

Diseño de un plan de mantenimiento basado en condición aplicado a los
compresores de amoniaco de la sala de máquinas en la cervecería de Barranquilla

Cristhian Camilo Velasquez Peña

Universidad Industrial de Santander
Facultad de ingenierías físicomecánicas
Escuela de Ingeniería Mecánica
Especialización en Gerencia de mantenimiento
Bucaramanga
2025

Diseño de un plan de mantenimiento basado en condición aplicado a los
compresores de amoniaco de la sala de máquinas en la cervecería de Barranquilla

Cristhian Camilo Velasquez Peña

Monografía para Optar el Título de Especialista en Gerencia de
mantenimiento

Director

Prof. Carlos Borrás Pinilla.

PhD., MSc., Spc Mto

Universidad Industrial de Santander
Facultad de ingenierías físicomecánicas
Escuela de Ingeniería Mecánica
Especialización en Gerencia de mantenimiento
Bucaramanga

2025

Tabla de Contenido

| | Pág. |
|--|-------------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 12 |
| 2. OBJETIVOS..... | 13 |
| 3. JUSTIFICACIÓN DEL PLAN PROPUESTO | 14 |
| 4. DESCRIPCIÓN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR CIRCULACIÓN DE AMONIACO | 15 |
| 4.1 Compresores de tornillo mayekawa serie maycom v | 16 |
| 4.2 Circuito de aceite..... | 20 |
| 5. MANTENIMIENTO BASADO EN CONDICIÓN (CBM)..... | 22 |
| 5.1 Técnicas de mantenimiento CBM | 24 |
| 6. DISEÑO PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN CONDICIÓN..... | 34 |
| 6.1 Definición de fronteras y partición del equipo..... | 34 |
| 6.2 Contexto operacional y definición de función primaria del equipo..... | 36 |
| 6.3 Partición de los subconjuntos..... | 38 |

| | |
|---|----|
| 6.4 Matriz de probabilidad y consecuencia. | 39 |
| 6.5 Identificación modos de falla | 40 |
| 6.6 Identificación tareas programadas de mantenimiento | 43 |
| 6.7 Definición de los puntos de muestreo | 46 |
| 6.8 Adquisición de datos | 49 |
| 6.9 Creación de la base de datos y configuración del Software condmaster ruby de SPM | 51 |
| 6.10 Creación de la base de datos y configuración del Software ULTRATREND DMS | 53 |
| 6.11 Análisis de Datos de vibratoriales..... | 54 |
| 6.12 Tablas de diagnóstico de vibraciones mecánicas | 56 |
| 6.13 Análisis de datos mediciones de ultrasonido..... | 59 |
| 6.14 Análisis de aceites Norma ISO 4406..... | 60 |
| 6.15 Parámetros de alarma vibraciones mecánicas..... | 61 |
| 6.16 Análisis de causa raíz y criterios de alarma del PM | 63 |
| 6.17 Plan de mantenimiento en CMMS SAP (PM) | 65 |

| | |
|--|----|
| 6.18 Indicadores de mantenimiento | 69 |
| 6.19 Metas indicadores de mantenimiento propuestos | 72 |
| CONCLUSIONES | 74 |
| BIBLIOGRAFÍA | 76 |

Lista de Tablas

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1. Compresores Amoniaco sala de máquinas | 6 |
| Tabla 2. Tipos de transductores de vibraciones mecánicas | 17 |
| Tabla 3. Definición de sistemas del paquete de compresión | 29 |
| Tabla 4. Variables de monitoreo según tipo de maquina | 46 |
| Tabla 5. Definición puntos de toma para compresores | 50 |
| Tabla 6. Problemas de Rodamientos con Elementos Rodantes | 61 |
| Tabla 7. Holgura Mecánica | 62 |
| Tabla 8. Problemas de Motor Eléctrico | 62 |
| Tabla 9. Criterios de evaluación sugeridos por Mayekawa | 65 |
| Tabla 10. Metas para indicadores del plan de mantenimiento propuesto ... | 72 |

Lista de Figuras

| | Pág. |
|---|-------------|
| Figura 1. Esquema simplificado del circuito de refrigeración..... | 15 |
| Figura 2. Compresor de amoniaco 8..... | 17 |
| Figura 3. Esquema de compresión del equipo. | 18 |
| Figura 4. Vista frontal y superior de los rotores del compresor | 18 |
| Figura 5. Montaje de los rotores en el compresor..... | 19 |
| Figura 6. Esquema circuito de aceite | 20 |
| Figura 7. Esquema refrigeración de aceite por termosifón..... | 21 |
| Figura 8. Curva P-F..... | 23 |
| Figura 9. Espectro de vibraciones en desplazamiento..... | 26 |
| Figura 10. Espectro de vibraciones en velocidad | 26 |
| Figura 11. Espectro de vibraciones en aceleración..... | 27 |
| Figura 12. Componentes acelerómetro piezoeléctrico..... | 29 |
| Figura 13. Espectro de ultrasonido analizado mediante FFT | 30 |
| Figura 14. Ejemplo informe análisis de aceites..... | 32 |
| Figura 15. Modelo de implementación Norma ISO 17359:2018..... | 33 |
| Figura 16. Desarrollo del Plan de mantenimiento | 34 |
| Figura 17. Definición de fronteras del objeto de estudio..... | 35 |
| Figura 18. Diagrama de funcionamiento del compresor | 37 |
| Figura 19. Partición del equipo en elementos mantenibles..... | 38 |

| | |
|---|----|
| Figura 20. Matriz de probabilidad y consecuencia..... | 40 |
| Figura 21. Identificación de modos de falla..... | 41 |
| Figura 22. Arbol de decisión para selección de tareas de mantenimiento. ... | 44 |
| Figura 23. Rutinas de monitoreo de condición | 46 |
| Figura 24. Estándar posicionamiento de transductores de vibraciones mecánicas. | 47 |
| Figura 25. Planos de medición de vibración | 48 |
| Figura 26. Definición de puntos de toma de datos | 48 |
| Figura 27. Mounting Pad para toma de vibraciones o ultrasonido por contacto. | 50 |
| Figura 28. Tabla de datos de equipos para toma de mediciones..... | 51 |
| Figura 29. Creación de los equipos y puntos de toma | 52 |
| Figura 30. Configuración de los puntos de toma..... | 52 |
| Figura 31. Configuración Bandas espectrales y frecuencias de fallo de rodamientos..... | 53 |
| Figura 32. Configuración medición ultrasonido por contacto..... | 54 |
| Figura 33. Tabla de criticidad Norma ISO 10816..... | 61 |
| Figura 34. Disparadores para análisis causa raíz PdM | 63 |
| Figura 35. Análisis de espectro de vibraciones | 55 |
| Figura 36. Grafica de cascada espectros de vibraciones..... | 55 |
| Figura 37. Espectro ultrasonido en dominio de la frecuencia | 59 |

| | |
|---|----|
| Figura 38.Código de limpieza ISO 4406 de acuerdo con el tipo de componente y mecanismos lubricados..... | 60 |
| Figura 39.Plan de mantenimiento toma de muestras análisis de aceite..... | 67 |
| Figura 40.Plan de mantenimiento análisis de ultrasonido | 67 |
| Figura 41. Plan de mantenimiento análisis de vibraciones | 68 |
| Figura 42. Histórico Fallas Mycom 1..... | 73 |

Resumen

Título: Diseño de un plan de mantenimiento basado en condición aplicado a los compresores de amoniaco de la sala de máquinas en la cervecería de Barranquilla

Autor: Cristhian Camilo Velasquez Peña

Palabras Clave: CBM, Compresores, vibraciones mecánicas, ultrasonido

Descripción: La cervecería de Barranquilla cuenta con siete compresores de tornillo MAYEKAWA en su sala de máquinas, usados para refrigeración mediante un circuito de amoniaco anhidro R717. Actualmente, el mantenimiento se basa en horas de funcionamiento según los manuales del fabricante, lo que no garantiza la confiabilidad ni optimiza los costos. El proyecto propone que: al implementar técnicas de monitoreo de condición como análisis de vibraciones, ultrasonido y aceites, se mejorarán los planes de mantenimiento en términos de costos y confiabilidad de los equipos.

Se desarrolla una metodología de diseño del plan de mantenimiento basada en la norma ISO 17359:2018**, que establece directrices generales para el monitoreo y diagnóstico de máquinas. Para el Análisis de Modos de Falla, Efectos y Criticidad (FMECA), se utilizó la norma SAE JA 1012††, que es una guía para la aplicación de la norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM).

Tras definir las tareas de mantenimiento, se implementó una metodología de análisis de datos, se establecieron límites de alarma para cada técnica de monitoreo propuesta, y se identificaron disparadores para el análisis de causa raíz.

La efectividad del plan será evaluada mediante indicadores de mantenimiento, cuya definición y métodos de cálculo se establecieron en el proyecto.

** (Organizacion Internacional de normalizacion, 2018)

†† (SAE International, 2014)

Abstract

Title: Design of a condition-based maintenance plan applied to the ammonia compressors in the machine room at the Barranquilla brewery.

Author: Cristhian Camilo Velasquez Peña

Key Words: CBM, Compressors, Mechanical Vibrations, Ultrasound

Description: The Barranquilla brewery has seven MAYEKAWA screw compressors in its machine room, used for refrigeration through an anhydrous ammonia R717 circuit. Currently, maintenance is based on operating hours according to the manufacturer's manuals, which does not guarantee reliability or optimize costs. The project proposes that by implementing condition monitoring techniques such as vibration analysis, ultrasound, and oil analysis, maintenance plans will be improved in terms of cost and equipment reliability.

A maintenance plan design methodology is developed based on the ISO 17359:2018 standard, which provides general guidelines for machine condition monitoring and diagnostics. For the Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis (FMECA), the SAE JA 1012 standard was used, which is a guide for the application of Reliability-Centered Maintenance (RCM).

After defining maintenance tasks, a data analysis methodology was implemented, alarm limits were established for each proposed monitoring technique, and triggers for root cause analysis were identified.

The effectiveness of the plan will be evaluated through maintenance indicators, whose definitions and calculation methods were established in the project.

1. Introducción

La cervecería de Barranquilla cuenta con siete compresores de tornillo marca MAYEKAWA serie MYCOM V, con capacidades entre 300 a 650 Toneladas de refrigeración en su sala de máquinas, estos suplen los diferentes procesos de refrigeración de la planta a través de un circuito de circulación de amoniaco anhidro R717.

Actualmente, el plan de mantenimiento de los compresores de amoniaco se realiza a través de rutinas de inspección basadas en horas de funcionamiento de acuerdo con los manuales del fabricante MAYEKAWA, las cuales no garantizan la confiabilidad de los equipos dado que no contemplan el entorno operacional de los equipos en la planta por lo que se han presentado daños en las unidades de potencia, circuitos eléctricos, circuitos de lubricación y unidades de compresión.

Adicionalmente la metodología actual del plan de mantenimiento no optimiza los costos de mantenimiento en las unidades de compresión, dado que estas podrían llegar a mayores horas de servicio en algunos casos, siempre y cuando se pudiera realizar un monitoreo de la condición de estas, en otros casos las fallas funcionales de los equipos generan sobrecostos en reparaciones adicionales.

Por lo tanto, la hipótesis del proyecto de investigación:

Implementando técnicas de monitoreo de condición como lo son: análisis de vibraciones mecánicas, medición de ultrasonido y análisis de aceites; se mejorarán los planes de mantenimiento preventivos actuales en términos de costos y confiabilidad de los equipos de compresión de Amoniaco en Bavaria SAS.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General:

Diseñar un plan de mantenimiento basado en condición a los compresores de amoniaco de la sala de máquinas en la cervecería de Barranquilla mediante las técnicas de monitoreo como son análisis de vibraciones, medición de ultrasonido y análisis de aceites.

2.2 Objetivos Específicos:

- Establecer los componentes críticos del sistema a través del análisis FMECA a los paquetes de compresión y las técnicas de monitoreo requeridas de acuerdo con sus modos de falla basados en la norma ISO 17359:2018.
- Diseñar un método de recopilación, registro y análisis de datos para las mediciones en campo que se realizan a los equipos basado en norma ISO 17359:2018.
- Determinar los criterios de alarma para las variables medidas en las técnicas de monitoreo (vibraciones, ultrasonido y análisis de aceite) basado en los límites establecidos en las normas ISO y los históricos de planta.
- Proponer la estructura de evaluación del plan de mantenimiento basado en condición para los compresores de amoniaco de la planta de cervecería BAVARIA en Barranquilla.

3. JUSTIFICACIÓN DEL PLAN PROPUESTO

El proceso de fabricación de cerveza y bebidas de malta requiere sistemas de enfriamiento para las fases de fermentación, maduración y filtración los cuales consumen el 90% de la capacidad total de refrigeración de la planta.

Cualquier disminución de la capacidad de refrigeración de la planta influye directamente en el área de elaboración, pudiendo ocasionar demoras o detenciones en los procesos, así como afectaciones de calidad del producto (KUNSE, 2006), en consecuencia, la confiabilidad del sistema de refrigeración es crítica para la operación de la cervecería.

El sistema de refrigeración está compuesto por un grupo de siete compresores de tornillo conectados en paralelo, lo cual permite que trabajen a presiones iguales tanto en succión como en descarga, utilizando como fluido refrigerante amoniaco anhidro R717. El compresor cumple la función de subir la presión y temperatura del fluido refrigerante para descargarlo al condensador donde este se condensa a través de la entrega de energía térmica al medio circundante y se distribuye a través de las diferentes estaciones a los consumidores.

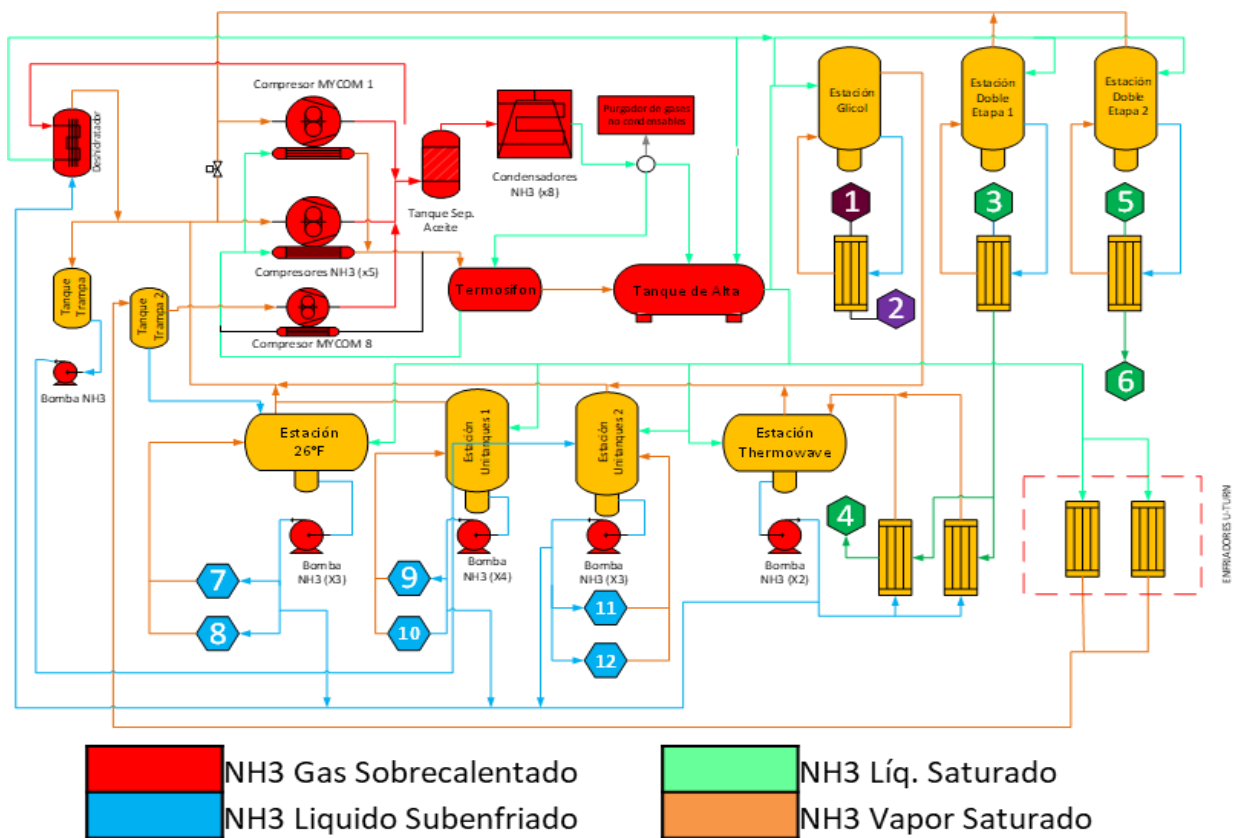
La falla o pérdida de capacidad de alguno de los compresores de amoniaco afecta directamente el rendimiento del sistema general aumentando la presión de succión y disminuyendo la capacidad de refrigeración. Asimismo, cualquier falla del sistema de compresión que cause pérdida de contención del fluido refrigerante es un riesgo alto de seguridad al personal de la planta debido a la toxicidad del amoniaco anhidro (ATSDR, 2024).

Lo anterior hace necesario la implementación de un sistema de monitoreo de condición de los equipos que permita garantizar la confiabilidad y seguridad de estos a un costo admisible de mantenimiento.

4. DESCRIPCIÓN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR CIRCULACIÓN DE AMONIACO

De acuerdo con Dossat (2007), el sistema de refrigeración instalado en la cervecería se denomina sistema por recirculación de líquido de régimen inundado como se aprecia en la figura 1, el cual utiliza como fluido refrigerante amoniaco anhidro R717.

Figura 1. Esquema simplificado del circuito de refrigeración.



Fuente: Autor

El amoniaco en el sistema inicia su ciclo almacenado en fase líquida a alta presión y temperatura en el tanque de alta o recibidor, luego el amoniaco pasa a

través de una válvula de expansión bajando su presión y temperatura para luego ser enviado al tanque separador de líquido. Desde el tanque separador el amoniaco líquido a la temperatura y presión de evaporación es bombeado a los evaporadores donde se produce el intercambio energía térmica, después, retorna nuevamente una mezcla de gas y liquido al tanque separador.

El amoniaco en forma de gas seco es succionado un grupo de siete compresores de tornillo conectados en paralelo, lo cual permite que trabajen a presiones iguales tanto en succión como en descarga. El compresor cumple la función de subir la presión y temperatura del fluido refrigerante para descargarlo al condensador donde este se condensa a través de la entrega de energía térmica al medio circundante almacenándose en el tanque de alta donde inicia su ciclo nuevamente.

4.1 Compresores de tornillo mayekawa serie maycom v

La cervecería de Barranquilla cuenta en su sala de máquinas con siete compresores tornillo marca MAYEKAWA serie Maycom V, de diferentes modelos de acuerdo con la tabla 1. La unidad de potencia, compresión , separador de aceite y enfriador se encuentran en un solo bloque como se muestra en la figura 2.

Tabla 1. Compresores Amoniaco sala de maquinas

| Denominación | Modelo | Año construc. | Capacidad [TR] | Potencia [HP] | Capacidad [KW] | COP |
|-------------------------|------------|---------------|----------------|---------------|----------------|-----|
| COMPRESOR DE AMONIACO 1 | N250SUD-MX | 1995 | 700 | 700 | 2461,80 | 4,7 |
| COMPRESOR DE AMONIACO 3 | N250VDM-W | 2000 | 538 | 760 | 1892,07 | 4,7 |
| COMPRESOR DE AMONIACO 4 | N250LUD-ME | 1992 | 668 | 800 | 2349,26 | 3,9 |
| COMPRESOR DE AMONIACO 5 | N250LUD-ME | 1995 | 668 | 800 | 2349,26 | 3,9 |
| COMPRESOR DE AMONIACO 6 | N250VLD-SU | 1999 | 643 | 658 | 2261,34 | 4,6 |
| COMPRESOR DE AMONIACO 7 | N160MUD-LI | 1994 | 136 | 147 | 478,29 | 4,4 |
| COMPRESOR DE AMONIACO 8 | N250VSD-HX | 2022 | 498,5 | 399 | 1753,15 | 5,9 |

Fuente: Autor

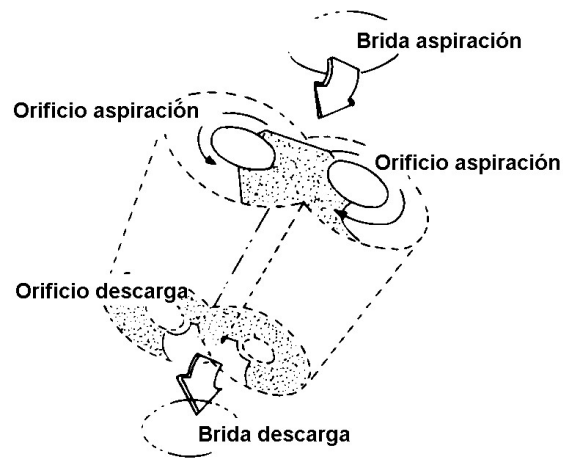
Figura 2. Compresor de amoníaco 8



Fuente: Autor

El compresor incrementa la presión del amoníaco gaseoso de manera continua al modificar el volumen entre dos rotores giratorios, como se muestra en la figura 3. El amoníaco gaseoso es aspirado en el espacio entre los dos rotores, donde la presión aumenta al reducirse el volumen, y posteriormente, el amoníaco es expulsado como gas a alta presión (MYCOM, 2002).

