fundamental para detectar fricción excesiva en rodamientos, problemas de lubricación, desalineación de acoples y puntos calientes en conexiones eléctricas de motores (falsos contactos) que podrían causar disparos intempestivos.

5.5.2 Inspección Sensorial A pesar de la tecnología, la inspección sensorial estructurada sigue siendo vital. El personal técnico puede detectar fugas de sellos mecánicos, cambios en el ruido audible, olores a quemado o soltura de pernos de anclaje que los sensores de vibración podrían no registrar inmediatamente. La estandarización de estas inspecciones mediante rutas y listas de chequeo es clave para la trazabilidad (Canales Aguilar, 2019).

5.6 INDICADORES DE DESEMPEÑO (KPIS)

La efectividad del mantenimiento se mide a través de indicadores estandarizados que cuantifican la confiabilidad del activo.

5.6.1 Disponibilidad (A) Es la probabilidad de que un equipo esté en estado de funcionar cuando se le requiere. Matemáticamente:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100\,\% \tag{5.1}$$

Donde el objetivo del mantenimiento predictivo es maximizar el MTBF (fiabilidad) y minimizar el MTTR (mantenibilidad) mediante la planificación anticipada (Boulangger et al., 2024).

5.6.2 Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) El MTBF (*Mean Time Between Failures*) es el promedio del tiempo operativo entre fallas no programadas. Un aumento en el MTBF es el indicador directo del éxito de las estrategias de eliminación de defectos y mantenimiento proactivo.

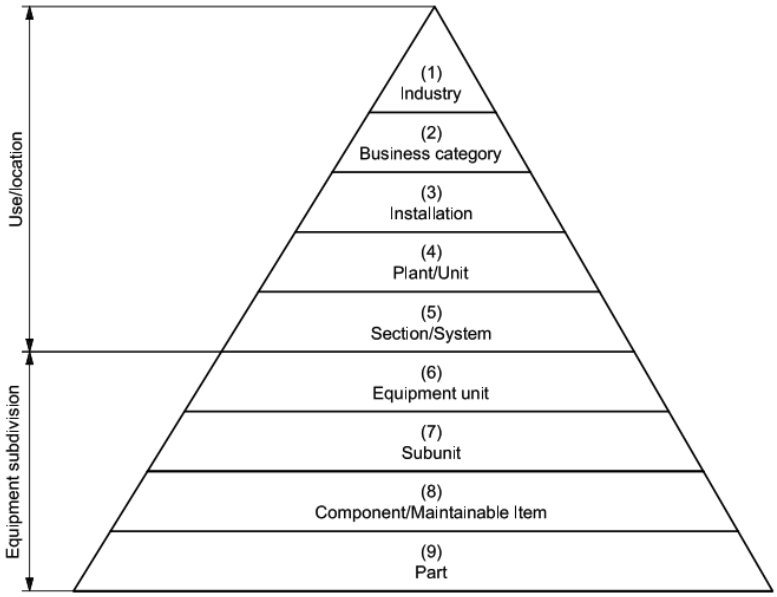
5.6.3 Tiempo Medio Para Reparar (MTTR) El MTTR (*Mean Time To Repair*) mide la mantenibilidad. El mantenimiento predictivo reduce este tiempo drásticamente, ya que per-

mite diagnosticar la falla y preparar los repuestos, herramientas y personal *antes* de detener el equipo, eliminando los tiempos muertos logísticos.

5.7 ESTANDARIZACIÓN DE DATOS: NORMA ISO 14224

La norma **ISO 14224** (ISO, 2016) "Industrias del petróleo, petroquímica y gas natural - Recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos", proporciona el marco taxonómico para la gestión de datos. Esta norma establece una jerarquía estandarizada (ver Figura 5) (Clase, Sistema, Subsistema, Ítem Mantenible) y define un lenguaje común para los Modos de Falla y Mecanismos de Falla, asegurando que la información recolectada sea consistente, comparable y apta para análisis estadísticos de confiabilidad.

Figura 5. Jerarquía taxonómica para la recolección de datos de confiabilidad



Fuente: Adaptado de Power-MI (s.f.)

6. METODOLOGÍA

La metodología del presente proyecto se estructura en una secuencia lógica de fases interdependientes, diseñadas específicamente para dar cumplimiento a los objetivos planteados y garantizar la rigurosidad técnica en el desarrollo del plan de mantenimiento. Cada fase aborda un componente crítico del estudio, desde el diagnóstico inicial hasta la evaluación de impacto, asegurando la trazabilidad y coherencia del proceso.

6.1 FASE 1: DIAGNÓSTICO Y RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN (OBJETIVO ESPECÍFICO 1)

Esta fase se centra en el levantamiento de la línea base técnica y operativa de los activos, actividad fundamental para cumplir con el primer objetivo específico. Su propósito es consolidar la información necesaria para el desarrollo posterior de los modos de falla.

6.1.1 Revisión Documental y Técnica Se procederá con la recopilación y análisis exhaustivo de la información técnica disponible en el sistema de gestión documental de la compañía (*Vault*), incluyendo:

- **Manuales de Fabricante:** Extracción de parámetros de diseño, curvas de operación y límites operativos seguros.
- **Información Técnica de Activos:** Revisión de los dosieres de calidad y planos P&ID para validar la configuración instalada.
- **Análisis de Causa Raíz (RCA):** Estudio detallado de las investigaciones de falla previas para identificar patrones recurrentes y lecciones aprendidas que no fueron gestionadas eficazmente en el pasado.

6.1.2 Análisis del Historial de Fallas (2023-2024) Para caracterizar el comportamiento real de los equipos, se realizará un análisis cuantitativo y cualitativo de las bitácoras de mantenimiento y órdenes de trabajo correspondientes a los periodos 2023 y 2024. Se tabularán los eventos de falla funcional, clasificándolos por frecuencia e impacto en la disponibilidad, lo que permitirá focalizar los esfuerzos en los "actores críticos" (*Bad Actors*).

6.1.3 Inspección en Planta y Categorización de Activos Se ejecutará una verificación física en campo para constatar el estado actual de los equipos rotativos, sus condiciones

de montaje y entorno operativo. Posteriormente, se generará el listado maestro de activos, aplicando una categorización taxonómica alineada con la norma ISO 14224 (ISO, 2016), estandarizando la denominación de sistemas, subsistemas y componentes mantenibles.

6.2 FASE 2: DISEÑO DE ESTRATEGIAS RCM (OBJETIVO ESPECÍFICO 2)

En cumplimiento del segundo objetivo específico, esta fase aplica la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad para transformar la información diagnóstica en decisiones técnicas concretas.

6.2.1 Desarrollo de AMEF Se elaborarán los Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF) para cada uno de los equipos rotativos identificados como críticos. Este proceso se centrará en:

- Identificar las funciones y fallas funcionales.
- Determinar los modos de falla (causas físicas) con mayor probabilidad de ocurrencia y severidad, basándose en la norma ISO 14224 como guía taxonómica.
- Validar los resultados con el área de Seguridad de Procesos para asegurar que los riesgos operativos están correctamente ponderados.

6.2.2 Selección de Técnicas de Monitoreo Para cada modo de falla crítico identificado, se seleccionará la técnica de inspección más adecuada para su detección temprana (Intervalo P-F). Se priorizará el análisis de vibraciones para fallas mecánicas internas (rodamientos, desbalanceo) y la inspección sensorial paramétrica para condiciones operativas (temperatura, presión, fugas), definiendo los criterios de aceptación y rechazo.

6.3 FASE 3: DISEÑO DE FORMATOS Y PROCEDIMIENTOS (OBJETIVO ESPECÍFICO 3)

Esta fase aborda el tercer objetivo, enfocándose en la creación de las herramientas administrativas y técnicas que permitirán la operatividad del plan.

6.3.1 Diseño de Formatos de Inspección Se desarrollarán formatos de campo estandarizados para las rutinas de inspección visual y toma de datos de vibraciones. Estos documentos

especificarán claramente qué medir, cómo medirlo y dónde registrarlo, minimizando la variabilidad en la recolección de datos por parte de los técnicos.

6.3.2 Protocolos de Trazabilidad y Reporte Se definirán los procedimientos para el flujo de la información. El objetivo es establecer un mecanismo formal mediante el cual el área de Confiabilidad analice las tendencias de los datos recolectados y, ante la detección de anomalías, genere las órdenes de trabajo preventivas hacia el área de Planeación. Esto asegura que la intervención se programe antes de la falla funcional, cerrando el ciclo de gestión.

6.3.3 Definición de Frecuencias Se establecerán las periodicidades óptimas de inspección para cada ruta, basándose en la tasa de degradación estimada (Curva P-F) y la criticidad del activo, buscando un equilibrio entre costo y riesgo.

6.4 FASE 4: CONSOLIDACIÓN E IMPLEMENTACIÓN (OBJETIVO ESPECÍFICO 4)

Como parte del alcance final, esta fase integra todos los productos diseñados en un plan maestro ejecutable.

6.4.1 Consolidación del Plan General Se unificarán las estrategias, rutinas y frecuencias en un documento procedimental general (“Plan de Mantenimiento Predictivo”), que servirá como guía rectora para la gestión de los activos rotativos de la caldera.

6.4.2 Implementación Controlada Se pondrá en marcha el plan diseñado durante el periodo de evaluación (año 2025), asegurando la ejecución de las rutas de inspección y la recolección sistemática de datos bajo los nuevos estándares definidos.

6.5 FASE 5: EVALUACIÓN DE RESULTADOS (OBJETIVO ESPECÍFICO 4)

Finalmente, para dar cumplimiento total al cuarto objetivo, se realizará la medición del impacto real del proyecto.

6.5.1 Cálculo de Indicadores Se procesarán los datos operativos del año 2025 para calcular los indicadores de confiabilidad clave, específicamente la Disponibilidad.

6.5.2 Análisis Comparativo Se realizará un contraste directo entre la disponibilidad obtenida tras la implementación (2025) y la línea base histórica (2023-2024). Este análisis permitirá cuantificar la reducción de paradas no programadas y validar la efectividad de las estrategias RCM adoptadas.

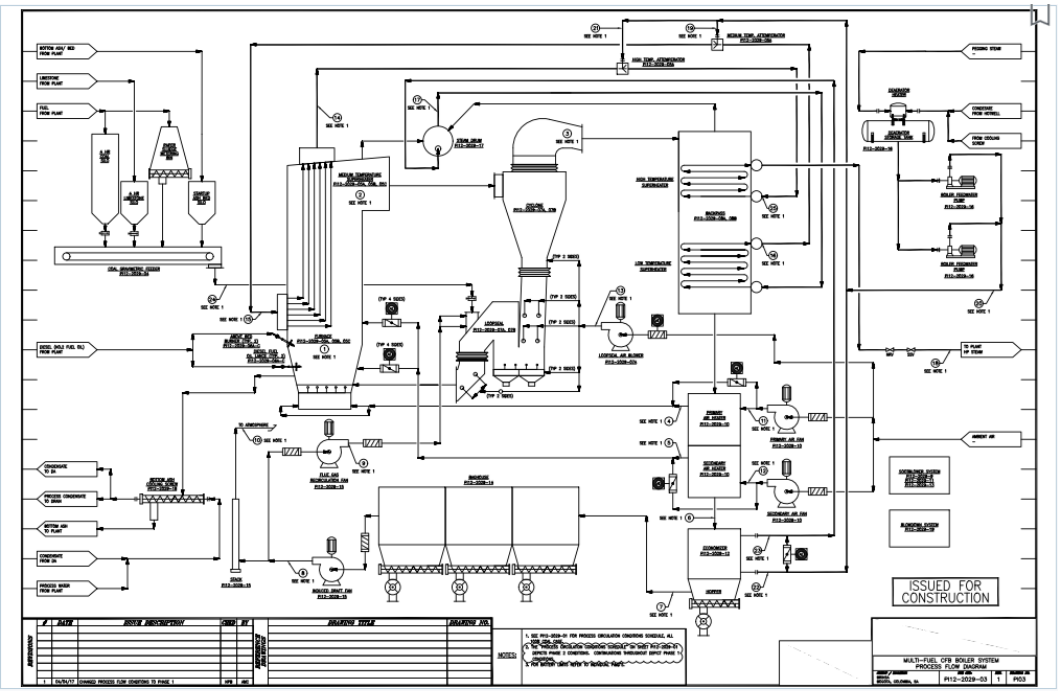
7. FASE 1

7.1 REVISIÓN DE MANUALES Y DOCUMENTACIÓN TÉCNICA

Con el propósito de adquirir un conocimiento técnico detallado y preciso sobre los equipos rotativos críticos de la caldera, se procedió a realizar una revisión exhaustiva de la documentación de ingeniería del proyecto. Esta actividad abarcó el análisis de los dosieres de calidad de montaje, los planos mecánicos y los manuales de operación y mantenimiento suministrados por los fabricantes.

Adicionalmente, se realizó un estudio detallado de los Diagramas de Tuberías e Instrumentación (P&ID), con énfasis en los subsistemas de aire y gases de la caldera. Esta revisión permitió identificar la interconexión funcional de los ventiladores y sopladores con los lazos de control y la instrumentación asociada, paso indispensable para definir el contexto operacional en el análisis RCM. A continuación, se presenta un extracto de dichos diagramas analizados (ver Figura 6).

Figura 6. Diagrama P&ID del sistema de aire y gases de la caldera

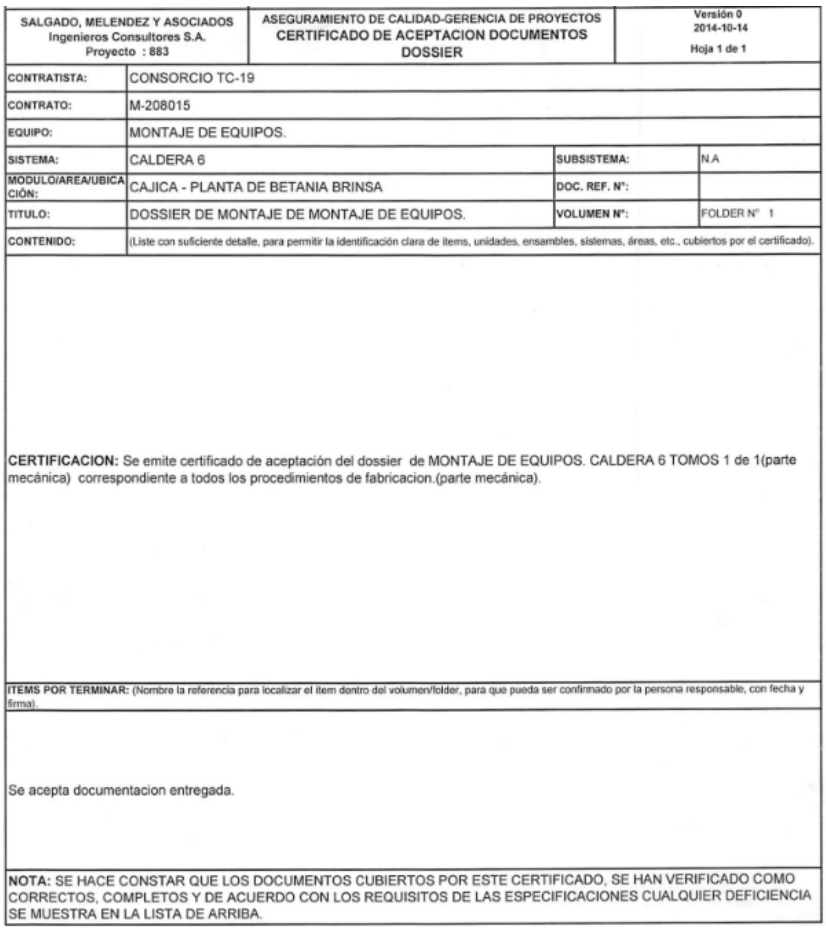


Fuente: Elaboración propia (Captura de documentación técnica interna).

La consulta y gestión de esta información se llevó a cabo mediante el software de administración de datos técnicos utilizado por la compañía, denominado *Vault* de Autodesk. Esta plataforma permitió el acceso a las versiones controladas y vigentes de la información, garantizando la fiabilidad de los datos técnicos utilizados para el desarrollo de los planes de mantenimiento.

Debido a la gran extensión y volumen de la documentación técnica analizada, no es viable su inclusión total en los anexos de este documento. No obstante, a continuación se presenta un ejemplo representativo de la estructura de los dosieres de montaje consultados (ver Figura 7), los cuales sirvieron como base para identificar las especificaciones de diseño de los activos.

Figura 7. Ejemplo del Dosier de Montaje de Equipos



SALGADO, MELENDEZ Y ASOCIADOS Ingenieros Consultores S.A. Proyecto : 883	ASEGURAMIENTO DE CALIDAD-GERENCIA DE PROYECTOS CERTIFICADO DE ACEPTACION DOCUMENTOS DOSSIER		Versión 0 2014-10-14 Hoja 1 de 1
CONTRATISTA:	CONSORCIO TC-19		
CONTRATO:	M-208015		
EQUIPO:	MONTAJE DE EQUIPOS.		
SISTEMA:	CALDERA 6	SUBSISTEMA:	N.A
MODULO/AREA/UBICACIÓN:	CAJICA - PLANTA DE BETANIA BRINSA	DOC. REF. N°:	
TITULO:	DOSSIER DE MONTAJE DE MONTAJE DE EQUIPOS.	VOLUMEN N°:	FOLDER N° 1
CONTENIDO:	(Liste con suficiente detalle, para permitir la identificación clara de ítems, unidades, ensambles, sistemas, áreas, etc., cubiertos por el certificado).		

CERTIFICACION: Se emite certificado de aceptación del dossier de MONTAJE DE EQUIPOS. CALDERA 6 TOMOS 1 de 1(parte mecánica) correspondiente a todos los procedimientos de fabricacion.(parte mecánica).

ITEMS POR TERMINAR: (Nombre la referencia para localizar el ítem dentro del volumen/folder, para que pueda ser confirmado por la persona responsable, con fecha y firma).

Se acepta documentacion entregada.

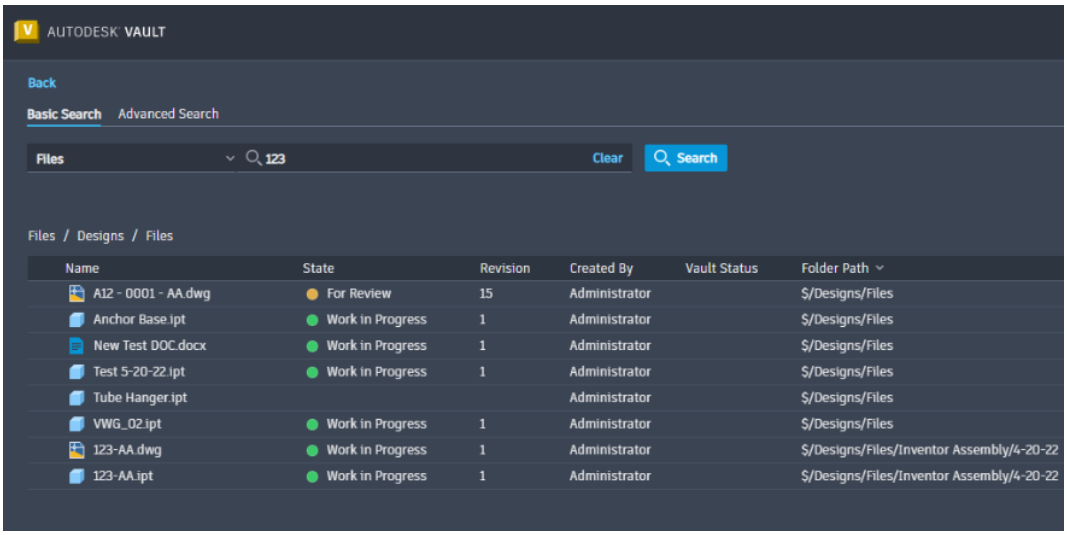
NOTA: SE HACE CONSTAR QUE LOS DOCUMENTOS CUBIERTOS POR ESTE CERTIFICADO, SE HAN VERIFICADO COMO CORRECTOS, COMPLETOS Y DE ACUERDO CON LOS REQUISITOS DE LAS ESPECIFICACIONES CUALQUIER DEFICIENCIA SE MUESTRA EN LA LISTA DE ARRIBA.

Fuente: Elaboración propia (Captura de documentación interna).

Asimismo, se evidencia el entorno de consulta dentro del sistema de gestión documental (ver

Figura 8), donde se reposan los históricos y fichas técnicas de los activos.

Figura 8. Visualización de documentos técnicos en software Vault (Autodesk)



Fuente: Elaboración propia (Captura de pantalla del software corporativo).

7.2 DEFINICIÓN DEL CONTEXTO OPERACIONAL

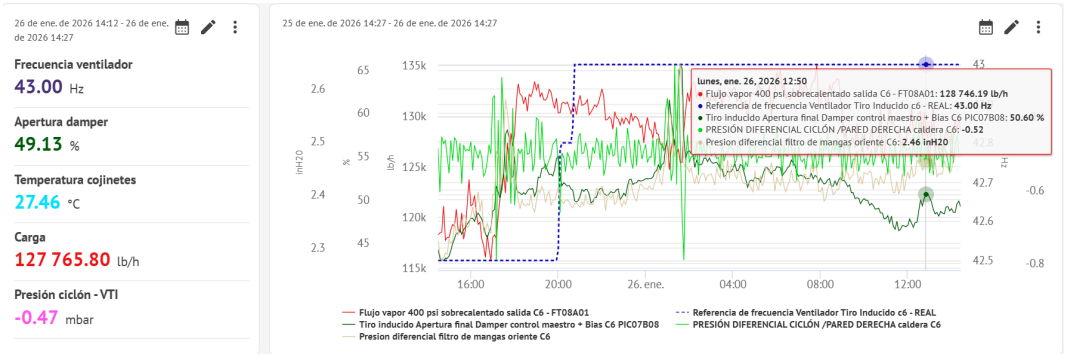
De acuerdo con los lineamientos de la norma SAE JA1011, para aplicar correctamente el RCM es indispensable definir las circunstancias bajo las cuales se espera que operen los activos físicos. El contexto operacional de la Caldera de Lecho Fluidizado (CFB) se caracteriza por un régimen de alta exigencia, condicionado por la demanda de vapor del proceso productivo aguas abajo.

7.2.1 Régimen de Operación y Disponibilidad Requerida El activo opera bajo un esquema de producción continua (24 horas / 7 días). Este régimen implica que no existen ventanas de mantenimiento rutinarias disponibles sin afectar la producción, lo que eleva la criticidad de cualquier evento de falla no planificado. La caldera es un equipo único (sin redundancia total o *stand-by* inmediato) para el suministro de vapor sobrecalentado a 400 PSI, insumo crítico para la generación de energía y el proceso químico.

7.2.2 Parámetros Termodinámicos y de Carga El análisis de los históricos del Sistema de Control Distribuido (DCS), correspondientes a la ventana de operación estándar (ver Figura 9), permite establecer los siguientes parámetros nominales de funcionamiento:

- **Carga de Vapor:** El equipo mantiene una producción promedio de **128,746 lb/h** de vapor sobrecalentado.
- **Presión de Salida:** Se establece un set-point operativo de 400 PSI.
- **Balance de Tiro:** Para garantizar la fluidización sin fugas de gases, el sistema opera con presión negativa en el hogar (tiro balanceado), manteniendo un diferencial de presión ciclón-VTI en el rango de **-0.47 mbar**.

