

**MONITOREO CONTINUO DE
VIBRACIONES MECÁNICAS EN
BOMBAS CENTRÍFUGAS VERTICALES**



MANTILARO, Pedro

PROYECTO INTEGRADOR PROFESIONAL

Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del
Comahue como requisito para la obtención del grado de
INGENIERO MECÁNICO

Neuquén - Argentina

2024

**MONITOREO CONTINUO DE
VIBRACIONES MECÁNICAS EN
BOMBAS CENTRÍFUGAS VERTICALES**

MANTILARO, Pedro

Director: Ing. **CAMPOS, Damián**

Co-Directora: Ing. **GARRIDO, Rocío**

Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del
Comahue como requisito para la obtención del título de grado de
INGENIERO MECÁNICO

Neuquén - Argentina

2024

MONITOREO CONTINUO DE VIBRACIONES MECÁNICAS EN BOMBAS CENTRÍFUGAS VERTICALES

MANTILARO, Pedro

Aprobado en fecha 22 de marzo de 2024.

Tribunal evaluador:

- Mg. Ing. AUDISIO, Orlando
- Ing. TROFFÉ, Mario
- Ing. MARCHEGANI, Ariel

AGRADECIMIENTOS

A todos las personas que me acompañaron en el transcurso de la carrera.

Especialmente a mis papás que me alentaron en todo momento. A mi compañera, quien siempre estuvo a mi lado alentándome.

A mis amigos, de quienes aprendí mucho para hoy en día finalizar una etapa.

A YPF SA, quienes confiaron en mí y posibilitaron mi desarrollo como Ingeniero Mecánico en la industria, permitiendo que desarrolle el presente trabajo dentro de mis obligaciones laborales.

A mis profesores, que me guiaron y enseñaron, y en especial a Damián Campos, quien me apoyó en el desarrollo del Proyecto Integrador Profesional desde el primer día.

A la Universidad Nacional del Comahue que me abrió las puertas y me permitió formarme como profesional en el ámbito de la educación pública y gratuita.

MONITOREO CONTINUO DE VIBRACIONES MECÁNICAS EN BOMBAS CENTRÍFUGAS VERTICALES

Autor: MANTILARO, Pedro

Director: Ing. CAMPOS, Damián

Co-Directora: Ing. GARRIDO, Rocío

Resumen

El presente trabajo aborda los aspectos relativos a la implementación de un sistema de monitoreo continuo, con un enfoque proactivo, para gestionar eficientemente el mantenimiento de un sistema de bombas verticales. En este sentido, el enfoque de Mantenimiento Basado en Condición comenzó con un diagnóstico detallado, logrado mediante un análisis exhaustivo de los equipos. La convergencia de la estrategia de mantenimiento con la inspección y análisis vibracional ha revelado problemas no anticipados durante la etapa de diseño del sistema, como es el caso de la soldadura mecánica detectada. Simultáneamente, su implementación ha permitido generar datos de calidad que, mediante un análisis detallado, contribuyeron significativamente a reducir las tareas de mantenimiento reactivo. En el futuro, se espera que la evolución del sistema esté vinculada a una mayor integración de los datos mediante herramientas específicas de análisis, potenciando así la eficacia del mantenimiento predictivo. En resumen, el sistema desarrollado se ha constituido en una herramienta efectiva para aumentar la disponibilidad de los equipos, siendo el análisis vibracional una técnica efectiva para realizar monitoreos precisos y evaluar la condición de los equipos. Para los próximos períodos, la aspiración de la Organización es consolidar el éxito de esta estrategia, ajustando sus planes de mantenimiento, para elevar los indicadores de disponibilidad operativa de los equipos. Este enfoque de mejora continua y optimización de los sistemas contribuirá decididamente al rendimiento sostenible de los activos físicos de la planta de bombeo.

Palabras clave: Bombas Centrífugas, Gestión de Activos, Mantenimiento, Vibraciones.

CONTINUOUS MONITORING OF MECHANICAL VIBRATIONS IN VERTICAL CENTRIFUGAL PUMPS

Author: MANTILARO, Pedro

Advisor: Ing. CAMPOS, Damián

Co-Advisor: Ing. GARRIDO, Rocío

Summary

This work addresses aspects related to implementing a continuous monitoring system with a proactive approach to manage the maintenance of a vertical pump system efficiently. In this regard, the Condition-Based Maintenance approach began with a detailed diagnosis achieved through a comprehensive equipment analysis. The convergence of the maintenance strategy with vibration inspection and analysis has revealed unforeseen issues during the system design stage, such as the detected mechanical looseness. Simultaneously, its implementation has allowed for the generation of high-quality data that, through detailed analysis, significantly contributed to reducing reactive maintenance tasks. In the future, the system's evolution is expected to be linked to increased data integration through specific analysis tools, thereby enhancing the effectiveness of predictive maintenance. In summary, the developed system has proven to be an effective tool in increasing equipment availability, with vibrational analysis being an efficient technique for precise monitoring and assessment of equipment conditions. For the upcoming periods, the Organization aspires to consolidate the success of this strategy by adjusting maintenance plans to elevate equipment operational availability indicators. This continuous improvement and system optimization approach will decisively contribute to the sustainable performance of the physical assets in the pumping plant.