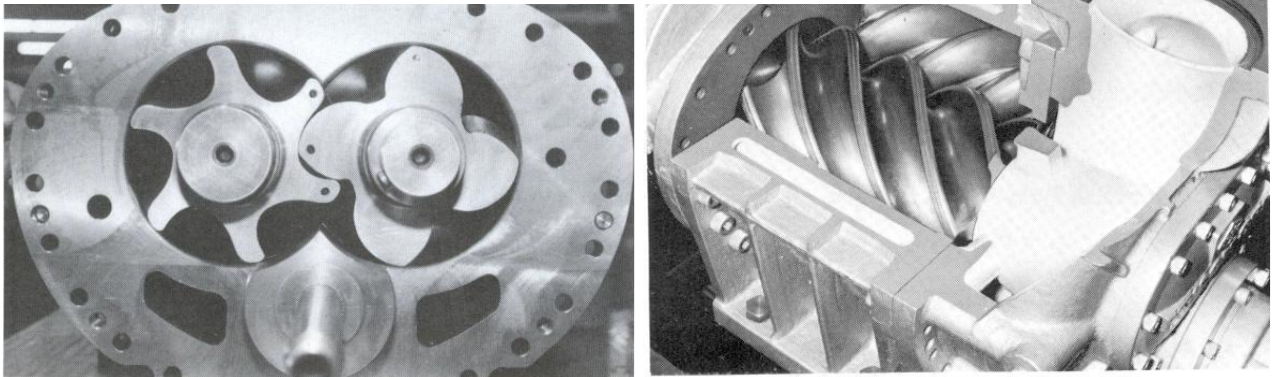
Figura 3. Esquema de compresión del equipo.



Fuente. (MYCOM, 2002)

Como se ilustra en la figura 4, los componentes esenciales del compresor son dos rotores ranurados, montados sobre cojinetes que engranan de manera helicoidal. El rotor con cuatro lóbulos convexos se llama rotor macho, mientras que el rotor con seis lóbulos cóncavos se denomina rotor hembra (MYCOM, 2002).

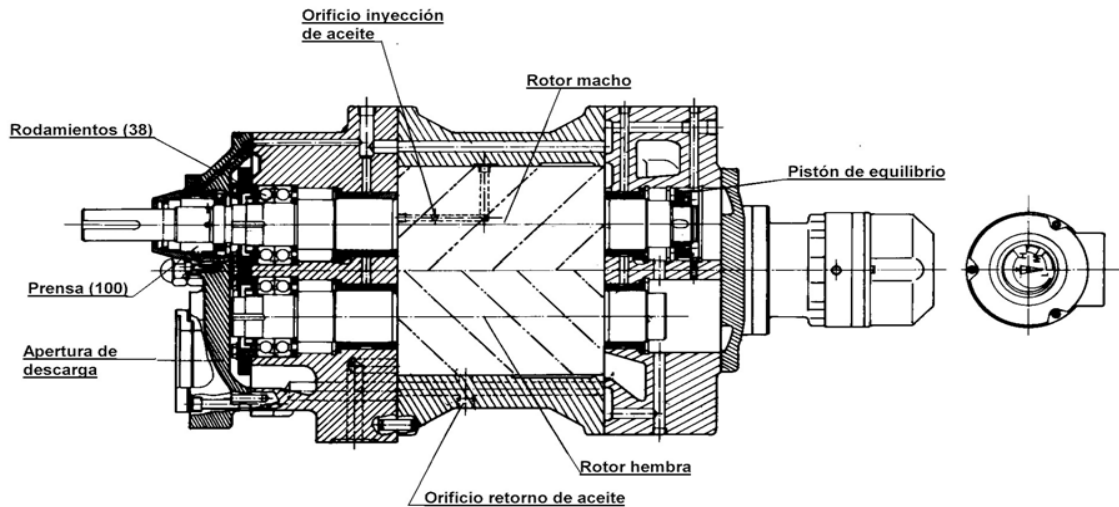
Figura 4. Vista frontal y superior de los rotores del compresor



Fuente. (MYCOM, 2002)

El rotor macho y el rotor hembra están sostenidos en ambos extremos por los cojinetes laterales en la cubierta de succión y los cojinetes principales en el cabezal del cojinete como se puede ver en la figura 5.

Figura 5. Montaje de los rotores en el compresor



Fuente. (MYCOM, 2002)

Además, los cojinetes de empuje ubicados fuera de los cojinetes principales soportan las cargas de empuje que actúan sobre los rotores, que resultan tanto de la rotación de los rotores como de la diferencia en la presión del gas refrigerante que tiene lugar durante el proceso de compresión. Para el rodamiento de empuje, los compresores de la serie V utilizan rodamientos de bolas de contacto angular.

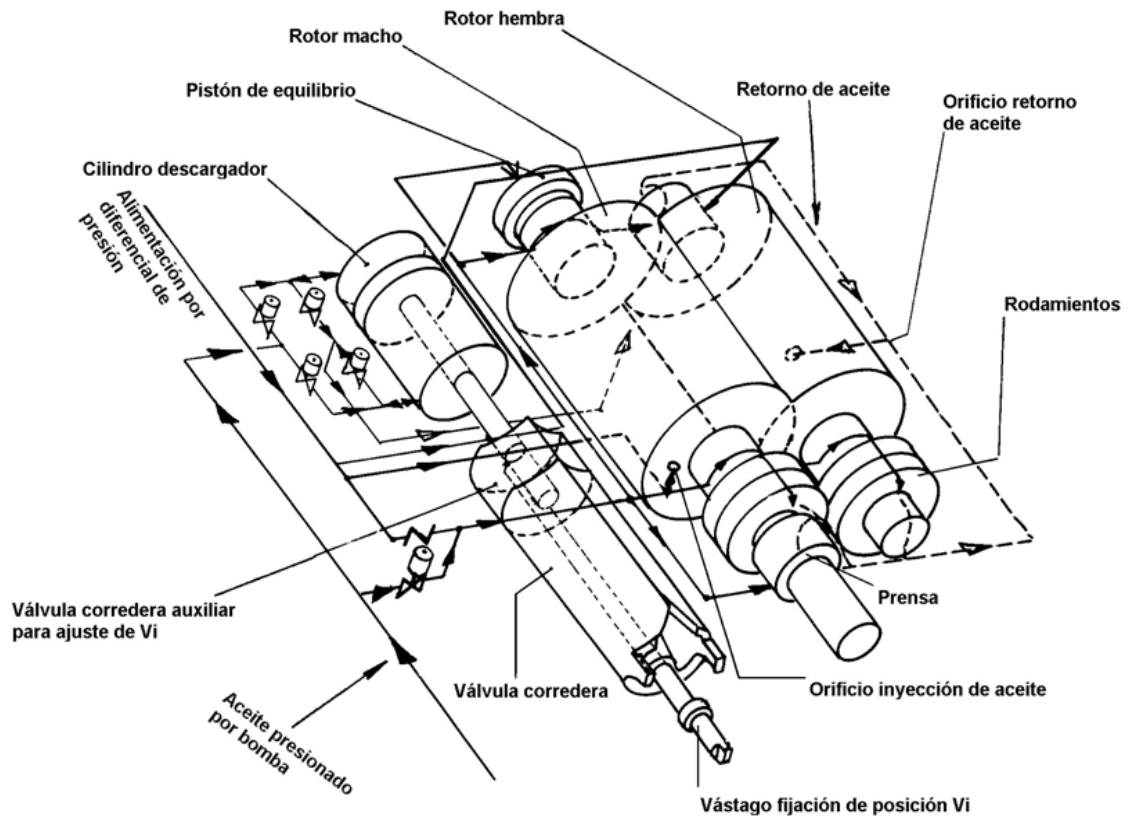
Dado que el rotor macho es una especie de engranaje helicoidal y también porque la fuerza de empuje producida por la presión de descarga es mayor que la del rotor hembra. Para reducir la carga que actúa sobre el cojinete de empuje del rotor macho, se proporciona un pistón hidráulico (pistón de equilibrio en la tapa de succión). Con esto se busca garantizar que los rodamientos de empuje tengan el mismo nivel de esfuerzo en ambos rotores (MYCOM, 2002).

4.2 Circuito de aceite

Los compresores cuentan con un sistema de suministro de aceite forzado a través de una bomba Maycom serie MP, las cuales son de desplazamiento positivo tipo tornillo de doble rotor helicoidal lo cual permite tener alta capacidad de flujo (MYCOM, 2002).

El aceite presurizado se utiliza para la lubricación de la unidad de compresión y el control de capacidad Vi como se puede apreciar en la figura 6.

Figura 6. Esquema circuito de aceite

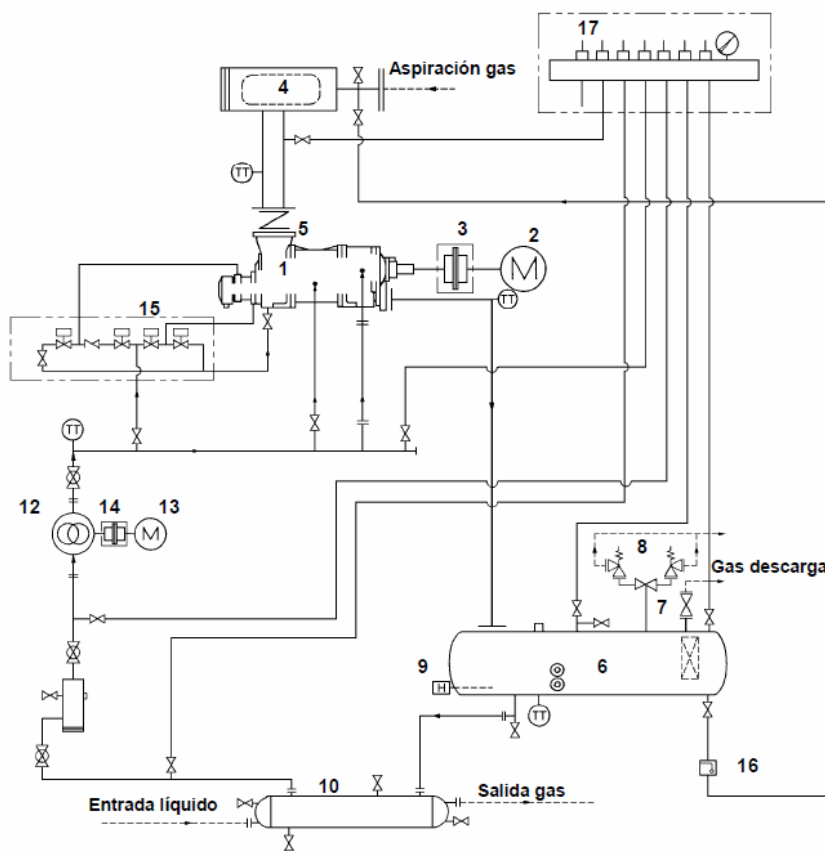


Fuente. (MYCOM, 2002)

El compresor cuenta con orificios mecanizados en el cuerpo de la unidad para el ingreso de aceite el cual cumple las tareas de lubricar y refrigerar la unidad de compresión, el aceite es arrastrado por el amoniaco gaseoso hasta el tanque separador de aceite del compresor donde es enviado al enfriador de aceite.

El propósito del enfriador de aceite es mantener la temperatura del aceite aproximadamente 14 °C por encima de la temperatura de condensación. El enfriador de aceite por termosifón es del tipo multitubular, donde el aceite circula por el lado de la carcasa y el refrigerante fluye por el lado de los tubos, como se muestra en la figura 7.

Figura 7. Esquema refrigeración de aceite por termosifón



Fuente: (MYCOM, 2002)

5. MANTENIMIENTO BASADO EN CONDICIÓN (CBM)

Según MOBLEY (2014), el mantenimiento basado en condición es una herramienta de gestión que permite programar tareas de mantenimiento preventivo y correctivo según sea necesario, utilizando el monitoreo directo de la condición operativa y la eficiencia del sistema.

A diferencia de los métodos tradicionales basados en el tiempo, el mantenimiento basado en condición se centra en determinar el tiempo real hasta la falla o pérdida de eficiencia de las máquinas o sistemas dentro de la planta. Esto permite minimizar las fallas no programadas y prevenir problemas antes de que se vuelvan graves. Sin embargo, para lograr estos objetivos, es crucial identificar correctamente la causa raíz de los problemas incipientes. Muchos programas de mantenimiento basado en condición fallan debido a métodos de monitoreo simplistas que identifican síntomas en lugar de causas reales.

Para ser efectivo, el mantenimiento basado en condición debe combinarse con una planificación de mantenimiento adecuada y contar con el conocimiento o habilidades de los técnicos de mantenimiento para realizar reparaciones y acciones correctivas apropiadas.

Algunas ventajas del mantenimiento basado en condición son:

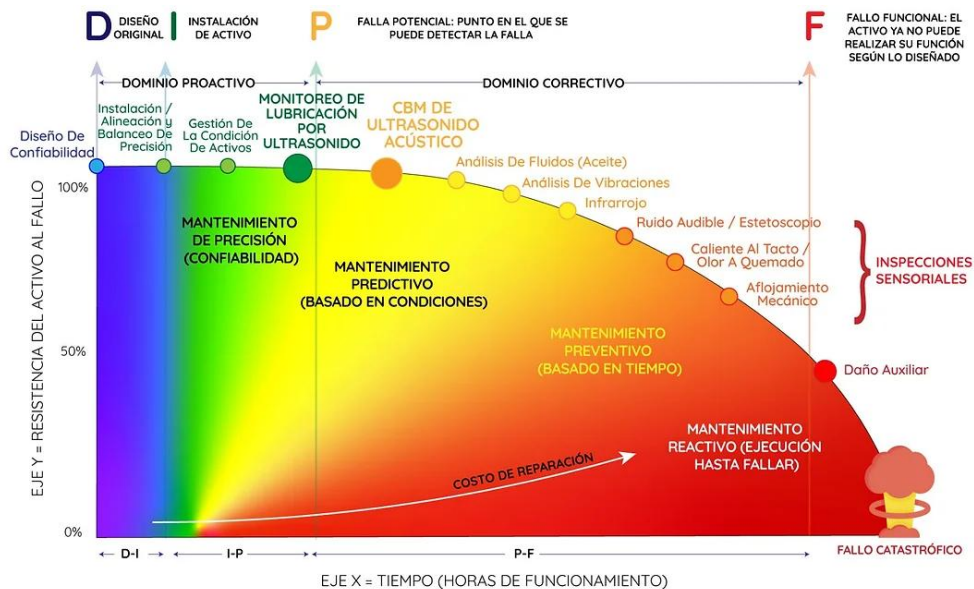
- Determinar el momento óptimo para realizar el mantenimiento preventivo, maximizando la vida útil de piezas y equipos, mejorando la gestión del inventario de repuestos y minimizando las emergencias correctivas.

Las principales desventajas del mantenimiento basado en condición son:

- Inversiones iniciales más elevadas, ya que la amortización de un sistema de CBM es inicialmente costosa debido a la incorporación de equipos de medición y recolección de datos.
- Requiere un alto nivel de formación para los técnicos de mantenimiento, quienes deben estar familiarizados con el uso de equipos tecnológicos avanzados y poseer un conocimiento profundo tanto del funcionamiento de las máquinas como de las disciplinas relacionadas.

La mayoría de los modos de falla no ocurren de forma repentina; es posible detectar el deterioro de los componentes antes de una falla total. La Figura 8 ilustra este proceso mediante la curva P-F, que muestra cómo una falla comienza, se deteriora hasta ser detectada (punto P) y, si no se corrige, continúa deteriorándose rápidamente hasta llegar a la falla funcional (punto F).

Figura 8. Curva P-F



Fuente. (CTRL Systems, Inc, 2024)

Si se detecta una falla funcional entre los puntos P y F, es posible intervenir para prevenirla o mitigar sus consecuencias, dependiendo de la rapidez con la que se desarrolle la falla.

Las tareas para identificar fallas potenciales se llaman tareas basadas en la condición, ya que los componentes se inspeccionan y se mantienen en servicio siempre que cumplan con los estándares de operación especificados, asumiendo que es improbable que ocurra una falla antes de la próxima inspección.

5.1 Técnicas de mantenimiento CBM

5.1.1 Análisis vibraciones mecánicas. El monitoreo y análisis de vibraciones son herramientas fundamentales para predecir problemas en el equipo de la planta, la maquinaria y los sistemas de proceso continuo. Son ampliamente utilizados en el mantenimiento predictivo, cuando se combinan con otras mediciones relacionadas con el proceso, como el flujo y la presión, permiten programar el mantenimiento de manera efectiva además de reducir la necesidad de tareas correctivas. Estas técnicas son aplicables a todo el equipo mecánico y la mayoría de los equipos de proceso continuo en plantas de fabricación o producción (WHITE, 2010).

De acuerdo con GARCIA (1992) podemos definir una vibración mecánica como la oscilación de un sistema mecánico en torno a una posición de equilibrio. Esta posición de equilibrio es aquella a la que el sistema llegará cuando la fuerza que actúa sobre él sea nula.

La vibración de un objeto es provocada por una fuerza de excitación. Esta fuerza puede ser aplicada externamente al objeto o puede originarse dentro de él.

Estas fuerzas dependen del estado de la máquina y comprender sus características e interacciones permite diagnosticar problemas en la máquina (GARCIA, 1992).

Las características más importantes de una vibración mecánica son: frecuencia, amplitud, velocidad y aceleración.

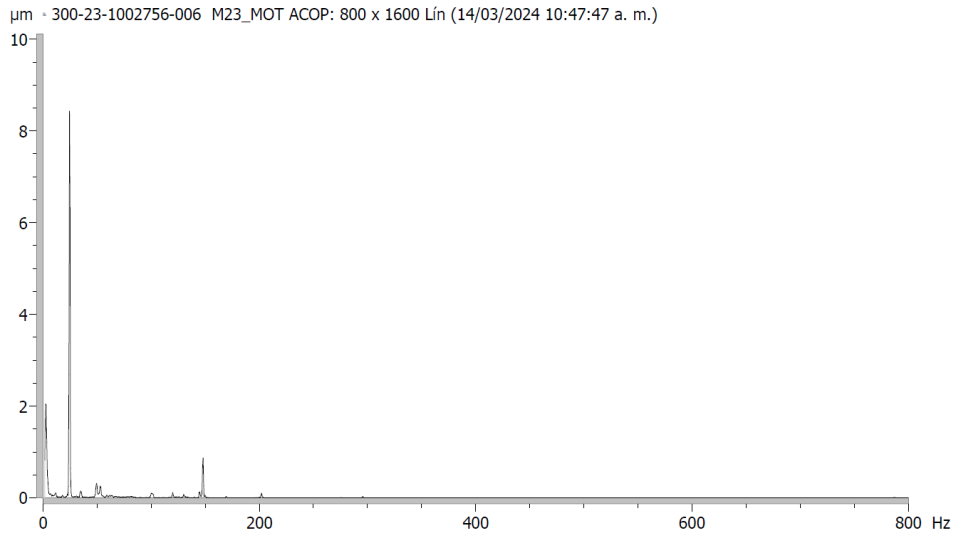
La frecuencia, medida en ciclos por minuto (CPM), es la cantidad de ciclos completos en un período de tiempo. Existe una relación significativa entre la frecuencia y la velocidad angular de los elementos rotativos, lo que ayuda a identificar el problema o el componente responsable de la vibración, ya que las fuerzas varían con la velocidad de rotación. Los problemas se detectan a través de frecuencias iguales o múltiplos de la velocidad de rotación, cada uno con una frecuencia de vibración distinta.