Figura 9. Parámetros operativos en tiempo real: Carga de vapor, Frecuencia de VTI y Apertura de Damper



Fuente: Sistema de Información de Planta (METRON).

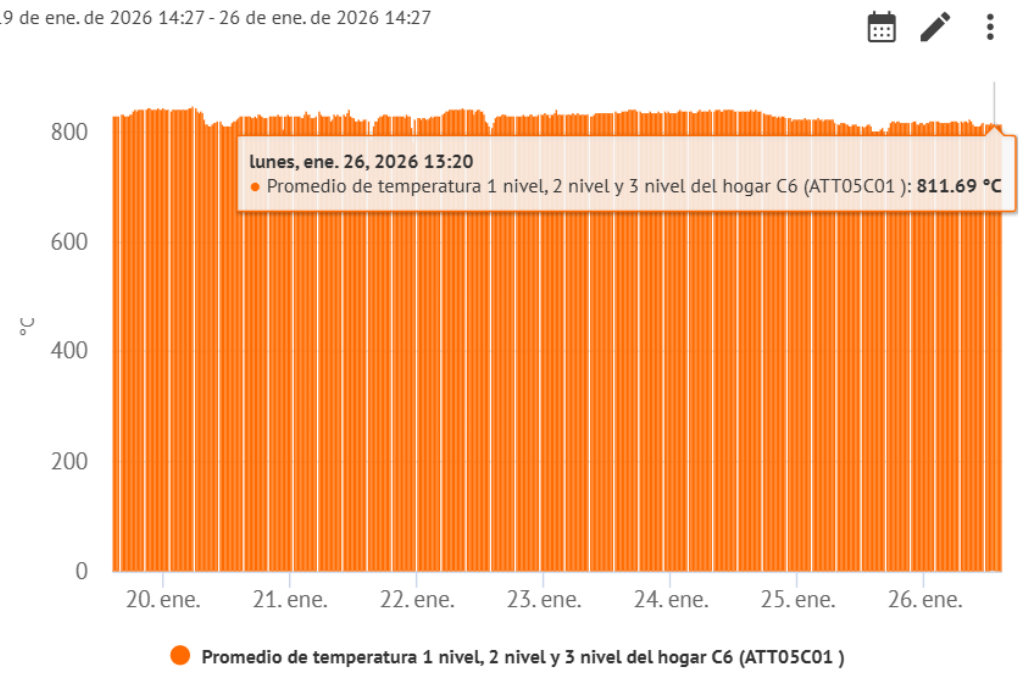
7.2.3 Perfil de Operación de Equipos Rotativos Los ventiladores, que constituyen el objeto central de este plan de mantenimiento, operan a carga variable controlados por Variadores de Frecuencia (VFD). Según la evidencia recolectada:

- **Ventilador de Aire Primario (VAP):** Opera a una frecuencia base de **47.00 Hz**, siendo el de mayor exigencia para sostener la fluidización del lecho de arena y combustible.
- **Ventilador de Tiro Inducido (VTI):** Opera en seguimiento a una frecuencia de **43.00 Hz** con una apertura de damper del 50.60 %, encargado de la extracción de gases y control de la presión negativa.
- **Ventilador de Aire Secundario (VAS):** Mantiene una frecuencia de **41.00 Hz** para el control de emisiones y combustión completa.

Estos valores indican que los equipos rotativos operan en un rango del 70 % al 80 % de su capacidad nominal, lo que genera un estrés dinámico constante sobre los rodamientos y acoples, justificando la necesidad de un monitoreo de vibraciones estricto.

7.2.4 Perfil Térmico del Hogar La estabilidad térmica es crítica para evitar la sinterización del material del lecho (formación de clinker). Como se observa en (la Figura 10), la temperatura promedio del hogar se controla rigurosamente en **811 °C**.

Figura 10. Tendencia de estabilidad de la temperatura promedio del hogar (niveles 1, 2 y 3)



Fuente: Sistema de Información de Planta (METRON).

Este contexto de alta temperatura impone condiciones severas para la instrumentación y los componentes mecánicos cercanos al cuerpo de la caldera, acelerando los modos de falla por degradación térmica y exigiendo rutinas de inspección termográfica periódicas.

7.3 ANÁLISIS DE HISTORIALES DE FALLAS

Superada la revisión documental, el siguiente paso consistió en analizar los datos históricos de mantenimiento, los cuales reflejan el comportamiento real de los equipos en su contexto operacional. Para ello, se realizó una extracción y depuración detallada de la base de datos de la compañía, gestionada a través del sistema CMMS (Sistema de Gestión de Mantenimiento Computarizado), acotando el periodo de estudio entre enero de 2023 y mayo de 2025.

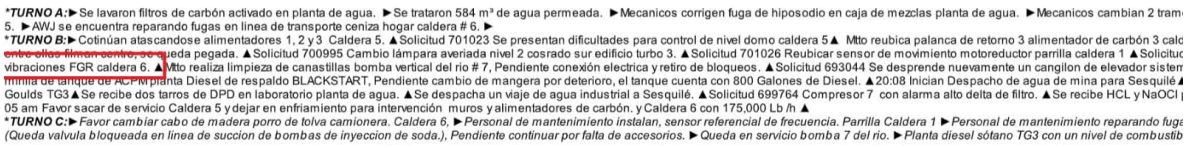
Es importante destacar que la información cruda del sistema se complementó con la revisión física de las bitácoras de turno de los técnicos mecánicos. Estos documentos de campo registran novedades operativas que, en ocasiones, no se detallan completamente en las órdenes de trabajo digitales. El análisis de estas bitácoras permitió identificar eventos que, aunque no generaron una orden de trabajo correctiva inmediata, sí representaron síntomas de degradación incipiente.

Para focalizar el estudio en los eventos de mayor criticidad, se aplicó un filtro basado en ”gatillos.º disparadores de consecuencia. Se seleccionaron únicamente aquellos registros que cumplieron con al menos una de las siguientes condiciones:

- Fallas que ocasionaron una parada total o parcial de la planta (lucro cesante).
- Eventos que comprometieron la seguridad del personal o la integridad de las instalaciones (riesgos HSE).
- Reparaciones que excedieron los tiempos estándar de intervención (mantenibilidad reducida).

La Figura 11 ilustra un ejemplo de los registros manuales en bitácora que sirvieron como fuente primaria para la validación de los datos del sistema.

Figura 11. Registro de novedades en bitácoras de mantenimiento mecánico


*TURNO A:►Se lavaron filtros de carbón activado en planta de agua. ►Se trataron 584 m³ de agua permeada. ►Mecanicos corrigen fuga de hiposodio en caja de mezclas planta de agua. ►Mecanicos cambian 2 tram
5. ►AWJ se encuentra reparando fugas en linea de transporte ceniza hogar caldera # 6. ►
*TURNO B:►Cotinúan atascandose alimentadores 1, 2 y 3 Caldera 5. ▲Solicitud 701023 Se presentan dificultades para control de nivel domo caldera 5▲ Mtto reubica palanca de retorno 3 alimentador de carbón 3 calc
entre ellas limpieza, se queda pegada. ▲Solicitud 700995 Cambio lámpara averiada nivel 2 cosrado sur edificio turbo 3. ▲Solicitud 701026 Reubicar sensor de movimiento motoreductor parrilla caldera 1 ▲Solicitud
vibraciones FGR caldera 6. ▲Mtto realiza limpieza de canastillas bomba vertical del rio # 7, Pendiente conexión electrica y retiro de bloqueos. ▲Solicitud 693044 Se desprende nuevamente un cangilon de elevador sistem
mmila de tanque de ACPM planta Diesel de respaldo BLACKSTART, Pendiente cambio de mangera por deterioro, el tanque cuenta con 800 Galones de Diesel. ▲20:08 Inician Despacho de agua de mina para Sesquilé
Goulds TG3▲Se recibe dos tarros de DPD en laboratorio planta de agua. ▲Se despacha un viaje de agua industrial a Sesquilé. ▲Solicitud 699764 Compresor 7 con alarma alto delta de filtro. ▲Se recibe HCL y NaOCl
05 am Favor sacar de servicio Caldera 5 y dejar en enfriamiento para intervención muros y alimentadores de carbón. y Caldera 6 con 175,000 Lb /h ▲
*TURNO C:►Favor cambiar cabo de madera porro de tolva camionera. Caldera 6. ►Personal de mantenimiento instalan, sensor referencial de frecuencia. Parrilla Caldera 1 ►Personal de mantenimiento reparando fuga
(Queda valvula bloqueada en linea de succion de bombas de inyeccion de soda.), Pendiente continuar por falta de accesorios. ►Queda en servicio bomba 7 del rio. ►Planta diesel sótano TG3 con un nivel de combustib

Fuente: Elaboración propia (Fotografía de registros de campo).

Como resultado de este proceso de filtrado y clasificación, se estructuró el historial de fallas dividiéndolo por especialidad para facilitar el análisis de causa raíz. A continuación, se presentan los eventos consolidados.

7.3.1 Historial de fallas mecánicas La Tabla 1 resume los eventos de naturaleza mecánica que impactaron la disponibilidad de la caldera. Se observa una recurrencia significativa en problemas asociados a vibraciones y fugas, especialmente en los ventiladores de tiro y el sistema de tuberías.

Tabla 1. Historial de fallas mecánicas registradas (2023-2025)

Fecha	Equipo / Componente	Tiempo (min)	Descripción del evento
01/06/2023	Caldera 6	1110	Fuga en tubos de pared occidental (back pass).
26/07/2023	Caldera 6	1400	Fuga en tubería del hogar.
31/08/2023	Caldera 6	35	Reparación de fuga en bolsillo.

Continúa en la siguiente página...

Tabla 1 – continúa de la página anterior

Fecha	Equipo / Componente	Tiempo (min)	Descripción del evento
28/11/2023	Caldera 6	1450	Falla general en zona back pass.
13/01/2024	Caldera 6	120	Acople con central térmica (evento operativo).
01/03/2024	Ventilador VTI 6	60	Disparo automático por altos niveles de vibración.
09/03/2024	Caldera 6	12	Operación fuera de parámetros, presencia de clinker y caída de refractario.
14/03/2024	Caldera 6	20	Salida de servicio por alta presión en loopseal y refractario caído.
11/06/2024	Ventilador VTI 6	50	Disparo de caldera por altas vibraciones en VTI.
02/07/2024	Ventilador VTI (D235)	840	Parada programada para corrección de alineación.
30/07/2024	Caldera 6	16	Disparo de caldera, falla reportada en Ventilador de Aire Primario (VAP).
12/09/2024	Caldera 6	11220	Pérdida crítica de refractario en hogar con exposición de tubería en curvas.
20/09/2024	Caldera 6	750	Evento de acople de caldera.
21/11/2024	Caldera 6	8580	Falla estructural en pared occidental (nivel 6 metros) del hogar.
24/01/2025	Economizador	4800	Falla en banco de tubos del economizador.
13/04/2025	Caldera 6	5760	Parada general para ajustes mecánicos en VTI.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del sistema CMMS y bitácoras.

7.3.2 Historial de fallas eléctricas y de control Aunque el enfoque del proyecto es mecánico, se documentan en la Tabla 2 las fallas de origen eléctrico y de control, dado que muchas de ellas (como los disparos por vibración o temperatura) son síntomas de problemas mecánicos subyacentes o afectan directamente la integridad de los componentes rotativos.

Tabla 2. Historial de fallas eléctricas y de instrumentación (2023-2025)

Fecha	Equipo / Componente	Tiempo (min)	Descripción del evento
09/02/2023	Caldera 6	30	Falla en módulo de control 4C.
09/06/2023	Caldera 6	10	Falla en módulo C2 de potencia del variador de aire secundario.
18/06/2023	Caldera 6	20	Salida de operación por protección de bajo voltaje.
16/08/2023	Caldera 6	12.5	Salida intempestiva del Ventilador VTI.
30/08/2023	Caldera 6	35	Falla en sistema de control del VTI.
09/12/2023	Caldera 6	14	Falla en variador de medida.
12/01/2024	Caldera 6	150	Falla en Dampers FV05812 y FV05811 por alta temperatura en cableado.
29/02/2024	Bombas KSB	780	Fallo en sistema eléctrico de bombas de alimentación.
12/06/2024	Caldera 6	240	Falla en resistencia de carga.
13/06/2024	Caldera 6	30	Disparo por fallo en transferencias de 440 VAC.
25/07/2024	Caldera 6	60	Disparo de válvula VAP por diferencial.
30/07/2024	Caldera 6	12	Disparo de válvula VAP.
18/08/2024	Bomba Alimentación	270	Disparo de bomba sur por protección eléctrica.
06/05/2025	Caldera 6	90	Falla en sistema de accionamiento del VTI.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos del sistema CMMS y bitácoras.			

El análisis cuantitativo de estos datos revela que los equipos rotativos, específicamente el Ventilador de Tiro Inducido (VTI) y las bombas de alimentación, representan los actores críticos (”bad actors”) en términos de frecuencia de falla. La recurrencia de eventos asociados a vibraciones en el VTI justifica plenamente la necesidad de implementar un monitoreo de condición más estricto, que permita anticipar la desalineación o el desbalance antes de que el sistema de protección genere un disparo automático de la caldera.

7.4 INSPECCIÓN EN PLANTA Y LEVANTAMIENTO DE DATOS

La información documental proporciona las especificaciones de diseño, pero es la inspección en planta la que revela la condición real de los activos. Esta etapa es fundamental para contrastar la teoría con la realidad operativa y recopilar datos cualitativos que los sistemas instrumentados no siempre capturan. La inspección se llevó a cabo en colaboración con el personal técnico de mantenimiento y operaciones, realizando un recorrido exhaustivo para identificar los equipos físicos, verificar sus placas de características y detectar modificaciones no documentadas en los planos originales.

El levantamiento de datos en sitio se estructuró en actividades de verificación física, análisis sensorial técnico y evaluación del entorno operativo. Durante este proceso, se prestó especial atención a las condiciones de montaje y cimentación, factores que afectan directamente los modos de falla y su frecuencia, un principio fundamental en la metodología RCM (Moubray, 1997).

7.4.1 Hallazgos en el Ventilador de Tiro Inducido (D235) Durante la inspección detallada, se identificó una condición particular en el Ventilador de Tiro Inducido (VTI). Se evidenciaron modificaciones estructurales significativas en los pedestales de la cimentación, las cuales no se encontraban registradas en los planos de construcción iniciales. Estas alteraciones responden a problemas estructurales históricos en la base del equipo. Específicamente, se observó la instalación de sistemas de gatos mecánicos auxiliares en los apoyos del motor (ver Figura 12), implementados como medida correctiva para facilitar las maniobras de alineación y compensar asentamientos o deformaciones de la base.

Figura 12. Modificaciones estructurales y gatos de alineación en el VTI



Fuente: Elaboración propia (Evidencia de inspección en campo).

7.4.2 Estado General de Equipos Auxiliares En contraste con el VTI, la inspección del resto de los equipos rotativos críticos reveló que estos se encuentran en buenas condiciones generales de conservación y operan bajo su configuración de diseño original, sin presentar modificaciones estructurales evidentes o adaptaciones mayores. A continuación, se presenta el registro fotográfico del levantamiento realizado a los activos principales del sistema de aire y agua, incluyendo el Ventilador de Aire Primario (ver Figura 13), el Ventilador de Aire Secundario (ver Figura 14), el Ventilador de Recirculación de Gases (ver Figura 15) y las bombas de alimentación (ver Figuras 16 y 17).

Figura 13. Ventilador de Aire Primario (VAP) en planta



Fuente: Elaboración propia.

Figura 14. Ventilador de Aire Secundario (VAS) en planta



Fuente: Elaboración propia.

Figura 15. Ventilador de Recirculación de Gases (FGR) en planta



Fuente: Elaboración propia.

Figura 16. Bomba de Alimentación Norte



Fuente: Elaboración propia.

Figura 17. Bomba de Alimentación Sur



Fuente: Elaboración propia.

7.4.3 Integración con el Sistema de Control (DCS) Finalmente, se verificó la integración de la instrumentación de campo con el Sistema de Control Distribuido (DCS). En la sala de control se centralizan las lógicas de operación, las tendencias de las variables de proceso y el registro histórico de alarmas. Esta interfaz es el punto neurálgico donde convergen los datos de temperatura, presión, flujo y vibración (en los equipos que poseen monitoreo en línea), constituyendo una fuente de información primaria para el diagnóstico de fallas funcionales.

7.4.4 Listado de Equipos Como resultado de la revisión documental exhaustiva y la validación física realizada durante el levantamiento en planta, se consolidó el inventario maestro de los activos rotativos asociados a la caldera. Este listado integra la información técnica recopilada de los manuales, los diagramas P&ID y las placas de características verificadas en sitio.

Para garantizar la estandarización de la información y facilitar el intercambio de datos de confiabilidad, se procedió a clasificar el inventario siguiendo rigurosamente la taxonomía definida en la norma internacional **ISO 14224** (ISO, 2016). Esta clasificación agrupa los equipos por su clase (Bomba, Ventilador, Compresor) y tipo de diseño (Centrífugo, Axial,

Rotativo), proporcionando una estructura lógica para el análisis posterior.

Adicionalmente, es importante señalar que la priorización de estos activos no es arbitraria. La clasificación de criticidad, fundamental para el desarrollo del RCM, fue proporcionada y validada por el área de Seguridad de Procesos de la compañía, basándose en una matriz de riesgos corporativa. El detalle de esta evaluación de criticidad se encuentra disponible para consulta en el **Anexo C**.

A continuación, se presentan las tablas consolidadas del inventario para el sistema de bombeo (ver Tabla 3), el sistema de ventilación y gases (ver Tabla 4) y los equipos auxiliares de limpieza y transporte (ver Tabla 5), organizadas por categoría funcional.

Tabla 3. Clasificación taxonómica de bombas (ISO 14224 - Clase PU)

Tag	Descripción	Fabricante	Clase/Tipo ISO
P670	BMB ALIMENTACION 01	KSB	PU / Centrifugal (CE)
P678	BMB ALIMENTACION 02	KSB	PU / Centrifugal (CE)
P681	BMB RECIRCULACION ACHIQUE	KSB	PU / Centrifugal (CE)
P571	BMB DESAIREADOR 01	GOULDS PUMPS	PU / Centrifugal (CE)
P572	BMB DESAIREADOR 02	GOULDS PUMPS	PU / Centrifugal (CE)
P573	BMB REFRIGERACION TORNILLO	GOULDS PUMPS	PU / Centrifugal (CE)
P574	BMB REFRIGERACION TORNILLO	GOULDS PUMPS	PU / Centrifugal (CE)
P575	BMB RED CONTRAINCENDIOS	WOMA	PU / Centrifugal (CE)
P576	BMB REPOSICION CONDENSADOS	GOULDS PUMPS	PU / Centrifugal (CE)
P577	BMB REPOSICION CONDENSADOS	GOULDS PUMPS	PU / Centrifugal (CE)
P578	BMB 01 PLANTA DIESEL	KATSU POWER	PU / Centrifugal (CE)
P679	BMB PATIN ANALITICA REFRIG.	SIHI PUMPS	PU / Centrifugal (CE)
P680	BMB PATIN ANALITICA REFRIG.	SIHI PUMPS	PU / Centrifugal (CE)
P681	BMB ACPM 01	VIKING PUMP	PU / Rotary (RO)
P682	BMB ACPM 02	VIKING PUMP	PU / Rotary (RO)

Continúa en la siguiente página...

Tabla 3 – continúa de la página anterior

Tag	Descripción	Fabricante	Clase/Tipo ISO
P683	BMB CARGUE ACPM 01	VIKING PUMP	PU / Rotary (RO)
P684	BMB NEUMATICA RECEPCION	SANDPIPER	PU / Reciprocating (RE)
P901	BMB TRASIEGO QUIMICOS 01	PROMINENT	PU / Reciprocating (RE)
P902	BMB TRASIEGO QUIMICOS 02	PROMINENT	PU / Reciprocating (RE)
P903	BMB TRASIEGO QUIMICOS 03	PROMINENT	PU / Reciprocating (RE)
P904	BMB DOSIF. POLIMERO PH 01	PROMINENT	PU / Reciprocating (RE)
P905	BMB DOSIF. POLIMERO PH 02	PROMINENT	PU / Reciprocating (RE)
P906	BMB DOSIF. ERITORATO 01	PROMINENT	PU / Reciprocating (RE)
P907	BMB DOSIFICADORA AMINA 01	PROMINENT	PU / Reciprocating (RE)
P908	BMB DOSIFICADORA AMINA 02	PROMINENT	PU / Reciprocating (RE)
P909	BMB DOSIF. ERITORATO 02	PROMINENT	PU / Reciprocating (RE)
P910	BMB AGUA INDUSTRIAL	KSB	PU / Centrifugal (CE)

Fuente: Elaboración propia basada en inventario físico y norma ISO 14224.

Tabla 4. Clasificación taxonómica de ventiladores y sopladores (ISO 14224 - Clase BL)

Tag	Descripción	Fabricante	Clase/Tipo ISO
D236	VENTILADOR TIRO INDUCIDO 01	CLARAGE	BL / Centrifugal (CE)
D236	VENTILADOR AIRE PRIMARIO 01	BARRON FAN	BL / Centrifugal (CE)
D237	VENTILADOR AIRE SECUNDARIO	BARRON FAN	BL / Centrifugal (CE)
D238	VENTILADOR GAS FDR 01	BARRON FAN	BL / Centrifugal (CE)
D255	SOPLADOR LOOP SEAL 01	HOFFMAN	BL / Blower
D298	SOPLADOR HOGAR SIST. CENIZAS	CLYDE BERG.	BL / Blower

D302	VENTILADOR PRESURIZACION	S&P	BL / Axial (AX)
D303	VENTILADOR PRESURIZACION	S&P	BL / Axial (AX)
D304	VENTILADOR PRESURIZACION	S&P	BL / Axial (AX)
Fuente: Elaboración propia basada en inventario físico y norma ISO 14224.			

Tabla 5. Clasificación de sistemas de limpieza y manejo de materiales

Tag	**Descripción**	**Fabricante**	**Categoría Funcional**
D258-265	SOPLADORES RETRÁCTILES (x8)	CLYDE BERG.	Limpieza de Caldera
D266-295	SOPLADORES ROTATORIOS (x30)	CLYDE BERG.	Limpieza de Caldera
G020	MOLINO DE CARBON 01	-	Reducción de Tamaño
K347/348	ELEVADOR CANGILONES	-	Transporte (CV)
K356	TORNILLO EXTRACTOR CENIZA	-	Transporte (CV)
K433-435	TORNILLO EXT. FLT MANGAS	-	Transporte (CV)
Fuente: Elaboración propia basada en inventario físico.			

8. FASE 2

8.1 ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLA (AMEF)

El Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF) se aplicó como la herramienta técnica central para la transición del modelo de mantenimiento. Esta metodología sistemática permitió descomponer funcionalmente cada uno de los activos rotativos identificados en la fase de diagnóstico, con el objetivo de determinar las causas raíz físicas de las fallas recurrentes y sus consecuencias operativas.

Para garantizar la estandarización en el análisis, se diseñó un formato específico que guía el desarrollo lógico del RCM. A continuación, se presenta un ejemplo de la estructura utilizada para el registro de la información (ver Figura 18).