Keywords: Centrifugal Pumps, Asset Management, Maintenance, Vibrations.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
3. MARCO TEÓRICO	4
3.1. Sistemas de Bombeo	4
3.1.1. Bomba Centrífuga Vertical	6
3.1.2. Fallas Hidráulicas	7
3.2. Mantenimiento Industrial	12
3.2.1. Mantenimiento Correctivo	13
3.2.2. Mantenimiento Preventivo	14
3.2.3. Mantenimiento Predictivo	16
3.2.4. Mantenimiento Proactivo	17
3.3. Fundamentos del Análisis de Vibraciones	18
3.3.1. Definiciones preliminares	18
3.3.2. Señales de Vibración	19
3.3.3. Análisis de Señales de Vibración	21
3.3.4. Transductores de Vibración	25
3.3.5. Identificación de Fallas Típicas en Máquinas Rotativas	29
4. METODOLOGÍA	46
5. DESARROLLO	49
5.1. Contexto Operacional	49
5.2. Identificación de los Equipos	52
5.3. Análisis de Confiabilidad y Criticidad	56
5.3.1. Análisis del Registro de Fallas	56
5.3.2. Análisis de Confiabilidad	59
5.3.3. Análisis de Criticidad	61
5.3.4. Análisis de Modos de Fallas y Efectos	64

5.4. Estrategia de Mantenimiento	67
5.5. Selección del Método de Monitoreo	68
5.5.1. Intervalo de Medición	70
5.5.2. Registro de los Parámetros	71
5.5.3. Puntos de Medición	72
5.5.4. Criterios de Alertas/Alarmas	74
5.6. Adquisición y Análisis de Datos	76
5.7. Identificación de Fallas Típicas a través del Sistema de Monitoreo	79
5.7.1. Soltura mecánica	79
5.7.2. Rodamientos	85
5.7.3. Desalineación	86
5.8. Acciones de Mantenimiento	88
5.9. Revisión	91
6. CONCLUSIONES	92
7. REFERENCIAS	93
A. Anexo I: <i>Curvas Características Bomba WVR 125/10</i>	96
B. Anexo II: <i>Especificaciones Técnicas Sistema de Monitoreo</i>	97

Índice de Figuras

1.	Bomba centrífuga vertical multietapa.	6
2.	Curva de Davies o de la bañera.	14
3.	Parámetros de una señal senoidal.	21
4.	Señal de vibración en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia.	22
5.	Transformación de señal analógica a digital (White, 2010).	23
6.	Diagrama esquemático de un acelerómetro (Mobley, 2004).	26
7.	Frecuencia de resonancia de un acelerómetro.	27
8.	Sensibilidad de un acelerómetro.	28
9.	Desbalance estático (White, 2010).	29
10.	Desbalance en cupla (White, 2010).	30
11.	Desalineación en bombas centrífugas (www.skf.com).	31
12.	Espectros característicos asociados a desalineación.	33
13.	Eje doblado o flexionado (White, 2010).	35
14.	Soltura mecánica vertical (Mobley, 2004).	35
15.	Soltura mecánica horizontal (Mobley, 2004).	36
16.	Terminología rodamiento rígido de bolas (www.evolution.skf.com).	37
17.	Estado de tensiones debajo del camino de rodadura (www.skf.com).	38
18.	Principio de desgaste abrasivo en un rodamiento (www.skf.com).	40
19.	Principio de desgaste por adherencia en un rodamiento (www.skf.com).	40
20.	Mecanismo de erosión por exceso de corriente en un rodamiento (www.skf.com).	42
21.	Etapas en la identificación de fallas de un rodamiento (Berry, 2000).	45
22.	Diagrama de Flujo Metodología.	48
23.	Traza del acueducto (Río Neuquén - La Amarga Chica).	49
24.	Planialtimetría del acueducto (Río Neuquén - La Amarga Chica).	50
25.	Detalle de las bombas centrífugas verticales del sistema de captación.	50
26.	Curva del sistema de bombeo.	51
27.	Vista en corte longitudinal bomba centrífuga multietapa vertical. Modelo WVR 125/10 KSB (www.ksb.com).	54

