

Plan de mantenimiento basado en condición (CBM), por medio de monitoreo off-line de parámetros de vibración y temperatura para bomba principal de alimentación de agua a la caldera advance, basado en árbol de decisiones.

Javier Alexander Huérfano Puentes

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

Director

Jabid Eduardo Quiroga Méndez

Doctor en Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Especialización en Gerencia de Mantenimiento

Bucaramanga

2024

### **Dedicatoria**

A mi esposa Betty... Por su amor y dedicación.

A mi Familia, por mi formación e incondicionalidad.

### **Agradecimientos**

A Palmas del Cesar S.A. por permitir el crecimiento profesional y el sentido humano de su personal.

Al equipo de mantenimiento de la planta industrial, por su dedicación y empeño.

Al excelente equipo de trabajo de dirección de planta de Beneficio de Palmas del Cesar.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	14
1. Objetivos .....	17
1.1. Objetivo General .....	17
1.2. Objetivos Específicos.....	17
2. Marco Teórico.....	18
2.1. Estrategias Mantenimiento.....	18
2.1.1 Mantenimiento Basado En Condición CBM .....	19
2.2. Árbol de Decisiones .....	20
2.3. Normas Aplicables.....	22
2.3.1. ISO 10816 .....	22
2.3.2. ISO 17359 .....	23
3. Auditoría de Equipo .....	24
3.1. Caldera Advance Boilers .....	24
3.2. Bomba Alimentación De Agua.....	28
3.2.1 Criticidad De La Bomba .....	33
3.2.2. Plan de mantenimiento actual .....	34
3.2.3. Modos de Fallo y Efecto .....	36
4. Método de Monitoreo .....	38
4.1. Selección De Los Parámetros .....	38
4.2. Instrumento De Medición .....	40
4.3. Técnica De Medición .....	41

4.4.	Selección De Puntos De Medición .....	42
4.5.	Precisión De Los Parámetros Monitoreados.....	44
4.6.	Condiciones Del Funcionamiento.....	45
4.7.	Límites de operación: Criterios De Alarma Y Peligro.....	46
4.7.1	Vibración (Velocidad) .....	47
4.7.2	Vibración (Aceleración Envolvente) .....	51
4.7.3	Temperatura .....	52
5.	Adquisición Y Análisis De Datos .....	52
5.1.	Registro y Seguimiento De Datos.....	52
5.2.	Árbol De Decisión .....	58
6.	Análisis y Resultados.....	61
6.1.	Velocidad Radial Bomba N°1.....	61
6.2.	Velocidad Radial Bomba N°2.....	64
6.3.	Aceleración Envolvente .....	65
6.4.	Temperaturas.....	68
6.5.	Vibración Axial.....	70
7.	Acciones de Mantenimiento .....	72
8.	Conclusiones .....	74
9.	Recomendaciones .....	76
	Referencias Bibliográficas .....	77
	Apéndices.....	78

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. <i>Factores de criticidad (No conocido)</i> .....	33
Tabla 2. <i>Propiedades físicas de grasa de lubricación</i> .....	35
Tabla 3. <i>Análisis de Fallas y efectos</i> .....	37
Tabla 4. <i>Variación de medición con respecto a presión de descarga</i> .....	46
Tabla 5. <i>Formato de Datos Registrados y Análisis</i> .....	55
Tabla 6. <i>Identificación De Actividades de mantenimiento</i> .....	72
Tabla 7. <i>Actividades de Mantenimiento Asociadas A Límites de Operación</i> .....	72

### Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. <i>Categorización del mantenimiento (ISO 14224, 2016)</i> .....	18
Figura 2. <i>Curva P-F (SAE JA1012,2016)</i> .....	19
Figura 3. <i>Diagrama de árbol de decisión (Hernández &amp; Torres, 2014)</i> .....	21
Figura 4. <i>Procedimiento esquemático de implementación de monitoreo de condición (ISO 17359, 2018)</i> .....	23
Figura 5. <i>Caldera acuatubular Advance Boiler</i> .....	24
Figura 6. <i>Jerarquía de equipo caldera advance</i> .....	26
Figura 7. <i>P&amp;ID cardera advance (advance Boilers, 2012)</i> .....	27
Figura 8. <i>Bomba Principal De Alimentación Al Drum</i> .....	28
Figura 9. <i>Sistema Alimentación de agua a caldera (sistema skada)</i> .....	29
Figura 10. <i>Curva de bomba caldera Hega (manual de servicio SIHI IS-0121.03.15, 2015)</i> .....	31
Figura 11. <i>Plano de cortes Hega 40 B* BK* (manual de servicio SIHI IS-0121.03.15, 2015)</i> ...	31
Figura 12. <i>Listado de partes de la bomba (manual de servicio SIHI IS-0121.03.15, 2015)</i> .....	32
Figura 13. <i>Resultado Análisis de criticidad bomba (Archivo de análisis de criticidad Palcesar S.A.)</i> .....	33
Figura 14. <i>Frecuencia y cantidad de lubricación (manual de operación Bomba Hega)</i> .....	36
Figura 15. <i>Parámetros de monitoreo con respecto a los equipos (ISO 17359, 2018)</i> .....	38
Figura 16. <i>Tipos de Falla de bomba con respecto a parámetro (ISO 17359, 2018)</i> .....	39
Figura 17. <i>Especificaciones técnicas del equipo (CM2355 SKF Condition Monitoring Essentials)</i> .....	40
Figura 18. <i>Puntos De Medición En Piezas No Giratorias (ISO 20816-1:2016)</i> .....	42

Figura 19. <i>Sección De Medición</i> .....	43
Figura 20. <i>Codificación de puntos de Medición</i> .....	44
Figura 21. <i>Marcación de puntos de Medición</i> .....	44
Figura 22. <i>Límites de Vibración Bombas Rotodinámicas (ISO 10816-7; 2003)</i> .....	47
Figura 23. <i>Zonas y Límites de Vibración Bomba Clase II (Autor)</i> .....	50
Figura 24. <i>Límites de Vibración envolvente en gE (SKF Asesor del estado de la máquina, Manual de usuario P/N 32150500-SP)</i> .....	51
Figura 25. <i>Cuadro de dialogo</i> .....	53
Figura 26. <i>Gráfica De Vibración Radial</i> .....	55
Figura 27. <i>Gráfica De Vibración Aceleración gE</i> .....	56
Figura 28. <i>Gráfica De Vibración Axial</i> .....	57
Figura 29. <i>Gráfica De Temperatura</i> .....	58
Figura 30. <i>Diagrama De Árbol De Decisiones</i> .....	59
Figura 31. <i>Gráfica De Vibración Aceleración gE</i> .....	60
Figura 32. <i>Velocidad De Vibración Bomba N°1, Sección 3</i> .....	63
Figura 33. <i>Velocidad De Vibración Bomba N°1, Sección 4</i> .....	63
Figura 34. <i>Velocidad De Vibración Bomba N°2, Sección 3</i> .....	64
Figura 35. <i>Velocidad De Vibración Bomba N°2, Sección 4</i> .....	65
Figura 36. <i>Aceleración Envolvente De Bomba N°1</i> .....	66
Figura 37. <i>Aceleración Envolvente De Bomba N°2</i> .....	67
Figura 38. <i>Temperatura Bomba N°1</i> .....	69
Figura 39. <i>Temperatura Bomba N°2</i> .....	69
Figura 40. <i>Velocidad Vibración Axial Bomba N°1</i> .....	70

Figura 41. *Velocidad Vibración Axial Bomba N°2*..... 71

**Lista de Apéndices**

	<b>pág.</b>
Apéndice A. Formato CBM. El apéndice está adjunto y se puede consultar en el Repositorio Institucional.....	78
Apéndice B. Diagrama Árbol De Decisiones. El apéndice está adjunto y se puede consultar en el Repositorio Institucional.....	79
Apéndice C. Código De Programación Visual Basic. El apéndice está adjunto y se puede consultar en el Repositorio Institucional. ....	79

## Resumen

**Título:** Plan de mantenimiento basado en condición (CBM), por medio de monitoreo off-line de parámetros de vibración y temperatura para bomba principal de alimentación de agua a la caldera advance, basado en árbol de decisiones.\*

**Autor:** Javier Alexander Huérfano Puentes\*\*

**Palabras Clave:** CBM, Mantenimiento basado en condición, monitoreo de condición, vibraciones mecánicas, temperatura, bombas, caldera, árbol de decisiones.

**Descripción:** Esta monografía pretende presentar una guía básica de implementación de mantenimiento basado en condición CBM para una bomba centrífuga multietapas por medio de monitoreo de variables de vibración en velocidad, aceleración envolvente y temperatura y evalúa estas variables con los límites de operación definidos por medio de árbol de decisiones. Para la implementación es tomada como guía el estándar ISO-17359 la cual establece unas directrices generales de monitoreo y diagnóstico de condición de máquinas las cuales van desde la auditoria del equipo, análisis de confiabilidad y criticidad, selección del método de monitoreo, adquisición y análisis de datos y la determinación de las acciones de mantenimiento. Se establecen los parámetros y límites de operación basados en el estándar ISO 10816 la cual nos indica la evaluación de vibración en máquinas, medidas en partes no rotativas específicamente la parte N°7 dirigida hacia las bombas rotodinámicas de aplicación industrial. Si bien la monografía está dirigida hacia la bomba de la caldera, la implementación y estructuras realizadas quedan abiertas para ser aplicadas en cualquier tipo de bomba o equipo industrial definiendo los límites de operación bajo la norma aplicable. En la monografía se realiza seguimiento a las variables tomadas y un análisis en el cual se generan intervenciones de mantenimiento para verificar los cambios en las variables y definir así las intervenciones de mantenimiento adecuadas que afectan directamente a la variable tomada.

---

\*Trabajo de Grado Monografía

\*\*Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Director: Jabid Eduardo Quiroga Méndez. PhD.

### Abstract

**Title:** Condition based maintenance plan (CBM), through off-line Monitoring of vibration and temperature parameters for the main water feed pump to the advance boiler, based on a decision tree.\*

**Author(s):** Javier Alexander Huerfano Puentes\*\*

**Key Words:** CBM, Condition based maintenance, Condition monitoring, mechanical vibration, Temperature, Pump, Boiler, Decision tree.

**Description:** This monograph aims to present a basic implementation guide for maintenance-based condition CBM for a multistage centrifugal pump by monitoring vibration variables in speed, envelope acceleration and temperature and evaluates these variables with the operating limits defined by means of a maintenance decisions tree. For implementation, the ISO-17359 standard is taken as a guide, which establishes general guidelines for monitoring and diagnosing of condition machines, which range from equipment audit, reliability and criticality analysis, selection of the monitoring method, acquisition and data analysis and the determination of actions maintenance. The operating parameters and limits are established based on the ISO 10816 standard, which indicates the evaluation of vibration in machines, measured in non-rotating parts, specifically part No. 7 directed towards rotodynamic pumps for industrial application. Although the monograph is directed towards the boiler pump, the implementation and structures carried out remain open to be applied to any type of pump or industrial equipment, defining the operating limits under the applicable standard. In the monograph, the variables taken are monitored and an analysis is carried out in which maintenance interventions are generated to verify the changes in the variables and thus define the appropriate maintenance interventions that directly affect the variable taken.

---

\* Degree Work Monograph

\*\* School of Mechanical Engineering. Specialization in Maintenance Management. Advisor: Jabid Eduardo Quiroga Méndez. PhD.

## Glosario

**Alarma:** Valor de parámetro en el cual permite analizar o buscar la ventana de tiempo para realizar actividad de mantenimiento.

**Peligro (Trips):** valor límite de parámetro en el cual se debe realizar acción inmediata de mantenimiento

**CBM (Condition Based Maintenance):** mantenimiento basado en condición.

**DE (Drive End):** en un equipo de rotación, lado del eje donde se transmite energía o lado acople.

**Falla Potencial:** punto en el tiempo en el cual la falla del elemento ya es detectable.

**Falla Funcional:** punto en el tiempo en el cual el equipo deja de ejercer su función principal.

**MTBF (Mean Time Between Failure):** tiempo medio entre falla del mismo elemento en un equipo.

**MTTF (Mean Time To Repair):** tiempo medio para reparar desde que ocurre la falla funcional en el equipo hasta que se reestablece su funcionamiento normal.

**NDE (Non Drive End):** En un equipo de rotación, lado del eje donde no se transmite energía, lado libre.

**RCM (Reliable Centered Manintenance):** Mantenimiento Centrado en Confiabilidad

**Temperatura:** magnitud física que identifica la energía térmica de un cuerpo

**Tareas basadas en condición:** Son las tareas de mantenimiento programadas para toma o inspección de parámetros basados en condición

**Vibración:** movimientos cíclicos oscilantes que tienen una maquina por efecto de la disipación de energía a determinada amplitud y frecuencia.

## Introducción

PALMAS DEL CESAR S.A. cuenta con una caldera de tipo acua-tubular marca ADVANCE BOILER de origen asiático (Malasia), con una capacidad nominal de generación de vapor sobrecalentado de 27 ton/hora a 340 Celsius y una presión de operación de 32 bares.

La caldera puede ser considerada como el corazón del proceso de extracción de aceite de palma, ya que esta abastece de vapor al proceso que requiere netamente de energía térmica en las diferentes etapas como: esterilización, digestión, prensado, clarificación, palmistería y almacenamiento de aceite, además de la generación de energía eléctrica por medio de una turbina de vapor.

La caldera cuenta actualmente con 10 años de operación y a lo largo de su vida útil ha presentado fallas en equipos rotativos como las bombas principales de alimentación de agua al drum los cuales han generado parada del equipo y consecuentemente de la planta de beneficio en el proceso de extracción y generación de energía eléctrica, generando de tal manera un alto impacto en costos operacionales, indisponibilidad de planta y disminución en confiabilidad de la misma.

Dentro de los equipos rotativos pertenecientes a la caldera, Las bombas de alimentación de agua al drum, se convierten en un equipo altamente crítico, debido a que una falla en el mismo puede generar un bajo nivel de agua en el drum que dejaría a la caldera sin una refrigeración adecuada y puede producir un daño catastrófico por fundición en los tubos acuatubulares, lo cual podría generar una parada total de hasta 6 meses de la operación, afectando drásticamente la disponibilidad de la planta. Por lo cual, generar un plan de mantenimiento para las bombas de agua al drum de la caldera, por medio de seguimiento de sus parámetros de operación, en el que podamos monitorear su condición, aumentar el nivel de detección de fallas y ayudar a tomar

decisiones que nos ayuden a disminuir la frecuencia de falla, aumentar el tiempo medio entre fallas, para garantizar una mayor disponibilidad y confiabilidad del equipo bajo unos costos óptimos, se convierte en una necesidad en el proceso de generación de vapor.

Uno de los parámetros más importantes que intervienen en el proceso para realizar la extracción de aceite crudo de palma africana es la energía térmica que se obtiene por medio de vapor producido en una caldera que realiza combustión de biocombustible obtenido del mismo fruto de la Palma (Fibra + Cascarilla). Otro de los beneficios del vapor obtenido de la caldera, es la cogeneración de energía eléctrica obtenida por medio de una a turbina de vapor, la cual abastece hasta un 70% del requerimiento energético de la planta de beneficio, aportando un importante ahorro económico en costos de energía y un alto impacto ambiental en generación de energía limpia alternativa. De tal manera la generación de vapor juega un valor importante en términos de disponibilidad, energéticos, ambientales, de seguridad y de costos en la planta de beneficio de extracción de aceite, convirtiendo la caldera en un equipo de alta criticidad en el proceso, en donde una falla genera el paro total de la planta de procesamiento de aceite y generación de energía.

Debido a la alta criticidad del equipo surge la necesidad de constituir un plan de mantenimiento basado en monitoreo de condiciones que permita realizar el seguimiento en operación a la bomba principal de alimentación de agua en operación, sin afectar la disponibilidad de la maquina y definir estrategias de mantenimiento, que aumenten esta disponibilidad y la confiabilidad del equipo por medio de inspecciones y actividades de mantenimiento. Además, por medio de la estrategia de mantenimiento basado en condición podemos obtener beneficios con respecto a:

1. disminuir el consumo de repuestos debido a que aumentamos el ciclo de vida de los mismos y no hay cambios por preventivo sino por una condición medible.

2. disminuir las horas hombre por mantenimientos de tipo preventivo y correctivo puesto que en el monitoreo solo se interviene si se detecta una condición fuera de parámetro.

3. Es un mantenimiento de tipo no invasivo que aumenta la disponibilidad del equipo y el cual se le puede realizar seguimiento en operación.

4. Por lo anterior implícitamente disminuye los costos de mantenimiento.

Este plan se propone como una definición de una estructura básica preliminar de un mantenimiento basado en condición por medio de monitoreo de variables de vibración y temperatura, que se pueda replicar hacia los demás equipos críticos rotativos de la planta.

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo General**

Implementar una estrategia de mantenimiento basado en condición, por medio de monitoreo off-line de parámetros de amplitud de vibraciones mecánicas (velocidad y aceleración) y temperatura, aplicada a la bomba principales de alimentación de agua HEGA-SIHI PUMP de la caldera ADVANCE BOILER, basado en árbol de decisiones para aumentar la disponibilidad del equipo.

### **1.2. Objetivos Específicos**

Realizar auditoria de confiabilidad y criticidad del equipo, definiendo parámetros y seleccionando la estrategia de mantenimiento apropiada según análisis de modos de falla.

Definir método y estructura de adquisición y monitoreo de datos off-line para los parámetros de vibración mecánica (velocidad, aceleración) y temperatura.

Realizar análisis, interpretación y validación de datos para establecer los límites operativos, parámetros de alerta y de alarma (trips) con respecto a las condiciones propias de operación y la norma ISO 10816.

Representar gráficamente y establecer en software determinado el análisis y clasificación de resultados basados en la técnica analítica de árbol de decisiones, con el fin de identificar las actividades de mantenimiento basadas en condición adecuadas para reestablecer el parámetro a su estado de operación normal.

## 2. Marco Teórico

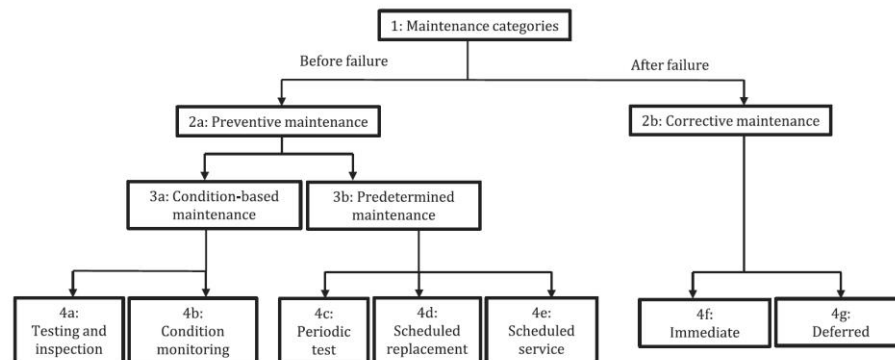
### 2.1. Estrategias Mantenimiento

A lo largo de la historia el mantenimiento ha venido convirtiéndose en uno de las principales áreas de las industrias, pasando de ser visto gerencialmente de un gasto a una inversión y jugando un papel principal en la ingeniería y gerencia de mantenimiento garantizando la disponibilidad, operación y óptimos costos en el proceso industrial.

La norma ISO 14224, 2016 clasifica en dos conceptos principales del mantenimiento el primero, el que actúa después de la falla también conocido como mantenimiento reactivo o correctivo y este puede atenderse de manera inmediata o programada, y en segundo caso el que actúa antes de que ocurra la falla funcional conocido como el mantenimiento proactivo o preventivo, dentro del cual se clasifican el mantenimiento basado en condición que se compone de inspección, pruebas y monitoreo de condición y por último el mantenimiento predeterminado que se basa en las pruebas periódicas y el plan de mantenimiento establecido de servicios y reemplazo de piezas.