Figura 18. Ejemplo del formato de Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF)

Nommbre equipo

Descripcion equipo

Sistema	Subsistema	Función	Descripción de la Función	Fallo Funcional	Modo de Falla (ISO 14224)	Codificación ISO 14224	Descripción de la Falla	Efectos de la Falla	Severidad (1-10)	Causas / Potencial de Falla	Ocurrencia (1-10)	Controles Actuales de Detección	Facilidad de Detección (1-10)	Acciones Recomendadas

Fuente: Elaboración propia.

El desarrollo de los AMEF se realizó para la totalidad de los equipos críticos (bombas de alimentación, ventiladores de tiro, sopladores), respondiendo a las siete preguntas fundamentales establecidas por la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)

(Moubray, 1997):

1. **Función:** ¿Cuál es la función principal y los estándares de desempeño del activo en su contexto operacional actual?
2. **Falla Funcional:** ¿De qué manera puede el activo fallar en cumplir con su función?
3. **Modo de Falla:** ¿Qué evento físico causa cada falla funcional? (Ej: Desgaste de rodamientos, desbalanceo del rotor, cavitación, soltura mecánica).
4. **Efecto de la Falla:** ¿Qué evidencia existe cuando ocurre la falla? (Ej: Aumento de vibración, ruido anormal, disparo por protección).
5. **Consecuencia de la Falla:** ¿De qué forma afecta la falla a la seguridad, el medio ambiente o la producción?
6. **Tarea Proactiva:** ¿Qué tarea de mantenimiento predictivo o preventivo es técnicamente factible para prevenir o detectar la falla?
7. **Tarea a Falta de:** Si no existe una tarea proactiva viable, ¿cuál es la estrategia por defecto (rediseño u operar hasta la falla)?

Este análisis permitió identificar que la mayoría de los modos de falla críticos en los equipos rotativos de la caldera (desalineación, desbalance, problemas de lubricación) presentan un patrón de degradación identificable mediante monitoreo de condición antes de la pérdida de función.

Debido a la extensión detallada de este análisis para cada uno de los activos, las tablas completas de los AMEF desarrollados se encuentran consolidadas en el **Anexo C: Análisis de Modos y Efectos de Falla por Equipo**.

8.2 SELECCIÓN DE TÉCNICAS DE MONITOREO Y DIAGNÓSTICO

Una vez jerarquizados los equipos según su criticidad y definidos sus modos de falla, el siguiente paso en la metodología RCM consiste en seleccionar las tareas de mantenimiento proactivo más eficientes. Para los equipos rotativos clasificados con criticidad A y B, la estrategia se fundamenta en la detección de la condición incipiente de la falla (Punto P en la curva P-F) antes de que ocurra la pérdida de función.

Tomando como referencia normativa la **ISO 14224**, específicamente el Anexo B (Tabla B.4), se identifican los métodos de detección estandarizados para la industria del petróleo, petroquímica y gas. Con base en esta guía y en la naturaleza de los modos de falla identificados en los AMEF (desgaste, desbalanceo, fugas, sobrecalentamiento), se ha estructurado la matriz de selección de técnicas presentada en la Tabla 6.

Tabla 6. Matriz de selección de técnicas de monitoreo por modo de falla

Modo de Falla (ISO 14224)	**Análisis de Vibraciones**	**Inspección Visual / Termografía**	**Análisis de Lubricante**
Desbalanceo del rotor	**Primaria**	Secundaria	N/A
Desalineación de ejes	**Primaria**	Secundaria	N/A
Falla en rodamientos	**Primaria**	Secundaria	Primaria
Holgura mecánica	**Primaria**	N/A	N/A
Fugas en sellos	Secundaria	**Primaria**	N/A
Corrosión / Erosión	N/A	**Primaria**	Secundaria
Problemas de lubricación	Secundaria	**Primaria**	Primaria
Sobrecalentamiento	Secundaria	**Primaria**	Secundaria

Fuente: Adaptado de ISO 14224:2016, Anexo B.

Con base en esta matriz y considerando la viabilidad técnica en la planta, se seleccionaron dos técnicas principales que, combinadas, cubren más del 90 % de los modos de falla críticos de los equipos rotativos:

8.2.1 Justificación Técnica del Análisis de Vibraciones Se seleccionó el análisis de vibraciones como la técnica predictiva principal debido a su capacidad única para diagnosticar problemas mecánicos internos sin necesidad de detener el equipo. Esta técnica es capaz de identificar:

- **Desequilibrio de masa y Desalineación:** Mediante el análisis del espectro de velocidad (mm/s) en frecuencias de $1\times$ y $2\times$ las RPM, permitiendo corregir la fuente de fatiga más común en los ejes y estructuras.
- **Defectos en Rodamientos:** Mediante el análisis de la envolvente de aceleración (gE), esta técnica detecta impactos microscópicos en las pistas de rodadura o elementos rodantes mucho antes de que generen calor o ruido audible, proporcionando el mayor intervalo de planificación posible (meses de antelación).
- **Problemas de flujo y cavitación:** En el caso de las bombas centrífugas, la vibración permite detectar turbulencias internas y cavitación que erosionan los impulsores.

8.2.2 Justificación Técnica de la Inspección Visual y Temperatura Aunque el análisis de vibraciones es potente, es "ciego" ante modos de falla estáticos o externos. Por ello, se seleccionó la inspección visual complementada con la medición de temperatura mediante pirómetro infrarrojo como técnica obligatoria. Esta selección se justifica por:

- **Detección de Fugas:** La inspección visual es el único método efectivo para detectar el modo de falla “Fuga externa de medio de proceso” (código ELP en ISO 14224) en sellos mecánicos y bridas, lo cual es crítico para la seguridad de procesos.
- **Verificación Tribológica:** La medición puntual de temperatura en las cajas de rodamientos con pirómetro permite validar la eficiencia de la lubricación. Un aumento de temperatura suele ser el primer indicador de una lubricación deficiente o degradada, incluso antes de que aumente la vibración.
- **Integridad Estructural:** Permite detectar pernos sueltos, corrosión en bases, falta de guardas y condiciones inseguras que los sensores de vibración no registran.

La combinación de estas dos técnicas asegura una cobertura integral tanto de la condición mecánica interna como de la integridad física externa de los activos.

9. FASE 3

9.1 DISEÑO DE HERRAMIENTAS DE RECOLECCIÓN Y GESTIÓN DE DATOS

La eficacia de un plan de mantenimiento basado en confiabilidad depende no solo de la correcta identificación de los modos de falla, sino de la capacidad de la organización para recolectar datos de campo de manera sistemática, estandarizada y auditable. Por consiguiente, esta fase se centró en el diseño de los soportes documentales y lógicos necesarios para la ejecución de las tareas definidas.

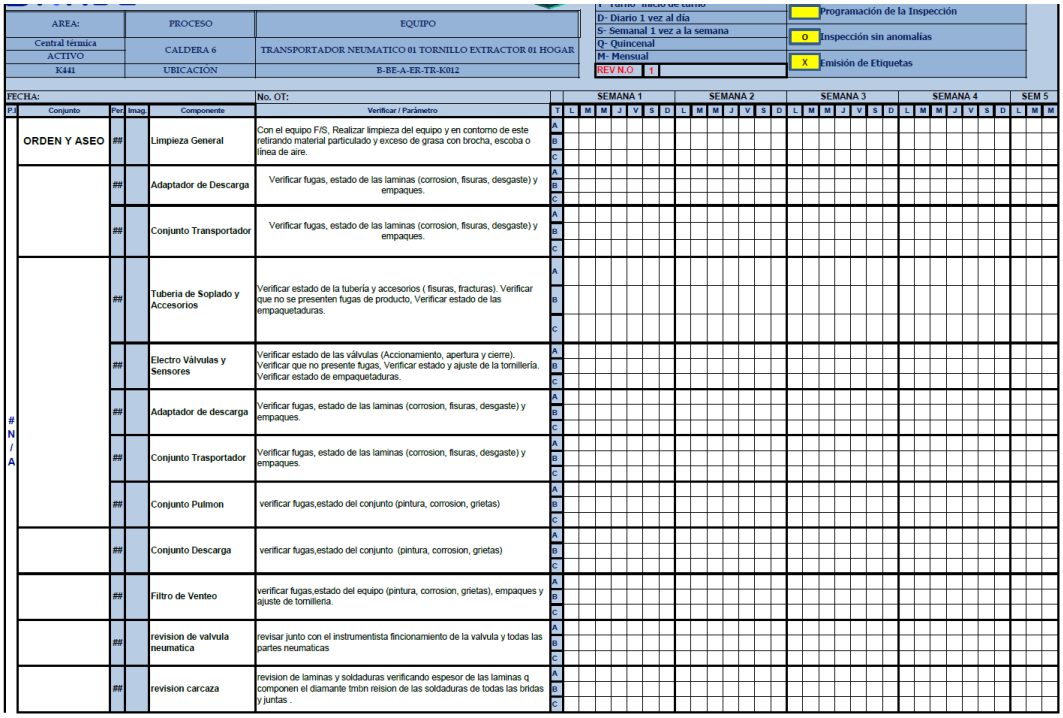
Se determinó la necesidad de desarrollar cuatro tipos de herramientas específicas, justificadas por la naturaleza distinta de las variables a controlar y la necesidad de vincular los hallazgos con el ciclo de planificación del mantenimiento.

9.1.1 Formato de Inspección de Parámetros Operativos Para el control de los modos de falla detectables sensorialmente (fugas, ruidos, solturas) y térmicamente, se diseñó un formato de inspección física (ver Figura 19) para ser ejecutado por los técnicos de mantenimiento mecánico. Este documento no se limita a una lista de chequeo genérica, sino que estructura la intervención garantizando la validación del proceso.

El formato se diseñó incluyendo los siguientes elementos críticos:

- **Taxonomía y Ubicación:** Identificación clara del equipo según la norma ISO 14224.
- **Tareas Específicas:** Instrucciones claras de revisión visual y puntos exactos para la toma de temperatura con pirómetro, asegurando repetibilidad en la medición.
- **Periodicidad:** Frecuencia de ejecución predefinida según el análisis RCM.
- **Registro de Ejecución:** Casillas de verificación para confirmar la realización de la tarea y campos para el registro de valores numéricos (temperatura).
- **Gestión de Hallazgos:** Espacio dedicado para comentarios y descripción de anomalías encontradas.
- **Validación:** Sección para la firma del supervisor de mantenimiento, lo cual formaliza la ejecución y asegura la calidad del dato recolectado.

Figura 19. Diseño del formato de rutina de inspección visual y temperatura



AREA:	PROCESO	EQUIPO
Central térmica	CALDERA 6	TRANSPORTADOR NEUMATICO 01 TORNILLO EXTRACTOR 01 HOGAR
ACTIVO		
K441	UBICACION	B-BE-A-ER-TR-K012

D- Diario 1 vez al día
S- Semanal 1 vez a la semana
Q- Quincenal
M- Mensual
REV N.O 1

Programación de la Inspección
O Inspección sin anomalías
X Emisión de Etiquetas

FECHA: | No. OT:

P.#	Conjunto	Per	Imag.	Componente	Verificar / Parámetro	T	SEMANA 1 L M M J V S D	SEMANA 2 L M M J V S D	SEMANA 3 L M M J V S D	SEMANA 4 L M M J V S D	SEM 5 L M M
# N / A	ORDEN Y ASEO	##		Limpieza General	Con el equipo F/S, Realizar limpieza del equipo y en contorno de este retirando material particulado y exceso de grasa con brocha, escoba o linea de aire.	A B C					
		##		Adaptador de Descarga	Verificar fugas, estado de las laminas (corrosion, fisuras, desgaste) y empaques.	A B C					
		##		Conjunto Transportador	Verificar fugas, estado de las laminas (corrosion, fisuras, desgaste) y empaques.	A B C					
		##		Tuberia de Soplado y Accesorios	Verificar estado de la tubería y accesorios (fisuras, fracturas). Verificar que no se presenten fugas de producto, Verificar estado de las empaquetaduras.	A B C					
		##		Electro Válvulas y Sensores	Verificar estado de las válvulas (Accionamiento, apertura y cierre). Verificar que no presente fugas, Verificar estado y ajuste de la tornillería. Verificar estado de empaquetaduras.	A B C					
		##		Adaptador de descarga	Verificar fugas, estado de las laminas (corrosion, fisuras, desgaste) y empaques.	A B C					
		##		Conjunto Trasportador	Verificar fugas, estado de las laminas (corrosion, fisuras, desgaste) y empaques.	A B C					
		##		Conjunto Pulmon	verificar fugas,estado del conjunto (pintura, corrosion, grietas)	A B C					
		##		Conjunto Descarga	verificar fugas,estado del conjunto (pintura, corrosion, grietas)	A B C					
		##		Filtro de Venteo	verificar fugas,estado del equipo (pintura, corrosion, grietas), empaques y ajuste de tornilleria.	A B C					
		##		revision de valvula neumatica	revisar junto con el instrumentista fincionamiento de la valvula y todas las partes neumaticas	A B C					
		##		revision carcaza	revision de laminas y soldaduras verificando espesor de las laminas q componen el diamante tmbn reision de las soldaduras de todas las bridas y juntas .	A B C					

Fuente: Elaboración propia.

Rutas de Vibración y Trazabilidad de Medición Para los equipos rotativos, la recolección de datos se gestiona digitalmente. Se configuró la ruta de inspección dentro del software propietario del analizador de vibraciones (*Omnitrend Center*), definiendo la secuencia lógica de medición en planta para optimizar los tiempos de desplazamiento.

Adicionalmente, se diseñó un formato de control en hoja de cálculo (Excel) para la trazabilidad administrativa de la ruta (ver Figura 20). Este instrumento permite registrar:

- Estado de la medición (Ejecutado / No Ejecutado / Equipo Parado).
- Fecha de la toma de datos.
- Asociación con el número de Orden de Trabajo (OT) generada en el sistema de gestión, garantizando el vínculo entre la actividad física y el control de costos/horas-hombre.

Figura 20. Trazabilidad ruta vibraciones

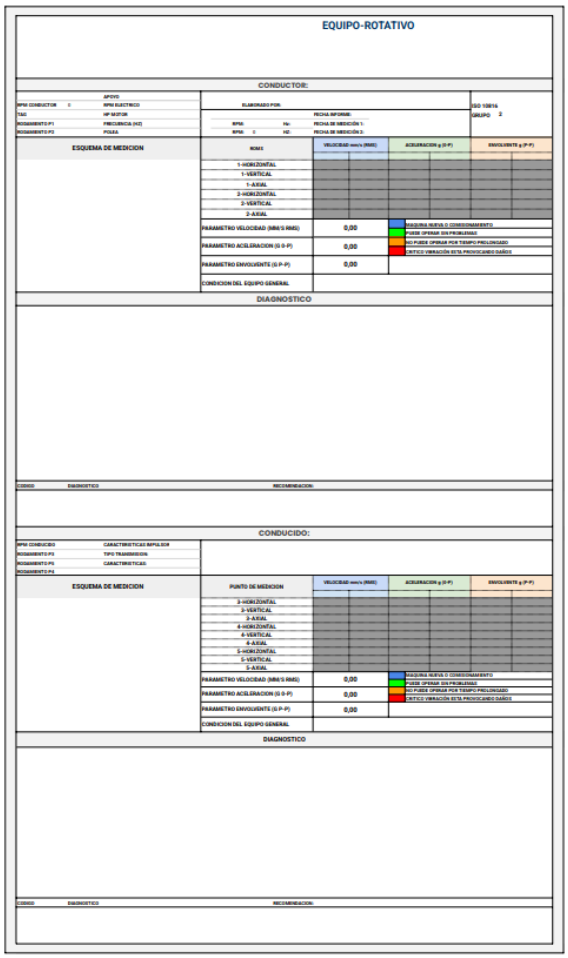
TAG	DESCRIPCION	PUNTOS	OCTUBRE-2024-IEC	junio-2025
	CALDERA 6			
G020	MOLINO DE CARBON 01	MOTOR	NO MEDIDO	ALTO
G020	MOLINO DE CARBON 01	TRITURADORA	NO MEDIDO	ALTO
D236	VENTILADOR AIRE PRIMARIO 01	MOTOR	BUENO	BUENO
D236	VENTILADOR AIRE PRIMARIO 01	VENTILADOR	BUENO	BUENO
D237	VENTILADOR AIRE SECUNDARIO 01	MOTOR	BUENO	BUENO
D237	VENTILADOR AIRE SECUNDARIO 01	VENTILADOR	BUENO	BUENO
D238	VENTILADOR GAS FGR 01	MOTOR	BUENO	BUENO
D238	VENTILADOR GAS FGR 01	VENTILADOR	BUENO	BUENO
D235	VENTILADOR TIRO INDUCIDO 01	MOTOR	BUENO	TOLERABLE
D235	VENTILADOR TIRO INDUCIDO 01	VENTILADOR	BUENO	ALTO
D255	SOPLADOR LOOP SEAL 01	MOTOR	BUENO	BUENO
D255	SOPLADOR LOOP SEAL 01	SOPLADOR	BUENO	BUENO
D296	SOPLADOR HOGAR 01 SISTEMA CENIZAS		NO MEDIDO	NO RUTA
K356	TORNILLO EXTRACTOR 01 CENIZA HOGAR		NO MEDIDO	NO RUTA
K436	TORNILLO EXTRACTOR CENIZA 01 BACK PASS		NO MEDIDO	NO RUTA
K433	TORNILLO EXTRACTOR 01 FILTRO MANGAS 01		NO MEDIDO	NO RUTA
K434	TORNILLO EXTRACTOR 01 FILTRO MANGAS 02		NO MEDIDO	NO RUTA
K435	TORNILLO EXTRACTOR 01 FILTRO MANGAS 03		NO MEDIDO	NO RUTA
P767	BOMBA ALIMENTACION 01	MOTOR	PROX RUTA	BUENO
P767	BOMBA ALIMENTACION 01	BOMBA	ALTO	BUENO
P768	BOMBA ALIMENTACION 02	MOTOR	BUENO	BUENO
P768	BOMBA ALIMENTACION 02	BOMBA	PROX RUTA	BUENO
P871	BOMBA DESAIREADOR 01		NO MEDIDO	NO RUTA
P872	BOMBA DESAIREADOR 02		NO MEDIDO	NO RUTA
P873	BOMBA REFRIGERACION 01 TORNILLO HOGAR		NO MEDIDO	NO RUTA
P874	BOMBA REFRIGERACION 02 TORNILLO HOGAR		NO MEDIDO	NO RUTA
P875	BOMBA EMERGENCIA RED CONTRAINCENDIOS 01		NO MEDIDO	NO RUTA
P876	BOMBA REPOSICION TANQUE CONDENSADOS 01		NO MEDIDO	NO RUTA
P877	BOMBA REPOSICION TANQUE CONDENSADOS 02		NO MEDIDO	NO RUTA
P878	BOMBA 01 PLANTA DIESEL		NO MEDIDO	NO RUTA
P879	BOMBA PATIN ANALITICA REFRIGERACION CHUMASERAS 01		NO MEDIDO	NO RUTA
P880	BOMBA PATIN ANALITICA REFRIGERACION CHUMASERAS 02		NO MEDIDO	NO RUTA
P911	BOMBA AGUA INDUSTRIAL 01 CALDERA 6		NO MEDIDO	NO RUTA
P901	BOMBA TRASIEGO DOSIFICACION QUIMICOS 01		NO MEDIDO	NO RUTA
P902	BOMBA TRASIEGO DOSIFICACION QUIMICOS 02		NO MEDIDO	NO RUTA
P903	BOMBA TRASIEGO DOSIFICACION QUIMICOS 03		NO MEDIDO	NO RUTA
P905	BOMBA DOSIFICADORA POLIMERO PH 02		NO MEDIDO	NO RUTA
P904	BOMBA DOSIFICADORA POLIMERO PH 01		NO MEDIDO	NO RUTA
P906	BOMBA DOSIFICADORA ERITORBATO 01		NO MEDIDO	NO RUTA
P907	BOMBA DOSIFICADORA AMINA 01		NO MEDIDO	NO RUTA
P908	BOMBA DOSIFICADORA AMINA 02		NO MEDIDO	NO RUTA
P909	BOMBA DOSIFICADORA ERITORBATO 02		NO MEDIDO	NO RUTA
P881	BOMBA ACPM 01		NO MEDIDO	NO RUTA
P882	BOMBA ACPM 02		NO MEDIDO	NO RUTA
P883	BOMBA CARGUE ACPM 01		NO MEDIDO	NO RUTA
P884	BOMBA NEUMATICA RECEPCION ACPM 01		NO MEDIDO	NO RUTA
P861	BOMBA RECIRCULACION DE ACHIQUE AGUAS LLUVIAS 01		NO MEDIDO	NO RUTA

Fuente: Elaboración propia (Captura trazabilidad).

9.1.2 Formato de Reporte de Análisis de Vibraciones El dato crudo de vibración carece de valor si no se transforma en información diagnóstica. Por ello, se estandarizó un formato de reporte técnico (ver Figura 21) que debe ser diligenciado por el analista de confiabilidad tras cada ruta. Este documento es fundamental para la toma de decisiones y se estructura con la siguiente información técnica:

- **Identificación del Activo:** Nombre y Tag del equipo.
- **Contexto Técnico:** Especificación de componentes críticos como referencias de rodamientos, tipo de acople, número de álabes/dientes y velocidad de operación (RPM). Estos datos son indispensables para calcular las frecuencias de falla esperadas.
- **Diagnóstico y Recomendación:** Conclusión técnica sobre la condición del equipo y acciones sugeridas.

Figura 21. Formato estandarizado para reporte de análisis de vibraciones



Fuente: Elaboración propia.

9.1.3 Procedimiento de Reporte de Novedades y Trazabilidad Finalmente, para cerrar el ciclo de gestión, se estableció un formato y procedimiento de reporte de novedades (ver Figura 22). El objetivo de esta herramienta es capturar los comentarios generados en las rutinas de inspección visual (ej. “fuga de aceite detectada”) y transformarlos en solicitudes formales de trabajo.

Este formato actúa como el puente entre el hallazgo en campo y el área de Planeación, permitiendo:

- Categorizar la novedad según su prioridad.
- Asignar un número de aviso o solicitud en el sistema.
- Realizar seguimiento al estado de la corrección (Pendiente / Programado / Ejecutado).

Figura 22. Formato de trazabilidad y gestión de novedades de inspección

Ítem de Inspección	Descripción / Equipo	¿Se realizó inspección?	Resultados / Observaciones	Clasificación de Riesgo	Acciones Recomendadas
1	VENTILADOR TIRO INDUCIDO 01	Sí	Operando en condiciones normales. Niveles de vibración y temperatura dentro de los parámetros esperados.	Bajo	Continuar con monitoreo de rutina.
2	VENTILADOR AIRE PRIMARIO 01	Sí	Se detecta un ligero aumento en la vibración del rodamiento lado libre. Amperaje de motor estable.	Medio	Realizar análisis de vibraciones para diagnóstico y programar lubricación.
3	VENTILADOR AIRE SECUNDARIO 01	Sí	Funcionamiento normal, sin novedades.	Bajo	No se requieren acciones correctivas.
4	VENTILADOR GAS FGR 01	Sí	Correcta operación. Guardas de seguridad y anclajes en buen estado.	Bajo	Mantener plan de mantenimiento preventivo.
5	SOPLADOR LOOP SEAL 01	Sí	Se evidencia una leve fuga de aceite en la caja de rodamientos. Nivel de aceite es correcto.	Medio	Limpiar la zona, monitorear la evolución de la fuga y programar cambio de sellos en la próxima parada.
6	SOPLADOR RETRACTIL 01	Sí	Operacion normal en prueba funcional.	Bajo	No se requieren acciones.
7	SOPLADOR RETRACTIL 02	Sí	Operacion normal en prueba funcional.	Bajo	No se requieren acciones.
8	SOPLADOR RETRACTIL 03	No	Equipo enclavado por condición de operación de la caldera. No fue posible realizar la prueba funcional.	N/A	Inspeccionar en la próxima ventana de oportunidad o parada de la unidad.