28.	Dimensiones generales bomba centrífuga multietapa vertical. Modelo WVR 125/10 KSB (www.ksb.com).	55
29.	Cantidad de fallas para cada bomba según tipificación adoptada.	56
30.	Identificación de las causas de fallas en rodamientos y cojinetes.	57
31.	Identificación de las causas de fallas en sellos mecánicos.	58
32.	Identificación de las causas de fallas en la transmisión y acoplamiento. . .	58
33.	Identificación de las causas de fallas en la unidad funcional.	58
34.	Probabilidad de fallos para cada bomba.	59
35.	Confiabilidad del sistema de bombeo.	60
36.	Niveles de criticidad.	62
37.	Identificación de parámetros de medición.	69
38.	Esquema de montaje del acelerómetro en el conjunto motor/bomba. . . .	73
39.	Severidad de las vibraciones según Norma ISO 10816-3 (2009).	75
40.	Tablero de control.	78
41.	Registro histórico BB-102 (intervalo de banda 2 a 65 Hz).	79
42.	Espectro de vibraciones BBA-102 (intervalo de banda de 0 a 100 Hz). . .	80
43.	Registro histórico BBA-103 (intervalo de banda 2 a 65 Hz).	80
44.	Espectro de vibraciones BBA-103 (intervalo de banda de 0 a 100 Hz). . .	81
45.	Registro histórico BBA-101 (intervalo de banda 2 a 65 Hz).	82
46.	Espectro de vibraciones BBA-101 (intervalo de banda de 0 a 200 Hz). . .	82
47.	Registro histórico BBA-104 (intervalo de banda 2 a 65 Hz).	83
48.	Espectro de vibraciones BBA-104 (intervalo de banda de 0 a 200 Hz). . .	83
49.	Registro histórico BBA-105 (intervalo de banda 2 a 65 Hz).	84
50.	Espectro de vibraciones BBA-105 (intervalo de banda de 0 a 200 Hz). . .	84
51.	Registro histórico BBA-102 (parámetro <i>PeakVue</i>).	85
52.	Espectro de vibraciones BBA-102 (intervalo de banda de 0 a 1000 Hz - 1X = 24,7 Hz).	86
53.	Registro histórico BBA-105 (intervalo de banda 6 a 300 Hz).	87
54.	Espectro de vibraciones en dirección radial BBA-105 (intervalo de banda de 0 a 200 Hz).	87

55. Espectro de vibraciones en dirección axial BBA-105 (intervalo de banda de 0 a 200 Hz).	88
56. Inspección con cámara de amplificación de movimiento.	89
57. Espectro de vibraciones BBA-102 en reserva.	90
58. Espectro de vibraciones BBA-102 en operación.	90
59. Curvas Bomba WVR 125/10 (www.ksb.com).	96
60. Sistema de monitoreo (www.emerson.com).	97

1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos veinte años el mantenimiento ha cambiado, quizás más que cualquier otra disciplina. Estos cambios se deben principalmente al enorme aumento en número y en variedad de los activos físicos (plantas, equipamiento, edificaciones, entre otros) que deben ser mantenidos en todo el mundo, diseños más complejos, nuevos métodos de mantenimiento y una óptica cambiante en la organización del mantenimiento y sus responsabilidades.

A lo largo de la historia, la filosofía del mantenimiento ha ido mutando. La primera generación pertenece típicamente a la época anterior a la segunda guerra mundial, donde los equipos eran sencillos y se hacían funcionar hasta su rotura. Luego, en el período de posguerra, la industria se volvió cada vez más compleja y las políticas de mantenimiento adoptadas se enfocaron en el mantenimiento preventivo planificado, el mantenimiento basado en el tiempo, y el sistema de planificación y control de obra. Hacia finales del siglo XX, las estrategias de mantenimiento que se adoptaron fueron el Mantenimiento Basado en Condición (CBM, por sus siglas en inglés), el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés) y la gestión de mantenimiento asistido por computadora. Con el advenimiento del nuevo siglo, la metodología de inspección y mantenimiento basado en el riesgo comenzó a surgir y ganar popularidad, sin dejar de lado el RCM y el CBM ([Cárcel Carrasco et al., 2016](#)).

Debido a los estrictos estándares de producción y las regulaciones integrales de seguridad y medio ambiente, las empresas se esfuerzan hoy en día por producir productos y servicios de alta calidad a bajo costo. Sin embargo, es imposible ignorar la presencia de fallas y mal funcionamiento de equipos o sistemas que causarán accidentes con consecuencias negativas para las personas y los equipos. Por lo tanto, el mantenimiento tiene como objetivo asegurar la disponibilidad y confiabilidad de los activos de una empresa, cumpliendo con los requisitos de seguridad, ambiente y calidad en todos sus procesos, buscando mejorar la productividad en sus actividades disminuyendo el tiempo de inactividad en la producción. Según sea la necesidad de mantenimiento de cada máquina o equipo, se puede aplicar mantenimiento correctivo, preventivo y/o predictivo.

Existe una gran cantidad de alternativas que se pueden emplear, tanto en cuestiones

técnicas como administrativas, para desarrollar la función mantenimiento. En particular, si de mantenimiento predictivo se trata, se aplican comúnmente las siguientes técnicas: inspección visual, acústica y al tacto de componentes, vigilancia de temperatura, análisis de vibraciones, análisis de lubricantes, ensayos no destructivos, control de ruido, entre otras (Mora, 2009).

Dado que todas las máquinas generan vibraciones como parte normal de su actividad, la técnica de análisis de vibraciones cobra especial importancia. Cuando se presenta una falla en algún componente de una máquina, su patrón de vibraciones cambia, permitiendo que bajo un estudio detallado se identifique el lugar y el tipo de falla asociado a dicho cambio. En este sentido, mediante la aplicación de esta técnica se puede detectar defectos como: desalineación y balanceo de ejes y poleas, desgaste de engranajes, fallas en rodamientos, sobrecargas, holguras excesivas, problemas eléctricos, entre otros.

Por lo expuesto, la vigilancia permanente de máquinas durante la operación o el mantenimiento juega un rol importante a la hora de detectar fallas o condiciones fuera del estándar. En este marco, el presente trabajo se centra en el desarrollo de herramientas específicas para el análisis de los datos obtenidos de las mediciones de vibraciones. Los mismos fueron obtenidos por monitoreo continuo de tres bombas centrífugas verticales instaladas en una planta de captación, en un yacimiento de producción de petróleo no convencional de la formación Vaca Muerta (Añelo, provincia del Neuquén).