#### Figura 1.

*Categorización del mantenimiento (ISO 14224, 2016)*



NOTE 3b — Predetermined maintenance, see EN 13306:2010, 7.2; 4c — Periodic test (as defined in 3.74) to detect potential hidden failures; 4e — In this International Standard, the term “scheduled service” is used, since it is meant to cover minor and major life-prolonging service activities; 4g — Deferred maintenance should also include planned corrective maintenance, i.e. where run-to-failure is the chosen failure management strategy.

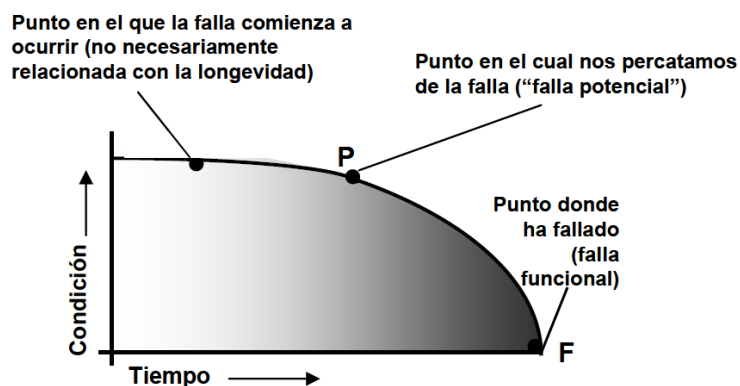
### 2.1.1 Mantenimiento Basado En Condición CBM

El mantenimiento basado en condición nace con el fin de aumentar el ciclo de vida del elemento por medio un seguimiento de monitoreo de condiciones del equipo generalmente en operación o fuera de él y como su nombre lo dice este se basa en las condiciones o parámetros medibles del equipo los cuales nos pueden indicar su funcionamiento normal o anormal y un conocimiento amplio de la máquina, de tal manera que permite detectar fácilmente una posible falla en el elemento de monitoreo y con respecto a esta variable actuar, generando una actividad de mantenimiento planeada con el fin de reestablecer a su parámetro normal de operación el activo, esto genera unas ventajas como:

1. El monitoreo de condición se puede realizar en operación, sin necesidad de afectar la disponibilidad.
2. Se dispone de un historial que permite tener el conocimiento de la funcionalidad del equipo permitiendo tomar decisiones fundamentales en el mantenimiento y operación.
3. Se alarga la vida útil del elemento ya que se realiza el cambio cuando se requiere (cuando ya ocurre la falla potencial, sin llegar a la falla funcional)

**Figura 2.**

*Curva P-F (SAE JA1012,2016)*



El mantenimiento basado en condición o por sus siglas en inglés CBM (Condition based maintenance), es una estrategia de mantenimiento que se puede clasificar dentro del mantenimiento preventivo o proactivo y se enfoca detectar una falla potencial por medio de monitoreo de condiciones y con base a esto determinar un diagnóstico y pronóstico para determinar una actividad de mantenimiento que pueda reestablecer el sistema a su operación normal.

En la curva P-F podemos graficar la condición con respecto al tiempo e identificamos un primer punto en el tiempo que marca el inicio de la falla, sin embargo, en este punto no es muy detectable por medio de las técnicas de monitoreo, continuamente viene un punto (P) llamado falla potencia que es donde la falla ya puede ser detectada por alguno de los métodos de monitoreo, pero aun sin tener una falla funcional (F) que es el último punto de la gráfica en donde el elemento ya no es capaz de cumplir su función.

Este intervalo de tiempo entre la falla potencial y la falla funcional lo define la norma SAE JA1012, como el intervalo P-F, es en este intervalo de tiempo en el cual la falla empieza a presentar señales tempranas, ruidos audibles, vibraciones, altas temperaturas, o parámetros de operación fuera de rango, entre otras, por lo cual es en este intervalo P-F es en donde se aplican las técnicas de detección pertinentes al modo de falla del elemento.

## **2.2. Árbol de Decisiones**

En el mantenimiento basado en condición una de las más importantes fases es establecer un diagnóstico y pronóstico en el análisis de datos y establecer una serie de actividades de mantenimiento basados en una condición, es decir, la toma de una decisión favorable que resuelva el problema presentado.

Como se define en el libro Planeación y control [9] “las decisiones son elecciones entre distintas opciones que se presentan para atender la necesidad de decisión identificada (problema u

oportunidad)". Para esto, existen varias técnicas de toma de decisión como lo son: la tabla de resultados, el árbol de decisiones, la toma de decisiones sin probabilidad y con probabilidad y el análisis de sensibilidad.

Para nuestro problema nos enfocaremos en la técnica de árbol de decisiones, la cual, con base a unos resultados de las variables tomadas, comparamos con la norma, clasificamos en un resultado y determinamos una acción y verificamos, esto no termina aquí, ya que es un ciclo cerrado en el cual al final se revisa y evalúa para ir corrigiendo, complementando y afinando el sistema completo.

El árbol de decisiones se define como un método analítico que se puede representar gráficamente y tiene la característica de exponerse en orden consecutivo, lo cual para términos de interpretación objeta una facilidad de comprensión visual.

como se muestra en la figura 3, un diagrama de árbol de decisión se compone con las notaciones de cuadrado como punto de acción o elección, círculo como punto de eventos y ramas. ***Punto De Acción o Elección (Cuadrado)***. Como su nombre lo especifica este es un punto de toma acción en donde se toma una decisión, en este punto se debe clasificar una rama con base a un criterio previamente establecido.

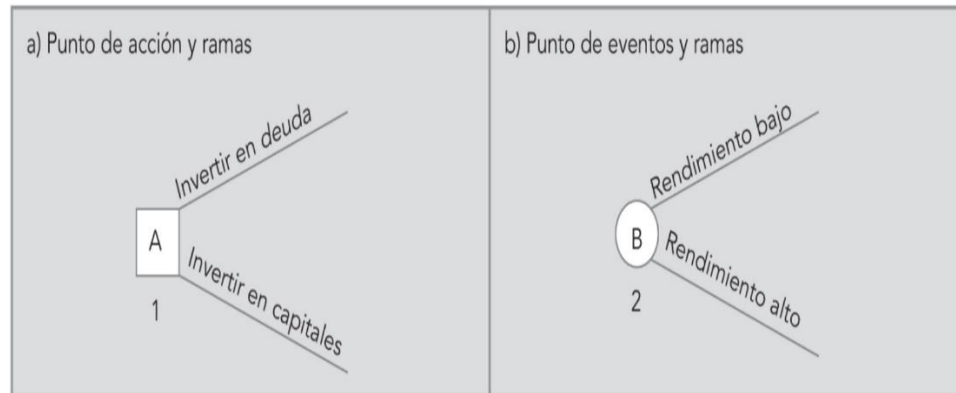
***Punto De Eventos (Círculo)***. Este punto representa lo que por estado natural se presenta, en el cual no se puede tomar una decisión sino simplemente una clasificación.

***Ramas (Líneas)***. Son las líneas de interconexión entre los puntos de elección y eventos.

***Resultados***. Estos se denotan al final del árbol de decisiones e identifica la acción final a establecer para la resolución del problema en el sistema.

### **Figura 3.**

*Diagrama de árbol de decisión (Hernández & Torres, 2014)*



### 2.3. Normas Aplicables

Son numerables las normas que aplican o tratan el mantenimiento y monitoreo basado en condición, basado en indagaciones en la industria y en lo aplicable para el objetivo propuesto, se tomaran como una guía las siguientes normas “ISO-International Standard Organization” Por sus siglas en inglés:

#### 2.3.1. ISO 10816

Esta norma se divide en varias partes comenzando por la parte 1 la cual se refiere a la directrices generales de medición y evaluación de las vibraciones mecánicas de las máquinas, y grosso modo define y clasifica los tipos de medidas, parámetros de medición, posiciones de medición, además, establece unos criterios de evaluación basados en la magnitud o severidad de la vibración y en el cambio de la magnitud de la vibración en el tiempo, establece unos límites operativos clasificados por zonas y unos niveles de alarmas y trips de disparo que son solo aplicables para medidas de vibraciones radiales, excluyendo las axiales. Estos valores están definidos en cada una de sus partes para diferentes tipos de máquinas, que para nuestro caso aplica la parte N°7 “Evaluación de vibración de la maquina mediante mediciones en piezas no giratorias. Parte 7: Bombas rotodinámicas para aplicación industrial”.

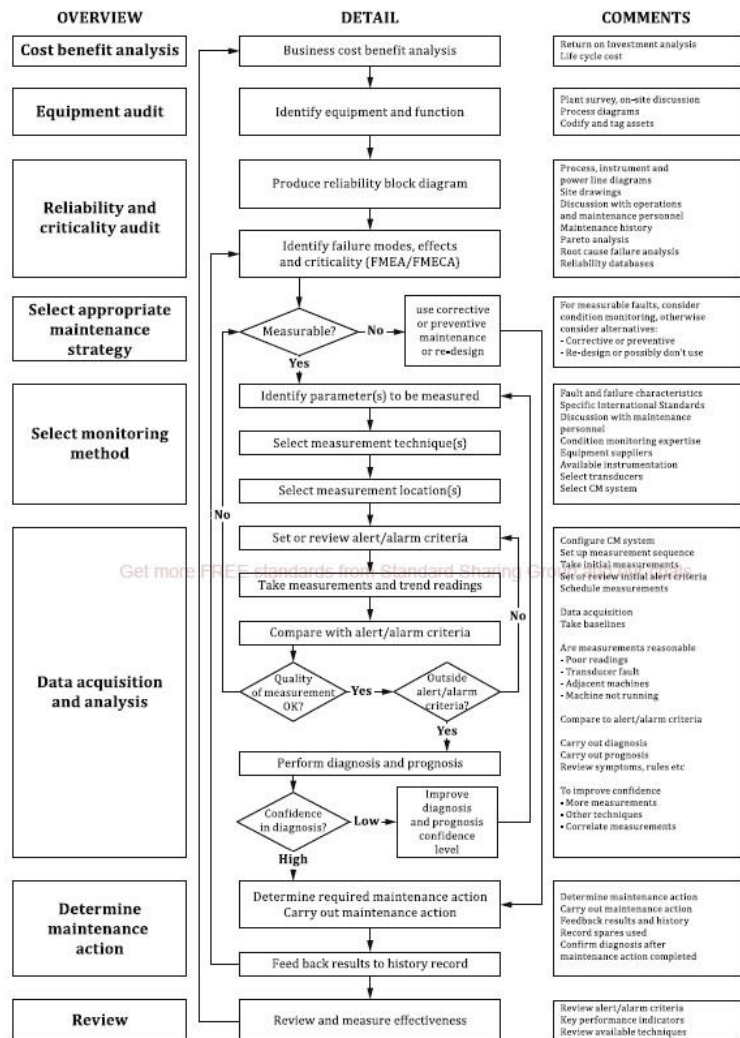
### 2.3.2. ISO 17359

Monitoreo y diagnóstico de condición de máquinas – Directrices generales. Esta norma es un overview sobre el monitoreo de condiciones y diagnóstico de las maquinas mencionando las reglas generales y utilizando parámetros de operación como la vibración, temperatura, análisis de aceites, caudales, potencia, velocidad, entre otros.

La ISO 17359 proporciona un procedimiento genérico que puede usarse como guía para la implementación de cualquier sistema de monitoreo de condición, en la cual tomaremos como base para el desarrollo de la actividad. El procedimiento se describe iniciando con un análisis de costo beneficio, seguido de una auditoría de equipo en donde se identifica el equipo y su sistema con todas sus variables y función principal, se realiza un análisis de fiabilidad y criticidad del equipo implementando un análisis de fallas, Luego vienen una selección del método de monitoreo en donde se identifican los parámetros, se selecciona la técnica y ubicaciones de medición, a continuación la adquisición y análisis de datos en donde basados en la norma estableceremos los criterios de alerta y alarma y se realiza un seguimiento, análisis y diagnostico para finalmente determinar las acciones de mantenimiento requeridas, ejecutándolas y realizando un feed back en todo el proceso hasta reestablecer los parámetro normales de operación.

#### **Figura 4.**

*Procedimiento esquemático de implementación de monitoreo de condición (ISO 17359, 2018)*



### 3. Auditoría de Equipo

#### 3.1. Caldera Advance Boilers

La caldera advance fue adquirida PALMAS DEL CESAR S.A. en el año 2012, la cual fue fabricada e importada desde malasia y puesta en operación en el año 2013.

Figura 5.

Caldera acuaturbular Advance Boiler



CALDERA TIPO: ACUATUBULAR (PARED DE MEMBRANA)

MARCA/ SERIAL N°: ADVANCE BOILER / WT-0430

CODIGO DE DISEÑO: BS 1113: 1999

CAPACIDAD: 27 ton vapor / hora

PRESION DE OPERACION: 33 barg

PRESION DE DISEÑO: 37 barg

TEMPERATURA DE OPERACIÓN: 340 c

La caldera está diseñada para utilizar como combustible subproductos de la palma de aceite con 70% de fibra del mesocarpio de la fruta de palma y 30% de cascarilla de la nuez del fruto de palma, los cuales al mezclar con el oxígeno introducido por el ventilador forzado y el ventilador de sobre fuego obtenemos la combustión en el hogar de la caldera, de tal manera, por medio de radiación y convección en los gases de combustión transmite esta energía térmica por medio de un sistema compuesto de paredes de tuberías con membranas y banco de tubos, por lo cual en el drum de vapor compuesto por 50% de agua y 50% de vapor a 30 barg de presión y una temperatura de

saturación de 235 Celsius, se generan 27 toneladas hora de vapor que pasa por un super heater convirtiéndolo en vapor sobrecalentado aumentando su temperatura a 340 Celsius.

Este vapor sobrecalentado es pasado inicialmente por una turbina de vapor que convierte esa entalpía en energía mecánica que hace girar un generador de 1.6 Mw, transformándola en energía eléctrica capaz de abastecer hasta un 70% del consumo total de energía de la plantación.

Luego este vapor sale de la turbina a 4 barg y a una temperatura de 180 Celsius, el cual pasa a un distribuidor de vapor el cual se encuentra con un 30% de agua que se encarga de saturar el vapor y acumular vapor de baja para distribuir a los diferentes procesos de la extracción de aceite de palma.

### Figura 6.

*Jerarquía de equipo caldera advance*



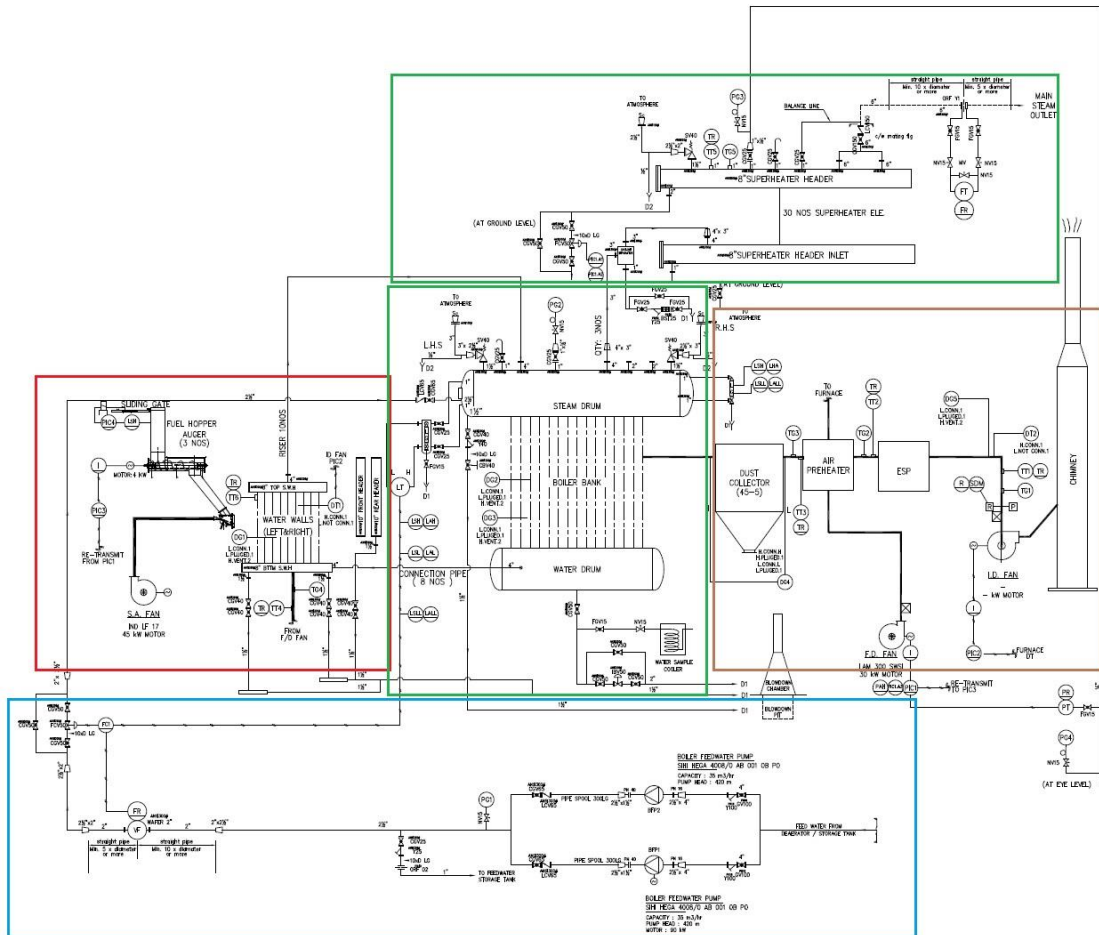
*Nota.* En la figura se observa la clasificación y el árbol jerárquico al que pertenece la caldera, imagen tomada del software de mantenimiento de Palmas del Cesar S.A.

La jerarquización de la caldera en el proceso en la unidad de negocio realizada fue tomada como guía la ISO 14224, en el cual se muestra que la caldera pertenece a la Sección de servicios

industriales en el servicio de Generación de vapor y el diseño de distribución de vapor esta implementado para poder distribuir vapor a cualquiera de las dos líneas de proceso.

**Figura 7.**

*P&ID cardera advance (advance Boilers, 2012)*



*Nota.* La imagen corresponde al plano P&ID de la caldera advance propiedad de palmas del cesar, elaborada por advance Boilers y se delimita los sistemas principales.

La caldera se clasificó en cinco sistemas principales correspondientes de la siguiente manera:

***Sistema de Combustión (Rojo).*** El sistema de combustión está compuesto por los equipos: Sinfines de alimentación, compuertas de alimentación, ventilador de alimentación, hogar de combustión, parrilla reciprocante, ventilador forzado y sistema de control y potencia.

***Sistema De Alimentación De Agua (Azul).*** El sistema de Alimentación de agua está compuesto por los equipos Bomba N°1, Bomba N°2, válvulas manuales de cierre, placa orificio de retorno, válvula proporcional de control automático, medidor de flujo de agua y sistema de control y potencia.

***Sistema De Generación De Vapor (Verde).*** El sistema de generación de vapor está compuesto de los equipos: tubería de paredes acuatubulares, banco de tubos, drum de vapor, drum de agua, válvula de control automática de purgas, super heater, válvulas de seguridad, medidor de flujo de vapor y sistema de control.

***Sistema De Tratamiento De Cenizas y Humos (Marrón).*** Este sistema se compone de los equipos: multiciclón, precalentador de aire, precipitador electrostático, ventilador inducido, chimenea de humos, redler de ceniza húmeda, sinfines de ceniza y sistema de control y potencia.