Fuente: Elaboración propia.

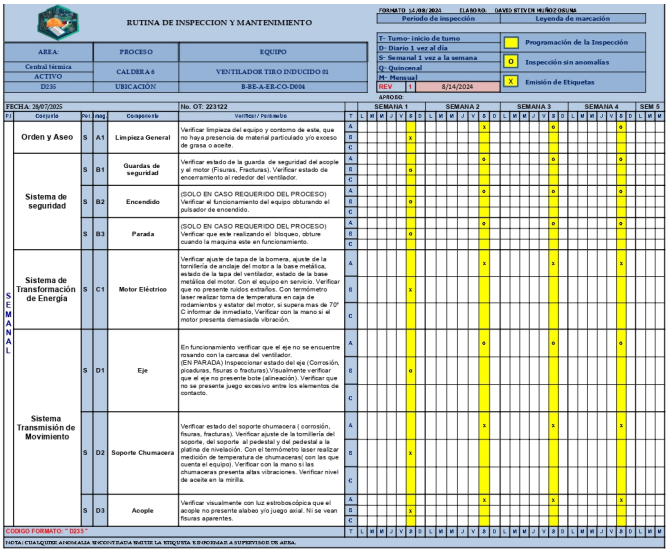
9.2 CONFIGURACIÓN DE RUTAS Y MEDIOS DE RECOLECCIÓN

Tras la validación y aprobación técnica de los diseños por parte de la Dirección de Mantenimiento, se procedió a la materialización de las herramientas de recolección de datos para su despliegue en campo.

9.2.1 Implementación de Rutinas de Inspección Visual Se generaron los formatos físicos de inspección visual para la totalidad de los equipos rotativos de la caldera (ver Figura 23). La decisión estratégica de implementar estos formatos en medio físico responde a la política de seguridad industrial vigente en la planta de Brinsa, la cual restringe el uso de dispositivos electrónicos (tabletas o pantallas) en áreas operativas clasificadas.

Para garantizar la durabilidad y operatividad de estas herramientas en un entorno industrial, se optó por la impresión y plastificado de las fichas técnicas. Esta metodología permite al personal técnico diligenciar las rutinas en campo utilizando marcadores de tinta borrable, facilitando la toma de datos in situ para posteriormente digitalizar y cargar los hallazgos manualmente al sistema ERP (*Enterprise Resource Planning*) en las estaciones de trabajo administrativas.

Figura 23. Formatos de inspección llenos en el sistema



RUTINA DE INSPECCION Y MANTENIMIENTO

AREA:	PROCESO	EQUIPO
Central térmica	CALDERA 6	VENTILADOR TIRO INDUCIDO 01
ACTIVO	UBICACIÓN	
D325		B-BE-A-ER-CO-D004

FORMATO 11/08/2023 ELABORÓ: DAVID STEVEN MUÑOZ OSUNA

Periodo de inspección: T- Turno- inicio de turno; D- Diario 1 vez al día; S- Semanal 1 vez a la semana; Q- Quincenal; M- Mensual

Leyenda de marcación: Programación de la Inspección; O Inspección sin anomalías; X Emisión de Etiquetas

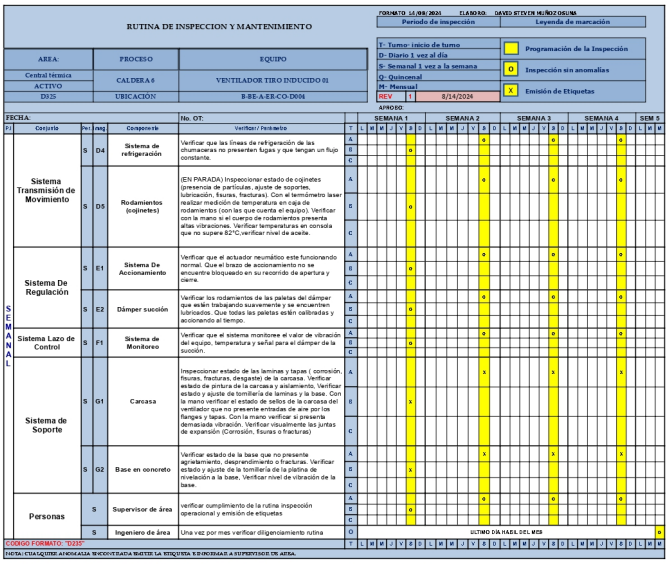
REV 1 8/14/2024 APROBO:

FECHA: 26/07/2023 No. OT: 223122

PJ	Conjunto	Ver	Ing	Componente	Verificar/ Parámetro	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEM 5
SEMANAL	Orden y Aseo	S	A1	Limpieza General	Verificar limpieza del equipo y contorno de este, que no haya presencia de material particulado y/o exceso de grasa o aceite.	X	X	O	O	
	Sistema de seguridad	S	B1	Guardas de seguridad	Verificar estado de la guarda de seguridad del acople y el motor (Fisuras, Fracturas). Verificar estado de encerramiento al rededor del ventilador.	O	X	X	X	
		S	B2	Encendido	(SOLO EN CASO REQUERIDO DEL PROCESO) Verificar el funcionamiento del equipo obturando el pulsador de encendido.	O	X	O	O	
		S	B3	Parada	(SOLO EN CASO REQUERIDO DEL PROCESO) Verificar que este realizando el bloqueo, obture cuando la maquina este en funcionamiento.	O	X	O	O	
	Sistema de Transformación de Energía	S	C1	Motor Eléctrico	Verificar ajuste de tapa de la bornera, ajuste de la tornillería de anclaje del motor a la base metálica, estado de la tapa del ventilador, estado de la base metálica del motor. Con el equipo en servicio. Verificar que no presente ruidos extraños. Con termómetro laser realizar toma de temperatura en caja de rodamientos y estator del motor, si supera mas de 70° C informar de inmediato. Verificar con la mano si el motor presenta demasiada vibración.	X	X	X	X	
	Sistema Transmisión de Movimiento	S	D1	Eje	En funcionamiento verificar que el eje no se encuentre rosando con la carcasa del ventilador. (EN PARADA) Inspeccionar estado del eje (Corrosión, picaduras, fisuras o fracturas).Visualmente verificar que el eje no presente bote (alineación). Verificar que no se presente juego excesivo entre los elementos de contacto.	X	O	X	X	
		S	D2	Soporte Chumacera	Verificar estado del soporte chumacera (corrosión, fisuras, fracturas). Verificar ajuste de la tornillería del soporte, del soporte al pedestal y del pedestal a la platina de nivelación. Con el termómetro laser realizar medición de temperatura de chumaceras(con las que cuenta el equipo). Verificar con la mano si las chumaceras presenta altas vibraciones. Verificar nivel de aceite en la mirilla.	X	X	X	X	
		S	D3	Acople	Verificar visualmente con luz estroboscópica que el acople no presente alabeo y/o juego axial. Ni se vean fisuras aparentes.	X	X	X	X	

CODIGO FORMATO: " D325 "

NOTA: CUALQUIER ANOMALIA ENCONTRADA TRATE LA ETIQUETA Y INFORMAR A SUPERVISOR DE AREA.



RUTINA DE INSPECCION Y MANTENIMIENTO

AREA:	PROCESO	EQUIPO
Central térmica	CALDERA 6	VENTILADOR TIRO INDUCIDO 01
ACTIVO	UBICACIÓN	
D325		B-BE-A-ER-CO-D004

FORMATO 11/08/2023 ELABORÓ: DAVID STEVEN MUÑOZ OSUNA

Periodo de inspección: T- Turno- inicio de turno; D- Diario 1 vez al día; S- Semanal 1 vez a la semana; Q- Quincenal; M- Mensual

Leyenda de marcación: Programación de la Inspección; O Inspección sin anomalías; X Emisión de Etiquetas

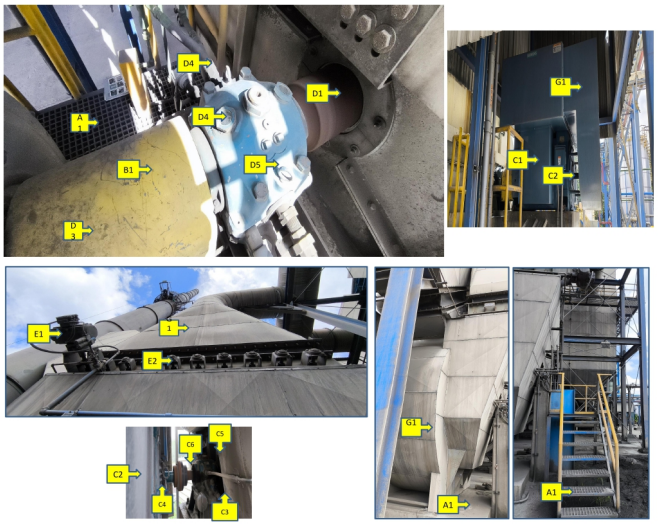
REV 1 8/14/2024 APROBO:

FECHA: No. OT:

PJ	Conjunto	Ver	Ing	Componente	Verificar/ Parámetro	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEM 5
SEMANAL	Sistema Transmisión de Movimiento	S	D4	Sistema de refrigeración	Verificar que las líneas de refrigeración de las chumaceras no presenten fugas y que tengan un flujo constante.	O	X	O	O	
		S	D5	Rodamientos (cojinetes)	(EN PARADA) Inspeccionar estado de cojinetes (presencia de partículas, ajuste de soportes, lubricación, fisuras, fracturas). Con el termómetro laser realizar medición de temperatura en caja de rodamientos (con las que cuenta el equipo). Verificar con la mano si el cuerpo de rodamientos presenta altas vibraciones. Verificar temperaturas en consola que no supere 82°C.verificar nivel de aceite.	O	X	O	O	
	Sistema De Regulación	S	E1	Sistema De Accionamiento	Verificar que el actuador neumático este funcionando normal. Que el brazo de accionamiento no se encuentre bloqueado en su recorrido de apertura y cierre.	O	X	O	O	
		S	E2	Dámper succión	Verificar los rodamientos de las paletas del dámper que estén trabajando suavemente y se encuentren lubricados. Que todas las paletas estén calibradas y accionando al tiempo.	O	X	O	O	
	Sistema Lazo de Control	S	F1	Sistema de Monitoreo	Verificar que el sistema monitoree el valor de vibración del equipo, temperatura y señal para el dámper de la succión.	O	X	O	O	
	Sistema de Soporte	S	G1	Carcasa	Inspeccionar estado de las laminas y tapas (corrosión, fisuras, fracturas, desgaste) de la carcasa. Verificar estado de pintura de la carcasa y aislamiento. Verificar estado y ajuste de tornillería de laminas y la base. Con la mano verificar el estado de sellos de la carcasa del ventilador que no presente entradas de aire por los flanges y tapas. Con la mano verificar si presenta demasiada vibración. Verificar visualmente las juntas de expansión (Corrosión, fisuras o fracturas).	X	X	X	X	
		S	G2	Base en concreto	Verificar estado de la base que no presente agrietamiento, desprendimiento o fracturas. Verificar estado y ajuste de la tornillería de la platina de nivelación a la base. Verificar nivel de vibración de la base.	X	X	X	X	
	Personas	S		Supervisor de área	verificar cumplimiento de la rutina inspección operacional y emisión de etiquetas	O	O	O	O	
		S		Ingeniero de área	Una vez por mes verificar diligenciamiento rutina	O	ULTIMO DIA HABIL DEL MES			O

CODIGO FORMATO: "D325"

NOTA: CUALQUIER ANOMALIA ENCONTRADA TRATE LA ETIQUETA Y INFORMAR A SUPERVISOR DE AREA.

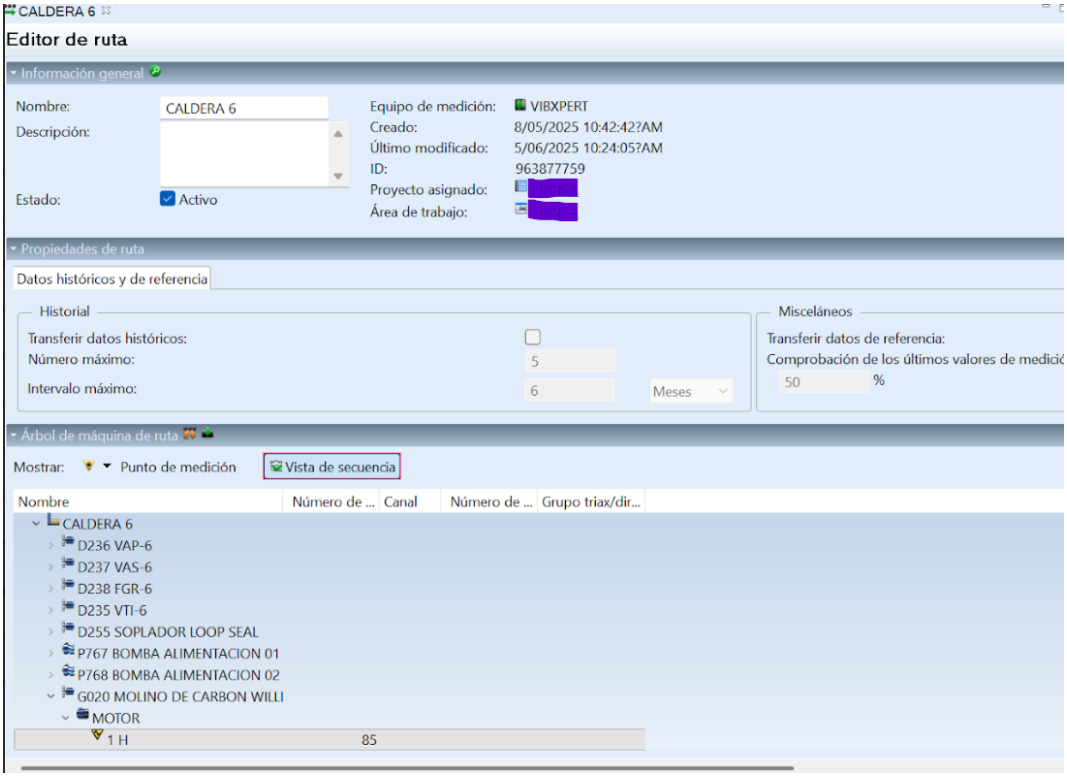


Fuente: Elaboración propia.

9.2.2 Configuración de la Ruta de Vibraciones Paralelamente, se ejecutó la programación de la ruta de monitoreo de condición en la plataforma de software *Omnitrend Center* (ver Figura 24). Esta ruta abarca todos los equipos identificados como críticos en el análisis RCM de la caldera.

La configuración de los puntos de medición, las bandas de frecuencia y los niveles de alarma se realizó cumpliendo estrictamente los criterios de severidad vibratoria establecidos por la norma **ISO 20816**. Una vez parametrizada la base de datos, la ruta fue cargada al equipo analizador de vibraciones (colector de datos) *VibXpert II*, dejando el sistema habilitado para la ejecución de las mediciones en campo.

Figura 24. Visualización de la ruta de vibraciones configurada en software Omnitrend



Fuente: Elaboración propia (Captura de software).

9.3 DEFINICIÓN DE FRECUENCIAS ÓPTIMAS

Una vez seleccionadas las técnicas predictivas, es imperativo establecer la periodicidad con la que se aplicarán. La definición de estas frecuencias no es arbitraria; constituye un balance técnico-económico entre el intervalo P-F (tiempo suficiente para detectar la falla antes de la pérdida de función) y la disponibilidad de recursos de la organización.

En coordinación con las áreas de **Planeación y Confiabilidad**, se determinó armonizar el plan de la caldera con la estrategia de mantenimiento vigente en la planta química. En consecuencia, se establecieron las siguientes periodicidades basándose en los procedimientos internos de la compañía:

- **Rutas de Análisis de Vibraciones (Trimestral):** Se definió una frecuencia de tres (3) meses para la toma de datos espectrales. Esta decisión obedece a la estandarización de las rutas predictivas de toda la planta, lo que facilita la logística del personal especialista y garantiza la captura de cuatro puntos de tendencia anuales.
- **Rutinas de Inspección Visual y Temperatura (Mensual):** Se estableció una frecuencia de un (1) mes para las inspecciones sensoriales. Esta periodicidad se justifica por la sinergia operativa con las rutas de lubricación existentes, optimizando el recurso humano.

Es importante destacar que estas frecuencias se aplican rigurosamente a los equipos con criticidad **A (Alta)** y **B (Media)**. Los activos de criticidad menor (C y D) se gestionarán bajo una estrategia de operación hasta la falla (*run to failure*).

La Tabla 7 consolida el plan de frecuencias asignado.

Tabla 7. Frecuencias de Inspección para Equipos Críticos

Tag	Equipo	Técnica	Crit.	Frecuencia
D235	Ventilador Tiro Inducido	Vib / Visual / Temp	A	Vib: 3 Meses Vis: 1 Mes
D236	Ventilador Aire Primario	Vib / Visual / Temp	A	Vib: 3 Meses Vis: 1 Mes
D237	Ventilador Aire Secundario	Vib / Visual / Temp	A	Vib: 3 Meses Vis: 1 Mes
D238	Ventilador Gas FDR	Vib / Visual / Temp	A	Vib: 3 Meses Vis: 1 Mes
D296	Soplador Hogar Cenizas	Vib / Visual / Temp	A	Vib: 3 Meses Vis: 1 Mes
G020	Molino de Carbón	Vib / Visual / Temp	A	Vib: 3 Meses Vis: 1 Mes
K356	Tornillo Extractor Ceniza	Vib / Visual / Temp	A	Vib: 3 Meses Vis: 1 Mes
P767	Bmb Alimentación 01	Vib / Visual / Temp	A	Vib: 3 Meses Vis: 1 Mes
P768	Bmb Alimentación 02	Vib / Visual / Temp	A	Vib: 3 Meses Vis: 1 Mes
P861	Bmb Recirculación Achique	Vib / Visual / Temp	B	Vib: 3 Meses Vis: 1 Mes

Continúa...

Tabla 7 – continúa de la página anterior

Tag	Equipo	Técnica	Crit.	Frecuencia
P873	Bmb Refrigeración 01	Vib / Visual / Temp	B	Vib: 3 Meses Vis: 1 Mes
P874	Bmb Refrigeración 02	Vib / Visual / Temp	B	Vib: 3 Meses Vis: 1 Mes
P875	Bmb Emergencia RCI	Vib / Visual / Temp	A	Vib: 3 Meses Vis: 1 Mes
P876	Bmb Reposición Condensados	Vib / Visual / Temp	B	Vib: 3 Meses Vis: 1 Mes
P877	Bmb Reposición Condensados	Vib / Visual / Temp	B	Vib: 3 Meses Vis: 1 Mes
P878	Bmb 01 Planta Diesel	Vib / Visual / Temp	A	Vib: 3 Meses Vis: 1 Mes
P879	Bmb Patín Analítica	Vib / Visual / Temp	B	Vib: 3 Meses Vis: 1 Mes
P880	Bmb Patín Analítica	Vib / Visual / Temp	B	Vib: 3 Meses Vis: 1 Mes
P911	Bmb Agua Industrial	Vib / Visual / Temp	B	Vib: 3 Meses Vis: 1 Mes

Fuente: Elaboración propia.

10. FASE 4

10.1 CONSOLIDACIÓN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO

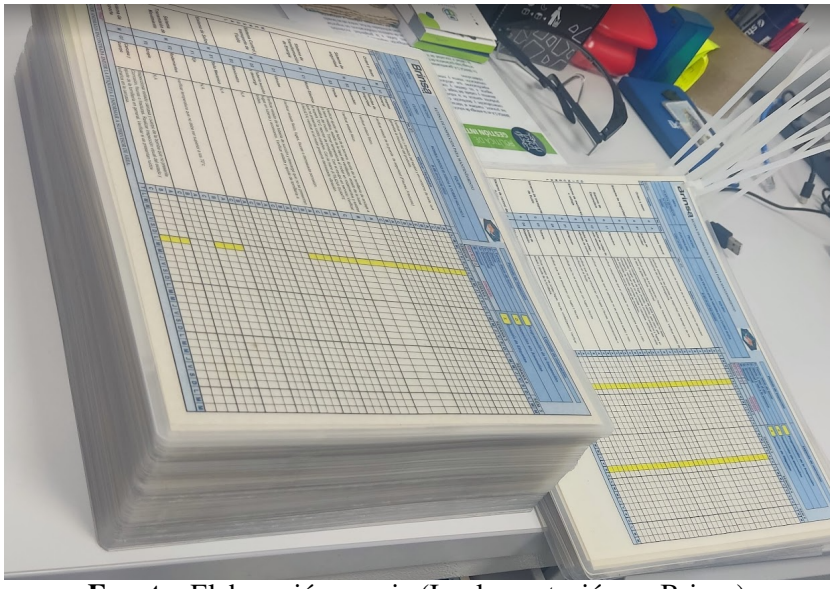
La fase de consolidación representa la integración sinérgica de las estrategias de mantenimiento diseñadas en las etapas anteriores. El objetivo fundamental de esta consolidación es transformar los hallazgos teóricos del RCM (modos de falla y criticidad) en un flujo de trabajo operativo y sostenible que garantice la disponibilidad de la caldera.

La estrategia se fundamenta en la ejecución sistemática de dos procesos paralelos pero complementarios: la inspección sensorial en campo y el monitoreo de condición especializado. Esta dualidad permite cubrir tanto los fallos funcionales evidentes como aquellos ocultos o incipientes, cerrando la brecha histórica que existía entre la operación y el mantenimiento.

El procedimiento se articula a través de un ciclo de vida de la orden de trabajo claramente definido, que coordina las responsabilidades de las áreas de Confiabilidad, Planeación y Mantenimiento. A continuación, se detalla el flujo estandarizado para la gestión de una tarea de inspección:

1. **Entrega y Estandarización de Herramientas:** El área de **Confiabilidad** es responsable de la gestión de los formatos físicos. Se realiza la entrega de las fichas de inspección visual plastificadas (ver Figura 25) al área de **Planeación**, asegurando que el personal cuente con herramientas duraderas y aptas para el entorno agresivo de la planta.

Figura 25. Formatos de inspección visual plastificados para uso en planta



Fuente: Elaboración propia (Implementación en Brinsa).

2. **Programación y Generación de Órdenes: Planeación** integra las frecuencias definidas (mensuales y trimestrales) en el sistema de gestión de mantenimiento (CMMS). Se generan las **Órdenes de Trabajo (OT)** periódicas (ver Figura 26), las cuales son asignadas nominalmente al personal técnico de **Mantenimiento** para su ejecución.