2. OBJETIVOS

Objetivo General

Desarrollar herramientas específicas que permitan establecer criterios para revisar y actualizar el plan de mantenimiento predictivo vigente de un conjunto de bombas centrífugas verticales, mediante la implementación de un sistema de monitoreo continuo del nivel de vibraciones.

Objetivos Específicos

- Caracterizar el sistema bajo estudio (principio de funcionamiento, elementos principales y fallas típicas).
 - Identificar las técnicas empleadas comúnmente para monitoreo de condición.
 - Procesar y analizar los datos adquiridos, estableciendo su relación con los modos de falla.
-

3. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos que se consideraron necesarios abordar el proyecto, en relación con el tipo de equipo, análisis de vibraciones y el Mantenimiento Industrial.

3.1. Sistemas de Bombeo

Existen registros de la utilización de ruedas hidráulicas para transportar agua para riego, de la época de los antiguos egipcios, más de 2000 años atrás. En los años 200 A.C., Arquímedes inventó una bomba en forma de tornillo sin fin, llamada “Tornillo de Arquímedes” y que se utilizó para drenar e irrigar las tierras de la planicie del río Nilo ([Girdhar y Moniz, 2005](#)). Este tipo de bomba aún es utilizada en la actualidad, y también se utiliza como turbina para generar energía. Dado que estas bombas primitivas se empleaban para desplazar y trasladar volúmenes, se las clasifica dentro del grupo de las bombas de desplazamiento positivo.

La bomba hidráulica es una máquina que produce un incremento de la energía total del fluido incompresible mediante la aplicación de energía mecánica, donde la corriente es forzada por el impulsor y conducida al exterior a través de la voluta incrementando su presión. Con esta energía el fluido puede remontar el desnivel geodésico existente entre un depósito superior y otro inferior, ser impulsado contra la diferencia de presión entre la atmósfera y la presión reinante en un recipiente (por ejemplo: calderas, intercambiadores de calor, entre otros).

El elemento impulsor puede ser según el tipo de bomba de uno o varios émbolos, engranajes de diversos tipos, paletas deslizantes, álabes de formas diversas, entre otros. A su vez, trabajan en condiciones de las más diversas, desde atmósferas esterilizadas hasta en pozos de petróleo. El líquido más frecuentemente bombeado es el agua, pero igualmente se bombean líquidos fríos o calientes, desde los más volátiles hasta los más densos, incluso con sólidos en suspensión ([Mataix, 1975](#)).

En este trabajo, el estudio se focaliza en las bombas centrífugas, también llamadas bombas rotodinámicas. Algunos atribuyen la invención de este diseño a Leonardo Da Vinci (1452–1519) por haber sido quien sugirió la idea de utilizar la fuerza centrífuga para

impulsar líquidos; otros a Johann Jordan, por el año 1680, aunque la mayoría adjudica el origen del impulsor centrífugo a Denis Papin en 1689. Más tarde, en 1750, Leonhard Euler aportó la ecuación fundamental de las turbomáquinas hidráulicas, que explica el principio de funcionamiento de las bombas centrífugas ([Engeda, 1998](#)).

Este tipo de bombas se pueden clasificar, en primera instancia, según la dirección del flujo en relación al giro del eje en radiales y diagonales. Las condiciones exigidas a la bomba (caudal, altura) determinan la forma del rodete, y ésta a su vez la dirección del fluido. Estos se fabrican en general, por fundición con posterior mecanizado y están conformados por una sola pieza, si bien en algunas bombas elementales pueden construirse con procedimientos más sencillos, como por ejemplo, por conformado de chapa y unión de piezas mediante soldaduras.

Los materiales más usuales con que se fabrican los rodetes son los aceros aleados hasta llegar a los inoxidable, el bronce y plásticos, estos últimos para los casos más elementales. La selección del material pasa fundamentalmente por las características químicas y temperatura del líquido a transportar, por la cantidad y propiedades abrasivas o erosionantes de las sustancias en suspensión o arrastradas por el líquido, por la resistencia que ha de ofrecer a la cavitación, por el servicio que ha de soportar la bomba y por la economía deseada. En todo caso, la rugosidad de las paredes por donde circula el líquido debe ser pequeña, con el fin de reducir en lo posible las pérdidas por rozamientos.

Además de la clasificación previamente mencionada, existen diferentes tipos constructivos de turbo bombas. Las bombas se denominan monoetapas cuando disponen de un solo rotor, y de múltiples etapas cuando dentro de una sola carcasa se disponen rotores iguales en serie, de tal forma que el líquido pasa de la salida de un rotor a la entrada del siguiente. Entre cada dos rotores consecutivos, es preciso disponer un sistema difusor doble de álabes: la primera parte del sistema obliga al líquido a cambiar su dirección y sentido, además de conseguir una cierta transformación de la energía cinética en presión; la segunda parte del sistema difusor es centrípeta y guía el fluido hacia el siguiente rotor. Por último, se pueden clasificar en función de la disposición de las mismas tanto vertical como horizontal ([Mataix, 1975](#)).