La amplitud de la vibración indica la condición de la máquina y puede medirse en desplazamiento como se muestra en la figura 9, velocidad como se muestra en la figura 10 o aceleración como se muestra en la figura 11. La velocidad de vibración, que considera tanto el desplazamiento como la frecuencia, es un indicador directo de la severidad de la vibración. La severidad se evalúa más precisamente midiendo la velocidad, aceleración o desplazamiento según el rango de frecuencias: para frecuencias bajas (menos de 10 Hz) se mide el desplazamiento; para el rango de 10 a 1000 Hz, se mide la velocidad; y para frecuencias altas (más de 1000 Hz), se mide la aceleración (TORRES, 2016).

La velocidad se define como la variación del desplazamiento de una superficie por unidad de tiempo mientras la máquina vibra y está directamente relacionada con la severidad de la vibración. Un cambio en la velocidad implica un cambio en la aceleración.

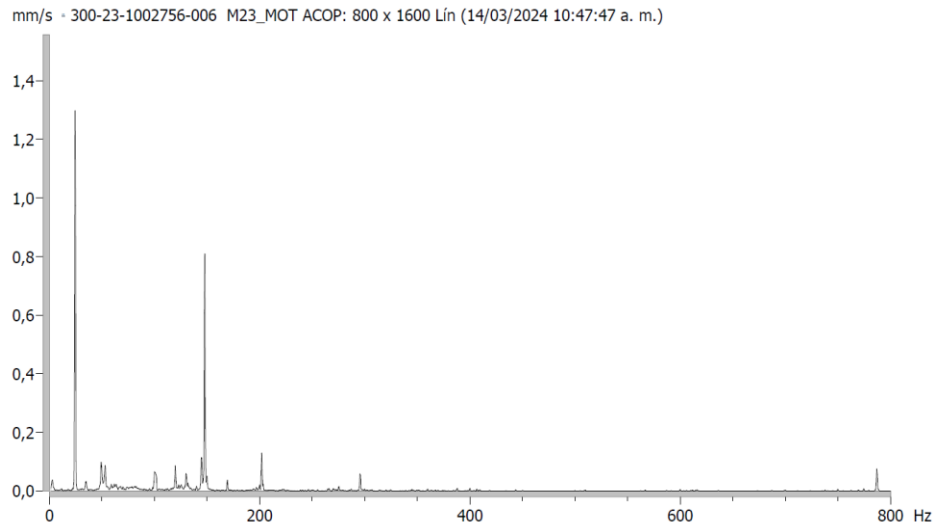
La aceleración se define como la tasa de cambio de la velocidad en la máquina y proporciona una indicación de las fuerzas dinámicas que causan la vibración.

Figura 9. Espectro de vibraciones en desplazamiento



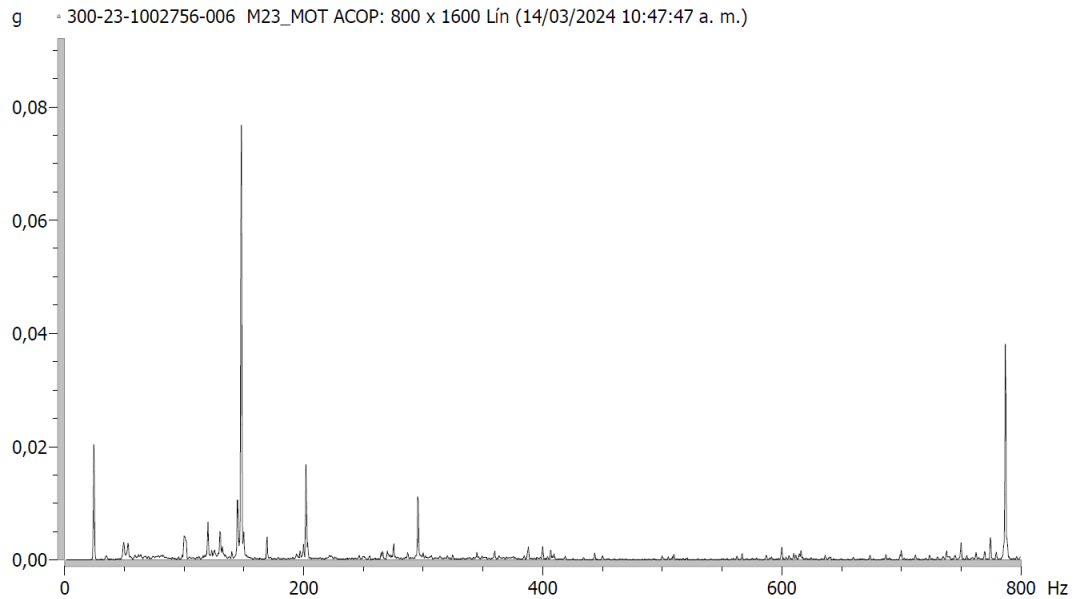
Fuente. Autor

Figura 10. Espectro de vibraciones en velocidad



Fuente. Autor

Figura 11. Espectro de vibraciones en aceleración



Fuente. Autor

La conversión de una señal de desplazamiento a velocidad o de velocidad a aceleración es equivalente a la derivación matemática, mientras que la conversión inversa (de aceleración a velocidad o de velocidad a desplazamiento) se realiza mediante la integración matemática.

Estas operaciones pueden llevarse a cabo con instrumentos de medición y análisis de vibraciones, permitiendo convertir los datos entre diferentes unidades. Prácticamente, la diferenciación introduce mucho ruido y rara vez se usa, mientras que la integración se realiza con precisión o de manera económica con un circuito eléctrico. Esto hace que el acelerómetro sea el transductor estándar para medir vibraciones, ya que su señal de salida puede integrarse fácilmente para mostrar velocidad o desplazamiento (TORRES, 2016).

Transductores de vibración. El transductor de vibraciones es un dispositivo diseñado para convertir las oscilaciones mecánicas o vibraciones presentes en un sistema o equipo en señales eléctricas que pueden ser medidas, registradas y analizadas. Su función principal es captar las variaciones en la vibración de una máquina o estructura para transformarlas en información cuantitativa que pueda ser utilizada para evaluar la salud y el estado operativo de los activos (WHITE, 2010).

Los transductores se clasifican de acuerdo con la fuente de vibración, como se puede apreciar en la tabla siguiente:

Tabla 2. Tipos de transductores de vibraciones mecánicas

| Tipo de Sensor | Parámetro de medición |
|----------------------|-----------------------|
| Sensor de Proximidad | Desplazamiento |
| Sensor de velocidad | Velocidad |
| Acelerómetro | aceleración |

Fuente. Autor

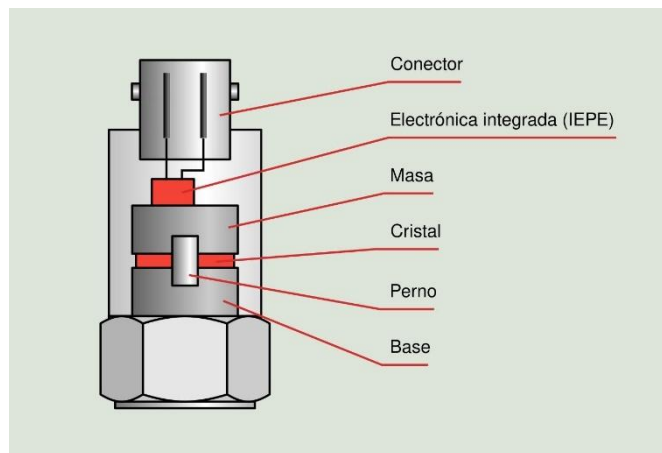
Los acelerómetros piezoeléctricos son ampliamente utilizados en aplicaciones de monitoreo de vibraciones, como en la industria de la manufactura, la automotriz, la aeroespacial, entre otras. Ofrecen una alta sensibilidad y una amplia gama de frecuencias de operación, lo que los hace adecuados para una variedad de aplicaciones de medición de vibraciones

Este sensor utiliza las propiedades piezoeléctricas de materiales cerámicos para acumular una carga interna de manera simétrica, como se muestra en la figura 12. Cuando se somete a una fuerza externa en la dirección de su polarización, se produce una carga eléctrica en su superficie. Como resultado, se genera una

diferencia de potencial entre las superficies. De forma natural, la carga y el voltaje son proporcionales a la fuerza aplicada (Fernandez, 2024).

Las mediciones de aceleración son las más adecuadas para analizar fenómenos de alta frecuencia. La aceleración es el parámetro que proporciona la mejor medida de las fuerzas internas relacionadas con una fuente específica de vibración ($F = m \times a$).

Figura 12. Componentes acelerómetro piezoeléctrico



Fuente. (Fernandez, 2024)

5.1.2. Análisis de Rodamientos mediante ultrasonido. El monitoreo de las condiciones de los rodamientos mediante ultrasonido es el enfoque más confiable para detectar fallos en etapas tempranas. Las alarmas de ultrasonido se emiten antes de que se produzca un aumento en la temperatura o un incremento en los niveles de vibración de baja frecuencia.

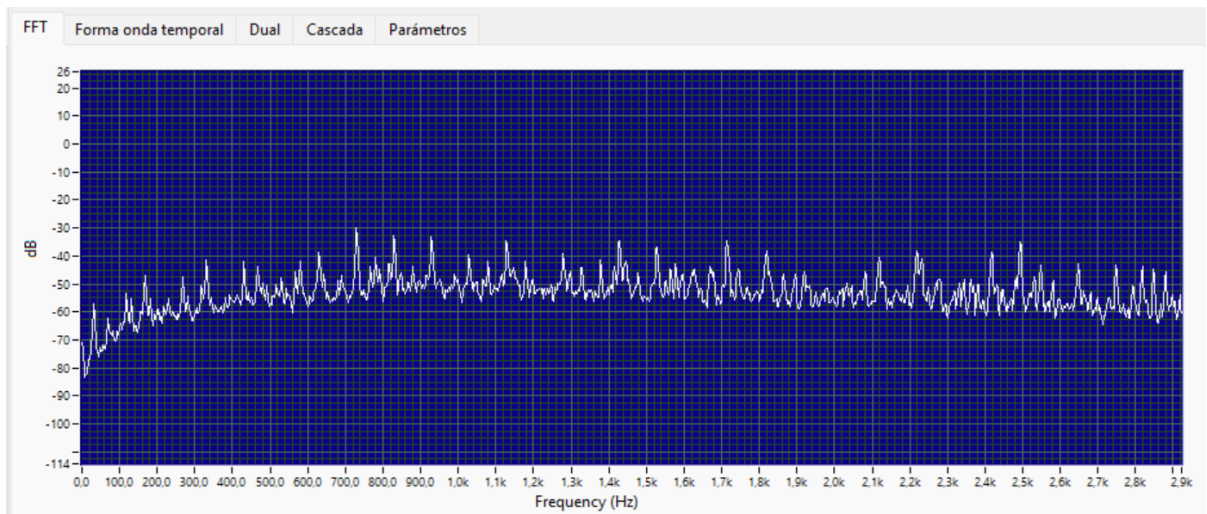
Las inspecciones de ultrasonido centradas en los rodamientos son útiles para identificar el inicio de fallos debido a fatiga, la formación de estrías en la superficie

de las pistas de contacto del rodamiento y problemas de lubricación (UE Systems, 2014).

En los componentes rodantes, como las superficies metálicas de las pistas, se produce una ligera deformación natural que genera emisiones de ondas ultrasónicas.

Un cambio en la amplitud respecto a la lectura inicial sugiere un posible fallo en el rodamiento. Si una lectura excede la línea base por 10 dB sin un cambio significativo en la calidad del sonido, indica falta de lubricación, ya que la intensidad del sonido está relacionada con la fricción. Si la lectura supera la línea base en más de 20 dB, se considera que el rodamiento ha entrado en modo de fallo (UE Systems, 2014).

Figura 13. Espectro de ultrasonido analizado mediante FFT



Fuente. Autor

Cuando un elemento rodante pasa sobre una picadura o falla en la superficie de la pista, provoca un impacto que genera una vibración en el rodamiento, percibida como un golpe repetitivo. Este sonido se puede escuchar y visualizar en

el espectro del software como un aumento en la amplitud de la frecuencia ultrasónica monitorizada del rodamiento como se muestra en la figura 13 (UE Systems, 2014).

5.1.3 Análisis de aceites. El análisis de aceites es una técnica que implica examinar muestras de aceite provenientes de equipos industriales, maquinaria o motores con el objetivo de evaluar su estado para obtener información valiosa sobre la salud y el rendimiento de los componentes lubricados.

Durante el análisis de aceites lubricantes, se realizan diversas pruebas y mediciones para identificar posibles problemas, tales como la presencia de partículas desgastadas, contaminantes, aditivos agotados, oxidación del aceite entre otros indicadores de deterioro. Algunas de las variables que se evalúan incluyen la viscosidad, la acidez, la cantidad de partículas, la presencia de agua y la composición química (ALBARRACIN, 2006).

La información obtenida a través del análisis de aceites lubricantes como se muestra en la figura 14 permite a los profesionales de mantenimiento prever posibles fallos, planificar intervenciones específicas y ajustar los programas de mantenimiento de manera proactiva. Además, el monitoreo regular de los aceites lubricantes contribuye a optimizar la eficiencia de los sistemas de lubricación, reducir los costos operativos y mejorar la confiabilidad general de los equipos.

Figura 14. Ejemplo informe análisis de aceites.

| | | | | | | | |
|---|--|---|--|---|--|---|--|
| Company: TECNA SMC PISO 10 TORRE CAJCO AV LAS AMERICAS NO 7 SANTA CRUZ BOLIVIA Customer No: 20369896 Unit No: MCD-3 | | Comp. Descr.: ENGINE Make: WAUKESHA Model: F3521G Equip. Make: Equip. Model: | | Fuel Type: Natural gas Oil Brand: CHEVRON Oil Type: HDAX LOWWASH 9EO Fluid Grade: 40 Ser.No: | | CTC Lab: 3319 WEST EARLL DRIVE PHOENIX, AZ 85017 (800)445-7930, FAX(602)252-4639 End User: End Loc: | |
|---|--|---|--|---|--|---|--|

| SPECTROCHEMICAL ANALYSIS (ppm) | | | | Iron | Chromium | Lead | Copper | Tin | Aluminum | Nickel | Silver | Silicon | Boron | Sodium | Magnesium | Calcium | Barium | Phosphorus | Zinc | Molybdenum | Titanium | Vanadium | Potassium |
|--------------------------------|------------|-------------|--------------|------|----------|------|--------|-----|----------|--------|--------|---------|-------|--------|-----------|---------|--------|------------|------|------------|----------|----------|-----------|
| Lab No | Date Taken | Time on Oil | Time on Unit | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 256367 | 25-NOV-03 | 2918 | | 6 | 0 | 0 | 1 | 5 | 3 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 8 | 1688 | 0 | 337 | 328 | 339 | 0 | 0 | 0 |
| Normal | 02-DEC-03 | 75146 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 241624 | 08-NOV-03 | 2475 | | 5 | 0 | 0 | 1 | 5 | 3 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 6 | 1508 | 0 | 305 | 345 | 299 | 0 | 0 | 0 |
| Normal | 10-NOV-03 | 76773 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 224571 | 14-OCT-03 | 1804 | | 10 | 0 | 0 | 1 | 7 | 4 | 0 | 0 | 8 | 0 | 2 | 10 | 1463 | 0 | 461 | 465 | 507 | 0 | 0 | 0 |
| Normal | 17-OCT-03 | 74127 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 203485 | 06-SEP-03 | 986 | | 2 | 0 | 0 | 0 | 5 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 5 | 1352 | 0 | 205 | 336 | 262 | 0 | 0 | 0 |
| Normal | 22-SEP-03 | 73123 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

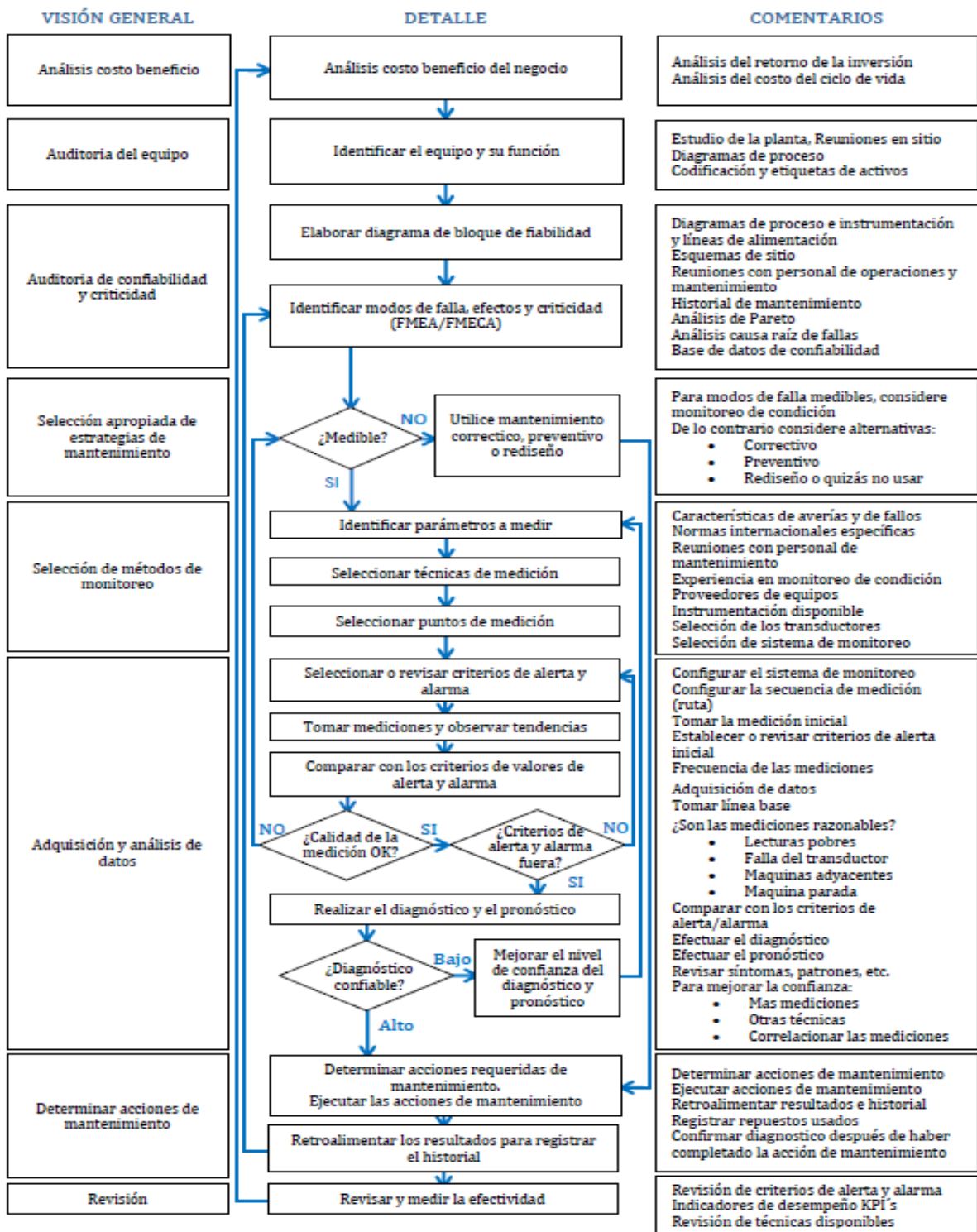
| LabNo | Physical Properties | | | | | | Additional Tests | | |
|--------|---------------------|--------|---------|-------|-----------------|--------|------------------|------|------|
| | Fuel | Visc40 | Visc100 | Water | Soot/ Solids | Glycol | NITR | OXID | TAN |
| 256367 | N/A | N/A | 13.97 | 0 | <0.1 | NEG | 8 | 8 | 1.52 |
| 241624 | N/A | N/A | 13.98 | 0 | <0.1 | NEG | 12 | 9 | 1.49 |
| 224571 | N/A | N/A | 14.02 | 0 | <0.1 | NEG | 3 | 2 | 1.20 |
| 203485 | N/A | N/A | 13.92 | 0 | <0.1 | NEG | 1 | 3 | 0.86 |

FUENTE. (Widman International SR, 2024)

5.1.4 Programa CBM basado en la norma ISO 17359. La norma ISO 17359:2018 describe un procedimiento recomendado para implementar un programa de monitoreo de la condición, detallando los pasos clave a seguir. Introduce el enfoque de identificar y detectar señales de posibles fallas fundamentales, también establece un marco para criterios de alarma, diagnósticos y pronósticos, mejorando su confiabilidad.

Además, proporciona directrices para la supervisión y diagnóstico de máquinas utilizando parámetros como vibración, temperatura, tribología, tasas de flujo, contaminación, potencia y velocidad, relacionados con estándares de rendimiento, condición y calidad. La evaluación del estado de la máquina puede basarse en su rendimiento o condición (Organización Internacional de normalización, 2018).