### **3.2. Bomba Alimentación De Agua**

La caldera está compuesta por dos bombas de alimentación de agua, una principal y una de stand by y su principal función es alimentar de agua al drum de vapor de la caldera a una presión de operación nominal mayor a 30 bares y a una temperatura de 105 c y debe mantener el nivel del drum de vapor a un 57%.

#### **Figura 8.**

*Bomba Principal De Alimentación Al Drum*



MARCA: HEGA – SIHI PUMPS

SERIAL: HEGA 04008-0AB BK3 0B P0

NUMERO DE ETAPAS: 08

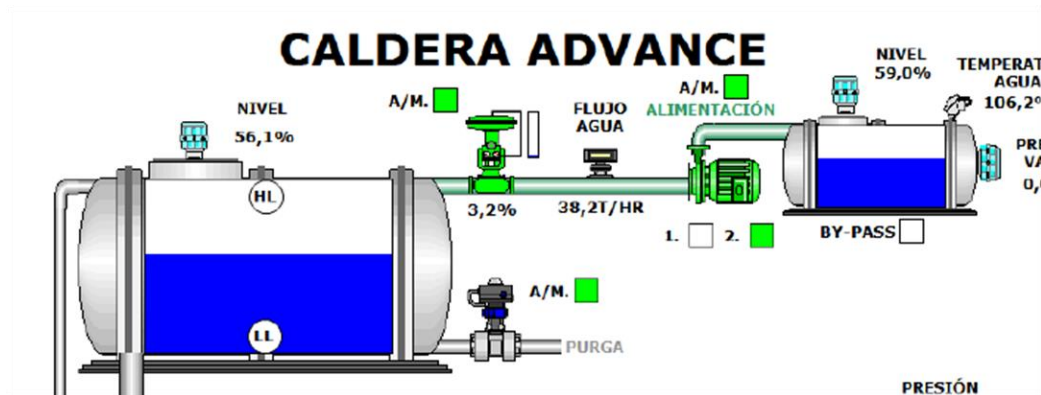
DIAMETRO IMPELLER: 175

POTENCIA: 125 HP

VELOCIDAD ANGULAR: 3583 rpm

**Figura 9.**

*Sistema Alimentación de agua a caldera (sistema skada)*



El funcionamiento de la bomba en su normal operación siempre esta encendida a 3583 rpm constantes y se regula la entrada de agua a la caldera por medio de una válvula de control automática que abre o cierra proporcionalmente por la señal enviada por el transmisor de nivel de agua en el drum de vapor el cual se debe mantener en un 57%, cuando la válvula cierra el flujo de agua retorna por una platina de orificio al tanque de agua caliente y la bomba se va a una presión máxima y un flujo mínimo de operación.

El proceso de agua de alimentación inicia recogiénose del canal reservorio y se envía a la planta de tratamiento de agua en donde se filtra y suaviza, luego se envía a un tanque de agua caliente que por medio de vapor lo lleva hasta 65°C, luego es enviado por medio de una bomba al tanque desairador, el cual se encarga de liberar el oxígeno que contiene llevando el agua a una temperatura de 105 Celsius, inyectándole vapor a 5 psi por medio de una válvula auto pilotada. Seguidamente, por último, se le inyectan queda los químicos para el tratamiento de agua de la caldera en la succión de las bombas principales e ingresa finalmente a la caldera para el proceso de generación de vapor.

Según la Figura 10. Muestra la gráfica de la curva de la bomba para el punto normal de operación para bombeo de agua a 105 Celsius y 34 barg de presión tenemos:

$$\text{Head: (h) * (\#etapas)} = 53\text{m} * 8 = 424 \text{ m} = 34 \text{ barg}$$

$$\text{Caudal: } 36 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Flujo masico: } 34 \text{ ton/h}$$

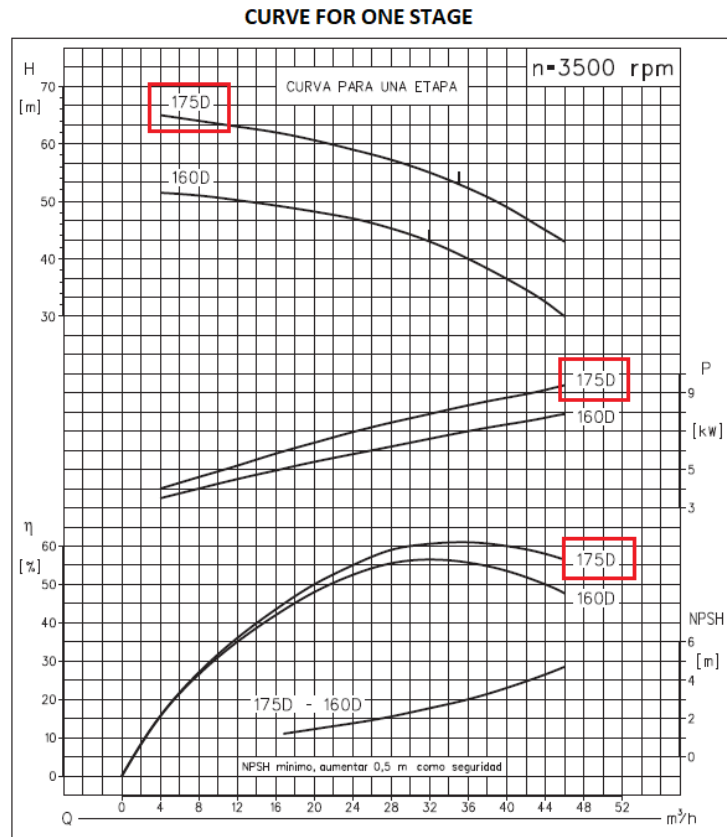
$$\text{Potencia: } 8.3 * 8 = 66.4 \text{ Kw} = 90 \text{ Hp}$$

En el cálculo teórico en su funcionamiento normal obtenemos un resultado de 34 toneladas hora, corroborando en los datos de tendencia de los parámetros de flujo masico real

medidos en sitio, tenemos unos valores que oscilan entre 36 y 46 toneladas por hora de agua que ingresa a la caldera con válvula abierta en su operación normal.

**Figura 10.**

*Curva de bomba caldera Hega (manual de servicio SIHI IS-0121.03.15, 2015)*

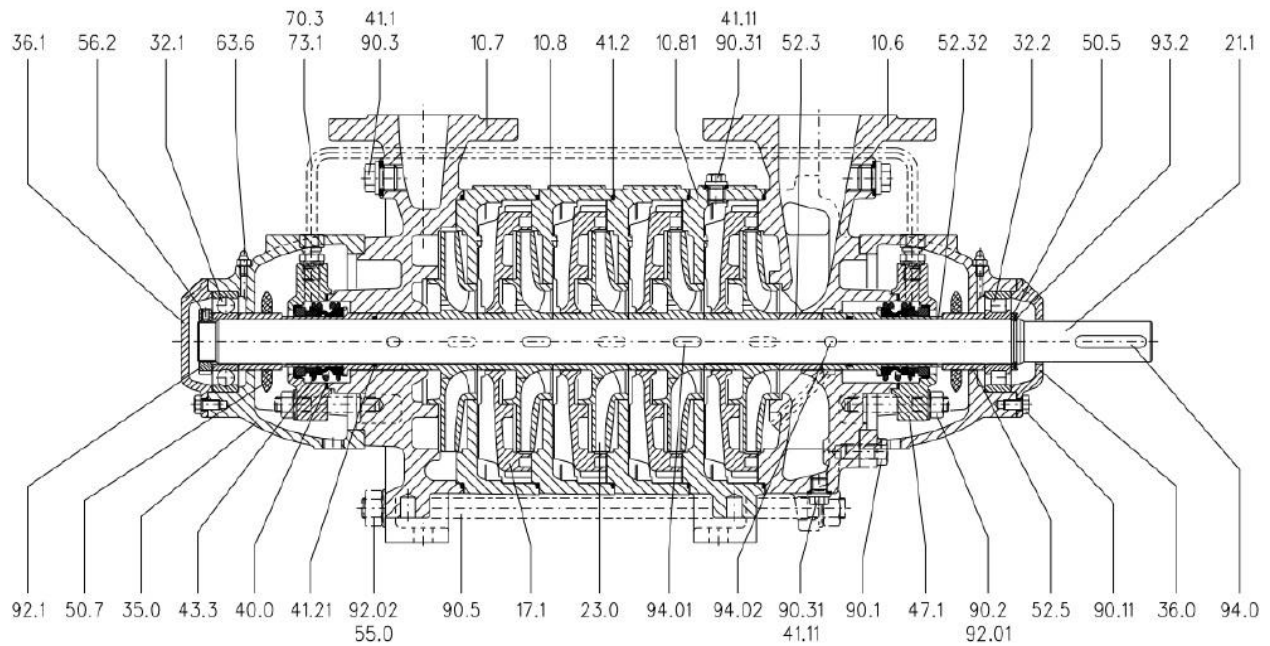


*Nota.* Cabeza y potencia para más de una etapa es igual a la cabeza o potencia multiplicada por el número de etapas.

El plano y la identificación de las partes de la bomba se muestran a continuación:

**Figura 11.**

*Plano de cortes Hega 40 B\* BK\* (manual de servicio SIHI IS-0121.03.15, 2015)*

**Figura 12.**

Listado de partes de la bomba (manual de servicio SIHI IS-0121.03.15, 2015)

Pos.	Denominación	Pos.	Denominación
10.6	Cuerpo de aspiración	52.3	Casquillo de eje (distanciador)
10.7	Cuerpo de descarga	52.31	Casquillo de eje (distanciador)
10.8	Cuerpo de etapa	52.32	Casquillo de protección del eje (sm)
10.81	Cuerpo de etapa con patas	52.4	Casquillo de protección del eje (pe)
17.1	Difusor	52.5	Casquillo de eje (distanciador)
17.11	Difusor (última etapa)	55.0	Arandela
21.1	Eje	56.12	Pasador cilíndrico
23.0	Impulsor	56.2	Tornillo prisionero
32.1	Rodamiento de bolas	63.6	Grasera
32.12	Rodamiento de contacto angular	70.3	Tubería de recirculación
32.2	Rodamiento de rodillos cilíndricos	73.1	Racor de conexión
35.0	Soporte rodamiento	90.1	Tornillo hexagonal
36.0	Tapa rodamiento	90.11	Tornillo hexagonal
36.1	Tapa rodamiento	90.2	Espárrago
40.0	Junta plana	90.21	Espárrago
41.1	O-ring	90.22	Espárrago
41.11	O-ring	90.3	Tapón roscado
41.12	O-ring	90.31	Tapón roscado
41.13	O-ring	90.32	Tapón roscado
41.2	O-ring	90.33	Tapón roscado
41.21	O-ring	90.5	Tirante de unión
41.22	O-ring	92.0	Tuerca hexagonal
41.23	O-ring	92.01	Tuerca hexagonal
43.3	Sello mecánico	92.02	Tuerca hexagonal
45.1	Cuerpo prensa estopas	92.1	Tuerca del eje
45.2	Brida prensa estopas	93.2	Anillo de seguridad (Seeger L-ring)
45.8	Anillo de cierre hidráulico	94.0	Chaveta
46.1	Empaquetadura	94.01	Chaveta
47.1	Tapa sello	94.02	Chaveta
50.5	Anillo de hombro	94.03	Chaveta
50.7	Anillo deflector		

### 3.2.1 Criticidad De La Bomba

Se realiza análisis de criticidad para la bomba de alimentación de agua principal de la caldera advance con respecto a los siguientes factores:

**Tabla 1.**

*Factores de criticidad (No conocido)*

FACTORES DE CRITICIDAD		
FF	FACTOR DE FRECUENCIA	ALTA FRECUENCIA
TPPT	TIEMPO PROMEDIO PARA REPARAR	VALOR DE PERSONAL
IO	IMPACTO OPERACIONAL	PRODUCCION
FO	FACTOR FLEXIBILIDAD OPERACIONAL	DINERO
CM	COSTO DE MANTENIMIENTO	DINERO
IMA	IMPACTO AL MEDIO AMBIENTE	SALUD Y AMBIANTE
IS	IMPACTO SEGURIDAD	SALUD Y AMBIANTE

De lo anterior en el análisis realizado en el año 2022 se toman los datos mostrados en la imagen siguiente, dando como resultado un valor de criticidad de 87.5 con un nivel de clasificación de la criticidad ALTO, los factores que más afectan son el factor de frecuencia, el tiempo para reparar, el impacto operacional y el factor económico.

**Figura 13.**

*Resultado Análisis de criticidad bomba (Archivo de análisis de criticidad Palcesar S.A.)*

		REGISTRO													VERSION 03	
		ANALISIS DE CRITICIDAD													SGC-RE-DPB-61	
SERVICIOS INDUSTRIALES																
PROCESO	Ci	EQUIPOS	SISTEMA	COMPONENTE	FF	TPPR	IO	FO	CM	IMA	IS	CO	CRITICIDA	NIVEL		
GENERACION DE VAPOR	GOV	CALDERA ADVANCE	CC	CALDERA ADVANCE	BOMBA	MEC	5	5	5	4	5	5	1	17,5	87,5	Alto

### ***3.2.2. Plan de mantenimiento actual***

El plan de mantenimiento actual está basado principalmente en el mantenimiento correctivo, con un plan básico de mantenimientos programados y un plan de monitoreo no estructurado en el cual se inspeccionan variables de vibración y temperatura solo del motor.

**Condiciones De Diseño, Montaje Y Operación.** En el año 2021 la frecuencia de falla de las bombas estaba en un umbral crítico de promedio 2 veces por año, en el cual las fallas más frecuentes eran por causa de daño en rodamientos, daño en sellos mecánicos, daño en acoples y válvulas. Por lo cual, para poder garantizar un buen funcionamiento del equipo, primero debemos garantizar que las variables principales que puedan afectar el funcionamiento sean corregidas, generalmente y en nuestro caso estas se refieren al montaje y recomendaciones del manual de operación y mantenimiento, por lo cual se realiza una revisión exhaustiva corrigiendo lo siguiente:

Se corrigen tensiones en las tuberías de succión y descarga los cuales generaban unas fuerzas de tensión en la bomba generando daño en rodamientos, acoples y desalineación con altas vibraciones y temperaturas.

Se modifican diámetros en tuberías de succión y bridas de conexión que no concordaban con la norma DIN de las bombas por lo cual generaba un cambio de secciones brusco que generaba cavitación en la bomba, al igual que las reducciones concéntricas se pasaron a excéntricas en instaladas según recomendaciones del manual.

Se realiza cambio de acoples por originales ya que contábamos con unos de fabricación hechiza, los cuales no nos garantizaban un óptimo funcionamiento.

Se realizó reforzamiento en el skid de la base de la bomba, mejorando el anclaje y reforzando su estructura.

Se realiza cambio de grasa de lubricación y establece una frecuencia de lubricación en las bombas de una vez por semana.

Se realiza plan de operación de la bomba principal y auxiliar, operando una semana cada bomba, con esto garantizamos poder detectar las fallas ocultas en las bombas.

Con todas estas actividades realizadas logramos reducir drásticamente la frecuencia de paradas y correctivos, llevando a cero la frecuencia de falla que me causara parada total de la planta, lo que nos indica que muchas veces no es el mantenimiento establecido lo que garantiza un buen funcionamiento sino cumplir con un diseño y montaje de ingeniería adecuados.

**Mantenimientos Programados.** Contamos con una inspección de vibraciones en el dominio de frecuencia realizado cada 6 meses por un especialista externo contratado, el cual toma el análisis y presenta un informe en donde realiza las recomendaciones estimadas según lo observado.

Por otra parte, cada 10.000 horas de operación o dos años de servicio se realiza cambio programado de rodamientos en la bomba.

**Lubricación.** Debido a la frecuencia de fallas altas se cambió el tipo de grasa de la recomendada por el fabricante a una de mayor calidad obteniendo excelentes resultados, en la siguiente tabla podemos observar las diferencias en las propiedades físicas de las grasas:

**Tabla 2.**

*Propiedades físicas de grasa de lubricación*

<b>PROPIEDADES FISICAS GRASA RODAMIENTOS</b>		
	<b>RECOMENDADA</b>	<b>SELECCIONADA</b>
<b>Marca:</b>	-	NCH
<b>Referencia:</b>	-	Extreme Green #2
<b>Consistencia NLGI:</b>	3	2
<b>Punto de Penetración:</b>	200 a 250 C	288 C

<b>Rango de Temperatura:</b>	-20 a 120 C	-23 a 260 C
<b>Punto de Goteo:</b>	> 170 C	> 302 C
<b>A base de:</b>	Complejo De Litio	Sulfonato De Calcio

*Nota:* La grasa seleccionada presenta mejor comportamiento a altas temperaturas.

La lubricación se encuentra programada actualmente con una frecuencia de 1 vez por semana (170 horas) y se inyecta una cantidad de 16 gramos por cada rodamiento.

#### Figura 14.

*Frecuencia y cantidad de lubricación (manual de operación Bomba Hega)*

Velocidad de rotación [rpm]	Intervalos de lubricación	Tamaño HEGA	Cantidad de grasa [gramos] según el soporte del eje			
			• B		• M	
			Lado aspiración	Lado descarga	Lado aspiración	Lado descarga
1.500	Cada 3.000 horas de operación	25 - 32	7,0	7,5	7,0	10,5
1.800	Cada 2.500 horas de operación	40 - 50	8,5	9,2	8,5	13,0
3.000	Cada 1.500 horas de operación	65	10,0	11,0	10,0	15,5
3.600	Cada 1.000 horas de operación	80	12,5	14,0	12,5	19,5

Según recomendación del manual de operación de la bomba este debe ser cada 1000 horas y una cantidad de 8.5 y 9.2 gramos, por lo cual concluimos que tenemos una alta frecuencia de lubricación con alta cantidad de grasa inyectada, la cual analizaremos para aumentar la frecuencia basados en el monitoreo de condiciones.

#### 3.2.3. Modos de Fallo y Efecto

Es necesario identificar los modos de fallo y efecto para las partes más críticas de la bomba, los cuales nos dirán el tipo de seguimiento deberíamos implementar y las variables de monitoreo a medir para detectar previamente la falla potencial sin que el activo presente una falla total.

En la siguiente tabla, podemos observamos que para los elementos o subcomponentes analizados para la bomba en donde el modo de falla refiere a aumento de vibración y temperatura,

los cuales son parámetros de seguimiento medibles, por lo cual podemos implementar el mantenimiento por monitoreo de condición.

Se observa también que algunos modos de falla se pueden detectar por la inspección visual, lo cual también representa una técnica de monitoreo de condición que implícitamente estará en la ruta de seguimiento realizada al equipo en el monitoreo de condición implementado.

**Tabla 3.**

*Análisis de Fallas y efectos*

SUB-COMPONENTE	ANÁLISIS FUNCIONAL				TAREAS
	FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA (Causa de la falla)	EFFECTOS DE LAS FALLAS (Qué sucede cuando falla)	
EJE	Transmitir potencia rotacional a los impulsores	El eje no gira	Fractura	No gira	Inspección visual
		El eje gira con dificultad	Desgaste Superficial	altas vibraciones y temperaturas	
IMPULSOR	Impulsar el caudal deseado a la presión del sistema	No genera el caudal y/o la presión deseada	Fractura o desgaste	Desbalanceo, altas vibraciones y temperaturas	Inspección de vibraciones y temperatura
			Espaciamiento alto entre impulsores	Disminuye caudal o presión	Inspección parámetros de operación
SELLO MECANICO	Realizar sello del fluido de la bomba al exterior	Fuga del fluido	Desgaste o fractura	Fuga de fluido	Inspección visual
RODAMIENTOS	Permitir giro del eje	El eje no gira o gira con dificultad	desgaste o fractura	Aumenta la vibración y temperatura	Inspección de vibraciones y temperatura
			desgaste o fractura	Aumenta la vibración y temperatura	Inspección de vibraciones y temperatura
			desgaste o fractura	Aumenta la vibración y temperatura	Inspección de vibraciones y temperatura
ACOPLE	Transmitir la potencia del motor a la bomba	No transmite la potencia óptimamente	desalineación o desajuste	Aumenta la vibración y temperatura	Inspección de vibraciones y temperatura

*Nota.* En el análisis observamos que las tareas principalmente se componen de inspección de vibraciones, temperaturas y visual.