A continuación, se realiza la descripción de las bombas centrífugas verticales que son los equipos incluidos en el alcance de este trabajo.

3.1.1. Bomba Centrífuga Vertical

Como se indicó anteriormente, una bomba consta de dos partes principales: un impulsor o rotor, que fuerza al líquido a girar mediante una acción de impulsión; y la carcasa de la bomba, que contiene y dirige el líquido al impulsor y lo aleja luego de pasar por él, a través del difusor, a una presión más alta.

El impulsor está montado en un eje que es soportado por los cojinetes, y es accionado por medio de un motor a través de un acoplamiento rígido o flexible (ver Figura 1). La carcasa de la bomba incluye un sector de succión o baja presión y uno de impulsión o de alta presión; además soporta los cojinetes y aloja el rotor. La carcasa debe empaquetarse alrededor del eje para evitar fugas externas mediante un sello mecánico. El motor, generalmente eléctrico, entrega la potencia mecánica al eje, que hace girar al rotor.

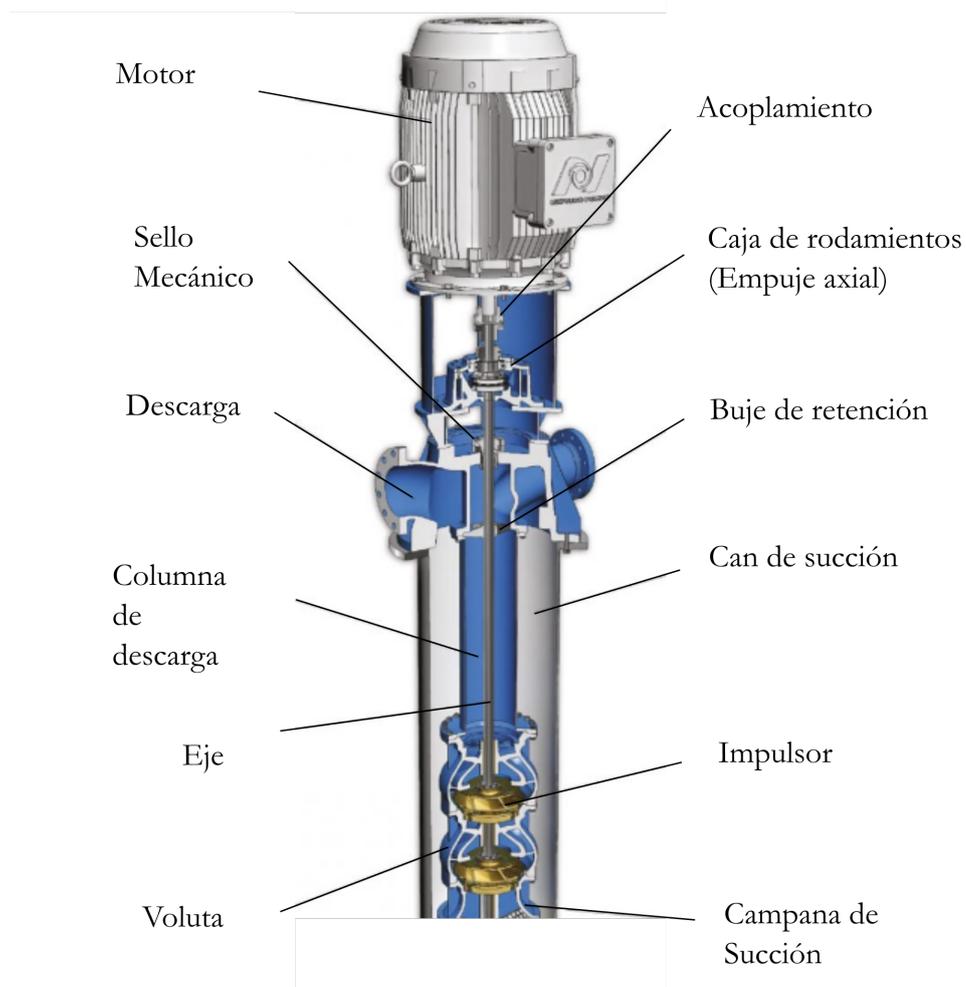


Figura 1. Bomba centrífuga vertical multietapa.

El líquido ingresa al impulsor o rodete y los álabes le confieren cantidad de movimiento angular a medida que avanza hacia el interior de este. Los álabes del rotor o impulsor y las paredes laterales del mismo, o cubiertas, forman los canales por donde se dirige el caudal desde el lado de succión hacia el lado de impulsión. Como resultado de la acción del impulsor, el líquido sale a una mayor presión y velocidad que la existente en su entrada ingresando a la cámara espiral, voluta o difusor, donde la velocidad se convierte parcialmente en presión antes de salir a través de la brida de descarga.

Las bombas centrífugas, en general, están equipadas con un difusor, el cual puede tener paletas para redireccionar el flujo o no. En el difusor se transforma parte de la energía cinética en la salida del impulsor en presión estática. La geometría consiste en un canal en forma de espiral de área de sección transversal creciente cuyo propósito es recoger el flujo del difusor (o impulsor) y entregarlo a la tubería de salida y a la vez lograr que, al disminuir la velocidad, aumente la presión interna antes de empalmarse con la tubería de impulsión. La energía cinética disponible en la entrada al difusor de una bomba es del orden del 50 % o más de la energía total entregada por el impulsor, lo cual explica la importancia del difusor en reconvertir parte de esta energía cinética en presión a partir de un diseño adecuado que evite las pérdidas por escurrimientos en geometrías divergentes (Dixon y Hall, 2013).