Figura 15. Modelo de implementación Norma ISO 17359:2018



Fuente: (Organizacion Internacional de normalizacion, 2018)

6. DISEÑO PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN CONDICIÓN

El desarrollo del plan se realizó de acuerdo con el procedimiento mostrado en la figura 16 basados en la norma ISO 17359:2018, para esto se tomará el compresor de amoníaco N°1 como objeto de estudio y los resultados serán aplicados a todo el grupo de siete equipos de compresión de la sala de máquinas. Dado que los equipos se encuentran trabajando en paralelo las cargas de trabajo son iguales y el entorno operacional es el mismo en la sala de máquinas.

Figura 16. Desarrollo del Plan de mantenimiento



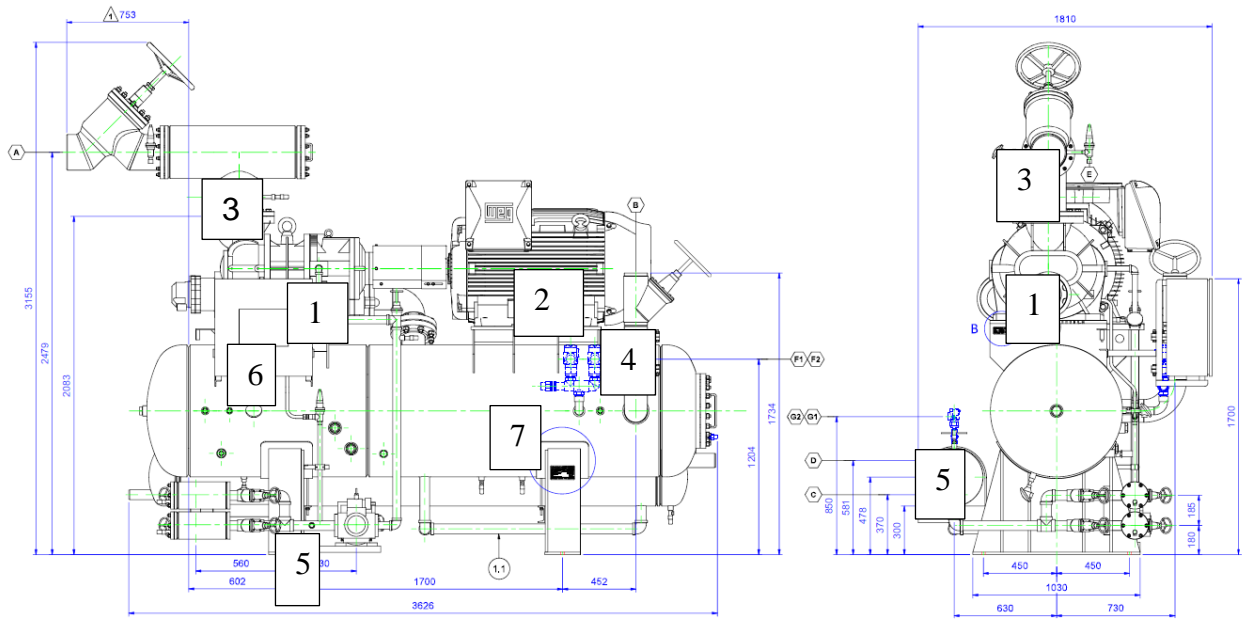
Fuente. (Organización Internacional de normalización, 2018)

6.1 Definición de fronteras y partición del equipo.

De acuerdo con la norma SAE JA1012 (SAE International, 2014) para identificar apropiadamente los modos de falla de un activo físico, se debe definir el activo. Esto incluye la selección del activo, la definición de sus límites, y la identificación del nivel de detalle más apropiado al cual se llevará a cabo el análisis.

Para nuestro caso de estudio se definen las fronteras y sistemas de los paquetes de compresión de acuerdo con la figura 17 y la tabla 3.

Figura 17. Definición de fronteras del objeto de estudio



(MYCOM, 2002)

Tabla 3. Definición de sistemas del paquete de compresión.

| Posición | Descripción |
|----------|------------------------|
| 1 | SISTEMA DE COMPRESION |
| 2 | SISTEMA MOTRIZ |
| 3 | SISTEMA DE SUCCION |
| 4 | SISTEMA DE DESCARGA |
| 5 | SISTEMA DE LUBRICACION |
| 6 | SISTEMA ELECTRICO |
| 7 | SISTEMA DE SEGURIDAD |

6.2 Contexto operacional y definición de función primaria del equipo.

El compresor de amoníaco N°1 de tipo tornillo con capacidad de 700 toneladas de refrigeración, cumple la función de aumentar la presión del amoníaco gaseoso proveniente de los tanques de baja presión (trampas de succión) para enviarlo a los condensadores evaporativos, eleva la presión del amoníaco gaseoso de (2.2 - 3.0 Kg/cm²) a (7.5 - 9.5 Kg/cm²). En condiciones normales de operación la temperatura del gas en la línea de succión oscila entre -10°C y -3°C, mientras que la temperatura del amoníaco en la descarga se encuentra en un rango entre 60°C y 80°C, en la figura 18 se muestra el diagrama de funcionamiento del compresor junto con cada uno de los pasos que componen su funcionamiento.

Como elemento impulsor se cuenta con un motor eléctrico de 700HP a 3540 RPM que opera a una tensión de 4160 Vac, el motor se encuentra acoplado de forma directa al compresor por medio de un acople tipo disco.

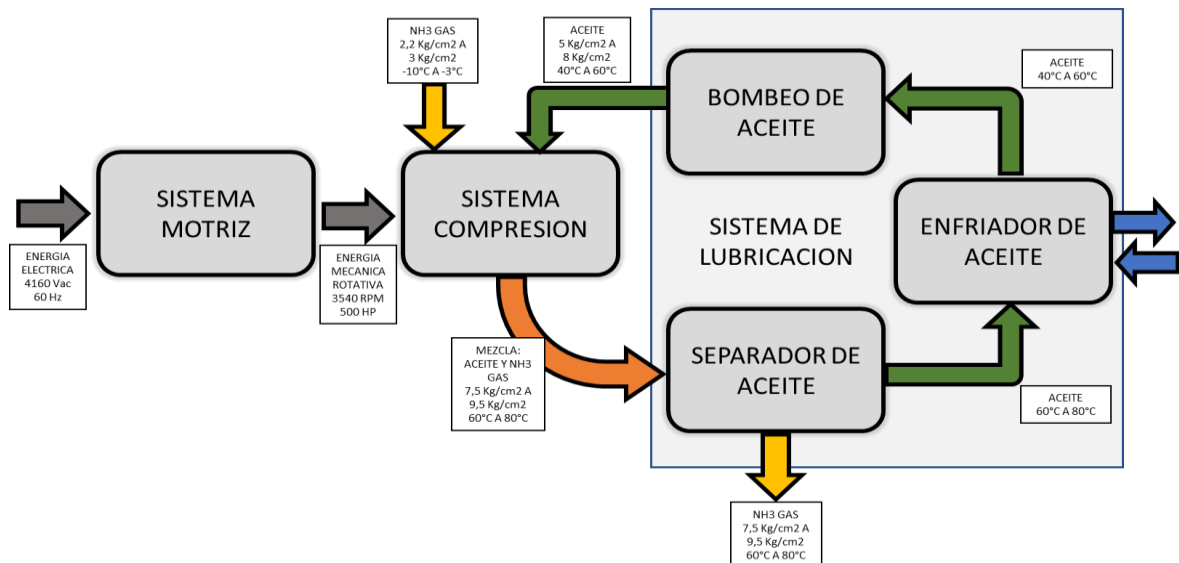
Para la modulación del compresor se emplea una válvula reguladora ubicada en la línea de succión, la apertura de dicha válvula se controla de manera automática usando como referencia la presión del amoníaco presente en la línea de succión del compresor. El sistema de refrigeración del compresor es un intercambiador de tubos y cascos que emplea amoníaco líquido que regula la temperatura del aceite manteniendo una temperatura de entre 40°C y 50°C.

Como protección del compresor, se cuenta con un sistema de parada autónomo que detiene el compresor si se detecta un nivel alto de amoníaco líquido en las trampas de succión, para evitar la entrada de líquido al cuerpo de compresión. El sistema de seguridad consta de 2 válvulas Hansen tipo pop-eye con setpoint de 250 PSI conectadas al separador de aceite del compresor mediante un manifold de 2 vías, la descarga de las válvulas de seguridad está conectada a la línea de succión

del tanque neutralizador de amoniaco (scrubber) para evitar descargas directas de amoniaco al ambiente.

El compresor es parte de un conjunto de 7 compresores conectados en paralelo que operan de acuerdo con la demanda de carga mediante el control de la presión de succión de la línea común en 2.5 Kg/cm².

Figura 18. Diagrama de funcionamiento del compresor



Fuente. Autor

Función Primaria del equipo.

Aumentar la presión del amoniaco gaseoso de 2.2 - 3.0 Kg/cm² a 7.5 - 9.5 Kg/cm² a un volumen de 700 TRF sin ninguna pérdida de contención del fluido refrigerante.

6.3 Partición de los subconjuntos

Para realizar el análisis de modos de falla debemos realizar la partición de los subconjuntos seleccionados durante la definición de las fronteras del objeto de estudio, la partición de acuerdo con la norma SAE JA1012 (SAE International, 2014) la realizamos hasta los elementos mantenibles de cada subconjunto. En la figura 19 se muestra la particion realizada para el compresor de amoniaco N°1.

Figura 19.Partición del equipo en elementos mantenibles.

| Item | Nivel 1 Partición (Ensamble) | Item | Nivel 2 Partición (Sub-Ensamble) | Item | Nivel 3 Partición (Componente) | Item | Nivel 4 Partición (sub-Componente) |
|------|------------------------------|------|----------------------------------|-------|---|---------|------------------------------------|
| 1. | SISTEMA DE COMPRESION | 1.1 | ROTOR MACHO | | | | |
| | | 1.2 | ROTOR HEMBRA | | | | |
| | | 1.3 | JUNTAS TORICAS | | | | |
| | | 1.4 | RODAMIENTOS | | | | |
| | | 1.5 | CUERPO DE ASPIRACION | | | | |
| | | 1.6 | CUERPO DE COMPRESION | | | | |
| | | 1.7 | CUERPO DE DESCARGA | | | | |
| 2. | SISTEMA MOTRIZ | 2.1 | MOTOR ELECTRICO TOSHIBA 500HP | | | | |
| | | | | 2.1.1 | RODAMIENTOS | | |
| | | | | 2.1.2 | BORNES | | |
| | | | | 2.1.3 | CARCASA(ROTOR/ESTATOR) | | |
| | | 2.2 | ACOPLE MECANICO COMPRESOR-MOTOR | | | | |
| 3. | SISTEMA DE SUCCION | 3.1 | VALVULA MANUAL | | | | |
| | | 3.2 | VALVULA CHEQUE | | | | |
| | | 3.3 | TUBERIA RED DE SUCCION | | | | |
| | | 3.4 | VALVULA DE SUCCION REGULADA | | | | |
| 4. | SISTEMA DE DESCARGA | 4.1 | VALVULA MANUAL | | | | |
| | | 4.2 | VALVULA CHEQUE | | | | |
| | | 4.3 | TUBERIA RED DE DESCARGA | | | | |
| 5. | SISTEMA DE LUBRICACION | 5.1 | BOMBEO DE ACEITE | 5.1.1 | MOTOR | 5.1.1.1 | RODAMIENTOS |
| | | | | | | 5.1.1.2 | BORNES |
| | | | | | | 5.1.1.3 | CARCASA(ROTOR/ESTATOR) |
| | | | | 5.1.2 | ACOPLE MECANICO (MOTOR-BOMBA) | | |
| | | | | 5.1.3 | RED DE SUCCION | 5.1.3.1 | FILTRO DE SUCCION |
| | | | | | | 5.1.3.2 | VALVULAS MANUALES (2) |
| | | | | 5.1.4 | RED DE DESCARGA | 5.1.4.1 | VALVULAS MANUALES (2) |
| | | | | 5.1.5 | BOMBA | | |
| | | 5.2 | SEPARADOR DE ACEITE | 5.2.1 | VALVULA MANUAL CARGUE DE ACEITE | | |
| | | | | 5.2.2 | FILTROS COALESCENTES (3) | | |
| | | | | 5.2.3 | MANHOLE | | |
| | | | | 5.2.4 | CUERPO DEL TANQUE | | |
| | | 5.3 | ENFRIADOR DE ACEITE | 5.3.1 | FILTRO IN AGUA | | |
| | | | | 5.3.2 | VALVULA SOLENOIDE | | |
| | | | | 5.3.3 | VALVULA AGUA (2) | | |
| | | | | 5.3.4 | VALVULA IN ACEITE | | |
| | | | | 5.3.5 | PASOS-TUBOS | | |
| | | | | 5.3.6 | EMPAQUE DE BRIDA (2) | | |
| 6. | SISTEMA ELECTRICO | 6.1 | INSTRUMENTACION Y CONTROL | 6.1.1 | SENSOR DE PRESION DE SUCCION | | |
| | | | | 6.1.2 | SENSOR DE PRESION DE DESCARGA | | |
| | | | | 6.1.3 | SENSOR DE PRESION DE ACEITE | | |
| | | | | 6.1.4 | SENSOR DE TEMPERATURA DE SUCCION | | |
| | | | | 6.1.5 | SENSOR DE TEMPERATURA DE DESCARGA | | |
| | | | | 6.1.6 | SENSOR DE TEMPERATURA DEL ACEITE | | |
| | | | | 6.1.7 | SENSOR DE TEMPERATURA DEL SEPARADOR | | |
| | | | | 6.1.8 | PANEL DE CONTROL MYPRO | | |
| | | 6.2 | GABINETE SUMINISTRO DE POTENCIA | 6.2.1 | MEDIDOR DE CORRIENTE DEL MOTOR | | |
| | | | | 6.2.2 | RELE DE PROTECCION ELECTRICA | | |
| | | | | 6.2.3 | CONTACTOR MEDIA TENSION | | |
| | | | | 6.2.4 | PROTECCION ELECTRICA MOTOR BOMBA ACEITE | | |
| 7. | SISTEMA DE SEGURIDAD | 7.1 | MANIFOLD DE 2 VIAS | | | | |
| | | 7.2 | VALVULA DE SEGURIDAD - 2 | | | | |
| | | 7.3 | RED DE DESCARGA | | | | |
| | | 7.4 | BOTON PARADA DE EMERGENCIA | | | | |

Fuente. Autor

6.4 Matriz de probabilidad y consecuencia.

La matriz de probabilidad y consecuencia es una herramienta utilizada para evaluar el riesgo asociado con los modos de falla identificados en un sistema.

La matriz de probabilidad y consecuencia combina dos aspectos clave:

1. **Probabilidad de ocurrencia del modo de falla:** Esto evalúa la posibilidad de que ocurra un modo de falla específico. Se puede clasificar en términos de frecuencia de ocurrencia, desde poco probable hasta muy probable.
2. **Consecuencia del modo de falla:** Esto evalúa el impacto que tendría la ocurrencia del modo de falla en el sistema o en sus usuarios. Se puede clasificar en términos de gravedad, desde insignificante hasta catastrófica.

Al combinar estas dos dimensiones, se obtiene una matriz que ayuda a priorizar los modos de falla según su riesgo relativo. Esto permite identificar aquellos modos de falla que tienen una alta probabilidad de ocurrencia y una consecuencia severa, lo que les otorga una mayor prioridad para la acción de mitigación o corrección. En la figura 20 se observa la matriz de criticidad desarrollada para los sistemas de compresión de amoníaco.

Figura 20. Matriz de probabilidad y consecuencia

| | | Consecuencia de falla | | | | | | |
|-------------|------------|---|--|--|--|----------------------------|---|---|
| | | Seguridad | Calidad | Ambiente | Produccion | Financiero | | |
| | | Lesión que no requiere tratamiento. | Fuera de especificación pero no detectable por el consumidor o sin experiencia negativa del consumidor | Evento que tiene un impacto interno insignificante | Menos de un cambio de tiempo de inactividad | Daño leve <\$ 1m | | |
| | | MTI o FAI posible | Fuera de especificación y detectable por el consumidor pero no lo suficiente como para quejarse | Menor: incumplimiento interno solo con impacto interno | Más de un turno pero menos de una semana de tiempo de inactividad | Daño menor \$ 1m a 10m | | |
| | | LTI o SIF posible | El consumidor probablemente se quejará | Significativo: queja externa pero no un incumplimiento legal | Más de una semana pero menos de 4 semanas de tiempo de inactividad | Daño local \$ 10m a \$ 30m | | |
| | | Fatalidad o MTI múltiples posibles | Posible lesión del consumidor | Mayor - incumplimiento legal | Más de 4 semanas de inactividad y más del 25% de las instalaciones afectadas | Daño mayor \$ 30m a \$ 90m | | |
| | | Múltiples muertes y posibles LTI | Múltiples lesiones del consumidor posibles | Grave - impacto externo y / o gran multa y / o cierre de la planta | Más de 4 semanas de tiempo de inactividad y más del 50% de las instalaciones afectadas | Daño extenso > 90 millones | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | |
| Probability | Improbable | Raramente o nunca ha ocurrido en la industria. Industria MTBF > 20 años | 1 | L | L | L | M | M |
| | Remoto | Ha ocurrido en la industria. Industria MTBF 10 a 20 años | 2 | L | L | M | M | H |
| | Ocasional | Sucede a veces. Instalación MTBF < 10 años | 3 | L | M | M | H | H |
| | Probable | Sucede cada pocos años. Instalación MTBF < 5 años | 4 | M | M | H | H | H |
| | Frecuente | Sucede varias veces al año. Instalación MTBF <= 1 año | 5 | M | H | H | H | H |

Fuente. Autor

6.5 Identificación modos de falla

De acuerdo con la norma SAE JA1012 (SAE International, 2014), un modo de falla se refiere a una forma específica en la que un componente o un sistema puede dejar de funcionar para cumplir con su función prevista. Esto implica una desviación del desempeño esperado o deseado.

Los modos de falla se identifican como parte del proceso de evaluación de riesgos. Se examinan los diferentes componentes y subsistemas de un sistema, luego se identifican los posibles modos en los que estos componentes pueden fallar. Estos modos de falla se describen en términos de cómo ocurre la falla, qué condiciones la desencadenan y cuáles son las consecuencias de la falla para el sistema en su conjunto. Para nuestro caso de estudio en la figura 21, se muestra el análisis de modos de falla para cada uno de los elementos mantenibles y su evaluación de criticidad de acuerdo con la matriz de la figura 20.