## **4. Método de Monitoreo**

### **4.1. Selección De Los Parámetros**

Según lo realizado en el ítem anterior podemos observar que la mayoría de las fallas potenciales en una bomba centrífuga son la vibración y la temperatura y estos parámetros son medibles a los cuales se le puede realizar un seguimiento en el tiempo para determinar dos variables principales, la primera es la magnitud del parámetro y la segunda la variación de ese parámetro en el tiempo y de esta manera aplicar un mantenimiento basado en monitoreo de condición.

La norma ISO 17359-2018, proporciona una tabla con los parámetros a medir de los diferentes equipos industriales, en el cual observamos los parámetros más relevantes que se pueden medir en una bomba como la temperatura, presión, caudal, vibración, velocidad, entre otras.

#### **Figura 15.**

*Parámetros de monitoreo con respecto a los equipos (ISO 17359, 2018)*

Parameter	Machine type									
	Electric motor	Steam turbine	Aero gas turbine	Industrial gas turbine	Pump	Compressor	Electric generator	RIC engine	Fan	Power transformer
Temperature	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Pressure		*	*	*	*	*		*	*	*
Pressure (head)					*					
Pressure ratio			*	*		*				
Pressure (vacuum)		*			*					
Air flow			*	*		*		*	*	
Fuel flow			*	*			*			
Fluid flow		*			*	*				
Current	*						*			*
Voltage	*						*			*
Resistance	*						*			*
Electrical phase	*						*			
Input power	*				*	*	*		*	*
Output power	*	*	*	*			*	*	*	*
Noise	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Vibration	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Acoustic emission	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Ultrasonics	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Oil pressure	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
Oil consumption	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
Oil (tribology)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Thermography	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Torque	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
Speed	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
Length		*								
Angular position		*	*	*	*	*				
Efficiency (derived)		*	*	*	*	*	*	*		

\* Indicates condition monitoring measurement parameter is applicable.

**Key**  
RIC: Reciprocating internal combustion

NOTE This table contains examples and is not an exhaustive list. Other parameters may be appropriate to consider.

Por otra parte, la norma también nos muestra un ejemplo de fallas de bombas relacionado con los parámetros y técnicas. El sistema puede ser tan complejo como se quiera, pero claramente se puede observar que para todos los modos de fallas presentadas en la tabla para la bomba el síntoma o parámetro de cambio son la vibración y algunas en algunos casos también la temperatura.

### Figura 16.

*Tipos de Falla de bomba con respecto a parámetro (ISO 17359, 2018)*

Machine type: Pumps	Symptom or parameter change									
	Fluid leakage	Length measurement	Power	Pressure or vacuum	Speed	Vibration	Temperature	Coast down time	Oil debris	Oil leakage
Damaged impeller		*	*	*	*	*	*	*	*	*
Damaged seals	*	*		*	*	*				
Eccentric impeller			*	*	*	*	*	*		
Bearing damage		*	*		*	*	*	*	*	*
Bearing wear		*				*	*	*	*	
Mounting fault						*				
Unbalance						*				
Misalignment		*				*				

\* Indicates symptom could occur or parameter could change if fault occurs.

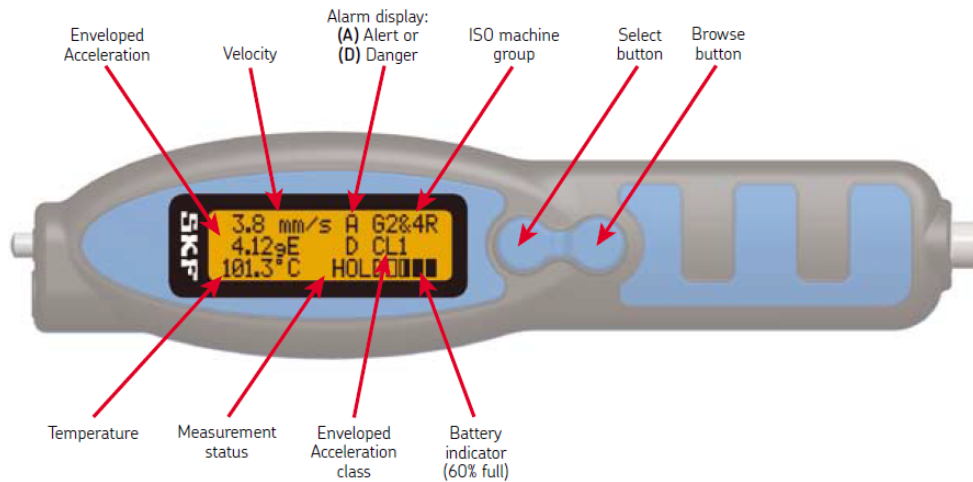
Con esto claramente podemos corroborar y definir los parámetros para nuestro monitoreo de condición serán la **Vibración y Temperatura**.

#### 4.2. Instrumento De Medición

Palmas del cesar cuenta con un equipo básico para sensor de vibraciones SKF Machine Condition Advisor CMAS 100-SL, este es un equipo portable cuenta con un acelerómetro piezoeléctrico integrado capaz de tomar medidas de velocidad de vibración en RMS y aceleración envolvente en gE, además cuenta con un sensor infrarrojo que mide la temperatura de la superficie de la pieza, por otro lado, el equipo cuenta con un programa predeterminado que compara automáticamente los valores con la norma 10816-3 y envía una señal de alerta o alarma a la pantalla.

#### Figura 17.

*Especificaciones técnicas del equipo (CM2355 SKF Condition Monitoring Essentials)*



### Specifications

- Vibration pickup:
  - Internal: Integrated piezoelectric acceleration
  - External: Accepts ICP™ type 100 mV/g accelerometer
- Temperature sensor: Internal IR temperature sensor
- Measurements:
  - Velocity:
    - Range: 0.7–65 mm/s (RMS), 0.04–3.60 in/s (equivalent Peak), meets ISO 10816
    - Frequency: 10–1 000 Hz, meets ISO 2954
  - Enveloped acceleration:
    - Range: 0.2–50.0 gE
    - Frequency: Band 3 (500–10 000 Hz)
  - Temperature:
    - Range: –20 to +200 °C (–4 to +392 °F)
    - IR temperature accuracy: ±2 °C (±3.6 °F)
    - Distance: Short range, maximum 10 cm (4 in) from target
  - Operating temperature range:
    - In use: –10 to +60 °C (+14 to +140 °F)
    - While charging: 0 to +40 °C (+32 to +104 °F)
  - Storage temperature:
    - Less than one month: –20 to +45 °C (–4 to +113 °F)
    - More than one month but less than six months: –20 to +35 °C (–4 to +95 °F)
  - Humidity: 95 % relative humidity, non-condensing
  - Enclosure: IP 54
  - Approvals: CE
  - Drop test: 2 m (6.6 ft)
- Weight: 125 g (4.4 oz)
- Dimensions:
  - Length: 200 mm (7.90 in)
  - Width: 47 mm (1.85 in)
  - Height: 25.4 mm (1.00 in)
- Battery capacity: 550 mA hours
- Battery life: 10 hours before charging again (≈1 000 measurements)
  - With external sensor: Up to 55 % less battery life
- Supported external sensor: Any standard accelerometer with 100 mV/g sensitivity that needs ICP (Integrated circuit-piezoelectric)
- External sensor power: 24 V DC at 3.5 mA
  - Universal AC/DC wall plug-in
  - Input: 90–264 VAC, 47–60 Hz
  - Output: 5 V DC regulated
  - 3 to 4 hours for a full charge

### 4.3. Técnica De Medición

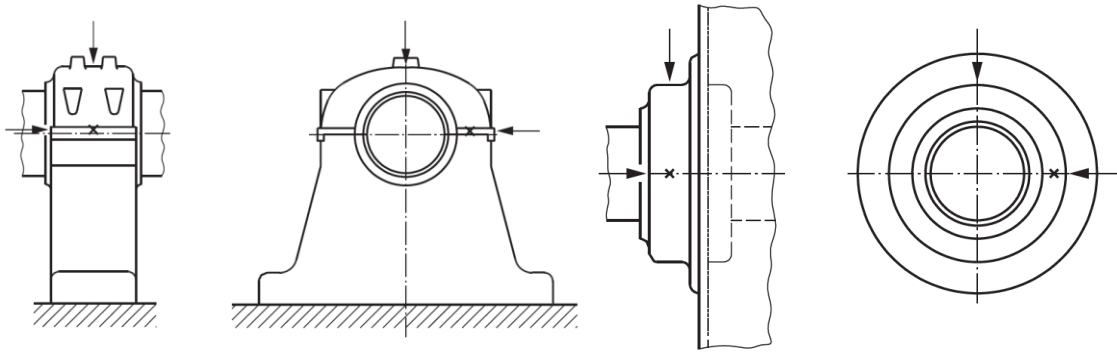
Con base al equipo de medición se define el método del seguimiento de los parámetros a medir serán relacionados en el tiempo e identificando los estados de operación de la máquina, estas mediciones se realizarán off line (no continuo), en el cual se tomarán los datos por medio de unas tareas basadas en condiciones estableciendo unas frecuencia, actividades y formatos. Las unidades seleccionadas para el seguimiento de las variables serán RMS de velocidad de vibración en mm/s, de aceleración envolvente en gE y de temperatura en Celsius.

#### 4.4. Selección De Puntos De Medición

La norma ISO 20816-1:2016, define la medición de las vibraciones en dos tipos, la primera como vibración en piezas no giratorias y la segunda en vibraciones relativas al eje, para nuestro caso aplicará la primera en donde la medición de la vibración se realiza en piezas no giratorias, es decir la medición se debe realizar en la carcasa o base de los cojinetes o en la sección más cercana si no hay acceso a la misma.

#### Figura 18.

*Puntos De Medición En Piezas No Giratorias (ISO 20816-1:2016)*



Primero, se realiza evaluación de la viabilidad de los puntos de medición, verificando que las bombas se encuentran a nivel de piso en un acceso libre a los puntos de medición, con obstáculos principalmente de tuberías de succión y descarga de la bomba a altas temperaturas, sin embargo, no presentan un peligro crítico, garantizando así la seguridad de personal y la continuidad de la operación en la realización de las tareas basadas en condición.

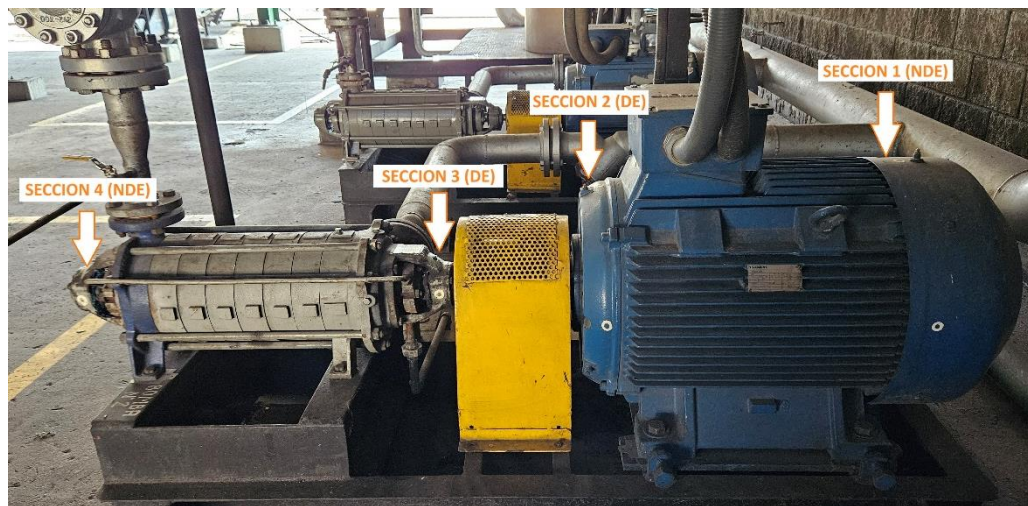
Se define convención para identificación y estandarización de los puntos de medición por medio de un código alfanumérico de tres dígitos de la siguiente manera:

**Primer Dígito (Sección De Medición):** Se identifica por un numero en cada una de las secciones en la cual se va a tomar la variable y se identificará de manera consecutiva en la dirección natural de transmisión de energía del equipo, es decir en un equipo motor-bomba, la energía se

transmite desde el motor hacia la bomba, siendo así la sección 1 el lado libre del motor (NDE), la sección 2 el lado acople del motor (DE), la sección 3 el lado acople de la bomba (DE) y terminando con la sección 4 el lado libre del motor (NDE).

### Figura 19.

#### *Sección De Medición*



**Segundo Dígito (Posición):** Se identifica con una letra que representa el plano u orientación en el que se está tomando la medida en cada sección de la siguiente manera: (V) Vertical, (H) Horizontal y (A) axial.

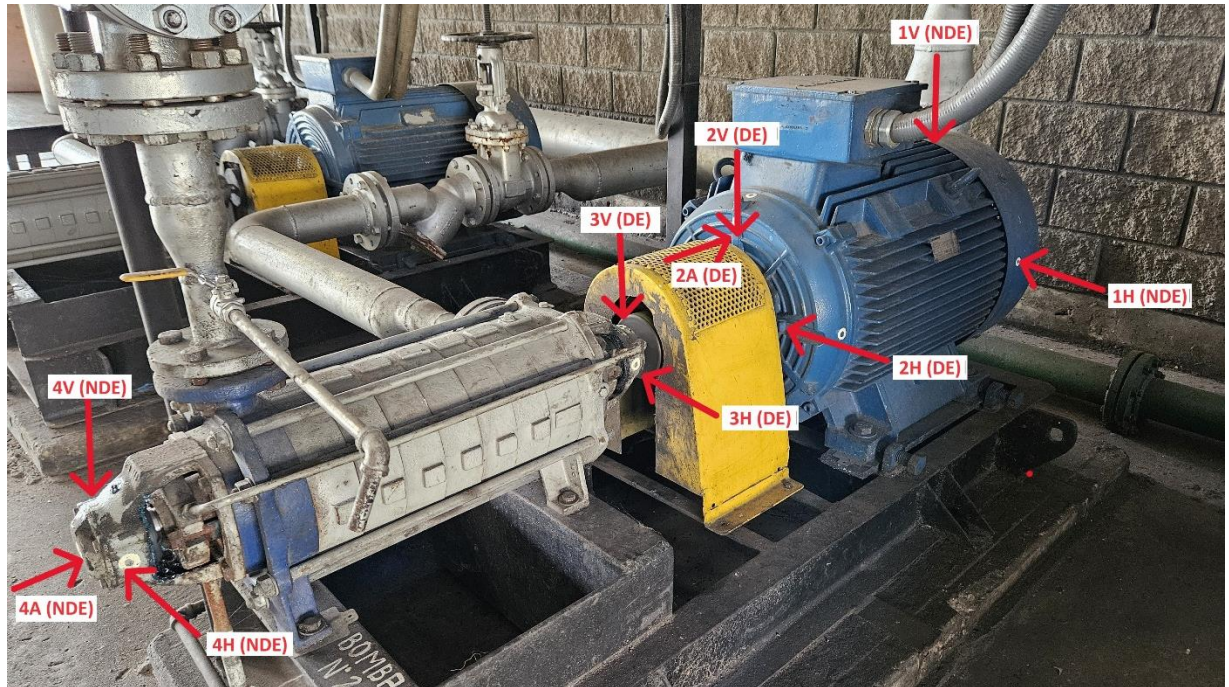
**Tercer Dígito (Parámetro):** Se identifica con una letra que representara el parámetro de medición tomado de la siguiente manera: (V) Velocidad, (A) Aceleración, (T) Temperatura.

**Adicional (Lado Transmisión):** como adicional se puede añadir para identificar si la sección o lado del eje hace parte de la transmisión de energía a otro sub-equipos o no por medio de las siglas DE (Drive End) y NDE (Non Drive End), respectivamente.

De tal manera, si estamos midiendo la aceleración, el código de identificación del punto **2VA (DE)** se refiere a la sección 2, orientación vertical, el parámetro de aceleración del lado acople del motor.

**Figura 20.**

*Codificación de puntos de Medición*



*Nota.* Con el fin de generalizar en la figura no se incluyó el tercer dígito del código referente al parámetro.

#### **4.5. Precisión De Los Parámetros Monitoreados**

Con el fin de garantizar la repetibilidad y disminuir los errores humanos de la toma de medición de los parámetros se realizó marcación de los puntos de medida por medio de un círculo con centro libre donde se sitúa el sensor del medidor, con esto se garantiza que la medida siempre se realice en el mismo punto y no haya mediciones diferentes o falsas.

Por otra parte, al personal que realiza la actividad de medición se le realiza capacitación en vibraciones y buenas prácticas de uso de equipo de medición.

**Figura 21.**

*Marcación de puntos de Medición*



#### 4.6. Condiciones Del Funcionamiento

Se debe tener en cuenta los estados transitorios del equipo a monitoreas con el fin de determinar si los valores tomados a las variables pueden cambiar con respecto al funcionamiento de la máquina.

En nuestro caso se define que la bomba debe haber tenido al menos una hora de operación continua en condiciones de caldera de flujo de vapor y presión nominal.

Se verifica por medio de tacómetro la velocidad angular del eje de las dos bombas dando como resultado 3583 rpm, debido a que esta velocidad es constante, no ejerce ninguna variación considerable en la medición de los parámetros de vibración.

Se toman valores de vibración con la bomba apagada y todos los demás equipos continuos de la caldera en operación normal, esto con el fin de verificar si alguna vibración externa pudiera ser transmitida por un equipo exterior, obteniendo como resultado que ninguna vibración es transmitida por equipos externos.

Por otra parte, la bomba regula su flujo por medio de una válvula automática en la descarga que abre o cierra por la señal del nivel del drum, cuando esta está abierta ingresando flujo de agua al drum la bomba opera en su flujo nominal entre 35 a 45 ton/h de agua a una presión de descarga de 480 psi y cuando la válvula está cerrada la bomba descarga por medio de una placa de orificio al tanque de agua caliente en flujo mínimo y subiendo la presión de descarga al máximo de la bomba de 580 psi, por lo cual esta variación de presiones y flujos nos indicó en la medidas una diferencia de vibraciones en velocidad en el plano horizontal por el orden de 3 mm/s del punto 4HV (NDE) y de 2.66 gE en el punto 3HA (DE), aunque no es un valor altamente representativo, se define que los valores se deben tomar en el estado de la válvula abierta y operación nominal de la bomba.