3.1.2. Fallas Hidráulicas

Las bombas centrífugas, aunque son dispositivos robustos y eficientes, pueden experimentar diversas fallas hidráulicas que afectan su rendimiento y confiabilidad. Algunas de las fallas hidráulicas más comunes en bombas centrífugas incluyen:

1. Cavitación:

- **Descripción:** la cavitación es un fenómeno en el cual se forman burbujas de vapor en el fluido debido a una caída de presión. Cuando estas burbujas colapsan, pueden causar daños en las superficies de las palas del impulsor y generar ruido.
 - **Causas:** presión de aspiración baja, altos caudales, diseño inadecuado de la bomba.
-

- **Prevención y solución:** asegurar una presión de aspiración adecuada, evitar altos caudales, y seleccionar bombas con diseño apropiado.

2. Desgaste del impulsor:

- **Descripción:** con el tiempo, el impulsor puede experimentar desgaste debido al flujo constante del fluido. Esto puede resultar en una disminución del rendimiento de la bomba.
- **Causas:** uso prolongado, presencia de partículas sólidas en el fluido.
- **Prevención y solución:** mantenimiento regular, filtrado del fluido para evitar partículas abrasivas.

3. Fugas en el sello mecánico o empaque:

- **Descripción:** las fugas en el sello mecánico o en el empaque pueden provocar pérdida de presión y reducción de la eficiencia de la bomba.
- **Causas:** desgaste, envejecimiento, instalación incorrecta.
- **Prevención y solución:** inspección regular, reemplazo de sellos desgastados, instalación adecuada.

4. Obstrucciones en las tuberías:

- **Descripción:** la presencia de obstrucciones en las tuberías, como sedimentos o depósitos, puede reducir el flujo y aumentar la carga de la bomba.
- **Causas:** acumulación de sedimentos, corrosión.
- **Prevención y solución:** limpieza regular de las tuberías, uso de filtros adecuados.

5. Fallas en el sistema de control de flujo:

- **Descripción:** problemas en las válvulas de control o en el sistema de regulación de flujo pueden afectar la operación de la bomba.
 - **Causas:** fallas eléctricas, mal funcionamiento de las válvulas.
-

- **Prevención y solución:** mantenimiento regular del sistema de control, revisión de las válvulas y actuadores.

6. Recirculación interna:

- **Descripción:** la recirculación interna se produce cuando parte del fluido bombeado fluye de nuevo hacia el impulsor en lugar de ser expulsado.
- **Causas:** diseño inadecuado, ajustes incorrectos.
- **Prevención y solución:** ajustar el diseño de la bomba, optimizar la configuración.

7. Fallas en la alineación del eje:

- **Descripción:** una mala alineación del eje puede generar fuerzas desiguales y desgaste prematuro en los cojinetes.
- **Causas:** montaje incorrecto, desalineación durante el funcionamiento.
- **Prevención y solución:** alineación adecuada durante la instalación, monitoreo regular.

Dentro de las fallas mencionadas, la cavitación es un fenómeno importante que, como se mencionó anteriormente, ocurre cuando se forman burbujas de vapor en un fluido en movimiento debido a una disminución de la presión del fluido por debajo de su presión de vapor. Este fenómeno es el resultado de una reducción en la presión de aspiración, un aumento en la temperatura de aspiración y variaciones en los caudales volumétricos, ya sea bajos o altos. Los diseñadores de bombas se esfuerzan por tener en cuenta que estas no siempre operan al máximo rendimiento, por lo que se busca que funcionen cómodamente dentro de un rango que oscile entre el 85 % y el 110 % de su Punto de Máximo Rendimiento (BEP, por sus siglas en inglés).

Los daños por cavitación, que generalmente se producen en la superficie de baja presión o visible del álabe de entrada del impulsor, presentan cuatro síntomas distintivos:

1. **Erosión:** este fenómeno ocurre cuando las cavidades colapsan en zonas de mayor presión, generando tensiones locales significativas en las superficies afectadas. El
-

colapso de las cavidades produce un chorro de líquido a velocidad local del sonido, generando una alta presión local en la superficie, a menudo superior a la resistencia última del material ([Mataix, 1975](#)).