Figura 21. Identificación de modos de falla.

| Item No. | Nombre de Partición | Modo de falla | Causa / Efecto | Criticidad |
|----------|---------------------------------|--|----------------|------------|
| 1.1 | ROTOR MACHO | PERDIDA DE CAPACIDAD DE COMPRESION POR DESGASTE DEL ROTOR POR VIDA UTIL | Causa | Baja |
| 1.1 | ROTOR MACHO | DESGASTE PREMATURO DEL ROTOR POR DESALINEACIÓN DEL EJE POR SOLTURA MECANICA | Efecto | Media |
| 1.2 | ROTOR HEMBRA | PERDIDA DE CAPACIDAD DE COMPRESION POR DESGASTE DEL ROTOR POR VIDA UTIL | Causa | Baja |
| 1.2 | ROTOR HEMBRA | DESGASTE PREMATURO DEL ROTOR POR DESALINEACIÓN DEL EJE POR SOLTURA MECANICA | Efecto | Media |
| 1.3 | JUNTAS TORICAS | FUGAS DE ACEITE POR FISURA DE LA JUNTA POR DESGASTE POR VIDA UTIL | Causa | Media |
| 1.4 | RODAMIENTOS | DESGASTE PREMATURO DEL RODAMIENTO POR DESALINEACIÓN DEL EJE POR SOLTURA MECANICA | Efecto | Baja |
| 1.4 | RODAMIENTOS | DESGASTE DEL RODAMIENTO POR FATIGA DEL MATERIAL POR FINALIZAR CICLO DE VIDA UTIL | Causa | Media |
| 1.5 | CUERPO DE ASPIRACION | FUGA DE AMONIACO/ACEITE POR SOLTURA MECANICA DE TORNILLOS POR VIBRACION | Efecto | Media |
| 1.5 | CUERPO DE ASPIRACION | CORROSION DEL CUERPO POR METAL EXPUESTO POR PINTURA EN MAL ESTADO | Causa | Baja |
| 1.6 | CUERPO DE COMPRESION | FUGA DE AMONIACO/ACEITE POR SOLTURA MECANICA DE TORNILLOS POR VIBRACION | Efecto | Media |
| 1.6 | CUERPO DE COMPRESION | CORROSION DEL CUERPO POR METAL EXPUESTO POR PINTURA EN MAL ESTADO | Causa | Baja |
| 1.7 | CUERPO DE DESCARGA | FUGA DE AMONIACO/ACEITE POR SOLTURA MECANICA DE TORNILLOS POR VIBRACION | Efecto | Media |
| 1.7 | CUERPO DE DESCARGA | CORROSION DEL CUERPO POR METAL EXPUESTO POR PINTURA EN MAL ESTADO | Causa | Baja |
| 2.1.1 | RODAMIENTOS | DESGASTE PREMATURO DEL RODAMIENTO POR DESALINEACIÓN DEL EJE POR SOLTURA MECANICA | Efecto | Media |
| 2.1.1 | RODAMIENTOS | DESGASTE DEL RODAMIENTO POR FATIGA DEL MATERIAL POR FINALIZAR CICLO DE VIDA UTIL | Causa | Media |
| 2.1.1 | RODAMIENTOS | DESGASTE PREMATURO DEL RODAMIENTO POR FALTA DE LUBRICACION | Causa | Baja |
| 2.1.2 | BORNES | CALENTAMIENTO DE BORNES POR SOBRECARGA DEL MOTOR POR DESALINEACION DE LOS EJES | Efecto | Baja |
| 2.1.2 | BORNES | DESBALANCE DE TENSION POR MAL CONTACTO DE LOS BORNES POR SOLTURA MECANICA | Efecto | Baja |
| 2.1.3 | CARCASA(ROTOR/ESTATOR) | PERDIDA DE EFICIENCIA POR SOBRECALENTAMIENTO POR ACUMULACION INTERNA DE SUCIEDAD/POLVO | Causa | Media |
| 2.1.3 | CARCASA(ROTOR/ESTATOR) | CORTOCIRCUITO EN LA BOBINA DEL ROTOR POR PERIDA DE AISLAMIENTO POR SOBRECALENTAMIENTO | Causa | Baja |
| 2.1.3 | CARCASA(ROTOR/ESTATOR) | CORROSION DEL CUERPO POR METAL EXPUESTO POR PINTURA EN MAL ESTADO | Causa | Baja |
| 2.2 | ACOPLE MECANICO COMPRESOR-MOTOR | SOLTURA MECANICA DEL ACOPLE POR VIBRACIONES POR DESALINEACION DE LOS EJES | Causa | Media |
| 3.1 | VÁLVULA MANUAL | VALVULA CON PASO POR DESGASTE DEL ASIENTO POR VIDA UTIL | Causa | Baja |
| 3.1 | VÁLVULA MANUAL | FUGA POR DESGASTE DEL SELLO EN EL VASTAGO | Causa | Media |
| 3.2 | VÁLVULA CHEQUE | VALVULA CON PASO POR MATERIAL DESGASTADO POR VIDA UTIL | Causa | Baja |
| 3.2 | VÁLVULA CHEQUE | VALVULA OBSTRUIDA POR SUCIEDAD POR IMPUREZAS EN EL AMONIACO | Efecto | Baja |
| 3.3 | TUBERIA RED DE SUCCION | TUBERIA CORROIDA POR ACUMULACION DE HUMEDAD POR AISLAMIENTO EN MAL ESTADO | Efecto | Media |
| 3.4 | VALVULA DE SUCCION REGULADA | VALVULA CON PASO POR MATERIAL DESGASTADO POR VIDA UTIL | Causa | Baja |
| 3.4 | VALVULA DE SUCCION REGULADA | VALVULA OBSTRUIDA POR SUCIEDAD POR IMPUREZAS EN EL AMONIACO | Efecto | Baja |
| 3.4 | VALVULA DE SUCCION REGULADA | VALVULA DETENIDA POR PERDIDA DE SEÑAL DE CONTROL Y/O POTENCIA | Causa | Baja |
| 4.1 | VÁLVULA MANUAL | VALVULA CON PASO POR DESGASTE DEL ASIENTO POR VIDA UTIL | Causa | Baja |
| 4.1 | VÁLVULA MANUAL | FUGA POR DESGASTE DEL SELLO EN EL VASTAGO | Causa | Baja |
| 4.2 | VÁLVULA CHEQUE | VALVULA CON PASO POR MATERIAL DESGASTADO POR VIDA UTIL | Causa | Media |
| 4.2 | VÁLVULA CHEQUE | VALVULA OBSTRUIDA POR SUCIEDAD POR IMPUREZAS EN EL AMONIACO | Efecto | Baja |
| 4.3 | TUBERIA RED DE DESCARGA | CORROSION DE TUBERIA POR METAL EXPUESTO POR PINTURA EN MAL ESTADO | Causa | Baja |
| 5.1.1.1 | RODAMIENTOS | DESGASTE PREMATURO DEL RODAMIENTO POR DESALINEACIÓN DEL EJE POR SOLTURA MECANICA | Efecto | Media |
| 5.1.1.1 | RODAMIENTOS | DESGASTE DEL RODAMIENTO POR FATIGA DEL MATERIAL POR FINALIZAR CICLO DE VIDA UTIL | Causa | Media |
| 5.1.1.2 | BORNES | CALENTAMIENTO DE BORNES POR SOBRECARGA DEL MOTOR POR DESALINEACION DE LOS EJES | Efecto | Baja |
| 5.1.1.2 | BORNES | DESBALANCE DE TENSION POR MAL CONTACTO DE LOS BORNES POR SOLTURA MECANICA | Efecto | Media |
| 5.1.1.3 | CARCASA(ROTOR/ESTATOR) | PERDIDA DE EFICIENCIA POR SOBRECALENTAMIENTO POR ACUMULACION INTERNA DE SUCIEDAD/POLVO | Causa | Media |
| 5.1.1.3 | CARCASA(ROTOR/ESTATOR) | CORTOCIRCUITO EN LA BOBINA DEL ROTOR POR PERIDA DE AISLAMIENTO POR SOBRECALENTAMIENTO | Causa | Baja |
| 5.1.1.3 | CARCASA(ROTOR/ESTATOR) | CORROSION DEL CUERPO POR METAL EXPUESTO POR PINTURA EN MAL ESTADO | Causa | Baja |
| 5.1.2 | ACOPLE MECANICO (MOTOR-BOMBA) | SOLTURA MECANICA DEL ACOPLE POR VIBRACIONES POR DESALINEACION DE LOS EJES | Causa | Baja |
| 5.1.3.1 | FILTRO DE SUCCION | PERDIDA DE CAPACIDAD POR FILTRO OBSTRUIDO POR ACUMULACION DE SUCIEDAD | Causa | Media |
| 5.1.3.1 | FILTRO DE SUCCION | PASO DE IMPUREZAS AL SISTEMA POR FILTRO ROTO POR DESGASTE POR VIDA UTIL | Causa | Baja |
| 5.1.3.2 | VÁLVULAS MANUALES (2) | VALVULA CON PASO POR DESGASTE DEL ASIENTO POR VIDA UTIL | Causa | Baja |
| 5.1.3.2 | VÁLVULAS MANUALES (2) | FUGA POR DESGASTE DEL SELLO EN EL VASTAGO | Causa | Media |

| | | | | |
|---------|---|--|--------|-------|
| 5.1.4.1 | VÁLVULAS MANUALES (2) | VALVULA CON PASO POR DESGASTE DEL ASIENTO POR VIDA UTIL | Causa | Baja |
| 5.1.4.1 | VÁLVULAS MANUALES (2) | FUGA POR DESGASTE DEL SELLO EN EL VASTAGO | Causa | Media |
| 5.1.5 | BOMBA | FUGA DE ACEITE POR RUPTURA DEL SELLO POR DESGASTE POR VIDA UTIL | Causa | Media |
| 5.2.1 | VÁLVULA MANUAL CARGUE DE ACEITE | VALVULA CON PASO POR DESGASTE DEL ASIENTO POR VIDA UTIL | Causa | Baja |
| 5.2.1 | VÁLVULA MANUAL CARGUE DE ACEITE | FUGA POR DESGASTE DEL SELLO EN EL VASTAGO | Causa | Media |
| 5.2.2 | FILTROS COALESCENTES (3) | PERDIDA DE EFICIENCIA POR DESGASTE POR FIN DE VIDA UTIL | Causa | Media |
| 5.2.3 | MANHOLE | FUGAS POR RUPTURA DEL SELLO POR DESGASTE POR VIDA UTIL | Causa | Media |
| 5.2.3 | MANHOLE | FUGAS POR SOLTURA MECANICA DEL MANHOLE POR MAL PROCEDIMIENTO DE MANTENIMIENTO | Efecto | Media |
| 5.2.4 | CUERPO DEL TANQUE | DISMINUCION DEL NIVEL DE ACEITE DEL COMPRESOR POR DESGASTE DEL COALESCENTE POR VIDA UTIL | Causa | Media |
| 5.2.4 | CUERPO DEL TANQUE | CORROSION DEL CUERPO POR METAL EXPUESTO POR PINTURA EN MAL ESTADO | Causa | Baja |
| 5.3.1 | FILTRO IN AGUA | PERDIDA DE CAPACIDAD POR FILTRO OBSTRUIDO POR ACUMULACION DE SUCIEDAD | Causa | Baja |
| 5.3.2 | VÁLVULA SOLENOIDE | VALVULA CON PASO POR MATERIAL DESGASTADO POR VIDA UTIL | Causa | Baja |
| 5.3.2 | VÁLVULA SOLENOIDE | VALVULA OBSTRUIDA POR SUCIEDAD POR IMPUREZAS EN AGUA | Efecto | Baja |
| 5.3.2 | VÁLVULA SOLENOIDE | VALVULA DETENIDA POR PERDIDA DE SEÑAL DE CONTROL Y/O POTENCIA | Causa | Media |
| 5.3.3 | VÁLVULA AGUA (2) | VALVULA CON PASO POR DESGASTE DEL ASIENTO POR VIDA UTIL | Causa | Baja |
| 5.3.3 | VÁLVULA AGUA (2) | FUGA POR DESGASTE DEL SELLO EN EL VASTAGO | Causa | Baja |
| 5.3.4 | VÁLVULA IN ACEITE | VALVULA CON PASO POR DESGASTE DEL ASIENTO POR VIDA UTIL | Causa | Baja |
| 5.3.4 | VÁLVULA IN ACEITE | FUGA POR DESGASTE DEL SELLO EN EL VASTAGO | Causa | Media |
| 5.3.5 | CASCO-TUBOS | CORROSION DE TUBERIA POR METAL EXPUESTO POR PINTURA EN MAL ESTADO | Causa | Baja |
| 5.3.5 | CASCO-TUBOS | PERDIDA DE EFICIENCIA POR ACUMULACION DE SUCIEDAD EN LOS TUBOS | Causa | Media |
| 5.3.6 | EMPAQUE DE BRIDA (2) | FUGAS DE AGUA POR EMPAQUE FISURADO POR ALTA PRESION/TEMPERATURA | Causa | Baja |
| 6.1.1 | SENSOR DE PRESION DE SUCCION | EQUIPO DESCALIBRADO | Causa | Media |
| 6.1.1 | SENSOR DE PRESION DE SUCCION | FALLA DE COMPONENTES POR DESGASTE POR VIDA UTIL | Causa | Media |
| 6.1.1 | SENSOR DE PRESION DE SUCCION | PERDIDA DE LA SEÑAL POR MAL CONTACTO DE LOS BORNES POR SOLTURA MECANICA | Causa | Media |
| 6.1.2 | SENSOR DE PRESION DE DESCARGA | EQUIPO DESCALIBRADO | Causa | Media |
| 6.1.2 | SENSOR DE PRESION DE DESCARGA | FALLA DE COMPONENTES POR DESGASTE POR VIDA UTIL | Causa | Media |
| 6.1.2 | SENSOR DE PRESION DE DESCARGA | PERDIDA DE LA SEÑAL POR MAL CONTACTO DE LOS BORNES POR SOLTURA MECANICA | Causa | Media |
| 6.1.3 | SENSOR DE PRESION DE ACEITE | EQUIPO DESCALIBRADO | Causa | Media |
| 6.1.3 | SENSOR DE PRESION DE ACEITE | FALLA DE COMPONENTES POR DESGASTE POR VIDA UTIL | Causa | Media |
| 6.1.3 | SENSOR DE PRESION DE ACEITE | PERDIDA DE LA SEÑAL POR MAL CONTACTO DE LOS BORNES POR SOLTURA MECANICA | Causa | Media |
| 6.1.4 | SENSOR DE TEMPERATURA DE SUCCION | EQUIPO DESCALIBRADO | Causa | Media |
| 6.1.4 | SENSOR DE TEMPERATURA DE SUCCION | FALLA DE COMPONENTES POR DESGASTE POR VIDA UTIL | Causa | Media |
| 6.1.4 | SENSOR DE TEMPERATURA DE SUCCION | PERDIDA DE LA SEÑAL POR MAL CONTACTO DE LOS BORNES POR SOLTURA MECANICA | Causa | Media |
| 6.1.5 | SENSOR DE TEMPERATURA DE DESCARGA | EQUIPO DESCALIBRADO | Causa | Media |
| 6.1.5 | SENSOR DE TEMPERATURA DE DESCARGA | FALLA DE COMPONENTES POR DESGASTE POR VIDA UTIL | Causa | Media |
| 6.1.5 | SENSOR DE TEMPERATURA DE DESCARGA | PERDIDA DE LA SEÑAL POR MAL CONTACTO DE LOS BORNES POR SOLTURA MECANICA | Causa | Media |
| 6.1.6 | SENSOR DE TEMPERATURA DEL ACEITE | EQUIPO DESCALIBRADO | Causa | Media |
| 6.1.6 | SENSOR DE TEMPERATURA DEL ACEITE | FALLA DE COMPONENTES POR DESGASTE POR VIDA UTIL | Causa | Media |
| 6.1.6 | SENSOR DE TEMPERATURA DEL ACEITE | PERDIDA DE LA SEÑAL POR MAL CONTACTO DE LOS BORNES POR SOLTURA MECANICA | Causa | Media |
| 6.1.7 | SENSOR DE TEMPERATURA DEL SEPARADOR | EQUIPO DESCALIBRADO | Causa | Media |
| 6.1.7 | SENSOR DE TEMPERATURA DEL SEPARADOR | FALLA DE COMPONENTES POR DESGASTE POR VIDA UTIL | Causa | Media |
| 6.1.7 | SENSOR DE TEMPERATURA DEL SEPARADOR | PERDIDA DE LA SEÑAL POR MAL CONTACTO DE LOS BORNES POR SOLTURA MECANICA | Causa | Media |
| 6.1.8 | PANEL DE CONTROL MYPRO | COMPRESOR NO OPERA POR PERDIDA DE DATOS/PROGRAMA DEL CONTROLADOR | Causa | Baja |
| 6.2.1 | MEDIDOR DE CORRIENTE DEL MOTOR | FALLA DE COMPONENTES POR DESGASTE POR VIDA UTIL | Causa | Baja |
| 6.2.1 | MEDIDOR DE CORRIENTE DEL MOTOR | PERDIDA DE LA SEÑAL POR MAL CONTACTO DE LOS BORNES POR SOLTURA MECANICA | Causa | Media |
| 6.2.2 | RELÉ DE PROTECCION ELECTRICA | FALLAS EN BOBINA POR SOBRECALENTAMIENTO POR ACUMULACION DE SUCIEDAD | Efecto | Media |
| 6.2.2 | RELÉ DE PROTECCION ELECTRICA | ACCIONAMIENTO DEL RELE POR MAL CONTACTO DE SEÑAL DE CONTROL POR SOLTURA MECANICA | Causa | Baja |
| 6.2.2 | RELÉ DE PROTECCION ELECTRICA | PERDIDA DE CONTINUIDAD ELECTRICA POR CONTACTOS SULFATADOS POR SUCIEDAD O HUMEDAD | Efecto | Baja |
| 6.2.3 | CONTACTOR MEDIA TENSION | CONTACTO ABIERTO POR FUSIBLE DAÑADO POR SOBRECORRIENTE | Causa | Media |
| 6.2.3 | CONTACTOR MEDIA TENSION | SOBRECALENTAMIENTO POR MAL CONTACTO DEL BORNE POR ACUMULACION DE SUCIEDAD | Efecto | Media |
| 6.2.4 | PROTECCION ELECTRICA MOTOR BOMBA ACEITE | FALLAS EN BOBINA POR SOBRECALENTAMIENTO POR ACUMULACION DE SUCIEDAD | Efecto | Baja |
| 6.2.4 | PROTECCION ELECTRICA MOTOR BOMBA ACEITE | PERDIDA DE CONTINUIDAD ELECTRICA POR CONTACTOS SULFATADOS POR SUCIEDAD O HUMEDAD | Efecto | Baja |
| 7.1 | MANIFOLD DE 2 VIAS | MANIFOLD OBSTRUIDO POR MECANISMO ATASCADO POR ACUMULACION DE OXIDO POR HUMEDAD | Efecto | Media |
| 7.1 | MANIFOLD DE 2 VIAS | MANIFOLD CON FUGA POR DESGASTE DEL SELLO EN EL VASTAGO | Causa | Media |
| 7.2 | VÁLVULA DE SEGURIDAD - 2 | VALVULA CON VIDA UTIL VENCIDA | Causa | Media |
| 7.2 | VÁLVULA DE SEGURIDAD - 2 | VALVULA OBSTRUIDA POR ACUMULACION DE SUCIEDAD O CORROSION | Efecto | Media |
| 7.3 | RED DE DESCARGA | CORROSION DE TUBERIA POR METAL EXPUESTO POR PINTURA EN MAL ESTADO | Causa | Baja |
| 7.4 | BOTON PARADA DE EMERGENCIA | RUPTURA DEL MECANISMO DE ACTIVACION POR GOLPE OCASIONADO ACCIDENTALMENTE | Efecto | Media |

Fuente. Autor

6.6 Identificación tareas programadas de mantenimiento

De acuerdo con la norma SAE JA 1011 (SAE International, 1999), Cualquier tarea basada en condición, ya sea predictiva o de monitoreo, debe cumplir con estos criterios:

- a. Debe haber una falla potencial claramente definida.
- b. Debe existir un intervalo P-F identificable (período para el desarrollo de la falla).
- c. El intervalo de la tarea debe ser menor que el intervalo P-F más corto probable.
- d. Debe ser físicamente posible realizar la tarea en intervalos menores que el intervalo P-F.
- e. El tiempo entre la detección de una falla potencial y la falla funcional debe ser suficientemente largo para permitir acciones preventivas que eviten, eliminen o minimicen las consecuencias del modo de falla.

Las tareas basadas en condición se denominan así porque los elementos se inspeccionan y se dejan en servicio bajo la condición de que continúen cumpliendo con los estándares de operación especificados. Es decir, se asegura que el modo de falla considerado no ocurra antes de la próxima revisión.

Aplicando el diagrama de decisión de la figura 22. a nuestro caso de estudio obtenemos que para prevenir los modos de falla identificados las tareas requeridas deben ser rutinas de monitoreo del equipo.

Tabla 4. Variables de monitoreo según tipo de maquina

| Parámetros de monitoreo de condición | | |
|--------------------------------------|--------------------|-------------|
| parámetro | Motores eléctricos | Compresores |
| Temperatura Operación | x | x |
| presión descarga | | x |
| Corriente | x | |
| vibración | x | x |
| Ultrasonido | x | x |
| análisis de aceite | x | x |
| presión de aceite | | x |
| Velocidad | x | x |

Fuente. Autor

En la tabla 4 se muestran las variables de monitoreo de acuerdo con el tipo de maquina sugeridas por la norma ISO 17359 (Organizacion Internacional de normalizacion, 2018).

En la figura 23 se listan las tareas de monitoreo de condición requeridas para cada uno de los modos de falla probables de los elementos de estudio de nuestro sistema de compresión de amoniaco.