**Tabla 4.**

*Variación de medición con respecto a presión de descarga*

	<b>3VV</b>	<b>3HV</b>	<b>3AV</b>	<b>3HA</b>	<b>Comentarios</b>
<b>480 psi</b>	6,4	12,2	0	12,6	Válvula Abierta
<b>580 psi</b>	6,5	13,1	0	15,26	Válvula Cerrada
<b>Diferencia</b>	0,1	0,9	0	2,66	
	<b>4VV</b>	<b>4HV</b>	<b>4AV</b>	<b>4HA</b>	
<b>480 psi</b>	10,1	11,6	5,1	4,87	Válvula Abierta
<b>580 psi</b>	9,2	8,6	5,5	4,52	Válvula Cerrada
<b>Diferencia</b>	-0,9	-3	0,4	-0,35	

#### 4.7. Límites de operación: Criterios De Alarma Y Peligro

Los límites de operación son esas variables de los parámetros medibles los cuales establecerán el estado de la maquina bajo condiciones normales de carga, flujos, presiones, entre otras. Estas generalmente pueden estar dadas por condiciones de diseño bajo normas estándares de fabricación que establecerán sus límites mientras se encuentren con un tiempo corto de puesta

en marcha o dependerá de las condiciones intrínsecas del sistema o ambiente en el que se encuentren operando. Es importante conocer estas tendencias para poder determinar el estado de operación de una maquina y que variables pueden generar un efecto en la normal operación de la misma.

#### ***4.7.1 Vibración (Velocidad)***

La norma que estableceremos como guía para definir la evaluación de las medidas y límites de operación para las vibraciones de la bomba es la “ISO 10816 Mechanical vibration – Evaluation of machine by measurements on non rotating parts, Part N°7: Rotodynamic pumps for industrial application”. Esta norma establece los requerimientos para evaluar la vibración en bombas rotodinámicas cuanto esta es medida en pares no rotativas como el soporte o carcasa de los cojinetes y establece dos criterios principales de evaluación de la vibración, el primero se refiere a la evaluación de la magnitud de la vibración y el segundo al cambio o variación de la magnitud en el tiempo.

Se establece que la medida de magnitud de vibración se debe establecer en RMS (root mean square) de velocidad en mm/s y que la frecuencia del instrumento de medición debe estar en un rango de frecuencia entre 10 a 1000 Hz conforme a los requerimientos de la ISO 2954, estos dos factores se cumplen a cabalidad con respecto a lo requerido.

Las medidas deben ser tomadas y evaluadas en los ejes radiales del alojamiento (vertical y horizontal), y no se tendrá en cuenta la vibración en el eje axial.

Para el Criterio 1 que evalúa la magnitud de la vibración se establece la tabla del anexo 1 de la norma 10816-7, la cual podemos observar en la siguiente imagen.

#### **Figura 22.**

*Límites de Vibración Bombas Rotodinámicas (ISO 10816-7; 2003)*

Zone	Description	Vibration limits r.m.s. value mm/s		
		Class I <sup>b)</sup>	Class II <sup>b)</sup>	Class III <sup>b)</sup>
A	Newly commissioned machines in preferred operating range	≤ 3,0	≤ 3,7	≤ 5,6
B	Unrestricted long-term operation in allowable operating range	≤ 4,5	≤ 5,6	≤ 9,0
C	Limited operation	≤ 7,1	≤ 9	≤ 11
D	Hazard of damage	> 7,1	> 9	> 11
Maximum ALARM <sup>c)</sup>		5,6	7	10
Maximum TRIP <sup>c)</sup>		9	11	12,5
For all acceptance tests and in the preferred operating range (see 3.4), the filtered values for rotating frequency ( $f_n$ ) and blade-passing frequency ( $f_n \cdot z_2$ ) should be		≤ 2	≤ 3	≤ 4,5
In-situ acceptance test	Preferred operating range (see 3.4)	≤ 3,0	≤ 3,7	≤ 5,6
	Allowable operating range	≤ 3,8	≤ 4,7	≤ 7,1
Factory acceptance test	Preferred operating range (see 3.4)	≤ 3,8	≤ 4,7	≤ 7,0
	Allowable operating range	≤ 4,5	≤ 5,6	≤ 9,0
<sup>a)</sup> For pumps with special one- and two-vane impeller, the values for class III pumps are applicable. For clogless or similar operation two-phase flow with suspended solids (e.g. rough sewage, potatoes, sugarbeans, fish), a higher vibration of 2 mm/s over Class III can be expected. <sup>b)</sup> The classes are in accordance with ISO 9905 (Class I), ISO 5199 (Class II) and ISO 9908 (Class III). <sup>c)</sup> Recommended values which must be above set ((that?)) value for a duration of not more than 10 s before alarm respectively trip is released (see also Clause 6).				

*Nota.* Esta tabla es el Anexo A.1 de la norma ISO 10816;2003 y aplica vibraciones tomadas en partes no rotativas de bombas rotodinámicas.

En la tabla A.1 la norma ISO 10816 establece y define unas zonas de operación de la siguiente manera:

**Zona A.** Maquinas con vibraciones optimas, se refiere generalmente a recién puestas en servicio u operación.

**Zona B.** Maquinas con vibración aceptable que aún puede prestar un largo servicio sin restricciones.

**Zona C.** Maquinas con vibraciones consideradas insatisfactorias para una operación a largo plazo, debe permanecer en observación en espera de una acción de mantenimiento que reestablezca sus valores de operación normal.

**Zona D.** Maquinas con valores de vibración que se pueden considerar peligrosas suficientes para causar un daño al equipo.

Así mismo la norma también establece unos límites de Operación definidos como alarma y peligro (trips) los cuales se indican a continuación:

**Alarma.** Valor definido como límite de operación en el cual me indica que hay un valor por fuera de parámetro, pero en el que se puede evaluar la causa o factor que lo ocasiona y generar la acción correctiva programada.

**Peligro (Trips).** El peligro o conocido como disparo es el valor en el cual me indica que la maquina esta por fuera de sus límites de operación máximos, en el cual se debe realizar la acción correctiva inmediata para reducir el valor o detener la máquina.

Para poder clasificar los límites en la table se debe definir la clase de bomba las cuales se presentan en tres tipos de clases y esta dependerá del diseño y fabricación de la misma en los cuales dependen del tipo de industria a la que fue diseñada, la potencia, las fuerzas internas y la aplicación.

**Clase I.** Bombas acordes en la norma ISO 9905, aplicaciones de operación críticas.

**Clase II.** Bombas acordes en la norma ISO 5199, aplicaciones de operación de criticidad media.

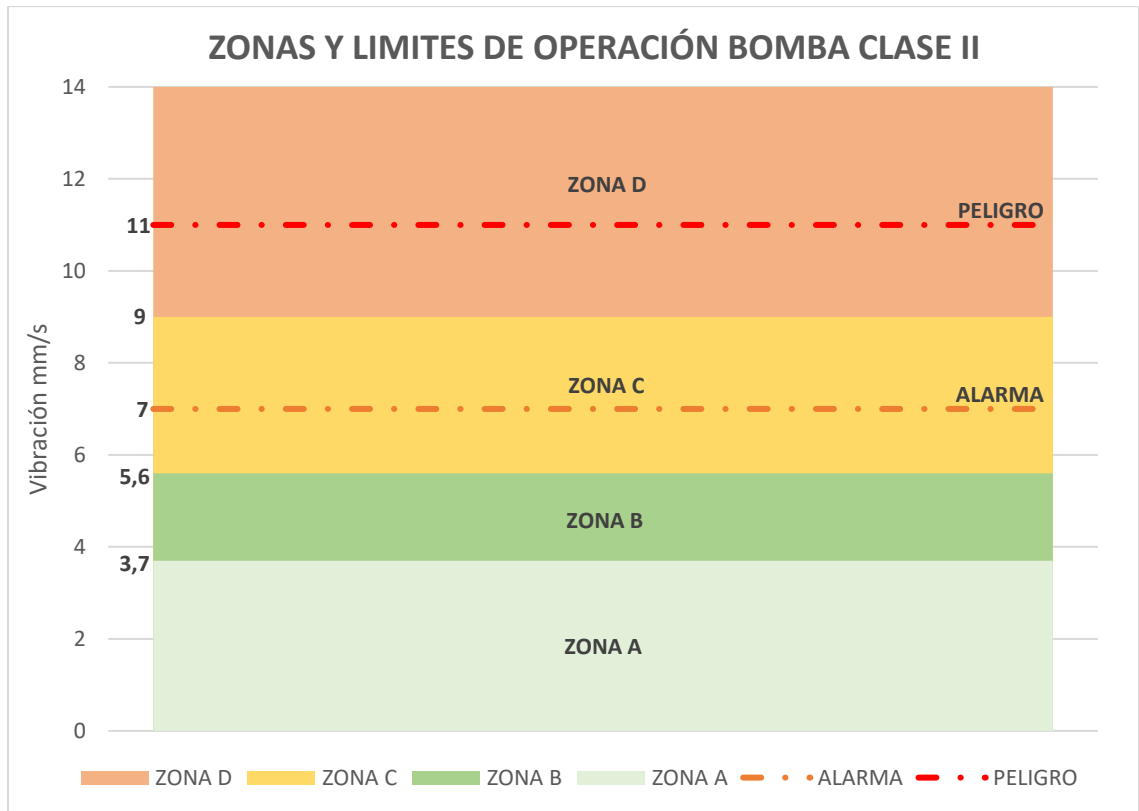
**Clase III.** Bombas acordes a la norma ISO 9908, aplicaciones de operación no críticas.

En nuestro caso para la bomba Hega el manual nos refiere que es fabricada acorde a la norma ISO 5199, lo cual nos indica que la bomba se clasifica como Clase II.

Basados en lo anterior tenemos en la gráfica siguiente los límites de operación y alarmas definidos para la bomba Hega de la siguiente manera:

**Figura 23.**

*Zonas y Límites de Vibración Bomba Clase II (Autor)*



**Zona A:** 0 a 3,7 mm/s

**Zona B:** 3,7 a 5,6 mm/s

**Zona C:** 5,6 a 9,0

**Zona D:** >9 mm/s

**Alarma:** 7 mm/s

**Peligro:** 11 mm/s

#### 4.7.2 Vibración (Aceleración Envolvente)

Si bien la velocidad nos da un dato confiable de seguimiento, algunos textos asocian especialmente la variable de aceleración envolvente con el modo de fallo en rodamientos, por lo cual consideramos que es importante también realizar el seguimiento a el comportamiento de esta variable y compararla con límites recomendados.

Es importante que el punto de medición establecido se conserve en esta medida ya que la aceleración puede variar considerablemente con la distancia de los cojinetes.

“SKF Asesor del estado de la máquina, Manual de usuario” establece unos límites de operación generado por medio de análisis estadístico de bases de datos de años, por lo cual sugiere los siguientes valores:

#### Figura 24.

*Límites de Vibración envolvente en gE (SKF Asesor del estado de la máquina, Manual de usuario P/N 32150500-SP)*

Clase	OK	Alerta	Peligro
CL1	0-1 gE	1-2 gE	más de 2 gE
CL2	0-2 gE	2-4 gE	más de 4 gE
CL3	0-4 gE	4-10 gE	más de 10 gE

Para esto presenta una clasificación del equipo por media de tres clases que se definen de la siguiente manera según SKF:

**Clase 1.** Cojinetes con un diámetro interior entre 200 y 500 mm y una velocidad angular de 500 rpm.

**Clase 2.** Cojinetes con diámetro interior entre 200 y 300 mm y una velocidad angular entre 500 y 1800 rpm

**Clase 3.** Cojinetes con diámetro interior entre 20 y 150 mm y una velocidad angular de 1800 a 3600 rpm

Para nuestro caso la bomba Hega de alimentación a la caldera se clasifica en una clase 3, por lo cual los límites de operación definidos serán de:

**Alerta:** 4 a 10 (gE)

**Peligro:** >10 (gE)

#### ***4.7.3 Temperatura***

El siguiente parámetro de seguimiento es la temperatura de los cojinetes en grados Celsius, esta es medida específicamente en la parte superficial de la carcasa del cojinete, para establecer este parámetro nos basamos en el manual de operación de la bomba Hega el cual establece que la temperatura de los rodamientos no debe sobrepasar los 80 Celsius, por lo cual se establece solo un límite de operación de alerta > a 80 Celsius.

## **5. Adquisición Y Análisis De Datos**

### **5.1. Registro y Seguimiento De Datos**

Teniendo todo ya definido con respecto a los parámetros a medir, instrumento de medición, confiabilidad de medidas y límites operacionales, nos queda definir el proceso de adquisición y análisis de datos, generando la estructura principal del monitoreo de condiciones que es el formato de seguimiento, las frecuencias de las rutas de monitoreo y el seguimiento y análisis de los datos.

Primero, se estructura una ruta de medición inicial donde se establece una frecuencia de toma de mediciones inicialmente se realizó diaria con el fin de realizar seguimiento y análisis de

los valores tomados, sin embargo, basados en que el tiempo entre fallas no es corto y que en el seguimiento realizado se observa que no hay variaciones significantes con una frecuencia de muestreo diaria, entonces, se determina una **frecuencia de muestreo de dos veces por semana**, teniendo en cuenta que este valor puede reestablecerse en el tiempo según los parámetros de operación y el seguimiento de los datos obtenidos.

Se establece por medio del programa Excel y con un código Macro en Visual Basic un formato de registro en el cual se encuentran definidos y estructurado los parámetros de medición, fechas, puntos de medición, personal de monitoreo, descripción del equipo, instrumento de medición y resultados del análisis. En el Apéndice A. Podemos observar el formato de registro de monitoreo de condiciones final.

Como primera medida se ingresan los datos solicitados por medio de una ventana de dialogo creada, esto se realiza con el fin de disminuir errores en la digitación, estandarizar todos los datos de entrada en un solo cuadro de dialogo y realizar de una manera más amigable la interacción del sistema con el personal de monitoreo. En la siguiente imagen podemos observar los datos solicitados con dos botones de interacción, el primero “análisis vibracional” da paso a generar la evaluación de los datos de entrada con los límites operacionales previamente establecidos y el segundo “Nuevo análisis” permite guardar los datos ingresados y dar paso a un nuevo cuadro de dialogo generando facilidad en el cargue masivo de datos de muestreo.

**Figura 25.**

*Cuadro de dialogo*

Análisis Vibracional de Equipos ×

<b>REALIZADO POR</b>	<input type="text"/>	<b>Análisis Vibracional</b>
<b>FECHA</b>	<input type="text"/>	
<b>HORA</b>	<input type="text"/>	
<b>MEDICIÓN SECCIÓN 3 (LADO ACOPLE)</b>		
Vel. Vertical [mm/s]	<input type="text"/>	<b>Nuevo Análisis</b>
Vel. Horizontal [mm/s]	<input type="text"/>	
Vel. Axial [mm/s]	<input type="text"/>	
Aceleración [gE]	<input type="text"/>	<b>Salir</b>
Temperatura [°C]	<input type="text"/>	
<b>MEDICIÓN SECCIÓN 4 (LADO LIBRE)</b>		
Vel. Vertical [mm/s]	<input type="text"/>	
Vel. Horizontal [mm/s]	<input type="text"/>	
Vel. Axial [mm/s]	<input type="text"/>	
Aceleración [gE]	<input type="text"/>	
Temperatura [°C]	<input type="text"/>	

*Nota.* Todos los datos son tomados en campo en el registro físico y llevados al computador en oficina.

Seguidamente, al registrar los datos en el cuadro de dialogo, estos son guardados y registrados en el formato en orden consecutivo en el que fueron ingresados y por medio del código establecido en visual Basic basado en árbol de decisiones realiza un análisis comparando los datos ingresados con los límites operacionales preestablecidos basados en la norma 10816-7 y la recomendación en envolvente de aceleración, generando así un resultado del análisis determinando el estado de vibración en el que se encuentre. Visualmente se genera este estado en la ventana del cuadro de dialogo y en el formato de Excel con un código de colores tipo semáforo de la siguiente manera:

**Verde.** si se encuentra en un estado de operación “NORMAL”.

**Amarillo.** si se encuentra en un estado de operación de “ALARMA”.

**Rojo.** si se encuentra en un estado de operación de “PELIGRO”.

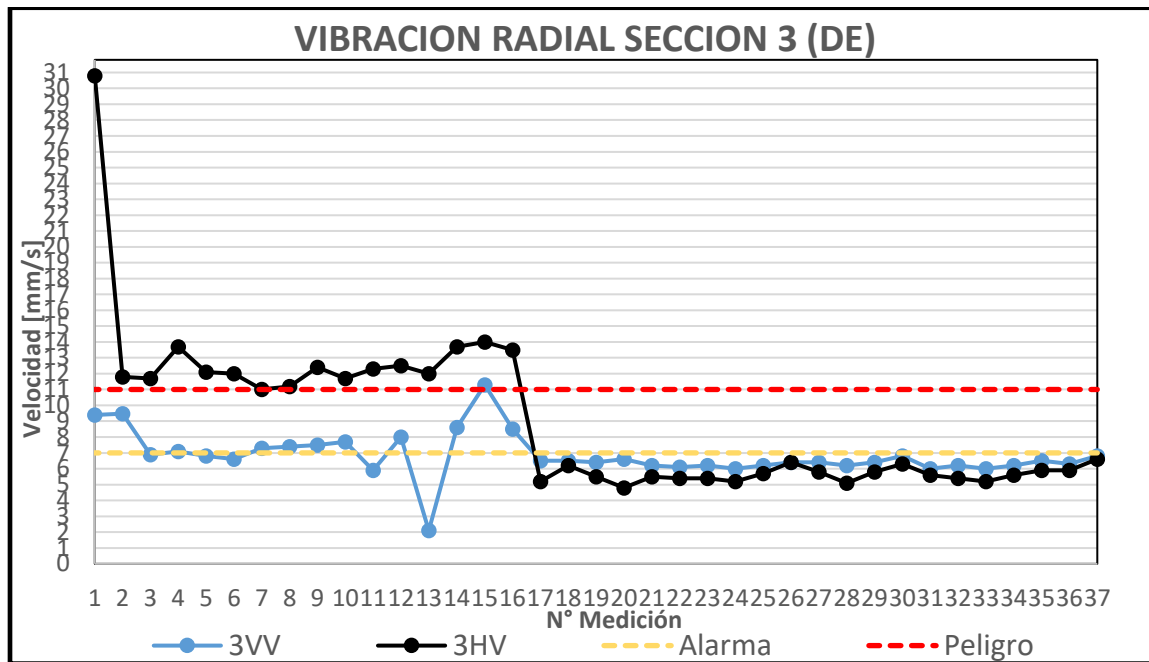
Así mismo, por medio del código se genera un determinado listado de sugerencia de actividades de mantenimiento a realizar si la variable esta por fuera de los parámetros establecidos con el fin de programar y llevar la variable hacia los estados de operación deseados.

**Tabla 5.***Formato de Datos Registrados y Análisis*

				SECCIÓN 3 (DE)			SECCIÓN 4 (NDE)					RESULTADOS DEL ANÁLISIS					
MEDICIÓN	FECHA	HORA	REALIZADO POR:	Velocidad [mm/s]			Aceleración [gE]	Temperatura [°C]	Velocidad [mm/s]			Aceleración [gE]	Temperatura [°C]	ESTADO DE VIBRACIÓN	ESTADO DE TEMPERATURA	ACTIVIDAD DE MANTENIMIENTO	ACTIVIDADES REALIZADAS
				3VV	3HV	3AV	3HA	3T	4VV	4HV	4AV	4HA	4T				
15	6/10/2023	2:00 p. m.	AH	11,3	14	0	1,7	76	3,5	14,2	2,7	2,7	95	DISPARO	ALTA	LUBRIQUE	
16	6/10/2023	16:00	AH	8,5	13,5	0	3,1	77	4	14,1	3,7	2,8	99	DISPARO	ALTA	LUBRIQUE	
17	13/12/2023	8:00	AH	6,5	5,2	0	4,43	85	3,3	3,6	0,9	1,99	90	NORMAL	NORMAL		BOMBA NUEVA MONTADA
18	9/01/2024	11:00 a. m.	DM	6,5	6,2	0	2,49	89,7	3,7	3,8	1,8	4,095	96,4	NORMAL	NORMAL		
19	10/01/2024	7:00 a. m.	DM	6,4	5,5	0	2,48	85,8	1,6	3,4	1	4,83	94,1	NORMAL	NORMAL		

El registro genera las gráficas de seguimiento de las variables divididas estratégicamente por secciones y tipos de variables a medidas, con el fin de poder observar gráficamente las magnitudes, variación y tendencias del parámetro medido y comparar con los límites de operación para facilitar la realización de un seguimiento y diagnóstico de la condición.