Figura 26. Ejemplo de una Orden de Trabajo generada en el sistema para una rutina de inspección



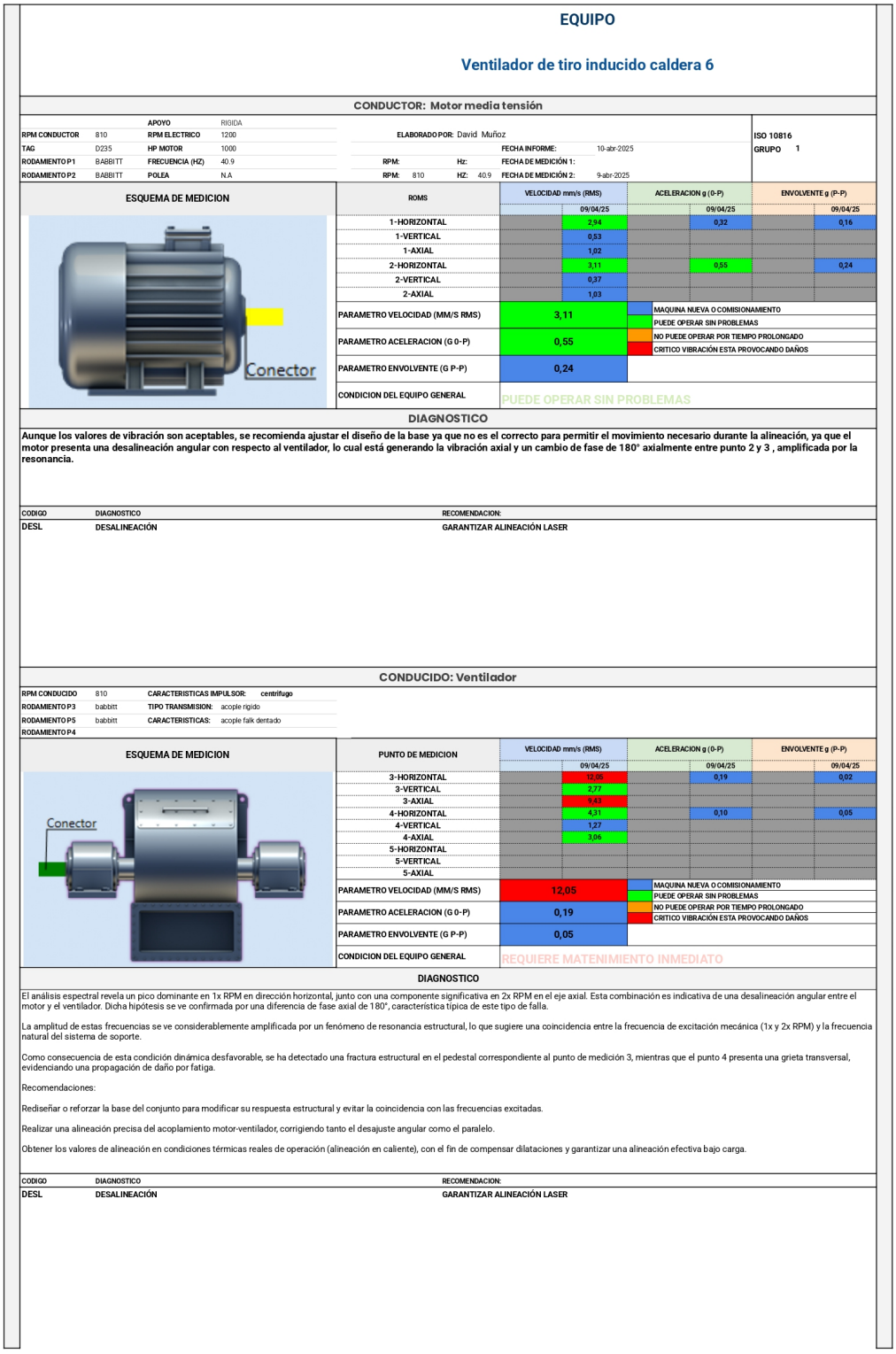
Fuente: Elaboración propia (Captura de sistema CMMS).

3. **Puesta en Marcha de Rutas Predictivas:** Simultáneamente, se activa la ejecución de la **ruta de vibraciones** según la periodicidad trimestral definida. Esta tarea es gestionada y ejecutada directamente por el especialista en predictivo, utilizando el analizador de datos configurado bajo norma ISO.
4. **Ejecución y Retroalimentación:** Tras la inspección en campo, el técnico de **Mantenimiento** ejecuta la OT, reporta las novedades encontradas en el sistema y adjunta

evidencia fotográfica del formato de trazabilidad diligenciado. Esto garantiza la visibilidad del proceso, crea un registro auditable y permite la toma de decisiones basada en evidencia.

5. **Generación de Hallazgos Predictivos:** En caso de que el analista de vibraciones detecte una anomalía espectral o de tendencia, se genera un **informe técnico** (ver Figura 27) dirigido al **Planeador**. Este documento detalla el modo de falla potencial identificado, su severidad y las recomendaciones específicas para la corrección.

Figura 27. Ejemplo de un informe técnico de vibraciones con diagnóstico y recomendación



EQUIPO

Ventilador de tiro inducido caldera 6

CONDUCTOR: Motor media tensión

		APOYO	RIGIDA				
RPM CONDUCTOR	810	RPM ELECTRICO	1200	ELABORADO POR:	David Muñoz		ISO 10816
TAG	D235	HP MOTOR	1000	FECHA INFORME:	10-abr-2025		GRUPO 1
RODAMIENTO P1	BABBITT	FRECUENCIA (HZ)	40.9	RPM:	Hz:	FECHA DE MEDICIÓN 1:	
RODAMIENTO P2	BABBITT	POLEA	N.A	RPM: 810	HZ: 40.9	FECHA DE MEDICIÓN 2:	9-abr-2025

ESQUEMA DE MEDICION

ROMS	VELOCIDAD mm/s (RMS)	ACELERACION g (0-P)	ENVOLVENTE g (P-P)
	09/04/25	09/04/25	09/04/25
1-HORIZONTAL	2,94	0,32	0,16
1-VERTICAL	0,53		
1-AXIAL	1,02		
2-HORIZONTAL	3,11	0,55	0,24
2-VERTICAL	0,37		
2-AXIAL	1,03		

PARAMETRO VELOCIDAD (MM/S RMS)	3,11	MAQUINA NUEVA O COMISIONAMIENTO
		PUEDE OPERAR SIN PROBLEMAS
PARAMETRO ACELERACION (G 0-P)	0,55	NO PUEDE OPERAR POR TIEMPO PROLONGADO
		CRITICO VIBRACIÓN ESTA PROVOCANDO DAÑOS
PARAMETRO ENVOLVENTE (G P-P)	0,24	
CONDICION DEL EQUIPO GENERAL	PUEDE OPERAR SIN PROBLEMAS	

DIAGNOSTICO

Aunque los valores de vibración son aceptables, se recomienda ajustar el diseño de la base ya que no es el correcto para permitir el movimiento necesario durante la alineación, ya que el motor presenta una desalineación angular con respecto al ventilador, lo cual está generando la vibración axial y un cambio de fase de 180° axialmente entre punto 2 y 3 , amplificada por la resonancia.

CODIGO	DIAGNOSTICO	RECOMENDACION:
DESL	DESALINEACIÓN	GARANTIZAR ALINEACIÓN LASER

CONDUCIDO: Ventilador

RPM CONDUCIDO	810	CARACTERISTICAS IMPULSOR:	centrifugo
RODAMIENTO P3	babbitt	TIPO TRANSMISION:	acople rigido
RODAMIENTO P5	babbitt	CARACTERISTICAS:	acople falk dentado
RODAMIENTO P4			

ESQUEMA DE MEDICION

PUNTO DE MEDICION	VELOCIDAD mm/s (RMS)	ACELERACION g (0-P)	ENVOLVENTE g (P-P)
	09/04/25	09/04/25	09/04/25
3-HORIZONTAL	12,05	0,19	0,02
3-VERTICAL	2,77		
3-AXIAL	9,43		
4-HORIZONTAL	4,31	0,10	0,05
4-VERTICAL	1,27		
4-AXIAL	3,06		
5-HORIZONTAL			
5-VERTICAL			
5-AXIAL			

PARAMETRO VELOCIDAD (MM/S RMS)	12,05	MAQUINA NUEVA O COMISIONAMIENTO
		PUEDE OPERAR SIN PROBLEMAS
PARAMETRO ACELERACION (G 0-P)	0,19	NO PUEDE OPERAR POR TIEMPO PROLONGADO
		CRITICO VIBRACIÓN ESTA PROVOCANDO DAÑOS
PARAMETRO ENVOLVENTE (G P-P)	0,05	
CONDICION DEL EQUIPO GENERAL	REQUIERE MATENIMIENTO INMEDIATO	

DIAGNOSTICO

El análisis espectral revela un pico dominante en 1x RPM en dirección horizontal, junto con una componente significativa en 2x RPM en el eje axial. Esta combinación es indicativa de una desalineación angular entre el motor y el ventilador. Dicha hipótesis se ve confirmada por una diferencia de fase axial de 180°, característica típica de este tipo de falla.

La amplitud de estas frecuencias se ve considerablemente amplificada por un fenómeno de resonancia estructural, lo que sugiere una coincidencia entre la frecuencia de excitación mecánica (1x y 2x RPM) y la frecuencia natural del sistema de soporte.

Como consecuencia de esta condición dinámica desfavorable, se ha detectado una fractura estructural en el pedestal correspondiente al punto de medición 3, mientras que el punto 4 presenta una grieta transversal, evidenciando una propagación de daño por fatiga.

Recomendaciones:

Rediseñar o reforzar la base del conjunto para modificar su respuesta estructural y evitar la coincidencia con las frecuencias excitadas.

Realizar una alineación precisa del acoplamiento motor-ventilador, corrigiendo tanto el desajuste angular como el paralelo.

Obtener los valores de alineación en condiciones térmicas reales de operación (alineación en caliente), con el fin de compensar dilataciones y garantizar una alineación efectiva bajo carga.

CODIGO	DIAGNOSTICO	RECOMENDACION:
DESL	DESALINEACIÓN	GARANTIZAR ALINEACIÓN LASER

Fuente: Elaboración propia.

6. **Cierre del Ciclo:** Basado en el informe técnico o el reporte de novedades, **Planeación** crea una nueva OT para la acción correctiva (alineación, balanceo, cambio de rodamientos). Una vez finalizada la reparación, se genera una última OT de verificación para que el analista de vibraciones realice una **medición de control**, asegurando que el problema fue solucionado eficazmente y restaurando así la confiabilidad del equipo.

10.2 CRONOGRAMA DE EJECUCIÓN Y EVALUACIÓN

Para garantizar la efectividad del plan diseñado, se estructuró un cronograma de implementación riguroso que abarca el ciclo operativo del año 2025. Este cronograma se diseñó para cubrir desde la socialización de las nuevas rutinas hasta la evaluación final de los indicadores de desempeño.

El periodo de ejecución se definió iniciando en la **segunda semana de enero de 2025** y finalizando el **1 de diciembre de 2025**. Este rango de tiempo permite capturar datos suficientes para evaluar la tendencia de la disponibilidad y validar la reducción de fallas en los equipos rotativos críticos.

[Image of project implementation gantt chart]

La Tabla 8 detalla los hitos principales y las ventanas de ejecución de las actividades predictivas y de inspección.

Tabla 8. Cronograma de Implementación del Plan de Mantenimiento (2025)

Periodo	Actividad Principal	Responsable
Enero (Semana 2-4)	Socialización de formatos, capacitación técnica y carga de planes en CMMS.	Confiabilidad / Planeación
Febrero	Ejecución de 1ra Ruta de Inspección Visual y Línea Base de Vibraciones.	Mantenimiento / Predictivo
Marzo - Abril	Seguimiento mensual de rutinas visuales y corrección de hallazgos tempranos.	Mantenimiento
Mayo	Ejecución de 2da Ruta Trimestral de Vibraciones y análisis de tendencias.	Predictivo
Junio - Julio	Auditoría de cumplimiento de formatos y verificación de trazabilidad.	Confiabilidad
Agosto	Ejecución de 3ra Ruta Trimestral de Vibraciones.	Predictivo

Continúa en la siguiente página...

Tabla 8 (Continuación)

Periodo	Actividad Principal	Responsable
Septiembre - Octubre	Ejecución continua de rutinas mensuales y gestión de repuestos críticos según hallazgos.	Mantenimiento / Planeación
Noviembre	Ejecución de 4ta Ruta Trimestral de Vibraciones (Cierre de ciclo predictivo).	Predictivo
1 Diciembre	Cierre de evaluación, cálculo de KPIs finales (Disponibilidad 2025) y comparación con línea base 2023-2024.	Ingeniería de Planta
Fuente: Elaboración propia basada en la planificación del proyecto.		

11. FASE 5

11.1 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La implementación de la estrategia de mantenimiento diseñada, fundamentada en la metodología RCM y soportada por rutas de inspección predictiva (vibraciones y termografía), ha catalizado una transformación significativa en la gestión del activo. A continuación, se presenta el análisis cuantitativo y cualitativo del desempeño operativo de la caldera de lecho fluidizado, contrastando la línea base histórica con los indicadores obtenidos tras la ejecución del plan.

11.1.1 Impacto en la Disponibilidad Operacional (2024 vs. 2025) El indicador rector para evaluar la efectividad del proyecto es la Disponibilidad Operacional (A_o). El análisis retrospectivo del periodo 2024 reveló un escenario crítico, donde la caldera operó con una disponibilidad promedio del **82 %**. Este desempeño deficiente era sintomático de un modelo de gestión puramente reactivo, caracterizado por paradas no programadas de alta duración debido a fallas catastróficas en los ventiladores de tiro y pérdidas de función intempestivas en el sistema de bombeo. Estas interrupciones generaban no solo lucro cesante, sino costos elevados por mantenimientos correctivos de emergencia.

En contraste, tras el despliegue de las rutas de inspección y la gestión basada en condición iniciada en enero de 2025, se ha logrado un incremento sustancial en la confiabilidad del sistema. Al corte de evaluación actual, la disponibilidad acumulada de la caldera se ha consolidado en un **96 %**.

Este aumento neto de 14 puntos porcentuales valida la hipótesis técnica del proyecto: la gestión efectiva del **Intervalo P-F**. Durante la ejecución del plan 2025, el análisis espectral de vibraciones permitió detectar patologías mecánicas (como desalineaciones en el VTI y defectos de lubricación en bombas) en sus estadios incipientes. Esta detección temprana facultó al área de Planeación para transformar lo que hubiesen sido “paradas de emergencia” en “intervenciones programadas”, ejecutadas durante ventanas operativas controladas, minimizando así el Tiempo Medio Para Reparar (MTTR) y maximizando el tiempo operativo.

11.1.2 Validación de la Ejecución Técnica en Campo El éxito en los indicadores macroscópicos (Disponibilidad) es una consecuencia directa de la disciplina técnica a nivel de piso de planta. La implementación de los formatos físicos de inspección representó un cambio cultural, migrando de la “observación subjetiva” a la “inspección parametrizada”.

La evidencia recolectada demuestra que la estandarización de las rutinas ha cerrado las brechas de información que existían anteriormente. El personal técnico ahora dispone de criterios claros de aceptación y rechazo, lo que ha permitido identificar anomalías sutiles —como variaciones térmicas en rodamientos o cambios en el patrón de ruido— que anteriormente eran ignoradas hasta la falla funcional.

A continuación, se documenta la validación de la ejecución en campo, la cual constituye el soporte fáctico de los resultados obtenidos:

1. **Rigor en la Inspección Sensorial:** El personal de mantenimiento ha adoptado las nuevas rutinas como parte integral de su operación diaria. La Figura 28 evidencia la aplicación de las técnicas de inspección visual y toma de parámetros (temperatura/vibración) directamente en el activo, garantizando la veracidad del dato desde la fuente.

Figura 28. Ejecución técnica de la rutina de inspección visual y sensorial en los equipos rotativos de la caldera



Fuente: Elaboración propia (Evidencia de validación en planta).

11.2 CONCLUSIONES

La ejecución del proyecto permite emitir las siguientes conclusiones, las cuales validan el cumplimiento de los objetivos planteados y demuestran el impacto técnico de la ingeniería de mantenimiento aplicada:

1. **Diagnóstico y Estandarización:** Se concluye que la gestión de mantenimiento previa al 2025 operaba bajo un esquema reactivo debido a la dispersión de la información técnica. La centralización de la documentación en el sistema *Vault*, sumada a la categorización taxonómica de los activos bajo la norma **ISO 14224**, permitió identificar con precisión que el Ventilador de Tiro Inducido (VTI) y las Bombas de Alimentación eran los "actores críticos" recurrentes, focalizando los recursos de ingeniería donde mayor impacto tenían sobre la disponibilidad.
2. **Efectividad del RCM y Técnicas Predictivas:** La aplicación de la metodología RCM validó que los modos de falla predominantes en la caldera (desalineación, desbalanceo y problemas de lubricación) son detectables. Se concluye que la selección del **análisis de vibraciones** como técnica primaria fue acertada, ya que permitió detectar condiciones incipientes de falla en los soportes de los ventiladores D235 y D236 durante las pruebas piloto, condiciones que eran imperceptibles sensorialmente pero visibles en el espectro FFT.
3. **Funcionalidad de las Herramientas de Gestión:** El diseño e implementación de los formatos de inspección física y las rutas digitales en *Omnitrend* solucionaron la problemática de la falta de trazabilidad. Se demostró que el uso de listas de chequeo estandarizadas eliminó la subjetividad en las inspecciones, garantizando que la información fluya de manera estructurada desde el personal técnico en campo hacia el área de Planeación para la generación oportuna de Órdenes de Trabajo.
4. **Impacto en la Disponibilidad:** El proyecto superó las expectativas de mejora operativa. Al comparar la línea base del año 2024, donde la disponibilidad fue del 82 %, con los resultados obtenidos tras la implementación en 2025, se alcanzó una disponibilidad del **96 %**. Este incremento neto valida que la intervención proactiva, basada en el monitoreo de condición, elimina eficazmente las paradas no programadas, optimizando los costos asociados al lucro cesante y extendiendo la vida útil de los activos críticos.

12. RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos, donde se evidenció un aumento de la disponibilidad al 96 % y la validación operativa de las rutinas de inspección, se formulan las siguientes recomendaciones para garantizar la sostenibilidad del plan y su evolución técnica.

12.1 RECOMENDACIONES PARA LA CONSOLIDACIÓN INMEDIATA

Estas acciones son críticas para mantener los indicadores alcanzados y cerrar las brechas detectadas durante la fase de implementación piloto:

- **Digitalización y Migración al ERP:** Aunque los formatos físicos plastificados demostraron ser efectivos en campo, se recomienda iniciar un proyecto de movilidad industrial que permita a los técnicos ingresar los datos directamente en el sistema CMMS (SAP/Maximo) mediante tabletas intrínsecamente seguras (Ex). Esto eliminará el tiempo administrativo de digitación y reducirá el error humano en la transcripción de datos.
- **Adquisición de Activos de Diagnóstico:** Se recomienda la adquisición propia de un analizador de vibraciones con capacidad de análisis de envolvente y licencias de software *Omnitrend*, así como termómetros infrarrojos para cada técnico de turno. Depender de equipos alquilados o de terceros pone en riesgo la continuidad de la ruta trimestral establecida.
- **Certificación de Competencias:** Para sostener la calidad del diagnóstico evidenciado en los informes de la Fase 5, es imperativo certificar al personal de confiabilidad bajo la norma **ISO 18436-2** (Categoría II en Análisis de Vibraciones). Un plan robusto depende de la competencia de quien interpreta los espectros.
- **Corrección Definitiva de Hallazgos Residuales:** Si bien la disponibilidad aumentó, el análisis de vibraciones detectó condiciones de desalineación residual en el Ventilador de Tiro Inducido (VTI). Se recomienda programar una alineación láser de precisión en la próxima parada mayor para eliminar este modo de falla de raíz y proteger los rodamientos a largo plazo.

12.2 RECOMENDACIONES PARA LA GESTIÓN DEL CICLO DE VIDA

Para asegurar que el plan evolucione y no se vuelva obsoleto, se sugieren las siguientes estrategias de gestión:

- **Auditoría de KPIs y Ajuste de Frecuencias:** Se recomienda realizar una revisión semestral de los indicadores MTBF y MTTR. Si la tendencia de confiabilidad se mantiene

positiva y estable (superior al 95 %) durante un año, se sugiere evaluar la extensión de los intervalos de inspección (ej. pasar vibraciones de 3 a 4 meses), optimizando así los costos de mantenimiento sin sacrificar la seguridad.

- **Gestión de Repuestos Basada en Condición:** Alinear el stock de almacén con los modos de falla críticos identificados en el AMEF. Se recomienda mantener en stock de seguridad un juego completo de rodamientos y elementos de transmisión para los equipos críticos (D235, D236, P767), reduciendo el MTTR ante una eventualidad catastrófica.
- **Retroalimentación del AMEF:** El AMEF no debe ser un documento estático. Se recomienda actualizarlo anualmente incorporando las "fallas nuevas" o no previstas que aparezcan en las bitácoras, asegurando que el plan de mantenimiento siempre responda a la realidad operativa de la caldera.

12.3 RECOMENDACIONES HACIA LA INDUSTRIA 4.0

El éxito en la estructuración de datos de este proyecto habilita a la empresa para dar el siguiente paso tecnológico:

- **Monitoreo Continuo (IoT):** Para los ventiladores de tiro (activos de criticidad A con acceso difícil), se recomienda evaluar la instalación de sensores de vibración inalámbricos permanentes. Esto permitirá pasar de una "foto" trimestral a una "película" continua del estado de la máquina, alertando en tiempo real cualquier desviación.
- **Analítica Predictiva (Big Data):** Utilizar la base de datos histórica estructurada que se ha comenzado a construir con este proyecto para, en el mediano plazo, entrenar algoritmos de Machine Learning. Esto permitirá predecir el Tiempo Remanente de Vida Útil (RUL) con mayor exactitud, facilitando la transición hacia un Mantenimiento Prescriptivo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguirre Tovar, A., Pérez, B., & Rincón, C. (2024). Análisis de Vibraciones en Equipos Críticos Mediante la Implementación de un Plan de Mantenimiento Predictivo. *Revista de Ingeniería Mecánica*, *15*(3), 55-68.

Ávila Martínez, M. F. (2012). *Diseño de un Plan de Mantenimiento Preventivo y Correctivo Programado en Equipos de la Industria Cervecera* [Tesis de maestría]. Universidad Tecnológica de Puebla.

Baque-Ballesteros, B. E., González-Cabeza, B. A., Guaitoso-Córdova, G., González-Quiñonez, L. A., & Salgado-Ortiz, P. J. (2023). Plan de mantenimiento para una caldera de generación a vapor en la refinería de aceites vegetales Oleana S.A. *Ibero-American Journal of Technology, Engineering & Studies*, *3*(1), 375-384.

Boulangger, M., Flores, R., & Guzmán, L. (2024). Diseño e implementación de una estrategia RCM en activos críticos del sector de hidrocarburos. *Revista de Ingeniería Industrial*, *12*(1), 15-28.

Camargo Sánchez, A., & Caro Garzón, L. (2015). *Manual de mantenimiento preventivo, predictivo y de operación para una caldera pirotubular de 10 BHP para la empresa Calderas y Automáticos* [Tesis de maestría, Universidad Distrital Francisco José de Caldas].