Figura 23. Rutinas de monitoreo de condición

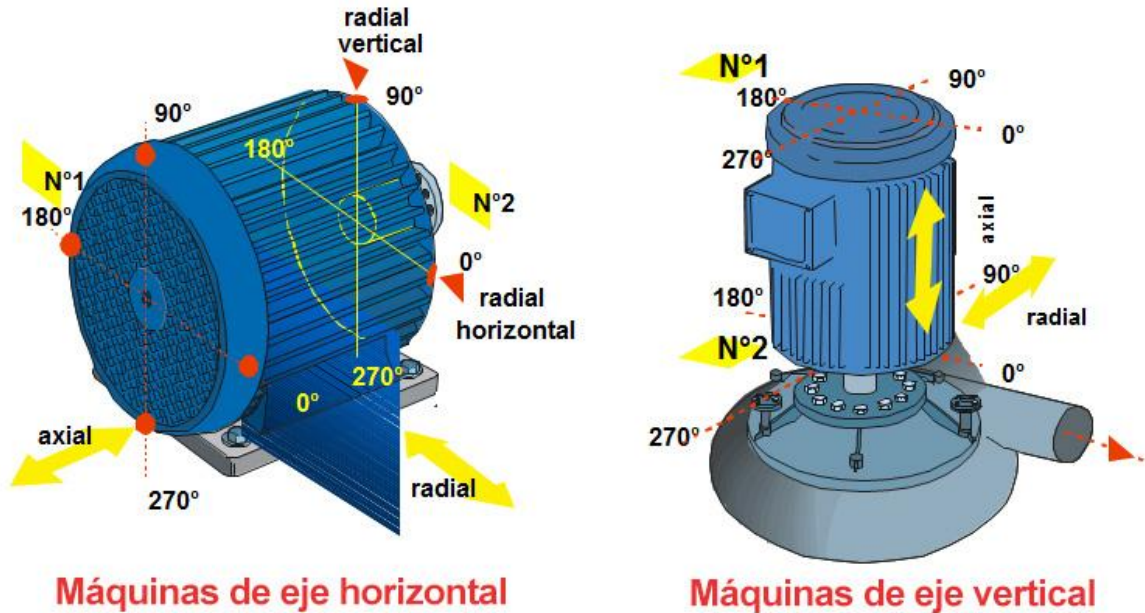
| ITEM NO. | EQUIPO, ENSAMBLE O COMPONENTE | MODOS DE FALLA | EFECTO | TAREA | DESCRIPCION DE LA TAREA |
|----------|---------------------------------|---|--------|-------|---|
| 1.1 | ROTOR MACHO | PERDIDA DE CAPACIDAD DE COMPRESION POR DESGASTE DEL ROTOR POR DETERIORO DEL ACEITE | HNS | I/F | ANALISIS DE ACEITE DEL CIRCUITO DE LUBRICACION |
| 1.2 | ROTOR HEMBRA | PERDIDA DE CAPACIDAD DE COMPRESION POR DESGASTE DEL ROTOR POR DETERIORO DEL ACEITE | HNS | I/F | ANALISIS DE ACEITE DEL CIRCUITO DE LUBRICACION |
| 1.4 | RODAMIENTOS | DESGASTE DEL RODAMIENTO POR FATIGA DEL MATERIAL POR FINALIZAR CICLO DE VIDA UTIL | HNS | I/F | ANALISIS DE VIBRACIONES PARA DETERMINAR ESTADO DE LOS RODAMIENTOS |
| 1.4 | RODAMIENTOS | DESGASTE PREMATURO DEL RODAMIENTO POR DESALINEACIÓN DEL EJE POR SOLTURA MECANICA | HNS | DS | PRUEBA DE ULTRASONIDO PARA VERIFICAR ESTADO |
| 1.5 | COJINETES | DESGASTE DEL COJINETE POR FATIGA DEL MATERIAL POR FINALIZAR CICLO DE VIDA UTIL | HNS | I/F | ANALISIS DE VIBRACIONES PARA DETERMINAR ESTADO DE LOS COJINETES |
| 2.1.1 | RODAMIENTOS | DESGASTE PREMATURO DEL RODAMIENTO POR DESALINEACIÓN DEL EJE POR SOLTURA MECANICA | HNS | I/F | PRUEBA DE ULTRASONIDO PARA VERIFICAR ESTADO |
| 2.1.1 | RODAMIENTOS | DESGASTE DEL RODAMIENTO POR FATIGA DEL MATERIAL POR FINALIZAR CICLO DE VIDA UTIL | HNS | I/F | ANALISIS DE VIBRACIONES PARA DETERMINAR ESTADO DE LOS RODAMIENTOS |
| 2.1.3 | CARCASA(ROTOR/ESTATOR) | CORTOCIRCUITO EN LA BOBINA DEL ROTOR POR PERIDA DE AISLAMIENTO POR SOBRECALENTAMIENTO | HNS | I/F | REALIZAR PRUEBAS DE AISLAMIENTO AL BOBINADO |
| 2.2 | ACOPLE MECANICO COMPRESOR-MOTOR | SOLTURA MECANICA DEL ACOPLER POR VIBRACIONES POR DESALINEACION DE LOS EJES | HNS | I/F | PRUEBA DE ULTRASONIDO PARA VERIFICAR ESTADO |
| 5.1.1.1 | RODAMIENTOS | DESGASTE DEL RODAMIENTO POR FATIGA DEL MATERIAL POR FINALIZAR CICLO DE VIDA UTIL | HNS | I/F | ANALISIS DE VIBRACIONES PARA DETERMINAR ESTADO DE LOS RODAMIENTOS |
| 5.1.1.3 | CARCASA(ROTOR/ESTATOR) | CORTOCIRCUITO EN LA BOBINA DEL ROTOR POR PERIDA DE AISLAMIENTO POR SOBRECALENTAMIENTO | HNS | I/F | REALIZAR PRUEBAS DE AISLAMIENTO AL BOBINADO |

Fuente. Autor

6.7 Definición de los puntos de muestreo

Las vibraciones en maquinaria rotativa, causadas por fuerzas cíclicas internas, no pueden medirse directamente. En su lugar, se mide su transmisión a través de la estructura de la máquina, y el sensor de vibraciones registra la respuesta de la impedancia mecánica a estas fuerzas. Para minimizar los efectos de la impedancia y medir correctamente las fuerzas internas, el punto de medición debe ubicarse lo más cerca posible del soporte del eje en una superficie rígida, ya que la señal se atenúa con la distancia. En la figura 24 se ilustra los puntos de toma de acuerdo a la posición del eje de movimiento del equipo.

Figura 24. Estándar posicionamiento de transductores de vibraciones mecánicas.

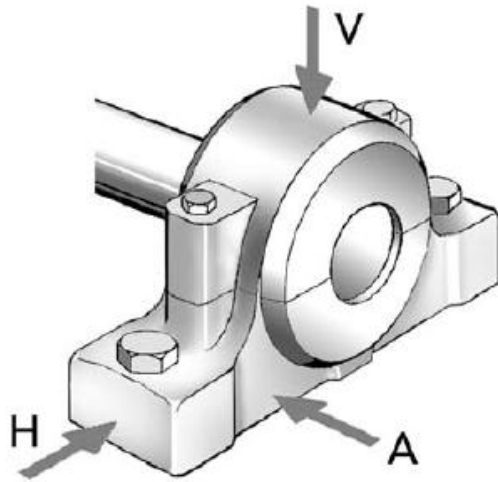


(pruftechnik, 2024)

Para nuestro caso de estudio se han definido los siguientes puntos de muestreo de acuerdo con la norma ISO 10816 como se muestran en la figura 26.

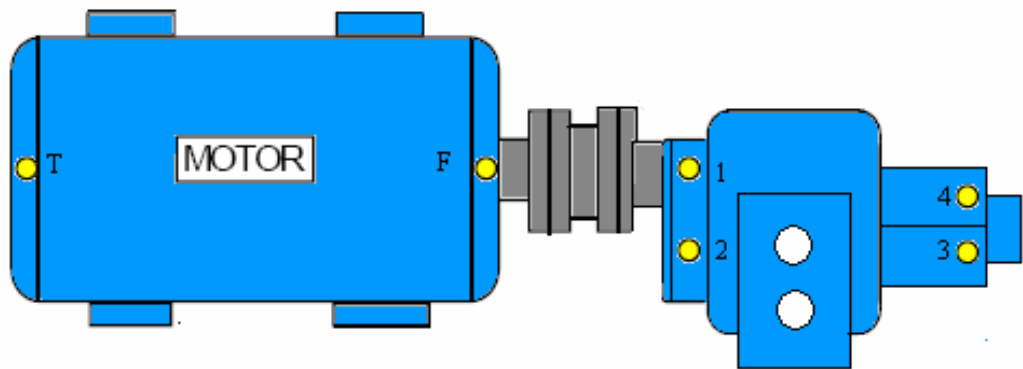
- La vibración horizontal (H) en el plano de rotación es la más representativa de la condición de equilibrio.
- La vibración vertical (V) en el plano de rotación es la más representativa de la debilidad estructural.
- La vibración axial (A) a lo largo de la línea del eje es la más representativa de una alineación defectuosa y ejes doblados.

Figura 25. Planos de medición de vibración



(WHITE, 2010)

Figura 26. Definición de puntos de toma de datos



Fuente. Autor

Tabla 5. Definición puntos de toma para compresores

| Puntos de Medición | |
|---------------------|-----------------|
| Motor | Compresor |
| Punto Frontal (F) : | Punto N° 1 : |
| Vertical (FV) | Vertical (1V) |
| Horizontal (FH) | Horizontal (1H) |
| Axial (FA) | Axial (1A) |
| Punto Trasero (F) : | Punto N° 2 : |
| Vertical (TV) | Vertical (2V) |
| Horizontal (TH) | Horizontal (2H) |
| Axial (TA) | Axial (2A) |
| | Punto N° 3 : |
| | Vertical (3V) |
| | Horizontal (3H) |
| | Axial (3A) |
| | Punto N° 4 : |
| | Vertical (4V) |
| | Horizontal (4H) |
| | Axial (4A) |

Fuente. Autor

6.8 Adquisición de datos

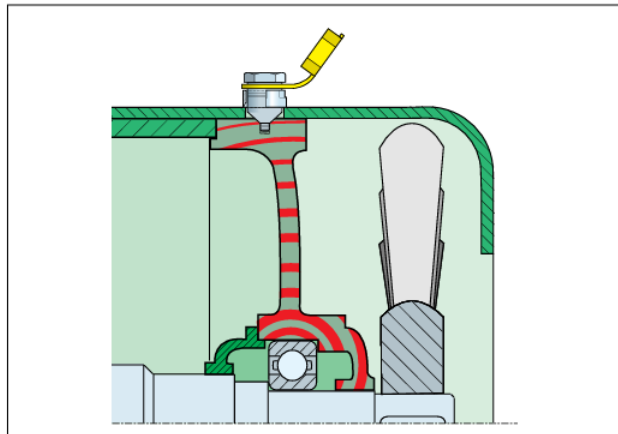
El monitoreo de máquinas debe realizarse cuando estas alcanzan condiciones operativas predeterminadas para establecer líneas base. Las mediciones posteriores se comparan con estos valores de referencia para detectar cambios y resaltar fallas.

La firma de vibración de la máquina depende de sus parámetros de operación y su estado físico. Estos parámetros incluyen la velocidad de operación, la carga y la presión del compresor. Es esencial recopilar datos de vibración bajo condiciones normales de operación para mantener la coherencia con firmas de vibración previas para poder establecer tendencias a lo largo del tiempo.

Las velocidades de los motores de inducción no deben variar significativamente entre recopilaciones, por lo que las condiciones de carga deben

ser lo más constantes posible. Además, el nivel de vibración causado por fuentes externas, como máquinas cercanas, debe ser consistente; los datos no deben recopilarse con estas máquinas apagadas si las recopilaciones anteriores se realizaron mientras estaban en funcionamiento.

Figura 27. Mounting Pad para toma de vibraciones o ultrasonido por contacto.



(WHITE, 2010)

Para proporcionar una superficie de calidad para montar los acelerómetros se debe realizar la instalación de mounting pads en los puntos definidos para el análisis como se muestra en la figura 27, de esta forma se mejorará la respuesta de frecuencia del sensor y la repetibilidad de la recopilación de datos.

La evaluación de la condición de la máquina según la norma ISO 10816 requiere una clasificación correcta de la máquina monitoreada, por lo cual se cuenta con una base de datos de consulta con los datos técnicos requeridos para la configuración del equipo de medición como se muestra en la figura 28.

Figura 28. Tabla de datos de equipos para toma de mediciones



DETALLE DE EQUIPOS
INGENIERÍA Y SERVICIOS

AREA: SDM
MAQUINA: MYCOM 8
EQUIPO: COMPRESOR

| | |
|-----------------------------------|--------------|
| Identificador único de la máquina | 1014542 |
| Tipo de máquina | COMPRESOR |
| Velocidad nominal (RPM) | 3584 |
| Rango de velocidad | VARIABLE |
| Potencia nominal (KW) | 370 |
| Configuración | ACOPLE |
| Soporte de la máquina | RIGIDO |
| Acoplamiento del eje | FLEXIBLE |
| Alimentado por | ELECTRICO |
| Función | ACCIONADO |
| Componente | COJINETE |
| Tipos de fluidos | REFRIGERANTE |

Fuente. Autor

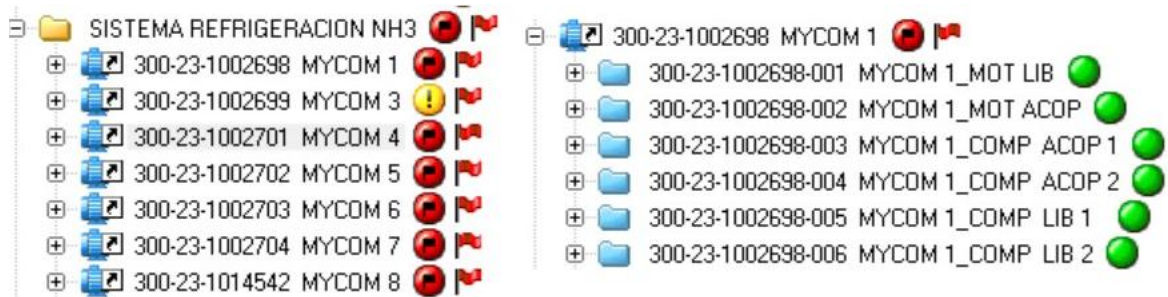
6.9 Creación de la base de datos y configuración del Software condmaster ruby de SPM

Para el proceso de toma y análisis de vibraciones la empresa cuenta con un analizador de vibraciones LEONOVA INFINITY de SPM el cual realiza el procesamiento y análisis de datos en el software Condmaster ruby. En el software se realizó el almacenamiento de los equipos como se aprecia en la figura 29, todas sus especificaciones técnicas como se muestra en la figura 30, puntos de medición asignados y las rutas a seguir para la obtención de datos vibracionales.

El software Condmaster ruby permite precargar las bandas espectrales y las frecuencias de fallo de rodamientos gracias a una biblioteca interna que maneja el

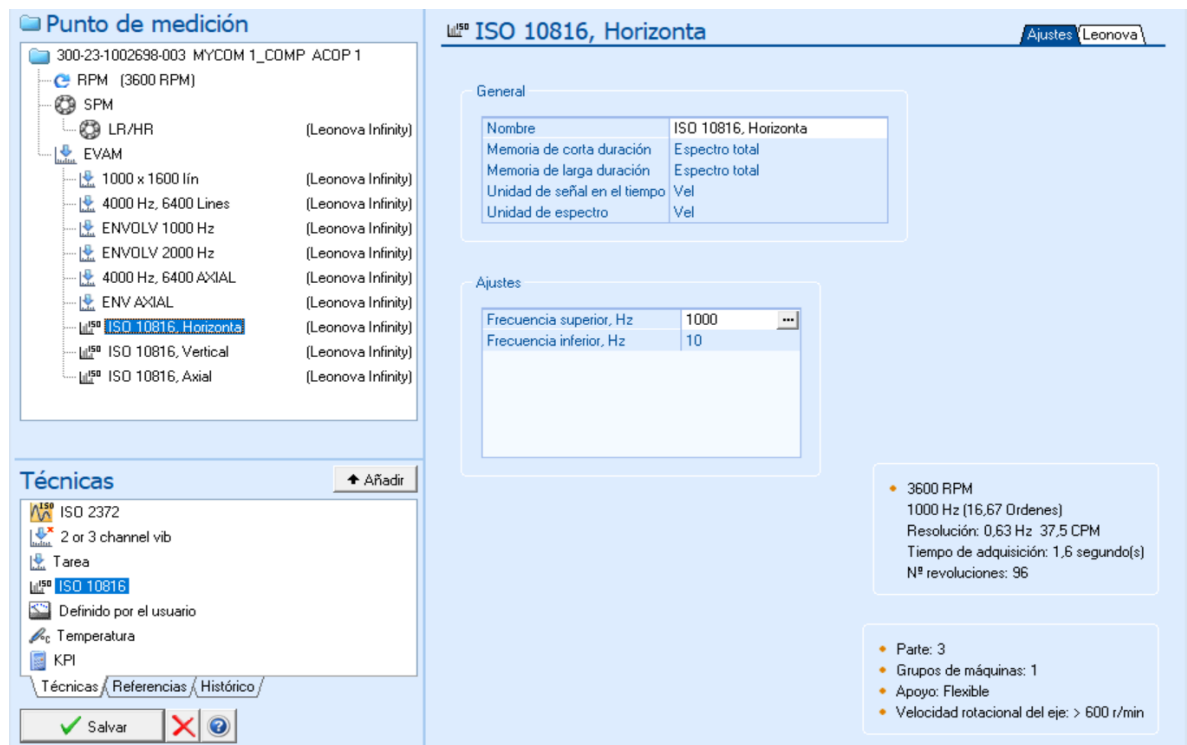
fabricante, de esta forma como se aprecia en la figura 31, al realizar la configuración de los puntos de toma podemos precargar esta información con el fin de agilizar la toma y análisis de los datos vibraciones.

Figura 29. Creación de los equipos y puntos de toma



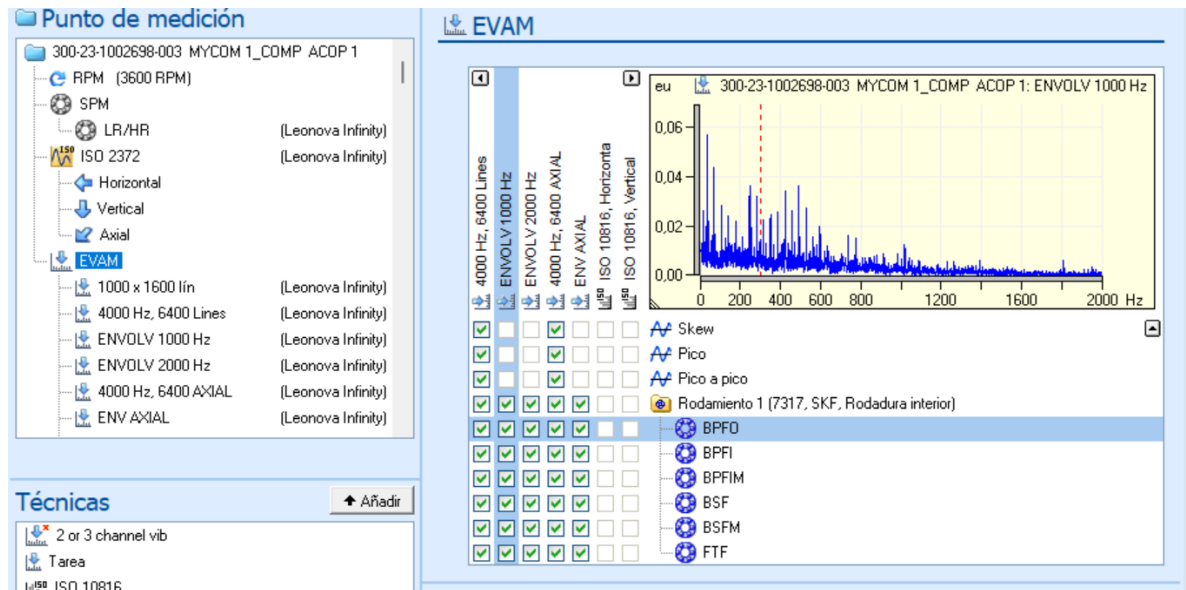
Fuente. Autor

Figura 30. Configuración de los puntos de toma



Fuente. Autor

Figura 31. Configuración Bandas espectrales y frecuencias de fallo de rodamientos

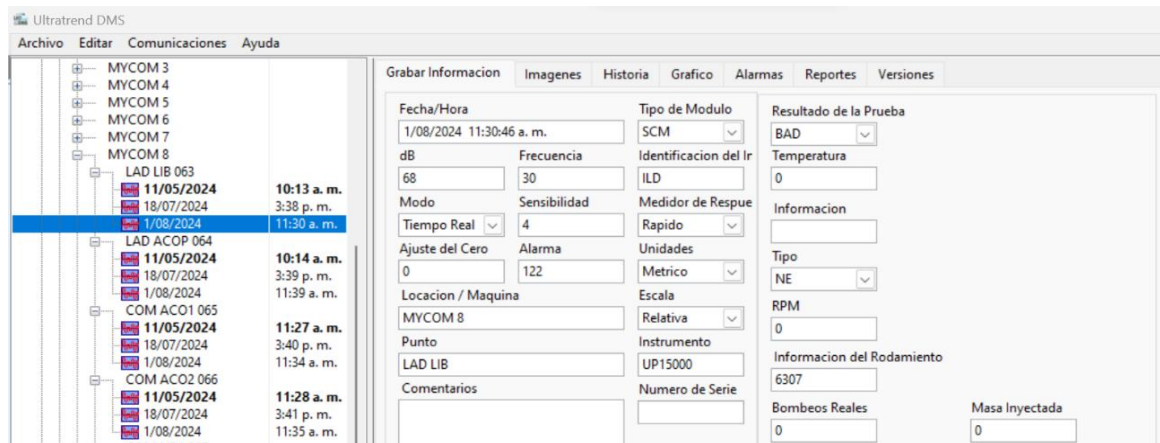


Fuente. Autor

6.10 Creación de la base de datos y configuración del Software ULTRATREND DMS

Para el proceso de toma y análisis de vibraciones la empresa cuenta con un analizador de Ultrasonido Ultraprobe 15000 de UE systems, el cual realiza el procesamiento y análisis de datos en el software Ultratrend DMS. Como se parecía en la figura 32 en el software se crearon los equipos y los puntos de medición donde será realizada la lectura.