**Figura 26.***Gráfica De Vibración Radial*



Nota. Esta grafica pertenece a la vibración radial (vertical y horizontal) en mm/s de la sección 3 de la bomba, separándose de los datos axiales, aceleración y temperatura con el fin de poder hacer una comparación directa en cada tipo de variable como se observa en las siguientes gráficas.

**Figura 27.**

*Gráfica De Vibración Aceleración gE*

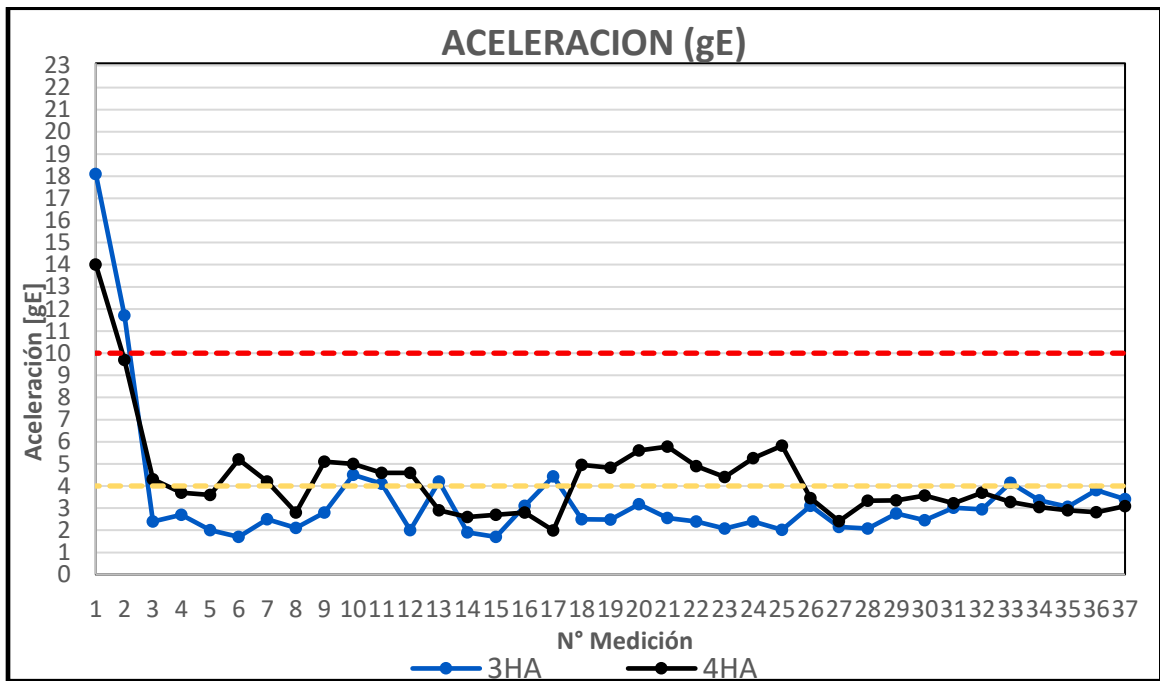
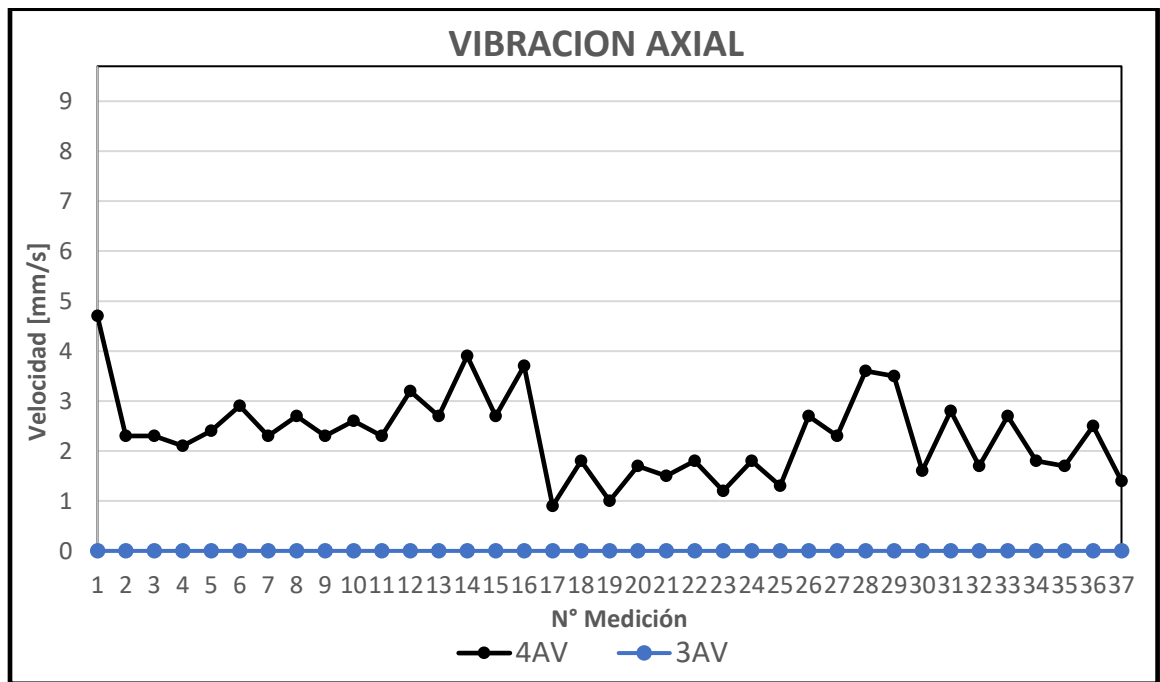
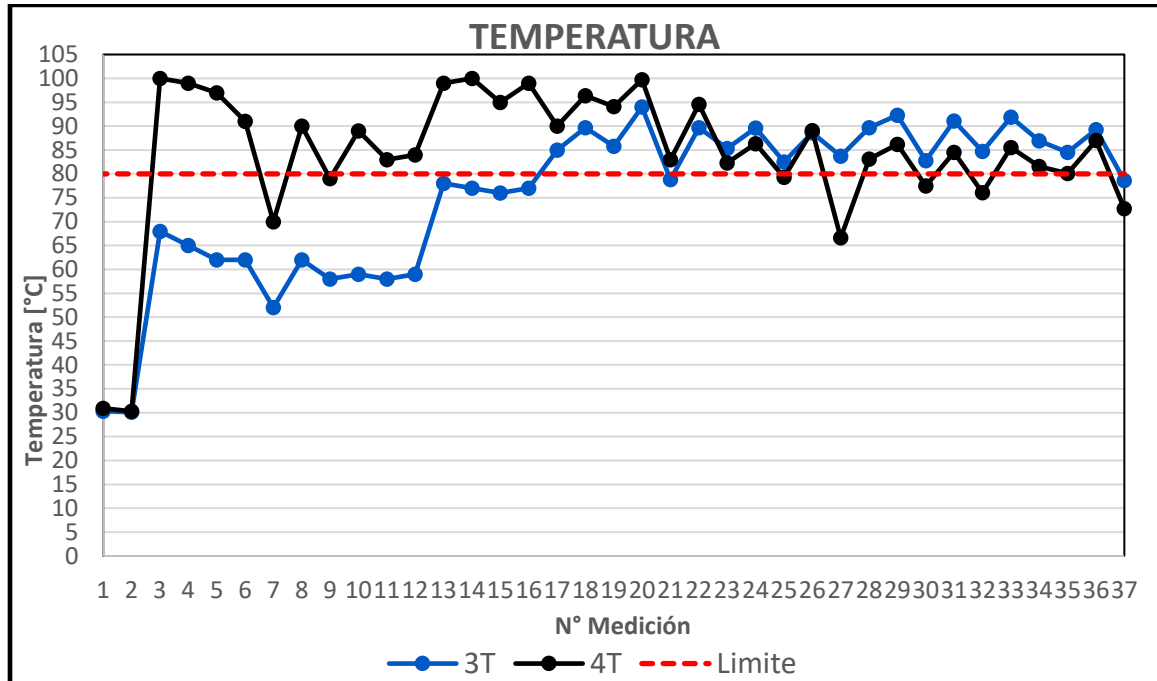


Figura 28.

Gráfica De Vibración Axial



**Figura 29.***Gráfica De Temperatura*

## 5.2. Árbol De Decisión

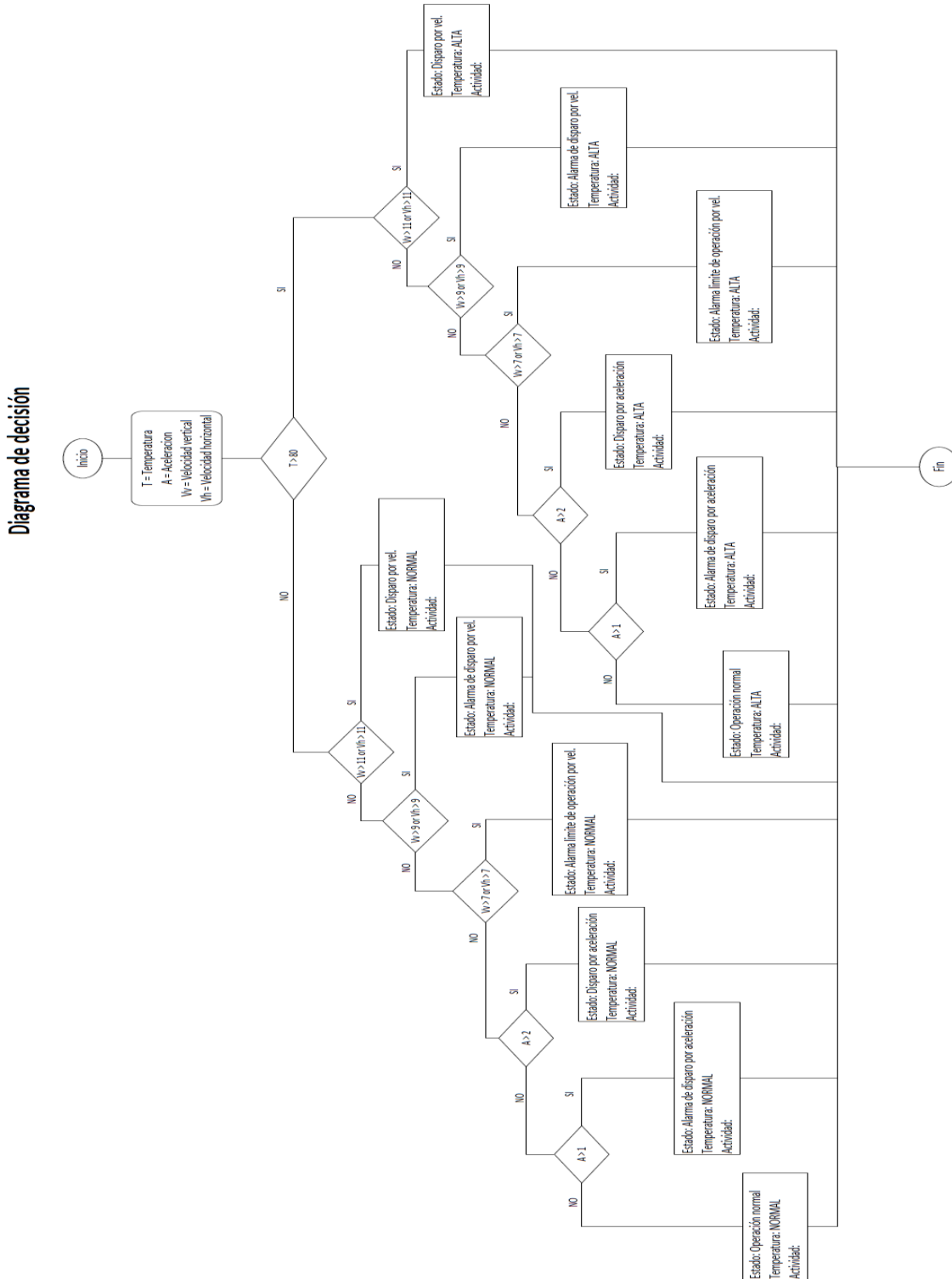
Se realiza diagrama de árbol de decisiones en donde se plasman todas las condiciones y límites operacionales de las variables de Temperatura, velocidad de vibración radial (vertical y horizontal) y aceleración envolvente.

Con estas variables de entrada se puede realizar evaluación por medio de condicionales (si o no) iniciando por los dos estados de temperatura (normal o Alta), seguidamente se evalúa los tres estados posibles de la aceleración (Normal, Alerta o Peligro), para terminar con los tres estados posibles de velocidad (Normal, Alerta o Peligro) y finalizando con un resultado de actividades sugeridas para mantenimiento para cada una de las posibles conjugaciones de estos estados.

En el apéndice B se puede observar el diagrama de árbol de decisiones final completo junto con las actividades de mantenimiento indicadas para cada resultado

Figura 30.

Diagrama De Árbol De Decisiones



*Nota.* Este Es el diagrama de árbol de decisión preliminar, antes de definir las actividades de mantenimiento, el diagrama final se puede observar en el Apéndice B.

Con base al diagrama de decisiones se realiza código de programación en Visual Basic de macro de Excel el cual se puede observar en el Apéndice C. El código está diseñado para generar un cuadro de dialogo donde el usuario ingresa las variables de entrada, seguidamente analiza y clasifica por medio de condicionales los valores de entrada con los límites de operación establecidos y genera un mensaje de estado de la maquina en el cuadro de dialogo con identificación de colores semáforo según el estado de la maquina verde, amarillo y rojo y un mensaje de actividades de mantenimiento sugeridas para realizar. Todos estos datos y mensajes son trasladados y guardados en las celdas del formato de registro de variables y graficados para dar seguimiento visual a los parámetros

### Figura 31.

*Gráfica De Vibración Aceleración gE*

Análisis Vibracional de Equipos	
<b>REALIZADO POR</b>	ALEX HUERFANO
<b>FECHA</b>	15/01/2024
<b>HORA</b>	10:10 am
<b>MEDICIÓN SECCIÓN 3 (LADO ACOPLE)</b>	
Vel. Vertical [mm/s]	1.5
Vel. Horizontal [mm/s]	2.2
Vel. Axial [mm/s]	1.4
Aceleración [gE]	3.1
Temperatura [°C]	79
<b>MEDICIÓN SECCIÓN 4 (LADO LIBRE)</b>	
Vel. Vertical [mm/s]	2.1
Vel. Horizontal [mm/s]	3.4
Vel. Axial [mm/s]	1.8
Aceleración [gE]	2.7
Temperatura [°C]	75

**Análisis Vibracional**

**Nuevo Análisis**

**Salir**

**Estado vibracional: OPERACIÓN NORMAL**

**Estado de temperatura: NORMAL**

**Actividad de mantenimiento: LUBRIQUE**

*Nota.* En los mensajes de texto de resultado se marca automáticamente color según el estado de respuesta.

## **6. Análisis y Resultados**

Se realiza seguimiento los datos tomados por cuatro meses consecutivos identificando los parámetros y tendencias de operación de la bomba y se establecen actividades de acciones correctivas con el fin de definir la afectación a las variables tomadas y las actividades de mantenimiento óptimas para reestablecer los valores a su estado de operación normal según su modo de falla.

Se inicia tomando datos de vibración y temperatura en condiciones de bomba apagadas y caldera encendida junto con los equipos cerca de las bombas encendidas para determinar si hay transferencias de vibraciones causadas por equipos externos encontrando que los valores son de cero, es decir que no se transmiten vibraciones externas a la bomba.

Se tiene en cuenta que estas dos bombas fueron instaladas nuevas en noviembre del año 2021 y tienen dos años de servicio alternándose la operación el 50 % cada una, presentando alrededor de 8000 horas de operación cada bomba y conociendo que no se le ha hecho mantenimiento mayor de cambio de rodamientos o impelerá ninguna cuando se inició el estudio de monitoreo de condiciones.

### **6.1. Velocidad Radial Bomba N°1**

**N° Medición 1 y 2.** En la primera medición de las gráficas de vibración radial de velocidad de la bomba que se muestran a continuación, encontramos un alto valor de vibración horizontal por encima de 30 mm/s en los puntos horizontales 3HV y 4HV, valores críticos de “PELIGRO”. Se procede a programar una intervención de mantenimiento de alineación que consistió en

verificación de Pata coja, Alineación de ejes y verificación de tensiones en tuberías, Después de realizar estas actividades se observa que los valores disminuyeron notablemente alrededor de 12 mm/s en velocidad. En conclusión, la bomba presentaba tensiones en las tuberías de succión y descarga y desalineación en el acople, determinando que este es un factor determinante en la vibración de velocidad en el plano horizontal.

**N° Medición 16 y 17.** En el punto 16 se realizó por parada de mantenimiento mayor el cambio de la bomba N°1 por una bomba nueva de fabricación del año 2023, esto se realiza con el fin de verificar el cambio de comportamiento de una bomba nueva en los parámetros de operación. Para el montaje se tiene en cuenta todas las recomendaciones técnicas del manual de la bomba, como alineación, tensión de tuberías y demás. Podemos observar en las gráficas de velocidad de las dos secciones de rodamientos la disminución notable de valores por debajo del nivel de alarma, es decir parámetros de operación normal de la bomba según la ISO-10816, podemos evaluar que la sección 3 se encuentra entre las zonas de Operación B y C y la sección 4 en la Zona B de operación y los valores después de la instalación se mantienen estables con la misma tendencia en el tiempo.

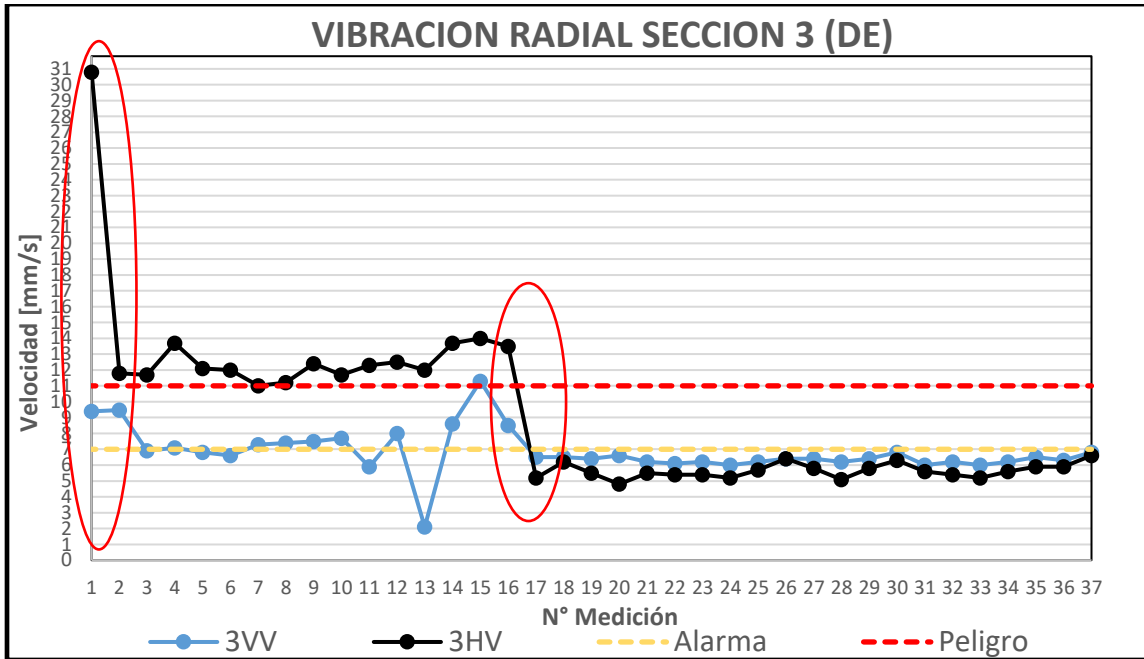
**N° Medición 02 al 16.** Antes de realizar la instalación de la bomba nueva, es decir entre los puntos 2 al 16, la bomba se mantiene presentando altas vibraciones al nivel de peligro en dos secciones 3 y 4, debido a que la aceleración no se encuentra por fuera de límite no asociamos el modo de falla directamente a rodamientos sino a desbalanceo por pérdida de material de los impeler.