Canales Aguilar, M. J. (2019). Manual de mantenimiento predictivo/correctivo y fichas técnicas, área calderas, Ingenio Santa Matilde.

Chang Arreaga, Ó. H. (2020). *Diseño de plan de mantenimiento predictivo a generador de potencia empleando la técnica en vibraciones mecánicas y descargas parciales, en planta hidroeléctrica Jurún Marinalá INDE, Guatemala* [Tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala].

Chaparro Pedraza, A. F. (2023). *Sistema de Gestión de Mantenimiento (SGM) basado en RCM para equipos de bombeo en la Industria Química* [Tesis de maestría]. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Díaz, F., Sánchez, E., & Ruiz, J. (2023). Diseño y aplicación de un prototipo de Digital Twin para el mantenimiento prescriptivo de maquinaria industrial. *Revista de Ingeniería Aplicada*, *8*(2), 45-59.

Esquivel, H., & Torres, E. (2020). *Implementación de la gestión de lubricación y análisis de aceite en bombas centrífugas para aumentar la disponibilidad* [Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional].

Fonseca, D., Castro, P., & Ortiz, L. (2015). Programa de mantenimiento predictivo y TPM para la mejora de la eficiencia energética en plantas termoeléctricas. *Energía y Desarrollo*, *5*(1), 101-115.

Gómez Rodas, G. E. (2015). *Desarrollo de un programa de mantenimiento predictivo y preventivo para la maquinaria industrial de la empresa Marlin Towers S. A.*

ISO. (2016). *ISO 14224:2016 - Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment* (inf. téc.). International Organization for Standardization. Geneva, CH.

Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). The role of Fast Fourier Transform (FFT) in vibration analysis for condition monitoring. *International Journal of Condition Monitoring*, *1*(1), 1-15.

Li, C., Jia, H., Wang, C., Duan, W., & Gao, R. (2025). A novel hierarchical framework based on improved CNN-BiLSTM for predictive maintenance of rolling bearings. *Journal of Manufacturing Systems*, *77*, 257-269.

Martínez Páez, J. C. (2024). *Plan de Inspección y Mantenimiento Basado en Confiabilidad (RCM) para Equipos Rotativos en una Caldera Acuotubular* [Tesis de maestría]. Universidad Nacional de Colombia.

Ministerio de Trabajo de Colombia. (2019). Resolución 5018 de 2019 - Por la cual se adoptan normas técnicas de seguridad para calderas y recipientes a presión [Disponible en: https://www.mintrabajo.gov.co].

Miranda Rojas, Y. A. (2020). *Implementación de Rutinas de Mantenimiento Preventivo y Rutas de Inspección en una Planta Industrial Utilizando CMMS* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería].

Montenegro Díaz, L. A., & Quiñones Vásquez, A. R. (2025). *Diseño de Plan de Mantenimiento en el Sistema de Vapor de una Central Termoeléctrica para Aumentar la Disponibilidad* [Tesis de maestría]. Universidad Politécnica Salesiana.

Moubray, J. (1997). *Reliability-centered Maintenance*. Industrial Press Inc.

NTi Audio. (s.f.). *Transformación Rápida de Fourier (FFT)* [Consultado en línea]. Consultado el 1 de junio de 2025, desde https://www.nti-audio.com/es/servicio/conocimientos/transformacion-rapida-de-fourier-fft

O'Hanlon, T. (2025). *Understanding the D-I-P-F Curve in Asset Management* [Publicado en LinkedIn]. Consultado el 9 de julio de 2024, desde https://www.linkedin.com/pulse/understanding-d-i-p-f-curve-asset-management-terrence-ohanlon-pufxc/

Pasquali Luis, L. D. (2024). *Desarrollo de Programas de Mantenimiento Preventivo Enfocados en la Estandarización de Tareas y Trazabilidad en Equipos Industriales* [Tesis de maestría, Universidad de Belgrano].

Porras A, A. (2015). *Estrategia de Mantenimiento Predictivo Basado en el Análisis de Vibraciones en Equipos Rotativos Críticos de una Refinería* [Tesis de maestría]. Universidad Politécnica de Cartagena.

Power-MI. (s.f.). *Taxonomy of assets hierarchy* [Consultado en línea]. Consultado el 1 de junio de 2025, desde https://power-mi.com/content/taxonomy-assets-hierarchy

SAE International. (1999). *Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes*. SAE International.

Salguero, J. R., & Gómez, M. T. (2022). *Propuesta de un plan de mantenimiento RCM para aumentar la confiabilidad en la línea de producción de una empresa química* [Tesis de maestría, Universidad Tecnológica de Panamá].

Sanabria Hernández, J. (2017). Plan de mantenimiento de calderas pirotubulares en Refinería Tenerife.

Socha Rueda, E. R. (2020). *Gestión del Mantenimiento Predictivo para Equipos Rotativos Críticos Mediante Análisis de Vibraciones y Termografía* [Tesis de maestría, Universidad EAFIT].

Valencia, C., Quintero, R., & Zapata, A. (2024). Análisis de criticidad de activos rotativos basado en ISO 14224 para la planificación de mantenimiento. *Ingeniería y Competitividad*, *26*(1), 101-115.

Wu, J., Lin, T., Xu, M., Gu, P., & Wu, D. (2023). A hybrid self-attention and CNN-based framework for predictive maintenance of rotating machinery. *Applied Soft Computing*, *144*, 110543.

A. TABLA DE FALLAS MECÁNICAS REGISTRADAS (2023-2025)

A continuación, se presenta el historial de fallas y paros no programados registrados para la Caldera 6 durante el período de enero de 2023 a mayo de 2025. El tiempo de intervención se expresa en minutos.

Tabla 9. Historial de Fallas Registradas en Caldera 6

Fecha Falla	Máquina / Comp.	T. Interv. (min)	Especialidad	Tipo	Descripción de la Falla
09/02/2023	Caldera 6	30	Eléctrica	Falla	Falla módulo 4C
01/06/2023	Caldera 6	1110	Mecánica	Fuga	Fuga tubos pared occidental back pass
09/06/2023	Caldera 6	10	Eléctrica	Falla	Falla módulo C2 de potencia del variador aire secundario
18/06/2023	Caldera 6	20	Eléctrica	Falla	Falla salida operación protección bajo voltaje
26/07/2023	Caldera 6	1400	Mecánica	Fuga	Falla fuga tubería del hogar
16/08/2023	Caldera 6	12.5	Eléctrica	Falla	Falla se sale el VTI
30/08/2023	Caldera 6	35	Eléctrica	Falla	Falla VTI
31/08/2023	Caldera 6	35	Mecánica	Fuga	Reparación fuga bolsillo
28/11/2023	Caldera 6	1450	Mecánica	Falla	Falla caldera 6 back pass
09/12/2023	Caldera 6	14	Eléctrica	Falla	Falla variador de medida
12/01/2024	Caldera 6	150	Eléctrica	Falla	Falla Damper FV05812 y FV05811 por alta temp. de cables
13/01/2024	Caldera 6	120	Mecánica	Paro	Caldera 6 acoplada con central térmica 11.25 h
29/02/2024	Bombas KSB	780	Eléctrica	Falla	Fallo en bombas KSB alimentación
01/03/2024	VTI 6	60	Mecánica	Paro	Disparo por vibraciones VTI 6
09/03/2024	Caldera 6	12	Mecánica	Paro	Equipo operando fuera de parámetros, clinker en hogar y refractario caído
14/03/2024	Caldera 6	20	Mecánica	Paro	Fuera de servicio por alta presión loopseal, refractario caído
11/06/2024	VTI 6	50	Mecánica	Paro	Disparo caldera 6 por altas vibraciones VTI
12/06/2024	Caldera 6	240	Eléctrica	Falla	Falla resistencia de carga

Continúa en la siguiente página...

Tabla 9 (Continuación)

Fecha Falla	Máquina / Comp.	T. Interv. (min)	Especialidad	Tipo	Descripción de la Falla
13/06/2024	Caldera 6	30	Eléctrica	Paro	Disparo Caldera Transferencias de 440 VAC
02/07/2024	D235 VTI	840	Mecánica	Paro Prog.	Paro programado por alineación
25/07/2024	Caldera 6	60	Eléctrica	Paro	Disparo V/V VAP por diferencial
30/07/2024	Caldera 6	16	Mecánica	Paro	Disparo caldera 6, Falla reportada en VAP
30/07/2024	Caldera 6	12	Eléctrica	Paro	Disparo V/V VAP
18/08/2024	Bomba alim.	270	Eléctrica	Paro	Disparo bomba sur alimentación de agua
12/09/2024	Caldera 6	11220	Mecánica	Falla	Pérdida de refractario en hogar con exposición en curvas
20/09/2024	Caldera 6	750	Mecánica	Paro	Caldera acoplada
21/11/2024	Caldera 6	8580	Mecánica	Falla	Falla en pared occidental nivel 6 metros hogar caldera 6
24/01/2025	Economizador	4800	Mecánica	Falla	Falla economizador
13/04/2025	Caldera 6	5760	Mecánica	Paro	Paro caldera ajustes VTI
06/05/2025	Caldera 6	90	Eléctrica	Falla	Falla VTI

B. ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLA (AMEF) POR EQUIPO

Para facilitar la interpretación visual de los resultados obtenidos en el análisis de criticidad, se ha implementado un sistema de codificación por colores tipo semáforo. Este sistema permite jerarquizar las intervenciones de mantenimiento de la siguiente manera: el color Verde representa activos de criticidad baja, cuyo impacto en la operación es mínimo; el Amarillo señala una criticidad media, requiriendo un monitoreo preventivo más riguroso; y finalmente, el Rojo identifica los activos de criticidad alta, los cuales demandan acciones correctivas o predictivas inmediatas para garantizar la integridad del proceso y la seguridad de la planta.

A continuación se presentan las tablas de Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF) para cada uno de los equipos rotativos críticos del sistema de la caldera.

Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) - SAE JA 1011

PROCESO: MANTENIMIENTO	**EQUIPO:** VENTILADOR DE TIRO INDUCIDO
SUBPROCESO: MANTENIMIENTO PREDICTIVO	**TAG:** D235

Tabla 10. AMEF para Ventilador de Tiro Inducido (D235)

COMP.	FUNCIÓN (SAE JA 1011)	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LA FALLA	S	O	D	NPR	CRIT.	ACCIONES RECOMENDADAS	FREQ.
Rodamientos	Soportar el eje del rotor permitiendo el giro con vibración < 4.5 mm/s y temp. < 75°C.	1. No soportar el eje del rotor.	Desgaste acelerado	Daño catastrófico, roce de álabes contra carcasa, paro de caldera.	10	3	2	60	Med.	Rutina de lubricación por ultrasonido y control de contaminantes.	Mensual
		2. Operar con vibración superior a 4.5 mm/s.	Desalineación / Desajuste	Paro de caldera por protección. Fatiga en soportes y pernos.	10	2	2	40	Baja	Análisis espectral de vibraciones y reapriete de pernos de anclaje.	Mensual
		3. Operar con temperatura superior a 75°C.	Defecto de lubricación	Degradación prematura del lubricante y falla de pistas.	8	4	5	160	Alta	Inspección termográfica y análisis físico-químico de grasa.	Mensual
Rotor y Álabes	Succionar gases de combustión manteniendo una presión negativa de -10 mmH2O $\pm$ 5.	1. No succionar los gases de combustión.	Fractura de álabes	Pérdida total de tiro, posible explosión por acumulación de gases.	10	2	5	100	Med.	Ensayos no destructivos (Tintas penetrantes) en raíz de álabes.	Anual
		2. Succionar gases por debajo del estándar de presión.	Obstrucción por ceniza	Reducción de la capacidad de carga de la caldera y eficiencia.	8	3	5	120	Alta	Limpieza neumática y revisión de ductos de succión.	Semestral
		3. Generar vibraciones por pérdida de masa.	Erosión / Corrosión	Desbalanceo dinámico que afecta la vida útil de los apoyos.	10	2	2	40	Baja	Balanceo dinámico en frío y medición de espesores por ultrasonido.	Anual

Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) - SAE JA 1011

PROCESO: MANTENIMIENTO	**EQUIPO:** VENTILADOR AIRE PRIMARIO
SUBPROCESO: MANTENIMIENTO PREDICTIVO	**TAG:** D236

Tabla 11. AMEF para Ventilador Aire Primario (D236)

COMP.	FUNCIÓN (SAE JA 1011)	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LA FALLA	S	O	D	NPR	CRIT.	ACCIONES RECOMENDADAS	FREQ.
Rodamientos	Soportar el eje del rotor permitiendo la rotación con niveles de vibración < 3.5 mm/s y temp. < 70°C.	1. No soportar el eje del rotor.	Desgaste acelerado	Falla catastrófica, daño en eje y sellos, paro de caldera.	10	3	2	60	Med.	Monitoreo por ultrasonido y engrase según condición.	Mensual
		2. Operar con vibración superior a 3.5 mm/s.	Desalineación entre motor y ventilador	Desgaste prematuro de elementos de transmisión y paro por protección.	10	2	2	40	Baja	Alineación láser y análisis de vibraciones.	Mensual
		3. Operar con temperatura superior a 70°C.	Contaminación del lubricante	Pérdida de viscosidad, fricción excesiva y posible incendio local.	8	4	5	160	Alta	Monitoreo termográfico y cambio de sellos obturadores.	Mensual
Rotor y Álabes	Suministrar un flujo de aire de combustión de 25,000 m³/h para mantener la fluidización del lecho.	1. No suministrar flujo de aire al lecho.	Rotura de álabes	Pérdida de fluidización, colapso del lecho fluidizado y paro de emergencia.	10	2	5	100	Med.	Inspección por líquidos penetrantes e inspección estructural.	Anual
		2. Suministrar un flujo de aire inferior a 25,000 m³/h.	Obstrucción en la admisión	Combustión incompleta, aumento de emisiones y pérdida de potencia térmica.	8	3	5	120	Alta	Limpieza de filtros/mallas de succión e inspección visual.	Mensual
		3. Operar con desbalanceo dinámico por encima de G 6.3.	Acumulación de partículas / Erosión	Daños por fatiga en la voluta y soportes del ventilador.	10	2	2	40	Baja	Balanceo dinámico y limpieza técnica de álabes.	Semestral

Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) - SAE JA 1011

PROCESO: MANTENIMIENTO	**EQUIPO:** VENTILADOR AIRE SECUNDARIO
SUBPROCESO: MANTENIMIENTO PREDICTIVO	**TAG:** D237

Tabla 12. AMEF para Ventilador Aire Secundario (D237)

COMP.	FUNCIÓN (SAE JA 1011)	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LA FALLA	S	O	D	NPR	CRIT.	ACCIONES RECOMENDADAS	FREQ.
Rodamientos	Soportar el eje del rotor para permitir el giro libre con vibración < 4.0 mm/s y temp. < 75°C.	1. No soportar el eje del rotor.	Desgaste acelerado	Daño severo en eje y sellos de laberinto, parada de planta.	10	3	2	60	Med.	Lubricación por ultrasonido y control de limpieza de grasa.	Mensual
		2. Operar con vibración superior a 4.0 mm/s.	Desalineación térmica	Daño progresivo en soportes y aumento de esfuerzos en el acople.	10	2	2	40	Baja	Verificación de alineación láser y espectrografía de vibración.	Mensual
		3. Operar con temperatura superior a 75°C.	Sobrecarga de lubricante / Fricción	Carbonización del lubricante y gripado del rodamiento.	8	4	5	160	Alta	Inspección termográfica y monitoreo de condición de sellos.	Mensual
Rotor y Álabes	Inyectar aire secundario a la cámara de combustión con un caudal de 12,000 m³/h para reducción de emisiones.	1. No inyectar flujo de aire secundario.	Fractura por fatiga de álabes	Ineficiencia térmica extrema, aumento de CO y exceso de inquemados en ceniza.	10	2	5	100	Med.	Inspección por partículas magnéticas o líquidos penetrantes.	Anual
		2. Inyectar un caudal inferior a 12,000 m³/h.	Obstrucción de ventanilla de succión	Pérdida de control de temperatura de hogar y aumento de emisiones NO_x.	8	3	5	120	Alta	Limpieza mecánica de rejillas y ductos de entrada de aire.	Trimestral
		3. Generar vibración excesiva por desbalanceo.	Acumulación de polvo / Incrustaciones	Fatiga en la voluta y vibración transmitida a la estructura.	10	2	2	40	Baja	Balanceo dinámico y limpieza de álabes durante paradas.	Semestral

Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) - SAE JA 1011

PROCESO: MANTENIMIENTO	**EQUIPO:** VENTILADOR GAS FGR
SUBPROCESO: MANTENIMIENTO PREDICTIVO	**TAG:** D238

Tabla 13. AMEF para Ventilador Gas FGR (D238) - Recirculación de Gases

COMP.	FUNCIÓN (SAE JA 1011)	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LA FALLA	S	O	D	NPR	CRIT.	ACCIONES RECOMENDADAS	FREQ.
Rodamientos	Soportar el eje del rotor permitiendo la rotación con niveles de vibración < 4.5 mm/s y temp. $<$ 85°C.	1. No soportar el eje del rotor.	Fatiga de material por calor	Daño catastrófico por expansión térmica, roce de componentes.	10	3	2	60	Med.	Análisis de lubricante y control de refrigeración de soportes.	Mensual
		2. Operar con vibración superior a 4.5 mm/s.	Desalineación por gradiente térmico	Desgaste acelerado en sellos mecánicos y pérdida de estanqueidad.	10	2	2	40	Baja	Monitoreo de vibraciones con sensores de alta temperatura.	Mensual
		3. Operar con temperatura superior a 85°C.	Falla del sistema de enfriamiento	Gripado inminente del rodamiento y deformación del eje.	9	4	5	180	Alta	Inspección termográfica y revisión de flujo de agua/aire de enfriamiento.	Quincenal
Rotor y Álabes	Recircular gases de combustión al hogar con un flujo de 8,500 m³/h para el control de la temp. de llama.	1. No recircular gases de combustión.	Corrosión ácida / Fractura	Pérdida de control térmico en el hogar, posible daño en refractarios.	10	2	5	100	Med.	Inspección visual interna y medición de espesores por ultrasonido.	Semestral
		2. Recircular un flujo de gases inferior a 8,500 m³/h.	Acumulación de hollín en álabes	Aumento de emisiones NO_x y desbalance térmico en la caldera.	8	3	5	120	Alta	Limpieza neumática y revisión de dampers de control.	Trimestral
		3. Operar con desbalanceo por incrustaciones.	Deposición de partículas sólidas	Vibración transmitida que reduce la vida útil de los rodamientos.	10	3	2	60	Med.	Balanceo dinámico y limpieza de álabes por soplado.	Semestral

Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) - SAE JA 1011

PROCESO: MANTENIMIENTO	**EQUIPO:** SOPLADOR LOOP SEAL
SUBPROCESO: MANTENIMIENTO PREDICTIVO	**TAG:** D255

Tabla 14. AMEF para Soplador Loop Seal (D255)

COMP.	FUNCIÓN (SAE JA 1011)	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LA FALLA	S	O	D	NPR	CRIT.	ACCIONES RECOMENDADAS	FREQ.
Rodamientos y Engranajes	Mantener la sincronización y soporte de los lóbulos con vibración < 2.8 mm/s y temp. $< 65°C$.	1. No mantener la sincronización de los lóbulos.	Desgaste en engranajes de tiempo	Contacto entre lóbulos, daño catastrófico y paro inmediato.	10	2	4	80	Med.	Análisis de aceite (partículas metálicas) y monitoreo de ruido.	Trimestral
		2. Operar con vibración superior a 2.8 mm/s.	Desalineación interna / Holgura	Falla prematura de sellos y pérdida de presión de aire.	9	3	2	54	Med.	Análisis espectral y control de nivel de lubricante.	Mensual
		3. Operar con temperatura superior a 65°C.	Falta de lubricación en caja	Degradación de rodamientos y posible gripado de ejes.	8	4	5	160	Alta	Inspección termográfica de la caja de engranajes.	Quincenal
Rotores y Lóbulos	Suministrar aire de fluidización al sello de retorno con una presión de descarga de 50 a 80 kPa.	1. No suministrar aire de fluidización.	Ruptura de eje conductor	Bloqueo del retorno de sólidos (Loop Seal), pérdida de carga y paro de caldera.	10	2	5	100	Med.	Inspección por líquidos penetrantes en ejes y puntos de fatiga.	Anual
		2. Suministrar aire a una presión inferior a 50 kPa.	Desgaste de sellos / Fugas	Sifonamiento del hogar hacia el ciclón, combustión en el retorno.	10	3	4	120	Alta	Verificación de filtros de entrada y medición de presión diferencial.	Mensual
		3. Operar con desbalanceo o fricción interna.	Ingreso de partículas sólidas	Aumento de consumo eléctrico y daño en la carcasa interna.	9	3	3	81	Med.	Limpieza de filtros de aire y control de vibración.	Mensual

Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) - SAE JA 1011

PROCESO: MANTENIMIENTO	**EQUIPO:** SOPLADOR RETRÁCTIL
SUBPROCESO: MANTENIMIENTO PREDICTIVO	**TAG:** D258

Tabla 15. AMEF para Soplador Retráctil (D258)

COMP.	FUNCIÓN (SAE JA 1011)	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LA FALLA	S	O	D	NPR	CRIT.	ACCIONES RECOMENDADAS	FREQ.
Motor y Reductor	Proporcionar torque para rotación y traslación de la lanza a una velocidad constante de 1.5 - 2.0 m/min.	1. No proporcionar movimiento a la lanza.	Cortocircuito / Falla de aislamiento	Lanza atascada dentro de la caldera, deformación por calor, paro de caldera.	10	3	2	60	Med.	Pruebas de aislamiento (Megger) y termografía en bornes.	Mensual
		2. Operar con velocidad de traslación irregular (< 1.5 m/min).	Desgaste de engranajes internos	Limpieza excesiva en un punto (erosión de tubos) o sobrecalentamiento de la lanza.	9	2	3	54	Med.	Análisis de aceite de la caja reductora y monitoreo de corriente.	Mensual
		3. Operar con vibración excesiva en el soporte.	Desalineación del eje motriz	Daño en sellos de la caja y pérdida de lubricante.	7	4	5	140	Alta	Análisis de vibraciones y revisión de acoples mecánicos.	Bimestral
Lanza y Toberas	Inyectar vapor de limpieza sobre los tubos con una presión de 15 a 25 bar durante el recorrido.	1. No inyectar vapor a través de las toberas.	Obstrucción por depósitos / Falla de válvula	Formación de costras de ceniza, reducción de transferencia de calor.	8	3	5	120	Alta	Inspección de presión en línea y revisión de la válvula de admisión de vapor.	Mensual
		2. Inyectar vapor con presión inferior a 15 bar.	Fugas en juntas de expansión / Pipping	Limpieza ineficiente del haz de tubos y desperdicio de energía.	8	3	4	96	Med.	Inspección visual con cámara térmica para detección de fugas.	Mensual
		3. No retraer la lanza después del ciclo de limpieza.	Falla mecánica en cremallera	Destrucción de la lanza por exposición térmica prolongada (> 500°C).	10	2	5	100	Med.	Limpieza y lubricación de cremalleras y rieles de guiado.	Quincenal

Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) - SAE JA 1011

PROCESO: MANTENIMIENTO	**EQUIPO:** SOPLADOR ROTATORIO
SUBPROCESO: MANTENIMIENTO PREDICTIVO	**TAG:** D266

Tabla 16. AMEF para Soplador Rotatorio (D266)

COMP.	FUNCIÓN (SAE JA 1011)	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LA FALLA	S	O	D	NPR	CRIT.	ACCIONES RECOMENDADAS	FREQ.
Motor y Cabezal	Rotar la lanza de soplado en un arco de 360° (o predefinido) a una velocidad de 1 a 2 RPM.	1. No rotar la lanza de soplado.	Desgaste de engranajes / Falla de leva	Soplado continuo en una sola dirección, erosión severa de tubos de la caldera y rotura.	10	2	4	80	Med.	Inspección del mecanismo de leva y monitoreo de corriente del motor.	Mensual
		2. Rotar fuera del arco de limpieza establecido.	Desajuste del interruptor de límite	Limpieza ineficiente de las superficies de transferencia y aumento de temp. de gases.	8	3	2	48	Baja	Verificación y ajuste de los finales de carrera (limit switches).	Trimestral
		3. Operar con temperatura excesiva en el reductor.	Degradación del lubricante	Gripado de la transmisión y falla total del sistema de soplado.	8	4	5	160	Alta	Análisis físico-químico del aceite y termografía de la carcasa.	Mensual
Lanza y Toberas	Distribuir vapor de limpieza a una presión de 10 a 18 bar uniformemente sobre el haz de tubos.	1. No distribuir vapor de limpieza.	Obstrucción de toberas por ceniza	Acumulación de depósitos, pérdida de eficiencia térmica y obstrucción del paso de gases.	8	3	5	120	Alta	Monitoreo de presión de vapor en línea y soplado manual de prueba.	Quincenal
		2. Distribuir vapor con presión inferior a 10 bar.	Desgaste interno por erosión	Limpieza parcial, formación de çaminos de cenizaz corrosión bajo depósito.	7	4	3	84	Med.	Inspección boroscópica interna en paradas programadas.	Anual
		3. Presentar fugas de vapor en el cabezal.	Falla del empaque (packing)	Riesgo de quemaduras, pérdida de vapor y daño a componentes externos.	9	3	4	108	Alta	Inspección visual de sellos y ajuste/reemplazo de empaquetaduras.	Mensual

Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) - SAE JA 1011

PROCESO: MANTENIMIENTO	**EQUIPO:** SOPLADOR HOGAR
SUBPROCESO: MANTENIMIENTO PREDICTIVO	**TAG:** D298

Tabla 17. AMEF para Soplador Hogar (D298)

COMP.	FUNCIÓN (SAE JA 1011)	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LA FALLA	S	O	D	NPR	CRIT.	ACCIONES RECOMENDADAS	FREQ.
Motor y Reductor	Extender y rotar la boquilla en un arco de 360° con un torque suficiente para romper depósitos de escoria.	1. No extender ni rotar la boquilla.	Fallo en el mecanismo de leva / Piñón roto	Acumulación de escoria en paredes de agua, reducción de transferencia de calor radiante.	9	3	2	54	Med.	Inspección de niveles de aceite y termografía del motor.	Mensual
		2. Operar con vibración superior a los límites del fabricante.	Desgaste de rodamientos del motor	Daño estructural en el soporte del soplador y posibles fugas de vapor.	8	2	2	32	Baja	Análisis de vibraciones periódico y ajuste de pernos.	Mensual
		3. Operar con temperatura en la carcasa del reductor > 70°C.	Pérdida de propiedades del lubricante	Gripado de la transmisión, dejando el soplador inoperativo en zona de alta temp.	8	4	5	160	Alta	Análisis de aceite de reductora e inspección termográfica.	Mensual
Boquilla y Válvula	Suministrar chorros de vapor a una presión de 20 a 30 bar para desprender incrustaciones sólidas.	1. No suministrar vapor de soplado.	Obstrucción de la boquilla por escoria sólida	Aumento de la temperatura de salida de gases (FEGT) y riesgo de daño en sobrecalentadores.	10	2	5	100	Med.	Verificación de la presión de vapor en cabezal y limpieza de boquillas.	Mensual
		2. Suministrar vapor con presión inferior a 20 bar.	Desgaste interno de la válvula de asiento	Limpieza parcial, dejando parches de escoria que desbalancean el flujo térmico.	8	3	4	96	Med.	Prueba de caída de presión y mantenimiento a la válvula de asiento.	Trimestral
		3. Presentar fugas de vapor por el sello del eje.	Degradación del empaque de alta temperatura	Erosión de la pared exterior de la caldera y desperdicio de vapor.	9	3	5	135	Alta	Inspección visual con detectores acústicos o cámara térmica.	Quincenal

Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) - SAE JA 1011

PROCESO: MANTENIMIENTO	**EQUIPO:** VENTILADOR PRESURIZACIÓN
SUBPROCESO: MANTENIMIENTO PREDICTIVO	**TAG:** D302

Tabla 18. AMEF para Ventilador de Presurización (D302)

COMP.	FUNCIÓN (SAE JA 1011)	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LA FALLA	S	O	D	NPR	CRIT.	ACCIONES RECOMENDADAS	FREQ.
Rodamientos	Soportar el eje del rodete permitiendo el giro libre con vibración < 2.5 mm/s y temp. < 60°C.	1. No soportar el eje del rodete.	Desgaste por falta de lubricación	Roce de álabes contra carcasa, daño total del equipo y pérdida de sellado.	9	3	2	54	Med.	Lubricación por ultrasonido y control de contaminantes.	Mensual
		2. Operar con vibración superior a 2.5 mm/s.	Desalineación con el motor	Fatiga de materiales y ruido excesivo, riesgo de falla inminente.	8	2	2	32	Baja	Análisis de vibraciones y alineación láser.	Mensual
		3. Operar con temperatura superior a 60°C.	Sobrecarga mecánica / Fricción	Degradación del lubricante y posible gripado de rodamientos.	8	4	5	160	Alta	Monitoreo termográfico y revisión de carga radial.	Mensual
Motor Eléctrico	Convertir energía eléctrica en mecánica para girar a 1750 RPM constantes.	1. No proporcionar movimiento de rotación.	Falla de aislamiento / Cortocircuito	Parada total del ventilador, salida de gases hacia zonas no deseadas.	10	2	5	100	Med.	Pruebas eléctricas (Megger) y termografía en caja de bornes.	Semestral
		2. Girar por debajo de 1750 RPM.	Deslizamiento excesivo / Falla eléctrica parcial	Caída de presión en los sellos, permitiendo el ingreso de ceniza a rodamientos de otros equipos.	9	3	4	108	Alta	Monitoreo de corriente y verificación de frecuencia con tacómetro.	Trimestral
		3. Operar con temperatura de bobinado > 80°C.	Obstrucción de rejilla de enfriamiento	Disparo por protección térmica o daño irreversible del motor.	8	3	5	120	Alta	Limpieza física de aletas y monitoreo de temperatura ambiental.	Mensual

Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) - SAE JA 1011

PROCESO: MANTENIMIENTO	**EQUIPO:** BOMBA ALIMENTACIÓN	
SUBPROCESO: MANTENIMIENTO PREDICTIVO	**TAG:** P767	**CRITICIDAD: ALTA**

Tabla 19. AMEF para Bomba de Alimentación (P767)

COMP.	FUNCIÓN (SAE JA 1011)	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LA FALLA	S	O	D	NPR	CRIT.	ACCIONES RECOMENDADAS	FREQ.
Rodamientos	Soportar el eje y mantener la alineación hidráulica con vibración < 2.5 mm/s y temp. < 70°C.	1. No soportar el eje de la bomba.	Fatiga de pistas / Cavitación severa	Desalineación interna, roce de impulsores, daño catastrófico y paro de caldera.	10	2	3	60	Med.	Análisis espectral de vibraciones (envolvente de aceleración).	Mensual
		2. Operar con vibración superior a 2.5 mm/s.	Desalineación bomba-motor	Desgaste acelerado de rodamientos y acople, posible rotura de eje.	9	3	2	54	Med.	Alineación láser y verificación de patas elásticas (soft foot).	Trimestral
		3. Operar con temperatura superior a 70°C.	Deficiencia en el enfriamiento de aceite	Degradación de lubricante, gripado de rodamientos y parada no programada.	10	3	4	120	Alta	Inspección termográfica y análisis físico-químico del aceite.	Mensual
Sellos Mecánicos	Asegurar la estanqueidad del fluido con una fuga controlada inferior a 5 gotas/min.	1. Permitir fuga de agua masiva.	Desgaste de caras de carbón / Ruptura de fuelle	Pérdida de agua tratada, riesgo de quemaduras, daño a rodamientos contiguos.	9	3	2	54	Med.	Inspección visual diaria y monitoreo de presión del sistema de flushing (Plan API).	Diario
		2. Operar con temperatura excesiva en las caras.	Falta de lubricación (Dry running) / Falla de flushing	Carbonización de las caras del sello, falla prematura y fuga súbita.	10	2	4	80	Med.	Verificación del flujo de agua de sello y limpieza de filtros en línea.	Semanal
		3. Permitir ingreso de aire al sistema (en succión).	Daño en junta estática / Empaque	Inestabilidad hidráulica, cavitación en la primera etapa e ineficiencia.	8	3	5	120	Alta	Monitoreo de presión de succión y ultrasonido acústico para detección de aire.	Mensual

Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) - SAE JA 1011

PROCESO: MANTENIMIENTO	**EQUIPO:** BOMBA RECIRCULACIÓN	
SUBPROCESO: MANTENIMIENTO PREDICTIVO	**TAG:** P861	**ESTADO: OPERATIVO**

Tabla 20. AMEF para Bomba de Recirculación (P861)

COMP.	FUNCIÓN (SAE JA 1011)	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LA FALLA	S	O	D	NPR	CRIT.	ACCIONES RECOMENDADAS	FREQ.
Rodamientos	Soportar el eje y absorber cargas axiales con vibración < 3.0 mm/s y temp. < 75°C.	1. No soportar el eje de la bomba.	Fatiga por expansión térmica diferencial	Roce entre impulsor y voluta, contaminación del agua con partículas metálicas, paro.	10	2	3	60	Med.	Análisis de vibraciones con énfasis en frecuencias de paso de álabes.	Mensual
		2. Operar con vibración superior a 3.0 mm/s.	Desequilibrio hidráulico / Cavitación	Daño progresivo en el acople motor-bomba y fatiga en tuberías de succión.	9	3	2	54	Med.	Monitoreo de presión diferencial y espectrografía de vibración.	Mensual
		3. Operar con temperatura superior a 75°C.	Obstrucción de chaqueta de enfriamiento	Oxidación prematura del lubricante y gripado de elementos rodantes.	9	4	5	180	Alta	Termografía infrarroja y control de flujo de agua de enfriamiento.	Mensual
Sellos Mecánicos	Mantener el sellado hermético del agua de caldera a alta presión ($P > 100$ bar).	1. No mantener la estanqueidad del fluido.	Choque térmico en caras del sello	Fuga masiva de agua caliente, pérdida de presión en caldera, riesgo de explosión local.	10	2	4	80	Med.	Inspección de la estabilidad de la temperatura de succión.	Diario
		2. Operar con goteo superior a 10 gotas/min.	Desgaste abrasivo por magnetita	Corrosión de la base del soporte y pérdida de agua desmineralizada costosa.	8	3	3	72	Med.	Inspección visual y purga de filtros del sistema de sellado.	Diario
		3. Presentar alta temperatura en la caja de sello (> 60°C).	Falla en el intercambiador de calor del sello	Vaporización del agua en las caras del sello y falla catastrófica inmediata.	10	3	5	150	Alta	Monitoreo de temperatura de entrada/salida del intercambiador del sello.	Semanal

Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) - SAE JA 1011

PROCESO: MANTENIMIENTO	**EQUIPO:** BOMBA DESAIREADOR	
SUBPROCESO: MANTENIMIENTO PREDICTIVO	**TAG:** P571	**SISTEMA: AGUA/VAPOR**

Tabla 21. AMEF para Bomba Desaireador (P571)

COMP.	FUNCIÓN (SAE JA 1011)	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LA FALLA	S	O	D	NPR	CRIT.	ACCIONES RECOMENDADAS	FREQ.
Rodamientos	Soportar el eje rotativo manteniendo la concentricidad con vibración < 2.8 mm/s y temp. < 65°C.	1. No soportar el eje de la bomba.	Fatiga de material por carga cíclica	Roce de impulsor contra la carcasa, daño catastrófico y pérdida de suministro al desaireador.	9	2	3	54	Med.	Análisis de vibraciones y ultrasonido para detección de fallas en pista.	Mensual
		2. Operar con vibración superior a 2.8 mm/s.	Cavitación por bajo NPSH disponible	Erosión del impulsor, inestabilidad hidráulica y reducción de la vida útil de sellos.	10	3	2	60	Med.	Monitoreo acústico de cavitación y revisión de niveles de succión.	Mensual
		3. Operar con temperatura superior a 65°C.	Contaminación del lubricante con agua	Pérdida de viscosidad, gripado de rodamientos y paro de planta.	9	3	5	135	Alta	Termografía de soportes y análisis físico-químico de aceite.	Mensual
Sellos Mecánicos	Mantener la estanqueidad del agua desaireada a una temperatura de operación de 100°C-120°C.	1. No evitar fugas de fluido hacia el exterior.	Fractura térmica de las caras del sello	Fuga de agua caliente a presión, riesgo de quemaduras y desbalance hídrico en el ciclo.	9	3	2	54	Med.	Inspección visual de la zona de drenajes del sello.	Diario
		2. Operar con fuga superior a 5 ml/min.	Desgaste abrasivo por presencia de oxígeno/sólidos	Pérdida de agua tratada y daño progresivo en el eje.	8	4	2	64	Med.	Control de la calidad química del agua y limpieza de filtros de succión.	Quincenal
		3. Presentar sobrecalentamiento en la cámara de sellado.	Obstrucción del Plan de soplado (Flushing)	Falla súbita del elastómero y fuga masiva de fluido.	10	2	5	100	Med.	Verificación de la línea de recirculación y limpieza de orificios de restricción.	Semanal

Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) - SAE JA 1011

PROCESO: MANTENIMIENTO	**EQUIPO:** BOMBA REFRIGERACIÓN	
SUBPROCESO: MANTENIMIENTO PREDICTIVO	**TAG:** P873	**SISTEMA: ENFRIAMIENTO**

Tabla 22. AMEF para Bomba de Refrigeración (P873)

COMP.	FUNCIÓN (SAE JA 1011)	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LA FALLA	S	O	D	NPR	CRIT.	ACCIONES RECOMENDADAS	FREQ.
Rodamientos	Soportar el eje rotativo y asegurar la transferencia de potencia con vibración < 3.5 mm/s.	1. No soportar el eje de la bomba.	Desgaste por ingreso de humedad (agua de torre)	Daño en soporte, roce de impulsor y pérdida de flujo de enfriamiento a la planta.	9	3	3	81	Med.	Análisis espectral de vibraciones y reemplazo de retenes de grasa.	Mensual
		2. Operar con vibración superior a 3.5 mm/s.	Desalineación mecánica por base corroída	Falla prematura de acoplamientos y pernos de anclaje.	8	3	2	48	Baja	Verificación de nivelación de base y limpieza de corrosión en apoyos.	Semestral
		3. Operar con temperatura superior a 65°C.	Falta de lubricación / Exceso de grasa	Carbonización de la grasa, gripado de bolas y parada no programada.	8	4	5	160	Alta	Control de lubricación mediante ultrasonido acústico.	Mensual
Sellos Mecánicos	Evitar la pérdida de agua de enfriamiento manteniendo la presión de red (> 4 bar).	1. No evitar fugas de fluido.	Erosión por partículas sólidas (arena/lodo)	Inundación de fosa, pérdida de presión en el anillo de enfriamiento y riesgo eléctrico.	8	3	2	48	Baja	Instalación de separadores de ciclón en la línea de sellado (Plan 31).	Anual
		2. Operar con fuga visible (> 10 gotas/min).	Incrustaciones de carbonatos en las caras	Deterioro del eje de la bomba y aumento de costos de tratamiento químico.	7	4	2	56	Med.	Inspección visual y monitoreo de la dureza del agua.	Diario
		3. Presentar sobrecalentamiento en sellos.	Obstrucción de línea de recirculación por algas/biofilm	Falla del elastómero y fuga masiva con pérdida de presión de red.	9	2	5	90	Med.	Limpieza de filtros de succión y aplicación de biocidas.	Mensual

Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) - SAE JA 1011

PROCESO: MANTENIMIENTO	**EQUIPO:** TORNILLO ALIMENTADOR	
SUBPROCESO: MANTENIMIENTO PREDICTIVO	**TAG:** SC-110	**SISTEMA: COMBUSTIBLE**

Tabla 23. AMEF para Tornillo Alimentador (SC-110)

COMP.	FUNCIÓN (SAE JA 1011)	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LA FALLA	S	O	D	NPR	CRIT.	ACCIONES RECOMENDADAS	FREQ.
Motorreductor	Suministrar el torque necesario para desplazar el combustible a una tasa de 5-10 ton/h.	1. No suministrar movimiento al tornillo.	Rotura de chaveta / Falla de engranajes	Cese de alimentación de combustible, caída de presión de vapor y posible paro de caldera.	10	2	3	60	Med.	Inspección visual de acoples y análisis de vibraciones en el reductor.	Mensual
		2. Operar con torque insuficiente.	Deslizamiento de correas / Desgaste eléctrico	Reducción de la carga de la caldera e inestabilidad en la combustión.	8	3	4	96	Med.	Monitoreo de amperaje del motor y ajuste de tensión de transmisión.	Quincenal
		3. Operar con alta temperatura (> 80°C).	Falta de lubricante en caja reductora	Gripado de piñones, falla catastrófica y reparación costosa.	9	4	5	180	Alta	Análisis físico-químico del aceite y termografía infrarroja.	Mensual
Eje Helicoide	Transportar el material sólido de forma continua evitando acumulaciones o retrocesos.	1. No transportar material.	Atascamiento por objetos extraños (piedras/metal)	Disparo por sobrecarga del motor, daño en álabes del tornillo.	9	3	2	54	Med.	Instalación de rejillas de cribado y detectores de metales en la entrada.	Diario
		2. Transportar un flujo menor al nominal (< 5 ton/h).	Desgaste abrasivo del borde del helicoide	Aumento de la luz entre tornillo y artesa, pérdida de eficiencia de transporte.	7	4	5	140	Alta	Medición de espesores del helicoide y revisión de holguras.	Trimestral
		3. Producir ruido y vibración estructural.	Desalineación del eje / Rodamiento intermedio dañado	Fatiga en la artesa del tornillo y posible fractura del eje principal.	8	3	3	72	Med.	Análisis de vibraciones y engrase de rodamientos de apoyo.	Mensual

Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) - SAE JA 1011

PROCESO: MANTENIMIENTO	**EQUIPO:** BOMBA PLANTA DIESEL	
SUBPROCESO: MANTENIMIENTO PREDICTIVO	**TAG:** P878	**SISTEMA: SEGURIDAD**

Tabla 24. AMEF para Bomba Planta Diesel (P878)

COMP.	FUNCIÓN (SAE JA 1011)	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LA FALLA	S	O	D	NPR	CRIT.	ACCIONES RECOMENDADAS	FREQ.
Motor Diesel	Proporcionar potencia mecánica autónoma para alcanzar la presión de red en < 10 seg.	1. No arrancar a demanda.	Batería sulfatada / Cargador dañado	Incapacidad de respuesta ante incendio, pérdida total de activos o fatalidades.	10	3	2	60	Med.	Monitoreo predictivo de conductancia de batería y prueba de arranque.	Semanal
		2. Detenerse durante la operación.	Filtros obstruidos por diesel degradado (lodos)	Falla en el combate del siniestro tras pocos minutos de operación.	10	2	5	100	Med.	Análisis de calidad de combustible y reemplazo anual de filtros.	Semestral
		3. Operar con sobretemperatura.	Obstrucción en intercambiador de calor	Daño térmico al motor (desbielado) y pérdida del sistema de bombeo.	9	2	4	72	Med.	Limpieza de líneas de enfriamiento y termografía en escape.	Mensual
Bomba de Agua	Suministrar agua a una presión de 120-150 PSI con un caudal de 500 GPM.	1. No suministrar caudal ni presión.	Pérdida de cebado / Válvula de pie trabada	Bomba gira en seco, destrucción de sellos y falta de agua en hidrantes.	10	2	4	80	Med.	Instalación de sensor de nivel en succión y verificación de cebado.	Semanal
		2. Suministrar presión insuficiente (< 120 PSI).	Desgaste abrasivo del impulsor por sedimentos	Los rociadores o monitores no alcanzan la distancia necesaria para el combate.	9	2	5	90	Med.	Prueba de desempeño anual (Curva Q vs H) según NFPA 25.	Anual
		3. Presentar fuga excesiva por sellos.	Resecamiento de empaquetaduras por inactividad	Pérdida de presión en la red de espera (arranques frecuentes de la bomba jockey).	8	4	2	64	Med.	Inspección visual y ajuste de prensaestopas (mantener goteo de enfriamiento).	Semanal

Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) - SAE JA 1011

PROCESO: MANTENIMIENTO	**EQUIPO:** BOMBA PATÍN ANALÍTICA	
SUBPROCESO: MANTENIMIENTO PREDICTIVO	**TAG:** P879	**SISTEMA:** MUESTREO

Tabla 25. AMEF para Bomba Patín Analítica (P879)

COMP.	FUNCIÓN (SAE JA 1011)	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LA FALLA	S	O	D	NPR	CRIT.	ACCIONES RECOMENDADAS	FREQ.
Rodamientos	Soportar el conjunto rotativo manteniendo una vibración estable < 2.0 mm/s para proteger el acople.	1. No soportar el eje.	Desgaste por micro-corrosión (ambiente húmedo)	Ruido excesivo, daño al motor eléctrico del patín y pérdida de flujo de refrigeración.	7	3	3	63	Med.	Análisis de vibraciones y revisión de sellos de protección (V-rings).	Mensual
		2. Operar con vibración fuera de rango.	Desalineación por fatiga del soporte del patín	Falla de sellos mecánicos y pérdida de precisión en el flujo de muestra.	6	2	2	24	Baja	Nivelación de la base del patín y ajuste de pernos de anclaje.	Trimestral
		3. Operar con alta temperatura ($> 60°C$).	Obstrucción de ventilación del motor	Falla eléctrica del motor, cese de refrigeración y daño térmico a los sensores de análisis.	9	3	4	108	Alta	Limpieza de rejillas de ventilación y termografía de motores.	Mensual
Sellos Mecánicos	Garantizar la estanqueidad absoluta del agua de enfriamiento para evitar contaminación de muestras.	1. Permitir fuga de agua.	Cristalización de sales en las caras del sello	Contaminación del área analítica, posible cortocircuito en sensores adyacentes.	8	3	2	48	Baja	Inspección visual diaria y control de conductividad del agua de enfriamiento.	Diario
		2. Fallar por sobrepresión.	Golpe de ariete en el sistema de muestreo	Fuga masiva, inundación del gabinete analítico y pérdida total de instrumentación.	10	2	5	100	Med.	Instalación y revisión de válvulas reguladoras de presión en la línea.	Semestral
		3. Operar en seco.	Bloqueo de la línea de succión (algas/lodo)	Destrucción inmediata del sello y pérdida de enfriamiento de la muestra.	9	3	5	135	Alta	Limpieza de filtros tipo "Y.en la succión de la bomba.	Mensual

Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) - SAE JA 1011

PROCESO: MANTENIMIENTO	**EQUIPO:** BOMBA ACPM	
SUBPROCESO: MANTENIMIENTO PREDICTIVO	**TAG:** P881	**SISTEMA: COMBUSTIBLE LÍQUIDO**

Tabla 26. AMEF para Bomba ACPM (P881)

COMP.	FUNCIÓN (SAE JA 1011)	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LA FALLA	S	O	D	NPR	CRIT.	ACCIONES RECOMENDADAS	FREQ.
Engranajes de Impulsión	Generar flujo volumétrico constante de combustible a una presión de 150-200 PSI.	1. No suministrar presión ni flujo.	Fractura de dientes por fatiga mecánica	Paro total del sistema de encendido, imposibilidad de arranque de caldera y pérdida de producción.	10	2	4	80	Med.	Análisis espectral de vibraciones (frecuencia de engrane) y revisión de acoples.	Mensual
		2. Suministrar flujo errático o pulsante.	Cavitación por entrada de aire en la succión	Desgaste acelerado de las caras laterales de los engranajes y ruido excesivo.	9	3	3	81	Med.	Verificación de estanqueidad en juntas de succión y purga de aire.	Quincenal
		3. Presentar bajo rendimiento volumétrico.	Desgaste abrasivo por partículas sólidas	Aumento de las tolerancias internas, imposibilidad de alcanzar la presión de atomización.	8	4	5	160	Alta	Análisis de aceite (ferrografía) y limpieza profunda de filtros dúplex.	Mensual
Sellos Mecánicos y Rodamientos	Mantener la integridad del eje y evitar derrames de hidrocarburos al suelo.	1. No evitar fugas de ACPM.	Degradación de elastómeros por incompatibilidad química	Riesgo de incendio, contaminación ambiental del suelo y sanciones regulatorias.	9	3	2	54	Med.	Inspección visual de la bandeja de goteo y verificación de drenajes.	Diario
		2. Operar con alta temperatura ($>70°C$).	Rodamiento sobreajustado o falta de lubricación	Gripado del eje, rotura del acoplamiento y potencial ignición de vapores.	10	2	5	100	Med.	Termografía infrarroja y lubricación basada en condición (ultrasonido).	Mensual
		3. Falla prematura de rodamientos.	Desalineación entre motor y bomba	Vibración estructural alta y daño en el sello mecánico por deflexión del eje.	7	3	4	84	Med.	Alineación láser de ejes y monitoreo de vibraciones globales.	Trimestral

Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) - SAE JA 1011

PROCESO: MANTENIMIENTO	**EQUIPO:** COMPRESOR DE INSTRUMENTOS	
SUBPROCESO: MANTENIMIENTO PREDICTIVO	**TAG:** K-910	**SISTEMA: AIRE DE CONTROL**

Tabla 27. AMEF para Compresor de Instrumentos (K-910)

COMP.	FUNCIÓN (SAE JA 1011)	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LA FALLA	S	O	D	NPR	CRIT.	ACCIONES RECOMENDADAS	FREQ.
Unidad de Tornillo	Comprimir aire atmosférico de forma continua para mantener la red a 100-115 PSI.	1. No suministrar aire comprimido.	Gripado de rotores por falta de lubricación	Pérdida total de control neumático, cierre de válvulas de seguridad y paro de emergencia.	10	2	3	60	Med.	Análisis físico-químico de aceite y monitoreo de temperatura de descarga.	Mensual
		2. Operar con vibración excesiva ($>$ 4 mm/s).	Desgaste en rodamientos del airend	Daño catastrófico de los rotores y altos costos de reconstrucción.	9	3	2	54	Med.	Análisis espectral de vibraciones (frecuencias de paso de lóbulos).	Trimestral
		3. Operar con alta temperatura de descarga ($>$ 100°C).	Obstrucción en el radiador de aceite	Disparo automático por protección térmica, inestabilidad en la red de aire.	9	4	2	72	Med.	Termografía de intercambiadores y limpieza de panales.	Quincenal
Separador Aire/Aceite	Garantizar que el aire de instrumentos tenga un contenido de aceite $<$ 0.01 mg/m³.	1. Permitir paso de aceite a la red.	Saturación / Ruptura del elemento separador	Contaminación de posicionadores de válvulas, fallas de control y paros parciales.	9	3	5	135	Alta	Monitoreo de caída de presión (ΔP) en el separador y filtros coalescentes.	Mensual
		2. Suministrar aire con alta humedad.	Falla en la purga automática de condensados	Corrosión interna en tuberías de instrumentación y bloqueo de solenoides.	8	4	4	128	Alta	Inspección de trampas de condensado y punto de rocío (Dew Point).	Semanal
		3. Operar con flujo restringido.	Filtro de admisión obstruido	Aumento del consumo energético y pérdida de capacidad volumétrica (SCFM).	7	4	3	84	Med.	Inspección y reemplazo predictivo del filtro de aire de entrada.	Mensual

Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) - SAE JA 1011

PROCESO: MANTENIMIENTO	**EQUIPO:** BOMBA NEUMÁTICA RECEPCIÓN	
SUBPROCESO: MANTENIMIENTO PREDICTIVO	**TAG:** P884	**SISTEMA: TRASVASE COMBUSTIBLE**

Tabla 28. AMEF para Bomba Neumática de Recepción (P884)

COMP.	FUNCIÓN (SAE JA 1011)	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LA FALLA	S	O	D	NPR	CRIT.	ACCIONES RECOMENDADAS	FREQ.
Diafragmas (Teflón/Buna-N)	Desplazar volumétricamente el ACPM mediante ciclos de flexión alternativa.	1. No impulsar fluido (ruptura total).	Fatiga del elastómero por ciclos de trabajo	Fuga de combustible hacia el escape de aire, contaminación ambiental y riesgo de incendio.	10	3	2	60	Med.	Monitoreo de presencia de líquido en el escape de aire y conteo de ciclos.	Diario
		2. Suministrar bajo caudal.	Estiramiento/Deformación del material	Aumento del tiempo de descarga de camiones cisterna y sobrecostos operativos.	7	3	4	84	Med.	Reemplazo preventivo basado en el histórico de volumen desplazado.	Anual
		3. Falla prematura tras intervención.	Torque excesivo en platos de sujeción	Corte radial del diafragma, parada inmediata del sistema de recepción.	8	3	5	120	Alta	Capacitación en uso de torquímetro según especificaciones del fabricante.	N/A
Válvula Piloto y de Aire	Alternar el flujo de aire entre cámaras para mantener el ciclado continuo.	1. No ciclar (bomba muerta).	Congelamiento por expansión de aire húmedo	Interrupción del proceso de recepción de combustible.	9	3	2	54	Med.	Verificación de purga de condensados en la unidad FRL (Filtro-Regulador).	Diario
		2. Operar con ciclado irregular.	Contaminación por partículas en el carrete	Desgaste irregular de sellos internos y consumo ineficiente de aire comprimido.	8	2	5	80	Med.	Inspección de filtros de línea y análisis por ultrasonido acústico.	Mensual
		3. Fuga de aire constante.	Desgaste de sellos en Ú.º juntas tóricas	Caída de presión en la red de aire de planta y pérdida de potencia de bombeo.	7	4	3	84	Med.	Detección de fugas mediante ultrasonido de alta frecuencia.	Mensual

Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) - SAE JA 1011

PROCESO: MANTENIMIENTO	**EQUIPO:** BOMBA DOSIFICADORA	
SUBPROCESO: MANTENIMIENTO PREDICTIVO	**TAG:** P901	**SISTEMA: TRATAMIENTO AGUA**

Tabla 29. AMEF para Bomba Dosificadora de Químicos (P901)

COMP.	FUNCIÓN (SAE JA 1011)	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LA FALLA	S	O	D	NPR	CRIT.	ACCIONES RECOMENDADAS	FREQ.
Cabezal y Diafragma	Inyectar un volumen preciso de reactivo químico (±1 %) contra la presión de línea.	1. No suministrar químico al sistema.	Ruptura de diafragma por fatiga/química	Desviación de parámetros de agua, corrosión acelerada en caldera y formación de incrustaciones.	10	3	2	60	Med.	Prueba de estanqueidad y revisión de detección de ruptura en cámara.	Diario
		2. Dosificar fuera de rango (caudal erróneo).	Incrustación en válvulas check de bola	Lecturas falsas de control químico, desperdicio de reactivos o daño al metal de la caldera.	9	4	4	144	Alta	Calibración volumétrica con probeta graduada y limpieza de asientos.	Mensual
		3. Presentar pérdida de presión de descarga.	Sifonamiento / Retorno por válvula dañada	Flujo ineficiente hacia la caldera e inestabilidad en el tratamiento.	8	3	4	96	Med.	Inspección y reemplazo del kit de válvulas de aspiración e impulsión.	Semestral
Mecanismo de Impulso	Suministrar el movimiento recíproco para el desplazamiento del diafragma.	1. No operar el mecanismo.	Quemado de bobina (solenoide) / Falla electrónica	Cese total de la dosificación; riesgo de contaminación química en el vapor.	9	2	5	90	Med.	Termografía infrarroja en tarjeta de control y motor.	Trimestral
		2. Operar con frecuencia irregular.	Desgaste en el sistema de excéntrica/biela	Dosificación pulsante incontrolada y fatiga en tuberías de descarga.	7	3	4	84	Med.	Monitoreo acústico de carrera de biela y lubricación de engranajes.	Trimestral
		3. Falla por vibración externa.	Aflojamiento de conexiones eléctricas	Paro intermitente de la bomba y pérdida de trazabilidad química.	7	2	3	42	Baja	Verificación de torque en terminales y soportes de montaje.	Semestral

Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) - SAE JA 1011

PROCESO: MANTENIMIENTO	**EQUIPO:** BOMBA DOSIFICADORA POLÍMERO	
SUBPROCESO: MANTENIMIENTO PREDICTIVO	**TAG:** P904	**SISTEMA: TRATAMIENTO QUÍMICO**

Tabla 30. AMEF para Bomba Dosificadora Polímero (P904)

COMP.	FUNCIÓN (SAE JA 1011)	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LA FALLA	S	O	D	NPR	CRIT.	ACCIONES RECOMENDADAS	FREQ.
Cabezal, Diafragma y Checks	Suministrar polímero/agente de pH de forma ininterrumpida para mantener el pH entre 9.0 - 9.5.	1. No suministrar químico.	Cristalización de polímero en válvulas check	Desviación drástica del pH, corrosión ácida en economizador y tubos de caldera.	10	4	2	80	Med.	Prueba de bombeo manual y limpieza de asientos de válvulas.	Quincenal
		2. Dosificar con caudal insuficiente.	Ruptura parcial / Fatiga del diafragma	pH inestable, formación de depósitos y reducción de la transferencia de calor.	9	3	4	108	Alta	Calibración volumétrica con probeta de aforo.	Mensual
		3. Fuga de producto al exterior.	Ataque químico a las juntas de sellado	Riesgo químico por contacto, daño a la pintura del patín y posible contaminación de suelos.	8	3	2	48	Baja	Inspección visual de la cámara de goteo y reapriete de tornillería.	Diario
Motor y Unidad Electrónica	Garantizar la frecuencia de carrera necesaria para cumplir con el set-point del analizador.	1. Paro total de la unidad.	Sobrecalentamiento de la tarjeta de control	Cese del tratamiento químico y riesgo de fragilización por hidrógeno en el metal.	10	2	5	100	Med.	Termografía de gabinete eléctrico y verificación de ventilación.	Semestral
		2. Operación con ruido interno.	Desgaste de rodamientos o mecanismo excéntrico	Vibración excesiva que puede fracturar las tuberías de descarga de PVC/CPVC.	7	3	5	105	Med.	Monitoreo acústico y análisis de vibraciones en base de bomba.	Mensual

Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) - SAE JA 1011

PROCESO: MANTENIMIENTO	**EQUIPO:** BOMBA DOSIFICADORA ERITORATO	
SUBPROCESO: MANTENIMIENTO PREDICTIVO	**TAG:** P906	**SISTEMA: TRATAMIENTO QUÍMICO**

Tabla 31. AMEF para Bomba Dosificadora Eritorato (P906)

COMP.	FUNCIÓN (SAE JA 1011)	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LA FALLA	S	O	D	NPR	CRIT.	ACCIONES RECOMENDADAS	FREQ.
Cabezal, Diafragma y Checks	Inyectar el secuestrante de oxígeno para mantener niveles residuales de 0.007 ppm en agua de alimentación.	1. No suministrar químico.	Presencia de burbujas de aire (Gas-lock)	Corrosión por picaduras de oxígeno en el economizador y domo, riesgo de rotura de tubos.	10	4	3	120	Alta	Purga periódica del cabezal e instalación de válvula de purga de aire automática.	Diario
		2. Dosificar caudal insuficiente.	Cristalización de eritorato en válvulas de descarga	Elevación de los niveles de O_2 disuelto y daño prematuro a los componentes de acero.	10	2	4	80	Med.	Prueba de flujo mediante cilindro de calibración y limpieza de válvulas.	Quincenal
		3. Falla funcional del diafragma.	Fatiga mecánica por alta contrapresión	Fuga de químico hacia la electrónica, riesgo de cortocircuito y parada de la bomba.	9	3	2	54	Med.	Inspección visual de la cámara de goteo y monitoreo de presión de red.	Diario
Motor y Solenoide	Generar la fuerza de impulso para vencer la contrapresión del domo/línea de agua.	1. Paro del motor por sobrecarga.	Aumento de temperatura en bobinado	Pérdida de la protección contra corrosión, degradación acelerada del activo caldera.	10	2	4	80	Med.	Termografía infrarroja del motor y medición de consumo de corriente.	Mensual
		2. Operación errática del solenoide.	Inestabilidad de voltaje o falla en tarjeta	Dosificación irregular, dificultad para mantener los residuales químicos estables.	8	3	4	96	Med.	Inspección de conexiones eléctricas y verificación de voltaje de alimentación.	Trimestral

Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) - SAE JA 1011

PROCESO: MANTENIMIENTO	**EQUIPO:** BOMBA DOSIFICADORA AMINA	
SUBPROCESO: MANTENIMIENTO PREDICTIVO	**TAG:** P907	**SISTEMA: TRATAMIENTO QUÍMICO**

Tabla 32. AMEF para Bomba Dosificadora Amina (P907)

COMP.	FUNCIÓN (SAE JA 1011)	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LA FALLA	S	O	D	NPR	CRIT.	ACCIONES RECOMENDADAS	FREQ.
Cabezal y Componentes de Bombeo	Dosificar amina neutralizante/fílmica para proteger las líneas de condensado contra la corrosión por CO_2.	1. No suministrar químico.	Bloqueo de válvulas check por viscosidad/residuos	Acidificación del condensado, corrosión en líneas de retorno y contaminación del agua de alimentación.	10	4	3	120	Alta	Limpieza química de válvulas check y prueba de caudal manual.	Quincenal
		2. Suministrar flujo inconsistente.	Ruptura parcial del diafragma de teflón	Protección deficiente de activos distantes (turbinas/intercambiadores) por falta de film protector.	9	3	4	108	Alta	Calibración de la bomba con cilindro de aforo y reemplazo de kits elásticos.	Semestral
		3. Fuga de amina al exterior.	Deterioro de sellos por incompatibilidad química	Emisión de vapores irritantes, daño a componentes eléctricos y pérdida de reactivo costoso.	8	2	2	32	Baja	Inspección visual diaria y verificación de compatibilidad de juntas (Viton/EPDM).	Diario
Motor Eléctrico y Control	Mantener el régimen de emboladas (strokes) definido por el setpoint del PLC/DCS.	1. No arrancar/Paro súbito.	Falla en la tarjeta electrónica por humedad ambiental	Suspensión total del tratamiento químico en la red de vapor; corrosión generalizada.	10	2	5	100	Med.	Termografía en placa de control y sellado de prensaestopas del motor.	Semestral
		2. Operación con alta temperatura.	Sobrecarga mecánica por obstrucción en descarga	Daño permanente del motor y cese del servicio; reparaciones costosas.	9	2	4	72	Med.	Limpieza de filtros de succión y medición de amperaje en el motor.	Mensual

Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) - SAE JA 1011

PROCESO: MANTENIMIENTO	**EQUIPO:** BOMBA AGUA INDUSTRIAL	
SUBPROCESO: MANTENIMIENTO PREDICTIVO	**TAG:** P911	**SISTEMA: AGUA DE SERVICIOS**

Tabla 33. AMEF para Bomba Agua Industrial (P911)

COMP.	FUNCIÓN (SAE JA 1011)	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFECTOS DE LA FALLA	S	O	D	NPR	CRIT.	ACCIONES RECOMENDADAS	FREQ.
Rodamientos	Soportar el eje rotativo permitiendo un giro libre con niveles de vibración < 2.8 mm/s.	1. No soportar el eje (gripado).	Contaminación con agua por falla de retenedores	Daño en eje y carcasa, indisponibilidad de agua industrial para servicios críticos.	8	3	2	48	Baja	Monitoreo de condición por ultrasonido (detección de fricción).	Mensual
		2. Operar con vibración excesiva.	Desalineación mecánica por fatiga de pernos	Desgaste prematuro de sellos y acoplamiento; aumento de costos de reparación.	7	4	2	56	Med.	Alineación láser y análisis de vibraciones (FFT).	Trimestral
		3. Operar con alta temperatura (> 80°C).	Pérdida de propiedades del lubricante	Falla catastrófica del motor/bomba y posible incendio por fricción.	8	4	5	160	Alta	Inspección termográfica de soportes y control de lubricación.	Mensual
Sellos Mecánicos e Impulsor	Garantizar la estanqueidad y transformar energía cinética en presión de flujo.	1. Fuga de fluido al exterior.	Erosión de las caras por sólidos en suspensión	Pérdida de presión en red, inundación de fosa de bombas y desperdicio de agua.	7	3	2	42	Baja	Inspección visual de goteo y limpieza de filtros de succión.	Diario
		2. Reducción de presión de descarga.	Cavitación por obstrucción en succión	Daño por picadura en el impulsor, ruido excesivo y baja eficiencia hidráulica.	9	3	4	108	Med.	Medición de presión diferencial y limpieza de filtros tipo "Y".	Mensual
		3. Falla total del sello.	Operación en seco por pérdida de cebado	Fuga masiva inmediata, riesgo de daño eléctrico al motor circundante.	9	2	5	90	Med.	Instalación de sensor de flujo/presión para protección por corrida en seco.	Única vez

C. TABLA DE CRITICIDAD DE EQUIPOS ROTATIVOS

Tabla 34. Clasificación de Criticidad de Equipos Rotativos

Tag	Descripción	Criticidad
D235	VENTILADOR TIRO INDUCIDO 01	A
D236	VENTILADOR AIRE PRIMARIO 01	A
D237	VENTILADOR AIRE SECUNDARIO 01	A
D238	VENTILADOR GAS FDR 01	A
D255	SOPLADOR LOOP SEAL 01	A
D258	SOPLADOR RETRACTIL 01	B
D259	SOPLADOR RETRACTIL 02	B
D260	SOPLADOR RETRACTIL 03	B
D261	SOPLADOR RETRACTIL 04	B
D262	SOPLADOR RETRACTIL 05	B
D263	SOPLADOR RETRACTIL 06	B
D264	SOPLADOR RETRACTIL 07	B
D265	SOPLADOR RETRACTIL 08	B
D266	SOPLADOR ROTATORIO 01	C
D267	SOPLADOR ROTATORIO 02	C
D268	SOPLADOR ROTATORIO 03	C
D269	SOPLADOR ROTATORIO 04	C
D270	SOPLADOR ROTATORIO 05	C
D271	SOPLADOR ROTATORIO 06	C
D272	SOPLADOR ROTATORIO 07	D
D273	SOPLADOR ROTATORIO 08	D
D274	SOPLADOR ROTATORIO 09	D
D275	SOPLADOR ROTATORIO 10	D
D276	SOPLADOR ROTATORIO 11	D
D277	SOPLADOR ROTATORIO 12	C
D278	SOPLADOR ROTATORIO 13	C
D279	SOPLADOR ROTATORIO 14	C
D280	SOPLADOR ROTATORIO 15	C
D281	SOPLADOR ROTATORIO 16	C
D282	SOPLADOR ROTATORIO 17	C
D283	SOPLADOR ROTATORIO 18	D
D284	SOPLADOR ROTATORIO 19	C
D285	SOPLADOR ROTATORIO 20	D
D286	SOPLADOR ROTATORIO 21	C
D287	SOPLADOR ROTATORIO 22	C
D288	SOPLADOR ROTATORIO 23	C

Continúa en la siguiente página...

Tabla 34 (Continuación)

Tag	Descripción	Criticidad
D289	SOPLADOR ROTATORIO 24	C
D290	SOPLADOR ROTATORIO 25	C
D291	SOPLADOR ROTATORIO 26	C
D292	SOPLADOR ROTATORIO 27	D
D293	SOPLADOR ROTATORIO 28	C
D294	SOPLADOR ROTATORIO 29	D
D295	SOPLADOR ROTATORIO 30	C
D298	SOPLADOR HOGAR 01 SISTEMA CENIZAS	A
D302	VENTILADOR PRESURIZACION 01 CUARTO	C
D303	VENTILADOR PRESURIZACION 02 CUARTO	C
D304	VENTILADOR PRESURIZACION 03 CUARTO	C
P670	BMB ALIMENTACION 01	A
P678	BMB ALIMENTACION 02	A
P681	BMB RECIRCULACION ACHIQUE AGUAS LLUVIAS	D
P571	BMB DESAIREADOR 01	C
P572	BMB DESAIREADOR 02	C
P573	BMB REFRIGERACION 01 TORNILLO HOGAR	B
P574	BMB REFRIGERACION 02 TORNILLO HOGAR	B
P575	BMB EMERGENCIA RED CONTRAINCENDIOS 01	A
P576	BMB REPOSICION TQ CONDENSADOS 01	B
P577	BMB REPOSICION TQ CONDENSADOS 02	B
P578	BMB 01 PLANTA DIESEL	A
P679	BMB PATIN ANALITICA REFRIGERACION	B
P680	BMB PATIN ANALITICA REFRIGERACION	B
P681	BMB ACPM 01	A
P682	BMB ACPM 02	A
P683	BMB CARGUE ACPM 01	A
P684	BMB NEUMATICA RECEPCION ACPM 01	A
P901	BMB TRASIEGO DOSIF QUIMICOS 01	C
P902	BMB TRASIEGO DOSIF QUIMICOS 02	C
P903	BMB TRASIEGO DOSIF QUIMICOS 03	D
P904	BMB DOSIFICADORA POLIMERO PH 01	C

Continúa en la siguiente página...

Tabla 34 (Continuación)

Tag	Descripción	Criticidad
P905	BMB DOSIFICADORA POLIMERO PH 02	B
P906	BMB DOSIFICADORA ERITORATO 01	B
P907	BMB DOSIFICADORA AMINA 01	B
P908	BMB DOSIFICADORA AMINA 02	B
P909	BMB DOSIFICADORA ERITORATO 02	B
P910	BMB AGUA INDUSTRIAL A CALDERAS	A