Figura 32. Configuración medición ultrasonido por contacto.



Fuente. Autor

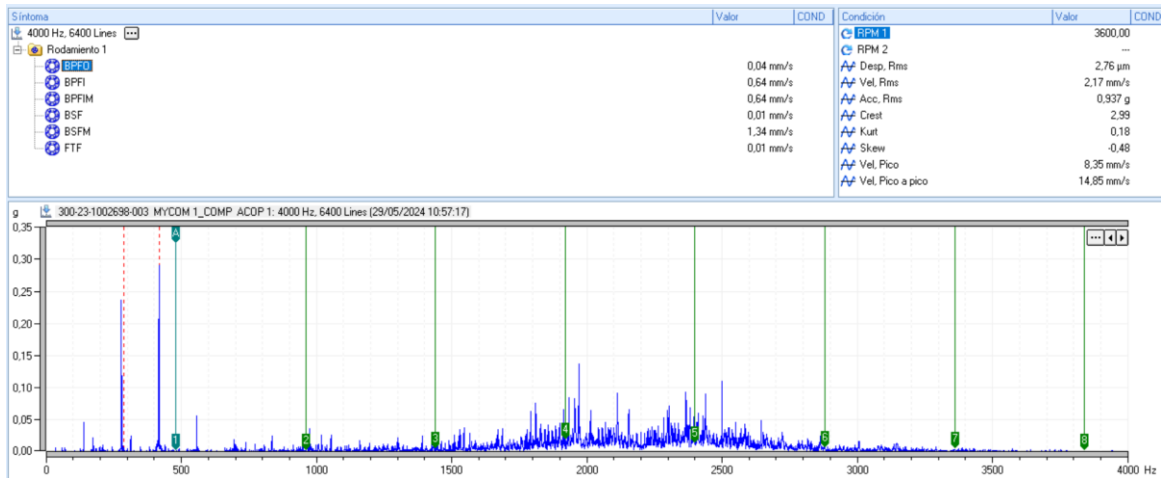
6.11 Análisis de Datos de vibracionales

Para el análisis de datos vibracionales se utilizó el software Condmaster ruby, con el cual podemos realizar la conversión de los espectros mediante FFT y de esta forma convertir una señal de tiempo (vibración medida como función del tiempo) en su equivalente en el dominio de la frecuencia. Este proceso permite descomponer una señal compleja en sus componentes de frecuencia individuales, lo cual es esencial para identificar las diferentes fuentes de vibración en una máquina.

Una vez obtenido el espectro en el dominio de la frecuencia el software permite identificar los armónicos del espectro y también identificar las frecuencias de falla de rodamientos como se puede observar en la figura 33.

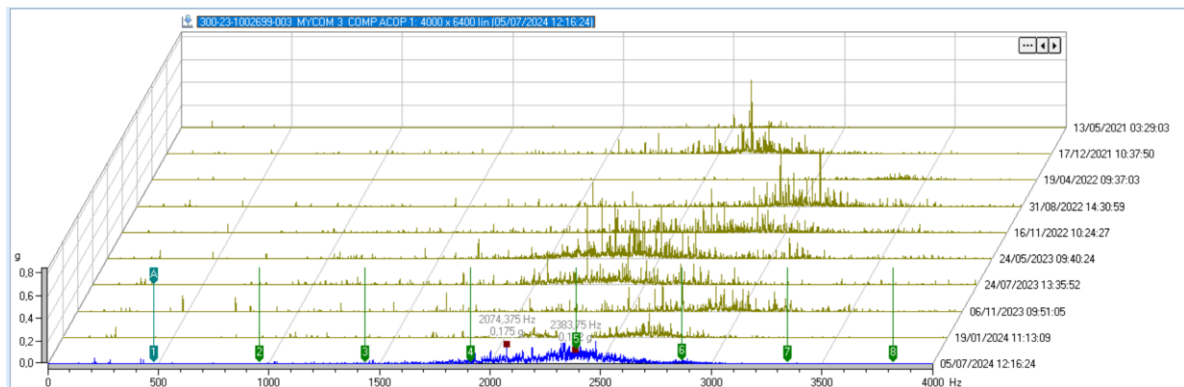
Asimismo, el software nos permite crear una base de datos de cada punto de medida con lo cual permite realizar graficas de cascada como se muestra en la figura 34 y de esta manera se pueden analizar las tendencias del espectro de vibraciones para cada punto de medida.

Figura 33. Análisis de espectro de vibraciones



Fuente. Autor

Figura 34. Grafica de cascada espectros de vibraciones



Fuente. Autor

6.12 Tablas de diagnóstico de vibraciones mecánicas

Las tablas de diagnóstico de vibraciones mecánicas son herramientas utilizadas para interpretar los datos de vibración obtenidos de una máquina y determinar posibles causas de anomalías o fallos. Estas tablas relacionan patrones específicos de vibración con problemas mecánicos comunes, ayudando a los técnicos de planta a identificar rápidamente la fuente de la vibración para tomar las medidas correctivas adecuadas. En las tablas 6, 7 y 8 se presenta un resumen de los diagnósticos de maquina más comunes.

Tabla 6. Problemas de Rodamientos con Elementos Rodantes

| Fuente de Vibración | Frecuencia de excitación | Plano dominante | Amplitud | Caracter espec. del Envoltente | Comentarios |
|---|---|-----------------|----------------------|--|---|
| Anillo interior defectuoso. Defecto pequeño | BPFI, armónicos de BPFI | radial | Uniforme | Picos sincronicos | Carga Radial |
| Defecto interior defectuoso. Un defecto moderado | BPFI con armónicos y bandas laterales de 1X | radial | Modulado en Amplitud | Picos no sincronicos con bandas laterales de 1X. | Niveles de carga radial incrementados |
| Anillo interior defectuoso. Dos o tres defectos pequeños. | BPFI y armónicos. Radial prominentes | radial | Alta, Uniforme | Banda Ancha | El ruido de banda ancha incrementa |
| Anillo interior defectuoso. Múltiples pequeños defectos Asperosidad alrededor del anillo. | BPFI y armónicos prominentes | Radial | Alto, Uniforme | Picos no Sincronicos | El ruido de banda ancha incrementa |
| Anillo exterior defectuoso. Un pequeño defecto | BPFO y armónicos | Radial | Uniforme | Picos no Sincronicos | Los armónicos tienen un más alto que la frecuencia fundamental. |
| Anillo exterior defectuoso. Un solo defecto moderado | BPFO y armónicos | Radial | Uniforme | Picos no Sincronicos | El ruido de banda ancha incrementa |
| Bola o rodillo defectuoso. (Único) | BSF y armónicos | Radial | Alta Uniforme | Banda Angosta | |
| Jaula defectuosa. Rota en un lugar. | Ruido de banda ancha | Radial | Uniforme | Banda ancha | Nivel de ruido bajo |
| Jaula rota en pedazos | Ruido de banda ancha | Radial | Uniforme | Banda Ancha | Ruido causado por los pedazos de la jaula en el rodamiento |
| Precarga o lubricación inadecuada | Ruido de alta frecuencia "montón de heno" | Radial | | Banda Ancha | El ruido de banda ancha incrementa |
| Holgura del rodamiento | Armónicos 1X | Radial | | Banda Angosta | Número y amplitud de los armónicos función de la holgura. |
| Holgura en le cárter | 1X, 2X, 3X | Radial | | Banda Agosta | |
| Holgura extrema o falla | 0.5X y Armónicos | Radial | | | Línea de base del ruido de baja frecuencia se va elevando. |
| Juega excesivo en un rodamiento | Armónicos 0.5X, 1X | Radial | | | 4X hasta 8X o 7X hasta 15X |
| Rodamiento Chueco | 1X, 2X, Tonos de rodamiento | Axial, Radial | Elevado Uniforme | Banda Angosta | Diferencia de fase de 180 grados en medidas axiales en cada lado del cárter del rodamiento. |

(WHITE, 2010)

Tabla 7. Holgura Mecánica

| Fuente de Vibración | Frecuencia de excitación | Plano dominante | Amplitud | Caracter espec. del Envoltente | Comentarios |
|-------------------------------|--------------------------|-------------------------|----------|--------------------------------|---|
| Holgura de las bases | Armónicos 1X | Generalmente tangencial | Uniforme | Banda Angosta | Indicado por flexibilidad de la base |
| Holgura en Rodamiento | Armónicos 1X | Radial | Uniforme | Banda Angosta | Los armónicos se pueden extender hasta 10X. |
| Holgura extrema de rodamiento | Armónicos 0.5X | Radial | Uniforme | | A veces también hay armónicos 0.25X. |

(WHITE, 2010)

Tabla 8. Problemas de Motor Eléctrico

| Fuente de Vibración | Frecuencia de excitación | Plano dominante | Amplitud | Caracter espec. del Envoltente | Comentarios |
|---|------------------------------------|-----------------|----------------|--------------------------------|--|
| Contacto incorrecto cepillos Conmutador (Motores CD) | $f = \frac{n C X}{60} \text{ Hz}$ | Radial | | Banda Angosta | n = cualquier entero positivo c = número de segmentos del conmutador X = velocidad de la máquina (RPM) |
| Barras de rotor rotas | 2X deslizamiento X número de polos | Radial | A veces batido | Banda Angosta | A veces causa bandas laterales de deslizamiento en 2X alrededor de 120 Hz. |
| Paso de ranuras de motor a inducción | $S = \frac{B}{60} + 120$ | Radial | | | S = frecuencia de paso de ranuras del rotor en Hz B = número de barras del rotor X = velocidad del rotor (RPM) 120 = doble de la frecuencia de línea en Hz. |

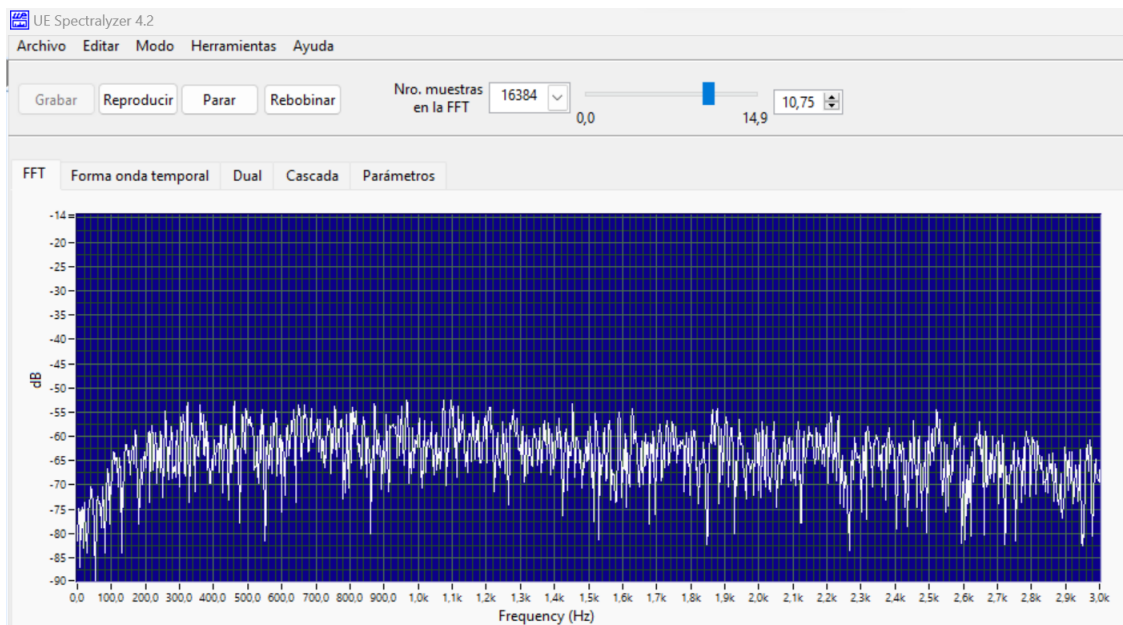
(WHITE, 2010)

6.13 Análisis de datos mediciones de ultrasonido

Las señales ultrasónicas se procesan e interpretan mediante el software Ultratrend DMS, con el software se procesa la señal medida en campo y se realiza la conversión de los espectros mediante FFT y de esta forma convertir una señal de tiempo (medida como función del tiempo) en su equivalente en el dominio de la frecuencia, de esta forma detectar frecuencias características de fallos en rodamientos como se muestra en la figura 35.

Dada la capacidad de contar con una base de datos de cada punto de medida que tiene el software podemos comparar con valores base e históricos para identificar cualquier desviación que sugiera un problema, de acuerdo con la experiencia en planta se establece un parámetro de alarma para las mediciones que tengan una variación arriba de 12 dBuv.

Figura 35. Espectro ultrasonido en dominio de la frecuencia



Fuente. Autor

6.14 Análisis de aceites Norma ISO 4406

La norma ISO 4406 es un estándar internacional que se utiliza para clasificar la limpieza de los lubricantes en función de la cantidad de partículas sólidas que contienen. Esta norma es fundamental en la industria para asegurar que los sistemas de lubricación operen eficientemente y tengan una vida útil prolongada, ya que la presencia de contaminantes sólidos puede causar desgaste prematuro, bloqueos y fallos en los componentes.

La norma clasifica la limpieza del fluido en tres rangos de tamaño de partículas, generalmente medidos en micrómetros (μm). Estos tamaños de partículas se cuentan y luego se clasifican en un código de limpieza que consta de tres números, que representan la cantidad de partículas en tres rangos de tamaño.

En la figura 36 se muestra los códigos según el tipo de equipo de mecanismo que se está lubricando, el estado óptimo de referencia (ORS) para el caso de los compresores de tornillo es de 18/17/15 según (ALBARRACIN P. , 2024).

Figura 36. Código de limpieza ISO 4406 de acuerdo con el tipo de componente y mecanismos lubricados

| 02. SISTEMAS DE LUBRICACION | | | | | | |
|-----------------------------|---|---|-------------|----------|--|---------------------|
| No | Componente | Mecanismos | Lubricación | | Límites condenatorios del código de limpieza ISO 4406-99 | |
| | | | HD | EHD | | |
| 01 | Transmisión mecánica. | Engranajes, rodamientos. | | 19/18/16 | OC | 20/19/17 |
| | | | | | OF | 21/20/18 - 22/21/19 |
| | | | | | EF | 23/22/20 |
| 02 | Transmisión automática. | Engranajes, rodamientos, sincronizadores. | 18/17/15 | | OC | 19/18/16 |
| | | | | | OF | 21/20/18 - 22/21/19 |
| | | | | | EF | 23/22/20 |
| 03 | Reductor de velocidad, motorreductor, compresor de tornillo cámara de compresión seca (CCS), compresor de pistón simple y doble efecto, bomba de pistones, soplador de lóbulos. | Engranajes, rodamientos, cojinetes lisos, cilindros, anillos, cruceta, bulón. | 19/18/16 | | OC | 20/19/17 |
| | | | | | OF | 21/20/18 - 22/21/19 |
| | | | | | EF | 23/22/20 |
| | | | | 18/17/15 | OC | 19/18/16 |
| | | | | OF | 21/20/18 - 22/21/19 | |
| | | | | | EF | 23/22/20 |
| 04 | Compresor de tornillo cámara de compresión húmeda (CCH), compresor axial, compresor centrífugo, bomba centrífuga. | Cojinetes lisos, cojinete de empuje, rodamientos, tornillos. | 17/16/14 | | OC | 18/17/15 |
| | | | | | OF | 19/18/16 - 20/19/17 |
| | | | | | EF | 21/20/18 |

(ALBARRACIN P. , 2024)

Así mismo el fabricante de los equipos recomienda la evaluación de los siguientes parámetros en la muestra de aceite de acuerdo con la tabla 9.

Tabla 9. Criterios de evaluación sugeridos por Mayekawa

| Ítem | Criterio |
|--------------------------|---------------------------------------|
| Color | Escala de color ASTM: 4.0 o menos. |
| Total número ácido (TAN) | 0.2 mg KOH/g o menor |
| Viscosidad Cinemática | Dentro de ± 10 % del aceite nuevo |

(MYCOM, 2002)

6.15 Parámetros de alarma vibraciones mecánicas

Para el caso de estudio se tomaron líneas base de vibración para cada equipo y se evaluarán bajo la tabla de criticidad según la norma ISO 10816 (Organización Internacional de normalización , 2009), a partir de esta línea base se realiza el monitoreo de la condición a través de la comparación en cascada de las lecturas de vibraciones.

En la figura 37 se muestra la tabla de criticidad según la norma ISO 10816 la cual es una herramienta utilizada para evaluar y clasificar el nivel de vibración de las máquinas en funcionamiento, con el fin de determinar su condición y la necesidad de mantenimiento o intervención. Esta tabla proporciona valores límite para diferentes niveles de vibración, que se utilizan para definir si las vibraciones son aceptables o inaceptables.

Figura 37. Tabla de criticidad Norma ISO 10816

| | | | | | | | | v r.m.s. mm/s | v r.m.s. inch/s | Velocidad Vibración (2 - 1000 Hz n > 600 1/min (2 - 1000 Hz n > 120 1/min)) |
|---|----------|--------------------------|----------|---|----------|--|----------|------------------|--------------------|---|
| | | | | | | | | 11 | 0.433 | |
| | | | | | | | | 7.1 | 0.280 | |
| | | | | | | | | 4.5 | 0.177 | |
| | | | | | | | | 3.5 | 0.138 | |
| | | | | | | | | 2.8 | 0.110 | |
| | | | | | | | | 2.3 | 0.091 | |
| | | | | | | | | 1.4 | 0.055 | |
| | | | | | | | | 0.71 | 0.028 | |
| rígida | flexible | rígida | flexible | rígida | flexible | rígida | flexible | Fundación | | |
| Bombas > 15 kW radial, axial, diagonal | | | | Máquinas medianas 15 kW < P ≤ 300 kW | | Máquinas Grandes 300 kW < P < 50 MW | | Tipo de Máquina | | |
| Acople directo | | Eje intermedio / Poleas. | | Motores 160 mm ≤ H < 315 mm | | Motores 315 mm ≤ H | | | | |
| Grupo 4 | | Grupo 3 | | Grupo 2 | | Grupo 1 | | Grupo | | |

| | | |
|--|---|------------------------------------|
| | A | Puesta en operación recientemente. |
| | B | Operación para largo plazo. |
| | C | Operación para corto plazo |
| | D | Vibración causando daños |

Fuente. (Organización Internacional de normalización , 2009)

ISO 10816 clasifica las vibraciones en varias categorías de severidad, generalmente divididas en cuatro zonas:

1. **Zona A:** La vibración está dentro de los límites aceptables. La máquina se considera en buen estado de funcionamiento.
2. **Zona B:** La vibración está por encima de los niveles normales, pero aún dentro de un rango aceptable. Se recomienda monitorear la máquina y planificar el mantenimiento.
3. **Zona C:** La vibración es alta y puede causar daños a la máquina a largo plazo. Se recomienda una intervención inmediata.

4. **Zona D:** La vibración es excesiva y la máquina está en una condición peligrosa. Se requiere una acción urgente para evitar daños severos o fallos catastróficos.

6.16 Análisis de causa raíz y criterios de alarma del PM

Una vez alcanzado alguno de los disparadores mencionados en la figura 34, se debe realizar un análisis de causa raíz. Para ello, es necesario contar con la información adecuada que permita identificar la causa raíz mediante dicho análisis.

A continuación, se deben determinar las acciones correctivas para solucionar tanto la anomalía detectada como la causa raíz encontrada, y validar que, tras su implementación, la condición del equipo vuelva a ser normal.