Se observa que la velocidad de vibración vertical no presenta variaciones considerables y mantiene su tendencia en el tiempo incluso con el cambio de una bomba nueva. Esto nos indica que el componente de vibración vertical no nos indica modos de falla diferentes a desajuste por

base o pernos de anclaje, a diferencia de la componente horizontal y su variabilidad puede mostrar modos de falla más definidos.

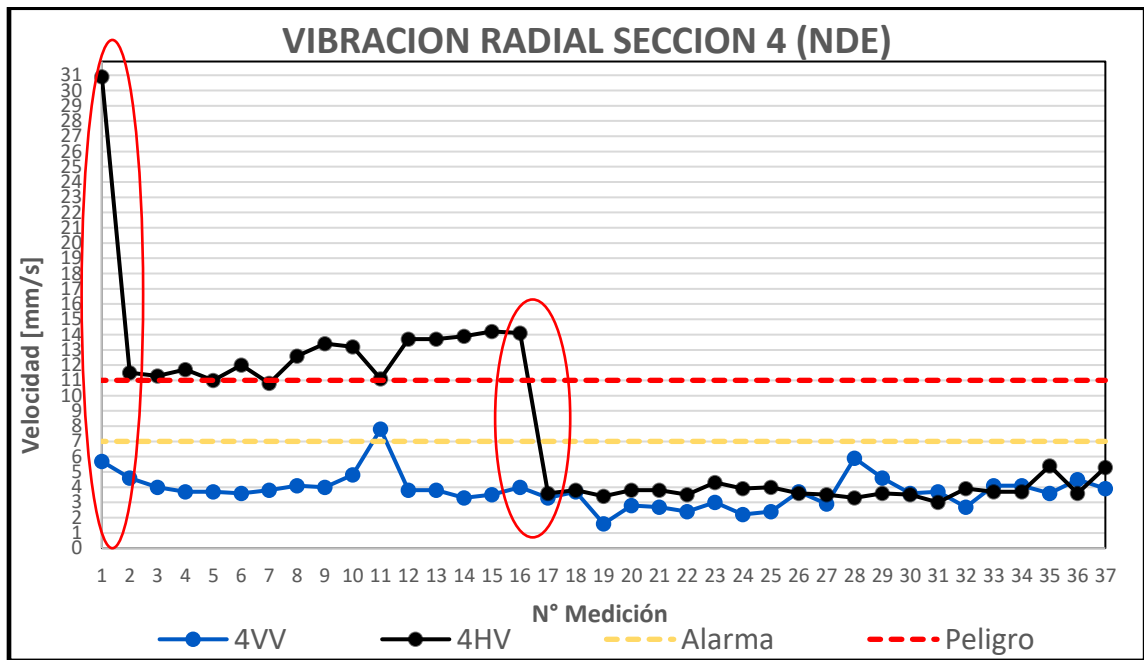
**Figura 32.**

*Velocidad De Vibración Bomba N°1, Sección 3*



**Figura 33.**

*Velocidad De Vibración Bomba N°1, Sección 4*



## 6.2. Velocidad Radial Bomba N°2

**Nº Medición 11 y 12.** Al igual que en la bomba N°1 al realizar alineación en la bomba presenta un cambio considerable de valores de vibración en el plano horizontal, a diferencia que en este caso baja también la vibración en el plano vertical, lo que quiere decir que la bomba presentaba desajuste en su base o estructura de anclaje.

**Nº Medición 12 a 36.** Si bien la vibración se logró bajar de valores de operación de Peligro a Alarma en la sección 4 (NDE), en la sección 3 (DE) solo bajo en la componente vertical, pero la Horizontal en velocidad de vibración y aceleración envolvente presenta valores por encima del límite de peligro y teniendo en cuenta que esta bomba cuenta con dos años de servicio y 8000 horas de operación. Se procede a programar para la siguiente parada de planta el cambio de bomba por una reparada de stock.

### Figura 34.

*Velocidad De Vibración Bomba N°2, Sección 3*

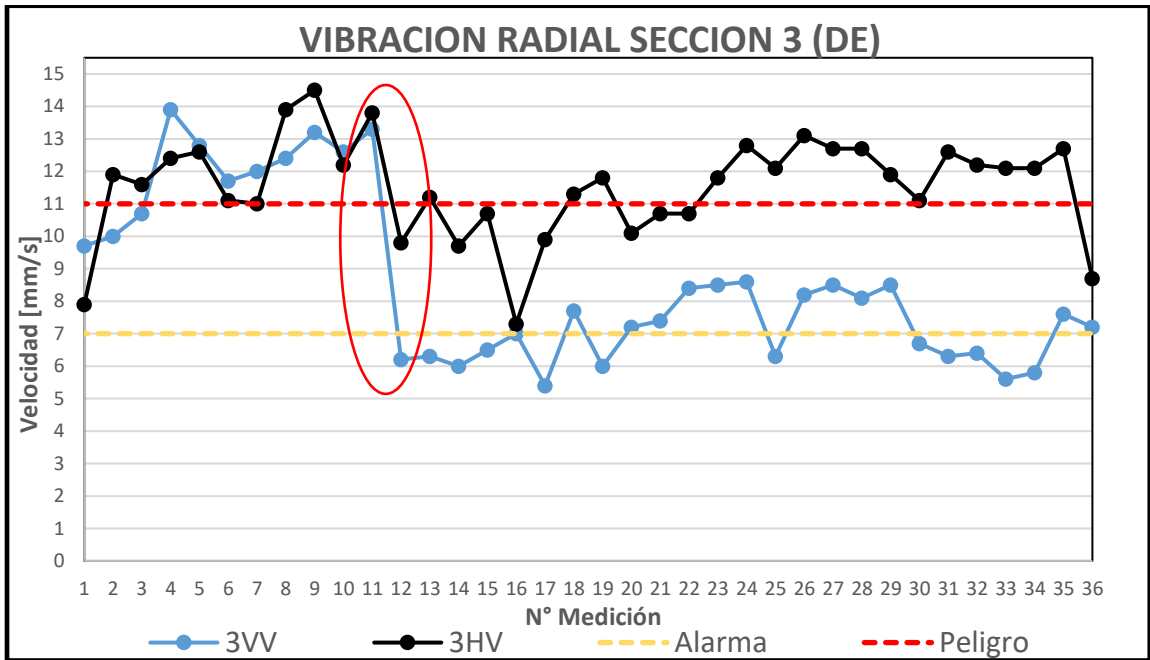
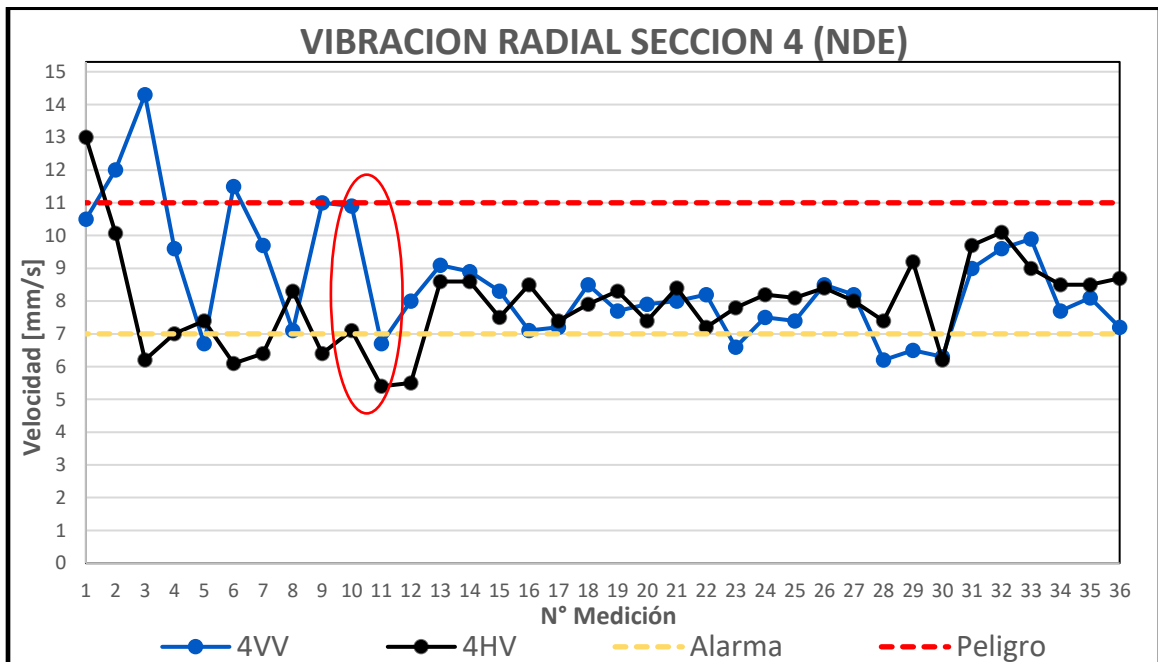


Figura 35.

Velocidad De Vibración Bomba N°2, Sección 4



6.3. Aceleración Envolvente

En la bomba N°1 la aceleración envolvente no presenta variaciones considerables sin afectaciones por alineación ni por el cambio de bomba nueva, solo en las mediciones iniciales realizadas en frío en los puntos 1 y 2, por lo demás, se comporta estable con valores por debajo del límite de 4 gE a excepción de las mediciones 18 a 25, los cuales fueron corregidos con lubricación de los puntos.

Se observa una relación directa entre la aceleración y la lubricación, ya que en el punto 26 de la bomba N°1 después de aplicar lubricación se baja la aceleración y se mantiene estable. Lo mismo ocurre en la bomba N°2 después del punto 12. Se realiza prueba de lubricación identificando en cuanto tiempo empieza a subir la aceleración considerablemente para identificar una frecuencia de lubricación óptima, por lo cual se encuentra que después de 2 semanas de operación empieza a subir levemente la aceleración, de tal manera, se establece esta frecuencia de lubricación en cada dos semanas.

De la Figura 36 los puntos de medición 1 y 2 y de la Figura 37 los puntos de medición 1 y 10 son valores tomados en frío, es decir con la caldera apagada sin presión ni temperatura de vapor en el drum, se puede observar que la aceleración envolvente en este estado sube a valores considerables.

**Figura 36.**

*Aceleración Envolvente De Bomba N°1*

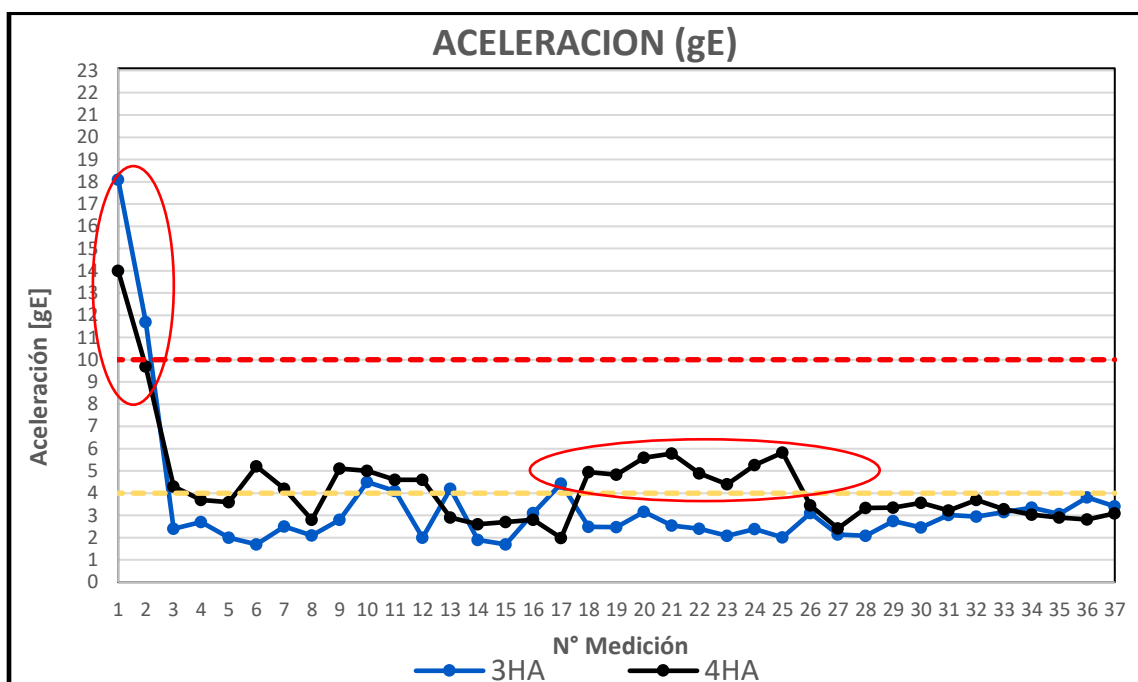
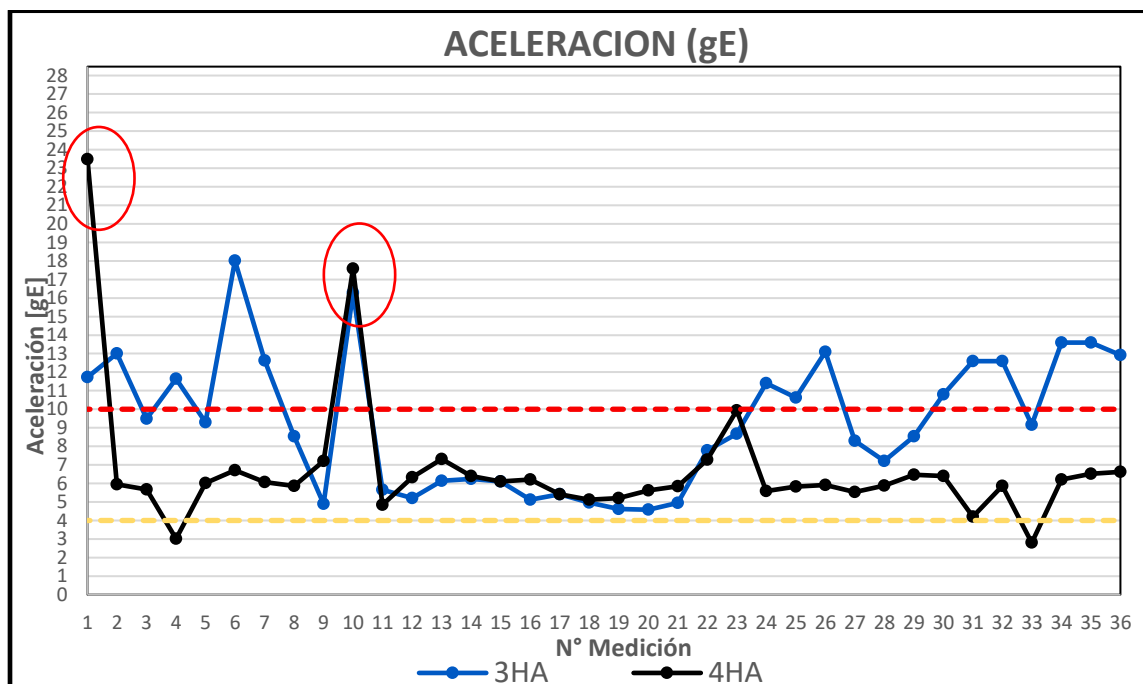


Figura 37.

*Aceleración Envoltante De Bomba N°2*



*Nota.* La Aceleración de la bomba N°2 en el punto 3HA no disminuye incluso después de lubricar, por lo que el modo de falla se asocia a rodamiento en el lado acople (DE).

#### **6.4. Temperaturas**

Las tomas iniciales de temperatura de las bombas que presentan valores alrededor de los 30 Celsius, son valores no confiables, se realiza verificación del dato comparando con cámara termográfica identificando que los valores no son lo correspondientes al real, se verifica causa raíz identificando que el orificio infrarrojo en el instrumento de medición se encontraba con grasa, lo que generaba un falso valor. Se realiza limpieza y se corrobora el valor con cámara termográfica, dando por solucionado la confiabilidad del dato.

Se identifica una relación directa al realizar la lubricación con un aumento de temperatura, este se puede evidenciar en la figura 39 en el punto de medición 13, en el cual presentan unas temperaturas de 65 y 75 Celsius y al realizar la lubricación pasan inmediatamente a temperaturas de 90 y 95 Celsius.

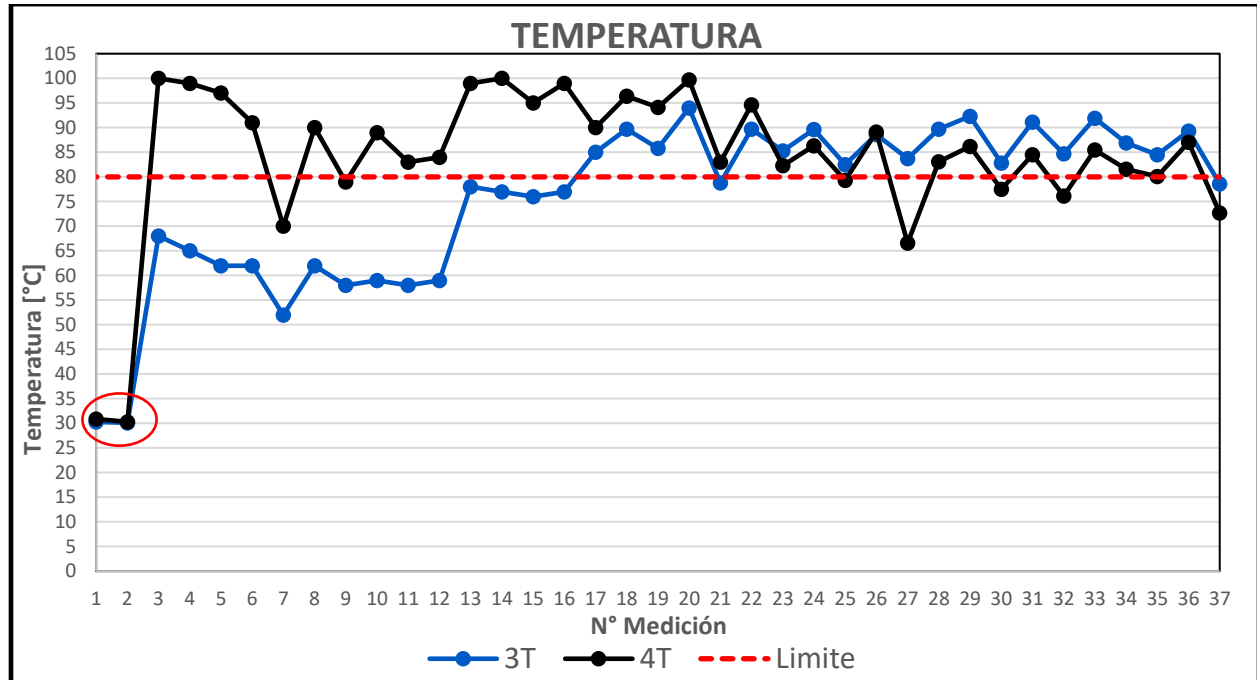
Se puede observar la variación en la temperatura de los rodamientos con respecto a la hora de toma de monitoreo en los puntos 19 y 20; 21 y 22; 23 y 24, son muestras que se tomaron a las 7:00 am y a las 2:00 pm, respectivamente, observando que en la mañana la temperatura ambiente está baja por lo cual se ve representado en la temperatura del rodamiento y por el contrario en la tarde la temperatura ambiente es alta lo que se relaciona con la temperatura alta del rodamiento.