2. Ruido: la cavitación produce un sonido agudo y distintivo cuando las burbujas colapsan bajo una mayor presión, similar al crujido de piedras. El nivel de ruido resultante es indicativo de la gravedad del fenómeno. Existen tres tipos principales de cavitación, cada uno con su propio rango de emisión acústica. La cavitación en lámina, la primera, forma cavidades a través de la superficie del álabe cuando la bomba opera cerca de su caudal de diseño con baja presión de aspiración, generando un ruido de banda ancha en el rango de 2 kHz a 40 kHz. La cavitación en nube, el segundo tipo, forma cavidades cuando la bomba opera lejos de su caudal de diseño a baja presión de aspiración, siendo la más ruidosa de los tres tipos y generalmente apareciendo a altas frecuencias, de 20 kHz a 40 kHz. El tercer tipo es la cavitación de vórtice, una forma inestable de cavitación que ocurre cuando la bomba opera con caudales muy bajos y en el régimen de contraflujo de entrada, generando un batido de baja frecuencia en la región de 1 Hz a 4 Hz, conocido como oleada de cavitación ([McKee et al., 2012](#)).
3. Vibración: las vibraciones de la bomba causadas por la cavitación son características de alta amplitud y baja frecuencia, manifestándose de manera aleatoria en el rango de 0 a 10 Hz.
4. Reducción del rendimiento de bombeo: las burbujas de vapor creadas alrededor del impulsor obstruyen el flujo del fluido bombeado, provocando una disminución del rendimiento. Esta reducción del rendimiento de la bomba se convierte en un indicador confiable de la presencia de cavitación, ya que el ruido asociado no se vuelve prominente hasta que el fenómeno ha progresado lo suficiente como para afectar significativamente el rendimiento de la bomba.

Las bombas, por su naturaleza, generan fuerzas hidráulicas al imprimir trabajo al fluido que manipulan a través de sus impulsores. En condiciones normales, estas fuerzas se gestionan con facilidad; sin embargo, surgen problemas cuando hay frecuencias resonantes que provocan vibraciones excesivas. La señal más comúnmente asociada con estas

fuerzas hidráulicas es la Frecuencia de Paso de Álabes (BPF, por su sigla en inglés), que relaciona el número de álabes (N_a) con la velocidad de giro del impulsor (n):

$$BPF[Hz] = N_a n[rpm] \quad (1)$$

Las fuerzas hidráulicas se originan debido a variaciones o impulsos de presión cada vez que un álabe carga o descarga al pasar por componentes estacionarios cercanos. Este fenómeno ocurre si el impulsor no está correctamente alineado con los difusores y no está centrado en la carcasa. Desde la perspectiva de la señal de vibración, es común buscar la BPF y sus armónicos.

En resumen, cuando la bomba opera en su BEP, las únicas cargas sobre los rodamientos se deben al peso del conjunto giratorio, la tensión causada por el ajuste de interferencia en el eje y cualquier precarga de los cojinetes especificada por el fabricante. Sin embargo, la mayoría de las bombas no funcionan continuamente en su BEP, lo que permite la posibilidad de sobrecargas. Estas pueden ser resultado de diversas condiciones, como un elemento giratorio desequilibrado, un eje doblado, obstrucciones en los orificios equilibrantes del impulsor, cavitación, empuje axial excesivo, carga radial excesiva debido al funcionamiento con bajo caudal, o algún fallo mecánico interno en la bomba.

Otros factores incluyen el calentamiento excesivo de los rodamientos debido a una disipación inadecuada del calor (falta de lubricación), aumento de las holguras internas de la bomba alrededor de los anillos de desgaste, incremento de la velocidad del eje, desalineación entre la bomba y su impulsor, operación de la bomba lejos de su punto de mejor rendimiento (creando fuerzas radiales excesivas en el impulsor que afectan al rodamiento), tensiones en las tuberías, frecuencia de paso de álabe coincidente con la resonancia del conjunto de la bomba, entre otros. Estos factores pueden alterar las vibraciones de las bombas y deben detectarse para evitar una falla catastrófica ([McKee et al., 2012](#)).

Por lo expuesto es fundamental realizar un mantenimiento preventivo, monitoreo constante y abordar de manera rápida cualquier problema detectado para garantizar un funcionamiento óptimo y prolongar la vida útil de las bombas centrífugas.

3.2. Mantenimiento Industrial

En general, se puede definir al mantenimiento como la combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y de gestión durante el ciclo de vida de un elemento, equipo o instalación (denominados también activos), destinadas a conservarlo o devolverlo a un estado en el cual puede desarrollar una función requerida.

En las últimas décadas, el mantenimiento en la industria moderna ha experimentado una serie de profundas transformaciones a nivel tecnológico, económico, social, organizacional, cultural y humano. Estos cambios emergen a partir de la actual competitividad de los negocios y la globalización de los mercados. Frente a este panorama un sistema integral de gestión de mantenimiento, representa la única vía efectiva que permite a las organizaciones, enfrentar de forma eficiente los retos constantes a los cuales están sometidas hoy en día.

El propósito del mantenimiento debe ser estudiar, analizar y proponer, en un proceso de mejora continua, las soluciones que aseguren la máxima confiabilidad, la mayor vida útil, y el mayor valor de los activos con los que se trabaja. Para esto, es importante disminuir la cantidad y la severidad de ocurrencia de fallas, teniendo en cuenta que la falla de un ítem es la pérdida de la capacidad de realizar lo requerido.

El mantenimiento en cada uno de los niveles de su estructura organizativa debe aportar estrategias de mejoramiento, a partir del diagnóstico y análisis de las oportunidades para la optimización de costos y la evaluación del impacto del mantenimiento, en sus cuatro áreas fundamentales ([UNE-EN 13306, 2018](#)).

1. Capacidad de Producción

- Mejora de la productividad de la planta.
- Aumento de la capacidad de los equipos.