Figura 38. Disparadores para análisis causa raíz plan de mantenimiento

| Tecnología | Norma | Descripción del disparador | Criterios de alarma | |
|----------------------------|---|--|---|--|
| Vibraciones | Alarmas de condición (Norma ISO 10816-3) | cuando la amplitud de vibración exceda los límites de precaución | Precaución 5-8 mm/Seg PK 0.40-1 G-s | Alerta >10 mm/Seg PK >1 G-s |
| Ultrasonido | Alarmas de condición (Norma ISO 29821-1) | Diferencial de dB de acuerdo a la línea base | Precaución Arriba de la línea Base dBuv Delta de 8 - 12 | Alerta Arriba de la línea Base dBuv Delta de >12 |
| Análisis de aceites | Alarmas de condición (Norma ISO ISO 4406) | Para cuantificar los niveles de contaminación de partículas por mililitro de fluido medidos en tres tamaños 4 (µm) , 6 (µm) y 14 (µm). | Precaución OF 20/19/17 | Alerta EF 21/20/18 |

Fuente. Autor

En los casos donde no se tenga la información necesaria para identificar la causa raíz del problema, es necesario realizar lo siguiente:

1. Revisar el historial de equipo (fallas previas, reparaciones, etc.)
2. Definir la actividad y/o actividades requeridas para reunir la información necesaria para la identificación de la causa raíz. Pueden surgir de dos tipos:

- Inspecciones que no requieren detener el equipo, tales como análisis con otras tecnologías y/o técnicas de inspección. Si se identifica la posibilidad de realizar una actividad de este tipo, se debe generar un aviso en SAP para programarla y ejecutarla. Una vez ejecutada dicha actividad, cerrar el aviso y avanzar al paso 3.
- Intervención al equipo con máquina parada. Tales como análisis visual de los rodamientos, inspección visual del embobinado, etc. Si se requiere una actividad de este tipo, avanzar al paso 3.

3. Determinar las actividades que deben realizarse para que la máquina pueda regresar a su condición normal de operación (acción correctiva).

4. Generar un aviso en SAP enlistando las acciones correctivas de acuerdo con la anomalía detectada.

5. Gestionar la acción correctiva para que se pueda reunir la información necesaria durante la intervención a máquina parada. Solicitar en su caso la pieza dañada para su análisis.

6. Realizar inspección del elemento dañado para reunir información necesaria en el análisis de 5 porqués.

7. Evaluar la condición de la máquina. Si la condición del equipo no es normal, significa que la causa raíz aún no ha sido encontrada, por lo que se deberá regresar al paso 2. Por el contrario, si tras intervenir el equipo su condición es ahora normal, se puede afirmar que la causa raíz encontrada es correcta.

8. Elaborar análisis causa raíz.

6.17 Plan de mantenimiento en CMMS SAP (PM)

SAP PM (Plant Maintenance), es un módulo de SAP que gestiona todas las actividades de mantenimiento dentro de la empresa. Está diseñado para soportar la planificación, ejecución, y monitoreo del mantenimiento de equipos, maquinarias, e instalaciones, con el objetivo de garantizar la disponibilidad operativa además de maximizar la eficiencia de los activos.

Dentro de las funciones Clave de SAP PM podemos destacar los siguientes puntos:

Gestión de Mantenimiento Preventivo: Permite la planificación y programación de mantenimientos preventivos basados en intervalos de tiempo o condiciones de operación de los equipos, para evitar fallos inesperados y prolongar la vida útil de los activos.

Gestión de Mantenimiento Correctivo: Facilita la gestión de reparaciones y correcciones de fallos cuando un equipo o sistema ha dejado de funcionar o no está operando según lo esperado.

Gestión de Órdenes de Trabajo: Genera y administra órdenes de trabajo para realizar actividades de mantenimiento, asignando tareas a técnicos, y controlando el progreso de las intervenciones.

Gestión de Inspecciones: Planifica y registra las inspecciones regulares de equipos o maquinarias para asegurar que operan dentro de los parámetros de seguridad y eficiencia.

Gestión de Materiales y Repuestos: Administra el inventario de repuestos y materiales necesarios para las actividades de mantenimiento, asegurando que estén disponibles cuando se necesiten.

Documentación y Registro Histórico: Mantiene un historial detallado de todas las actividades de mantenimiento realizadas en cada equipo, incluyendo reparaciones, repuestos utilizados y tiempos de inactividad, lo que permite análisis junto con mejoras continuas.

Integración con Otros Módulos de SAP: SAP PM se integra con otros módulos de SAP, como MM (Gestión de Materiales), FI (Finanzas), CO (Controlling), y HR (Recursos Humanos), para ofrecer una solución de gestión de mantenimiento completa y centralizada.

Como se muestra en las figuras 39, 40 y 41, se realiza el cargue en SAP de los planes de mantenimiento para cada una de las técnicas propuestas en estos se establece la frecuencia, responsable y prioridad.

Figura 39. Plan de mantenimiento toma de muestras análisis de aceite

| | | |
|-------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Pos.mantenimiento | 59117 | RCM I/F PRED MEC AAU COMPRESOR N... |
| Estrategia | HORAPM | PLAN POR HORAS DE OPERACION |
| Tp.plan manten. | Orden de mantenimiento preven... ▾ | |

| | | |
|----------|-----------------------|------------------------|
| Posición | Lista objeto posición | Emplazamiento posición |
|----------|-----------------------|------------------------|

| | |
|----------------------|--|
| Objeto de referencia | |
| Ubic.téc. | AG01-SERIND-ADT 23-SISTREFRAMO SISTEMA REFRIGERACION AM... |
| Equipo | 1002703 COMPRESOR DE AMONIACO 6 |
| Conjunto | |

| | | | |
|------------------------|------------------------------------|----------------------|------------------------|
| Datos de planificación | | | |
| Centro planif. | AG01 Barranquilla | Grupo planif. | 300 Mto Servicios Indu |
| Clase de orden | ZOT4 OT Mantenimiento Predictivo | Clase actividad PM | Z28 Análisis de aceite |
| Pto.tbjo.resp. | ESPMASER / AG01 ESPECIALISTA MA... | División | |
| Prioridad | Media | Norma de liquidación | |
| Documento venta | | | |

| | | | |
|---------------------------------|---------|-------|--|
| Hoja de ruta para mantenimiento | | | |
| Tp. | GrHRuta | CGrHR | Descripción |
| E | / 3797 | / 15 | RCM I/F PRED MEC AAU COMPRESOR NH3 6 DET |

Fuente. Autor

Figura 40. Plan de mantenimiento análisis de ultrasonido

| | | |
|-------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Pos.mantenimiento | 134321 | CBM INST ULTRASO COMPR DE NH3 - 5 |
| Estrategia | DIASPM | PLAN POR DIAS CALENDARIO |
| Tp.plan manten. | Orden de mantenimiento preven... ▾ | |

| | | |
|----------|-----------------------|------------------------|
| Posición | Lista objeto posición | Emplazamiento posición |
|----------|-----------------------|------------------------|

| | |
|----------------------|--|
| Objeto de referencia | |
| Ubic.téc. | AG01-SERIND-ADT 23-SISTREFRAMO SISTEMA REFRIGERACION AM... |
| Equipo | 1002702 COMPRESOR DE AMONIACO 5 |
| Conjunto | |

| | | | |
|------------------------|------------------------------------|----------------------|------------------------|
| Datos de planificación | | | |
| Centro planif. | AG01 Barranquilla | Grupo planif. | 300 Mto Servicios Indu |
| Clase de orden | ZOT4 OT Mantenimiento Predictivo | Clase actividad PM | Z26 Ultrasonido |
| Pto.tbjo.resp. | ESPMASER / AG01 ESPECIALISTA MA... | División | |
| Prioridad | Media | Norma de liquidación | |
| Documento venta | | | |

| | | | |
|---------------------------------|---------|-------|--|
| Hoja de ruta para mantenimiento | | | |
| Tp. | GrHRuta | CGrHR | Descripción |
| A | / 7401 | / 12 | CBM INST ULTRASO COMPR DE NH3 - 5 - FUNC |

Fuente. Autor

Figura 41. Plan de mantenimiento análisis de vibraciones

| | | |
|-------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| Pos.mantenimiento | 34596 | RCM I/F PRED VIBRA COMPRES NH3 No 1 |
| Estrategia | SEMANA | PLAN POR SEMANA CALENDARIO |
| Tp.plan manten. | Orden de mantenimiento preven... | |

| | | |
|----------|-----------------------|------------------------|
| Posición | Lista objeto posición | Emplazamiento posición |
|----------|-----------------------|------------------------|

| | |
|----------------------|---|
| Objeto de referencia | |
| Ubic.técn. | AG01-SERIND-ADT 2... SISTEMA REFRIGERACION AMONIACO |
| Equipo | 1002698 COMPRESOR DE AMONIACO 1 |
| Conjunto | |

| | | | | | |
|------------------------|-----------------|-----------------------------|----------------------|-----|--------------------|
| Datos de planificación | | | | | |
| Centro planif. | AG01 | Barranquilla | Grupo planif. | 300 | Mto Servicios Indu |
| Clase de orden | Z014 | OT Mantenimiento Predictivo | Clase actividad PM | Z24 | Vibraciones |
| Pto.tbjo.resp. | ESPMASER / AG01 | ESPECIALISTA MA... | División | | |
| Prioridad | Media | | Norma de liquidación | | |
| Documento venta | | | | | |

| | | | |
|---------------------------------|---------|-------|---|
| Hoja de ruta para mantenimiento | | | |
| Ip. | GrHRuta | CGrHR | Descripción |
| A | / 1028 | / 1 | RCM I/F VIBRA MOTOR Y COMPRESOR NH3 FUN |

| | |
|--|---|
| Plan mantenimiento preventivo asignado | |
| Plan mant.prev. | 17530 CBM TERMOG Y VIBRA SIST. GENERAC FRIO |

Fuente. Autor

6.18 Indicadores de mantenimiento

Los indicadores de mantenimiento son métricas utilizadas para evaluar y monitorear la eficiencia, efectividad o desempeño de las actividades de mantenimiento. Estos indicadores permiten medir el impacto del mantenimiento en la disponibilidad y fiabilidad de los equipos, así como en la optimización de los recursos además de la reducción de costos operativos. A continuación, se definen los indicadores de mantenimiento con los cuales vamos a evaluar el plan de mantenimiento basado en condición para los compresores de amoniaco:

Averías (Breakdowns %)

Definición: Esta relación supervisa el carácter reactivo de la ejecución del mantenimiento. Este indicador mide la relación entre las horas notificadas de las órdenes de trabajo de averías SAP y las horas totales notificadas de órdenes de trabajo.

Métrica: Unidad (%)

$$\% \text{ Breakdowns} = \frac{\text{Horas de mantenimiento Averías}}{\text{Horas Totales de Mantenimiento ejecutadas}}$$

Ejecución del Plan de Mantenimiento

Definición: Es un indicador para medir el cumplimiento en la ejecución de las tareas de mantenimiento en el periodo de evaluación.

Métrica: Unidad (%).

$$\text{Maintenance Plan Attainment} = \frac{\text{Operaciones de mantenimiento ejecutadas y notificadas}}{\text{Operaciones Totales Solicitadas}}$$

Trabajo terminado vs trabajo Planeado

Definición: Es un indicador para medir el cumplimiento en la ejecución de las tareas planificadas (programadas) en el periodo evaluado.

Métrica: Unidad (%)

$$\text{Work Completed vs Work Planned} = \frac{\text{Operaciones de mantenimiento ejecutadas y notificadas}}{\text{Operaciones Totales Planeadas}}$$

Trabajo pendiente (Backlog)

Definición: Mide las horas de trabajo por realizar a la fecha de análisis relacionadas con la mano de obra disponible para realizar mantenimiento con personal propio.

Métrica: Unidad (semanas). Se considera para un técnico ó especialista la base 6,5 hr efectivas para mantenimiento por turno de 8 horas. Dicho porcentaje se tomará sobre las 6,5 hr efectivas por turno entendiendo que las 1,5 hr restantes son para toma de alimentos, desplazamiento entre áreas, coffee break, y notificación de órdenes de trabajo.

$$\text{Backlog} = \frac{\text{Sumatoria de horas mantenimiento abiertas ó programadas NO notificadas}}{\text{Horas Disponibles Semanales (Hr Técnicos)}}$$

Tiempo Medio entre Fallos (MTBF (Mean Time Between Failure))

Definición: Este indicador es una medida de la fiabilidad de las máquinas en referencia al tiempo medio entre sus fallos. Es el tiempo medio transcurrido entre 2 paros > 10 min de origen Mecánico, Eléctrico, Instrumental y Automatización, si tener en cuenta los paros Operacionales.

Métrica: Unidad (horas). Se calcula como el Tiempo de eficiencia (LET= tiempo de producción bruta + paros internos) del equipo dividido por el número de fallos funcionales registrados mayores de 10 minutos en el mismo intervalo de tiempo.

$$\text{Mean Time Between Failure (MTBF)} = \frac{\text{Tiempo de Eficiencia de Línea (LET)}}{\text{Número total de fallos funcionales en el mismo periodo}}$$

Tiempo Medio de Reparación (MTTR (Mean Time to Repair))

Definición: Es la medida de la distribución del tiempo de reparación de un equipo o sistema, no es más que la facilidad y rapidez con que cualquier actividad de mantenimiento puede ser llevada a cabo para restaurar un componente defectuoso a una condición especificada.

Métrica: Unidad (Horas). Se calcula como la suma del tiempo de reparación total para cada fallo funcional en un intervalo de tiempo, registrado mediante avisos de avería en SAP mayores de 10 minutos en el mismo periodo de evaluación dividido el Número total de fallos funcionales durante el mismo intervalo de tiempo.

$$\text{Mean Time to Repair (MTTR)} = \frac{\text{Suma del tiempo de reparación total para cada fallo funcional}}{\text{Número total de fallos funcionales en el mismo periodo}}$$

6.19 Metas indicadores de mantenimiento propuestos

Las metas definidas para los indicadores propuestos se basaron en los datos históricos de los equipos extraídos del sistema SAP como se muestra en la figura 42 y los resultados esperados de la implementación del proyecto de CBM para los equipos de compresión, en la tabla 10 se muestran los valores objetivo para cada indicador.

Tabla 10. Metas para indicadores del plan de mantenimiento propuesto

| KPI | UM | Meta |
|---------------------|---------|------|
| Averías | % | 0.1 |
| MPA | % | 97 |
| Mtto Plan/Mtto Ejec | % | 97 |
| Backlog | Semanas | 4 |
| MTBF | Horas | 8760 |
| MTTR | Horas | 48 |

Fuente. Autor

Figura 42. Histórico Fallas Mycom 1.

| Equipo | Denominación de objeto técnico | | | |
|-----------|--------------------------------|----------------------|-------------------------------|-----------|
| | Tiempo medio reparac | Impo.entre reparacio | Impo.medio entre reparac. (H) | |
| Periodo | Paradas | Imp.muerto (H) | MTR (H) | MTBR (H) |
| 1002698 | COMPRESOR DE AMONIACO 1 | | | |
| | 230.03 | | 154,504.68 | 7,725.23 |
| 2006.03 | 1 | 1.50 | 1.50 | 13,402.50 |
| 2006.04 | 1 | 7.00 | 7.00 | 663.50 |
| 2006.06 | 1 | 1.00 | 1.00 | 1,782.00 |
| 2006.08 | 1 | 0.50 | 0.50 | 1,351.50 |
| 2007.04 | 1 | 8.75 | 8.75 | 5,916.50 |
| 2007.08 | 1 | 3,140.33 | 3,140.33 | 2,823.25 |
| 2008.02 | 1 | 3.67 | 3.67 | 1,327.50 |
| 2009.09 | 1 | 1.00 | 1.00 | 14,050.50 |
| 2010.10 | 1 | 265.50 | 265.50 | 9,196.00 |
| 2016.05 | 1 | 6.00 | 6.00 | 48,706.50 |
| 2017.09 | 1 | 48.00 | 48.00 | 11,400.53 |
| 2017.11 | 1 | 71.98 | 71.98 | 1,648.48 |
| 2018.02 | 1 | 734.67 | 734.67 | 2,433.33 |
| 2018.04 | 1 | 54.97 | 54.97 | 329.03 |
| 2018.07 | 2 | 25.45 | 12.73 | 1,235.28 |
| 2018.10 | 1 | 21.20 | 21.20 | 2,110.80 |
| 2018.11 | 1 | 180.77 | 180.77 | 447.23 |
| 2020.11 | 1 | 27.08 | 27.08 | 17,191.92 |
| 2022.10 | 1 | 1.20 | 1.20 | 17,253.05 |
| * 1002698 | | | | |
| | 20 | 4,600.57 | | |

Fuente. Autor

Conclusiones

El mantenimiento basado en la condición (CBM) ha demostrado ser una solución eficaz para mejorar la gestión de mantenimiento en la industria, la implementación de esta metodología en los compresores de amoníaco en la sala de máquinas de la cervecería de Barranquilla reducirá el riesgo de fallas inesperadas, aumentando la confiabilidad operativa y asimismo reducir costos, extender la vida útil de los equipos garantizando un funcionamiento seguro y eficiente.

El uso de técnicas de monitoreo como análisis de vibraciones, ultrasonido y análisis de aceites permitirá detectar fallas potenciales en etapas tempranas, garantizando intervenciones correctivas oportunas. Esto contribuirá a aumentar la confiabilidad operativa de los compresores para optimizar los costos de mantenimiento

A través del análisis de Modos de Falla, Efectos y Criticidad (FMECA), se identificaron los componentes más vulnerables de los compresores, lo que permitió seleccionar las técnicas de monitoreo adecuadas según cada modo de falla. La implementación de este análisis ha sido clave para priorizar las acciones de mantenimiento y mejorar la confiabilidad de los equipos.

La norma ISO 17359:2018 proporciona directrices generales para el monitoreo y diagnóstico de máquinas mediante técnicas de mantenimiento predictivo. Con su implementación se logró configurar un sistema robusto para la recolección de datos de campo y su posterior análisis, lo que permite monitorear de forma continua las condiciones de operación de los compresores y tomar decisiones basadas en datos reales.

Se establecieron criterios de alarma específicos para las variables monitoreadas (vibraciones, ultrasonido y aceites), basados en los límites normativos y los históricos de la planta. Este enfoque facilitara la identificación temprana de condiciones anómalas en los equipos, lo que reduce el riesgo de fallas funcionales graves.

Se diseñó una estructura gerencial adecuada para implementar y gestionar el plan de mantenimiento predictivo en la planta de la cervecería. Esta estructura facilita la integración del sistema en la operación diaria, asegurando una administración eficiente del mantenimiento basado en la condición

Bibliografía

- ALBARRACIN, P. (2006). *Tribología y Lubricación industrial y automotriz*. Bucaramanga: Litocha.
- ATSDR. (10 de 04 de 2024). *Agencia para sustancias tóxicas y registro de enfermedades*. https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs126.html
- CTRL Systems, Inc. (12 de 04 de 2024). *CTRL Systems, Inc.* <https://www.ctrlsys.com/?lang=es>
- Dossat, R. J. (2007). *Principios de refrigeración*. Mexico: Continental .
- Fernandez, A. (12 de 04 de 2024). *Power_MI*. <https://power-mi.com/es/content/transductores-de-desplazamiento>
- GARCIA, A. (1992). *Vibraciones Mecánicas*. Bucaramanga: UIS.
- GARRIDO, S. G. (2003). *Organización y gestión integral de mantenimiento*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- KUNSE, W. (2006). *Tecnología para cerveceros y malteros*. Berlin: VLT Berlin.
- MOBLEY, K. (2014). *Maintenance engineering handbook*. New York: Mc Graw Hill.
- MORA, L. A. (2009). *Planeación, ejecución y control*. Ciudad de México: Alfaomega Grupo Editor.
- MYCOM. (2002). *Manual unidad compresora SCV*. Bélgica: MYCOM EUROPE.
- Organización internacional de normalización. (2006). *Industrias petrolera, petroquímica y de gas natural. Recopilación e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos. ISO 14224*. Ginebra: ISO.
- Organización Internacional de normalización. (2018). *Monitoreo de condición y diagnóstico de máquinas ISO 17359*. Ginebra: ISO .
- SAE International. (2014). *JA1012: A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standardization*. SAE International.
- TORRES, F. (2016). *Análisis de vibraciones e interpretación de datos. DIDYF Universidad de Zaragoza*, 14.

UE Systems. (2014). *Mantenimiento Predictivo con Ultrasonido*. Elmsford: UE Systems,.

WHITE, G. (2010). *Introducción al Análisis de Vibraciones*. Woburn: Azima DLI.

Widman International SR. (12 de 04 de 2024). *Widman International SR*.
<https://www.widman.biz/Analisis/interpretacion.php>