Si bien el límite de temperatura establecido por el manual de usuario de la caldera es de 80 Celsius, se observa que generalmente estos valores se encuentran muy en el límite o por encima de este valor, esto se puede deber a dos factores principales a tener en cuenta, el primero la temperatura ambiente y humedades altas en la zona del sur del cesar donde se encuentra ubicada la planta y la segunda la alta temperatura del fluido que alcanza los 105°C. Sin embargo, el cambio

de la calidad de la grasa ha presentado excelentes resultados en este aspecto al tener un mejor comportamiento con la temperatura.

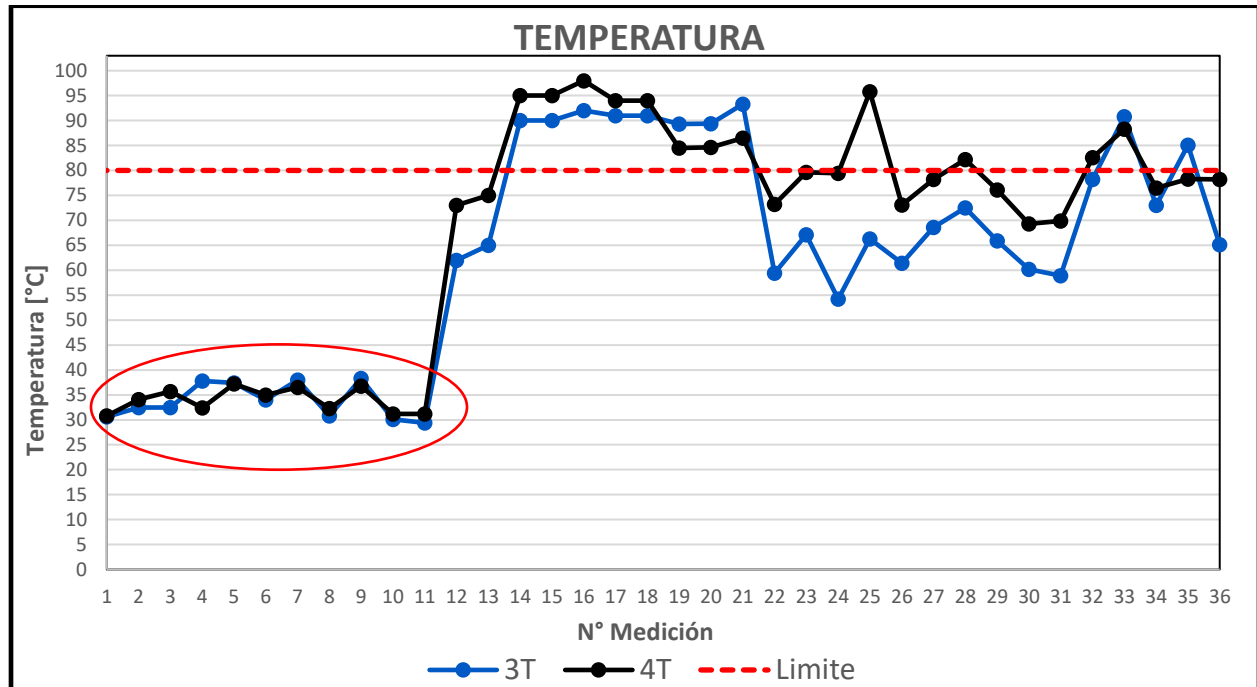
**Figura 38.**

*Temperatura Bomba N°1*



**Figura 39.**

*Temperatura Bomba N°2*



### 6.5. Vibración Axial

Al igual que la vibración Radial, la velocidad de la vibración axial se ve directamente relacionada con la alineación y tenciones, se identifica claramente una disminución al realizar esta actividad en las bombas N°1 y N°2 como se puede observar en las siguientes gráficas.

**Figura 40.**

*Velocidad Vibración Axial Bomba N°1*

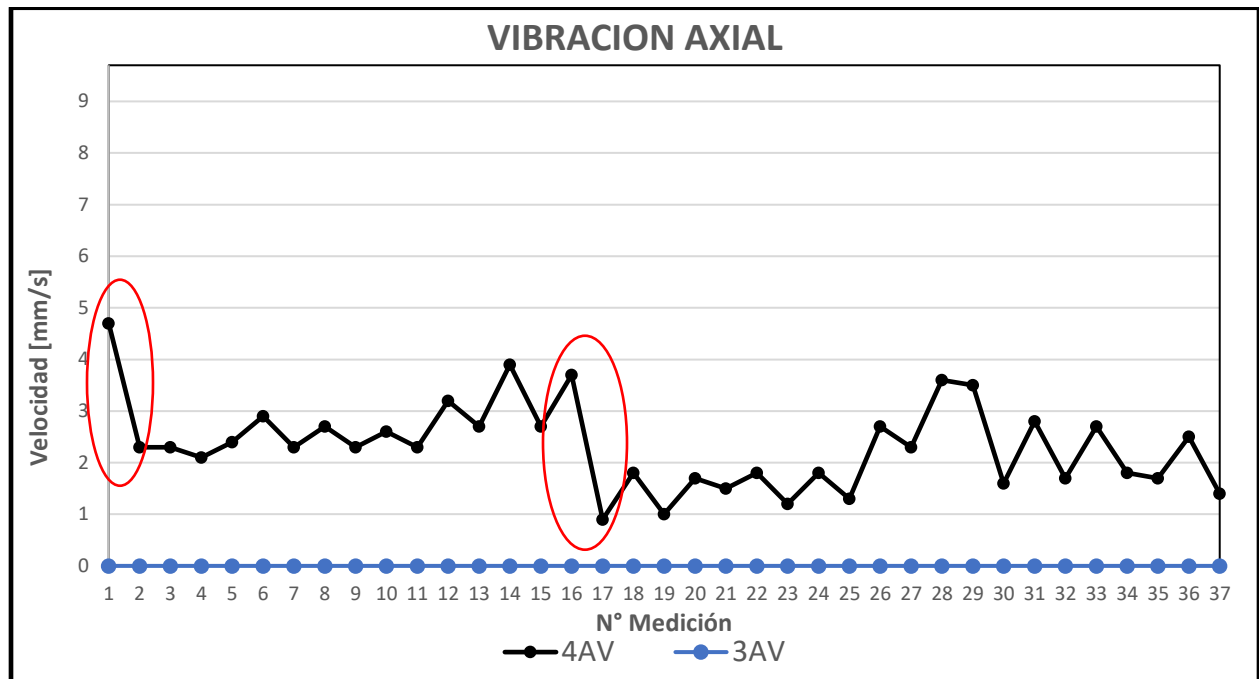
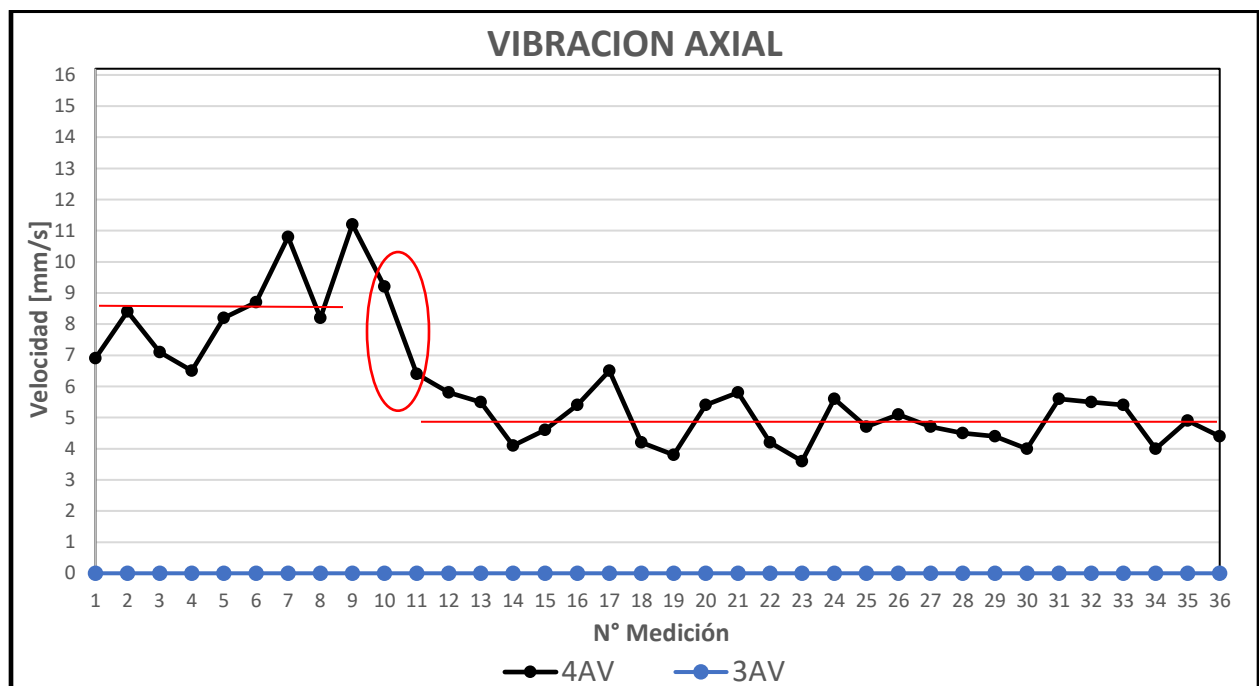


Figura 41.

Velocidad Vibración Axial Bomba N°2



## 7. Acciones de Mantenimiento

Con respecto a la literatura que indica modos de falla relacionados con las variables de vibración en velocidad y aceleración envolvente y de la Temperatura, y con base a lo verificado en el análisis de monitoreo de condiciones realizado al equipo definimos las actividades de mantenimiento asociadas a cada parámetro establecido de la siguiente manera:

**Tabla 6.**

### *Identificación De Actividades de mantenimiento*

ITEM	MODO DE FALLA	ACTIVIDADES MTTO	PARAMETRO	
1	N/A	Continuar Monitoreo Con Frecuencia Normal		
2	N/A	Aumentar Frecuencia De Monitoreo		
3	Lubricación	Revisar Ultima Lubricación Realizada	Aceleración	Temperatura
4	Desajuste	Revisar Ajuste De Pernos De Anclaje y Base		Velocidad
5	Desalineación	Revisar Parámetros De Alineación		Velocidad
6	Rodamientos	Inspección o Cambio De Rodamientos	Aceleración	Temperatura
		Revisar Estado De Elementos Internos De		
7	Desbalanceo	Bomba		Velocidad

Dadas las actividades de mantenimiento definidas, tenemos que asociar estas a los límites de operación establecidos, por lo cual tenemos lo siguiente:

**Tabla 7.**

### *Actividades de Mantenimiento Asociadas A Límites de Operación*

PARAMETRO	ESTADO	LIMITES OPERACIÓN	MODO DE FALLA	ACTIVIDADES MTTO	ITEM
Temperatura (°C)	Normal	<80	N/A	Continuar Monitoreo Con Frecuencia Normal	1
	Alarma	>80	Lubricación	Revisar Ultima Lubricación Realizada	3
Velocidad Radial (mm/s)	Normal	<7	N/A	Continuar Monitoreo con Frecuencia Normal	1
	Alarma	7 a 11	Desajuste	Revisar Ajuste De Pernos De Anclaje y Base	4
			Desalineación	Revisar Parámetros De Alineación	5
	Peligro	>11	Rodamientos	Inspección o Cambio De Rodamientos	6

			Desbalanceo	Revisar Estado De Elementos Internos De Bomba	7
			N/A	Aumentar Frecuencia De Monitoreo	2
<b>Aceleración (gE)</b>	Normal	<4	N/A	Continuar Monitoreo Con Frecuencia Normal	1
	Alarma	4 a 10	Lubricación	Revisar Ultima Lubricación Realizada	3
	Peligro	>10	Rodamientos	Inspección o cambio de rodamientos	6
			N/A	Aumentar Frecuencia De Monitoreo	2

*Nota.* Para las condiciones donde se clasifique en más de un parámetro de Operación se aplicarán las Actividades de los parámetros de resultados.

En el caso en el que la variable esté por fuera de rango en varios parámetros, como ejemplo que se tenga aceleración en estado de “peligro” y velocidad en estado de “alarma”, se realizarán las actividades de mantenimiento sugeridas número 4 y 5 correspondientes a la velocidad 6 y 2 correspondientes a aceleración, aplicándolas en orden cronológico según escala de gravedad de variable, es decir, iniciando por el estado de alarma y siguiendo por el estado de Peligro, una a una hasta volver los parámetros a estado “Normal”.

Con esto Ingresamos las actividades de mantenimiento en el árbol de decisiones y en el código de macro del Formato CBM.

La definición de actividades de mantenimiento basado en condición indica que es un proceso dinámico en el cual se debe seguir monitoreando, analizando, ejecutando y retroalimentando para ir cada vez conociendo más el equipo e ir ajustando los detalles para llegar a alcanzar una certeza y confiabilidad mayor en la estrategia implementada.

## 8. Conclusiones

El mantenimiento basado en condición CBM, demuestra ser una excelente estrategia gerencial de mantenimiento dando resultados en la disponibilidad de la operación por medio de obtener el conocimiento del equipo sin detenerlo y a un costo optimo llevando los repuestos a un cambio basado en la condición y no en la prevención.

En general se puede observar claramente en el monitoreo las condiciones de operación de los equipos, esto ayuda a conocer el funcionamiento del equipo y a implementar las estrategias adecuadas para garantizar una disponibilidad y confiabilidad al proceso de extracción de aceite.

El mantenimiento basado en condición es un proceso dinámico que se debe seguir monitoreando, analizando, ejecutando y retroalimentando para ir cada vez conociendo más el equipo e ir ajustando para llegar a alcanzar una certeza y confiabilidad mayor en la estrategia implementada.

El contar con tres bombas, una bomba principal con su stand by y además una de stock, permite optimizar el tiempo de intervención en caso de una falla inminente o detección de una variable de peligro ya que solo se procede a cambiar la bomba y permite la reparación de la bomba en falla en banco, aumentando la confiabilidad, disponibilidad de tiempo y mejores prácticas de mantenimiento.

Según observamos en el análisis de la bomba N°1 y N°2. la alineación, pata coja desalineación de tuberías, debido a las tensiones internas que generan en la bomba y que es transmitida a sus cojinetes, pueden generar altos valores de vibración en velocidad en la posición horizontal y en la axial.

Al instalar una bomba nueva garantizando las variables de montaje, se puede observar un comportamiento y tendencia más estable en las variables de operación a diferencia de una bomba de dos años de servicio que puede tener ya varios tipos de afectaciones que hacen variar la vibración por fallas internas causadas por desbalanceo, desalineaciones o rodamientos.

Las velocidades de vibración en la posición vertical no varían considerablemente en el tiempo incluso con el cambio de bomba, con esto corroboramos que esta es afectada principalmente por desajustes de estructura o pernos de anclaje.

Se identifica levemente una relación directamente proporcional entre la lubricación y la temperatura e inversamente proporcional entre la temperatura y la aceleración, es decir al lubricar, sube la temperatura y baja la aceleración en el rodamiento y con el tiempo sin lubricar va bajando la temperatura y subiendo la aceleración levemente. Estos datos son considerando que no se encuentren falla en el rodamiento pues esto causaría un aumento inminente en la temperatura y aceleración a la vez.

La temperatura límite establecida en el manual de usuario, no se cumple ya que en promedio se mantienen en este límite o por encima de este valor, esto es debido a la alta temperatura ambiente de la zona y la alta temperatura del fluido bombeado, esto es corregido con el cambio de calidad de la grasa de lubricación que presenta mejores propiedades físicas con alta temperatura, mejorando considerablemente el comportamiento de los rodamientos.

## 9. Recomendaciones

Se recomienda actualizar el instrumento de medición, el equipo con el que cuenta Palmas del Cesar ya cuenta en el mercado con altas variedades y nuevas tecnologías por un costo asequible para cumplir con las necesidades requeridas, lo cual puede generar mejora en rapidez de adquisición de Datos, en traspaso de datos, en seguridad para el personal que realizar la actividad y en la confiabilidad de los datos.

Del mismo modo, el siguiente paso a realizar es adquirir un software actualizado de manejo de CBM o ingresar la implementación del CBM al software de mantenimiento con el que cuenta Palmas del Cesar, con el fin de mejorar la transmisión de datos a la plataforma, pudiendo realizarla directamente mediante un dispositivo móvil y con una plataforma amigable de análisis de datos para el seguimiento, análisis y monitoreo de los datos y que se pueda integrar con las Ordenes de trabajo de mantenimiento garantizando la trazabilidad y midiendo la efectividad del CBM.

Si bien este es el primer paso para la implementación del mantenimiento basado en condición, que sirve como base o estructura en la aplicación de esta estrategia de mantenimiento en la planta extractora, se recomienda replicar el CBM a las demás bombas y equipos rotativos críticos del proceso industrial de extracción de palma de aceite.

### Referencias Bibliográficas

- BS EN ISO 14224:2016: Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries -- Collection and Exchange of Reliability and Maintenance Data for Equipment. British Standard Institution, 2016.
- BS ISO 10816-3:2009 - Mechanical Vibration - Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts - Part 3: Industrial Machines with Nominal Power above 15 kW and Nominal Speeds between 120R/Min and 15000 r/Min When Measured in Situ. BSI, 2009.
- Hernández, Zacarias Torres, and Helí Torres Martínez. Planeación y Control. Larousse - Grupo Editorial Patria, 2014.
- ISO 17359:2018, Condition monitoring and diagnostics of machines - general guidelines.
- ISO 10816-1:1995, Mechanical vibration-evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts.
- ISO 10816-7 "Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts — Part 7: Rotodynamic pumps for industrial application.
- Manual de Servicio FLOWSERVE SIHI Pumps, IS-0121.03.15-Esp / Marzo 2015.
- SAE JA 1012 Surface Vehicle Aerospace Standard. SAE, 2002.
- SKF, Asesor del estado de la máquina, Manual de usuario P/N 32150500-SP Revisión A.
- SKF, Reliability System – Condition Monitoring Essentials, CM2355.
- Osarenren, J. Osarodion. Integrated Reliability: Condition Monitoring and Maintenance of Equipment. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.
- Rotating Machinery and Signal Processing: Proceedings of the First Workshop on Signal Processing Applied to Rotating Machinery Diagnostics, SIGPROMD '2017, April 09-11, 2017, Setif, Algeria. Springer, 2019.
- White, G. & Azima DLI. (n.d.). Introducción al análisis de vibraciones.



**Apéndice B. Diagrama Árbol De Decisiones.** El apéndice está adjunto y se puede consultar en el Repositorio Institucional.

**Apéndice C. Código De Programación Visual Basic.** El apéndice está adjunto y se puede consultar en el Repositorio Institucional.