2. Costos de Producción

- Reducción de tiempos de mantenimiento.
- Reducción de los tiempos de paradas.

3. Seguridad Industrial y personal

- Reducción de fallas críticas y catastróficas.
- Mayor seguridad del personal.

4. Satisfacción de los Clientes

- Cumplimiento de las entregas.
- Alta calidad de los productos.

Existen diversas filosofías de mantenimiento, y muchas veces es difícil establecer fronteras entre las mismas, debido a que existen diferencias entre lo que plantean distintos autores. A menudo se diferencian cuatro filosofías básicas de mantenimiento, las cuales se definen a continuación.

3.2.1. Mantenimiento Correctivo

También denominado Mantenimiento Basado en la Rotura (MBR), consiste en la reparación de averías a medida que van apareciendo ([Pistarelli, 2012](#)). La lógica de esta filosofía es simple y directa, “si no se rompe, no se repara”. Este método ha sido una parte importante de las operaciones de mantenimiento desde los inicios de las plantas industriales. De esta forma, no se gasta dinero en mantenimiento hasta que una máquina o sistema falla en operación. MBR es una técnica de gestión reactiva que espera por la falla de la máquina o equipo antes de tomar cualquier acción de mantenimiento. Este es el método de gestión de mantenimiento más costoso ([Mobley, 2004](#)). El mantenimiento correctivo estará presente en todo tipo de gestión de mantenimiento, ya que siempre se necesitarán reparaciones.

En relación a costos asociados a este tipo de gestión de mantenimiento, se pueden destacar altos costos de almacenamiento de repuestos, altos costos de mano de obra por pago de horas extra, elevados tiempos de inactividad de máquinas, equipos y operarios, reducción de vida útil de equipos, con la consecuente depreciación de los activos, y baja disponibilidad de producción.

El resultado de este tipo de gestión de mantenimiento reactivo es un elevado costo de mantenimiento y una baja disponibilidad de equipos. El análisis de los costos de mantenimiento indica que una reparación realizada de modo reactivo o MBR tendrá un costo promedio aproximado tres veces mayor que la misma reparación realizada de modo

programado o preventivo (Moblely, 2004). Realizar intervenciones programadas permite minimizar tiempos de reparación, evitando una serie de tiempos asociados, como tiempos de detección, de diagnóstico y de espera. Además, se reducen costos de mano de obra asociados a reparaciones no programadas, evitando también pérdidas de producción.

3.2.2. Mantenimiento Preventivo

Consiste en reparar un equipo o reemplazar sus componentes en forma periódica, sin importar su estado o condición. En otras palabras, las tareas de mantenimiento se basan en lapsos de tiempo de operación. La Figura 2 muestra un ejemplo de la vida estadística de un tren de máquinas, representada comúnmente por la conocida Curva de Davies o de la bañera. El Tiempo Medio a la Falla (MTTF, por sus siglas en inglés), indica que una máquina nueva tiene una alta probabilidad de falla durante las primeras semanas de operación, debido a problemas de manufactura o de instalación. Después de este período inicial, la probabilidad de falla es relativamente baja por un período de tiempo extendido. Una vez cumplido el período de vida normal de la máquina, la probabilidad de falla se incrementa rápidamente a medida que transcurre el tiempo. En la gestión de mantenimiento preventivo, las reparaciones se programan en base a la estadística del MTTF.

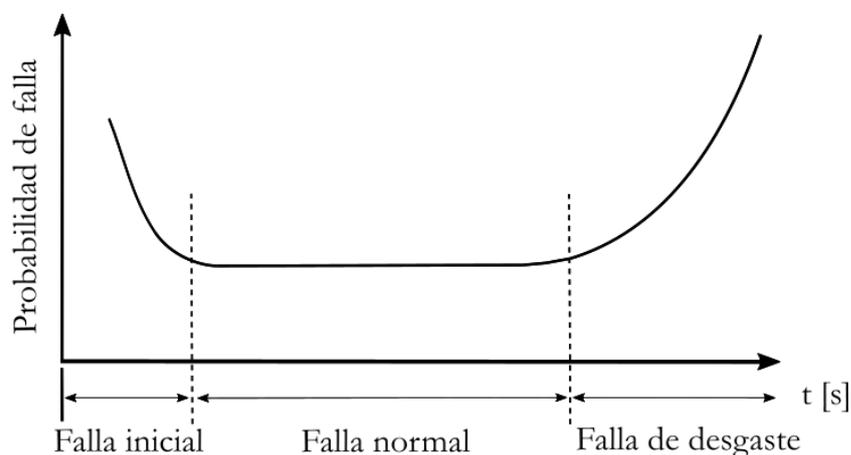


Figura 2. Curva de Davies o de la bañera.

La implementación del mantenimiento preventivo se realiza de diferentes maneras. Algunos programas son más limitados, y consisten en lubricación y ajustes menores. Otros programas de mantenimiento preventivo más completos incluyen lubricación, reparaciones programadas, ajustes y *overhauls*. Todos los programas de gestión de mantenimiento

preventivos utilizan la premisa de programar las intervenciones a intervalos predeterminados de tiempo, de acuerdo a criterios preestablecidos, tendientes a reducir la probabilidad de falla. Dichos programas asumen que las máquinas o equipos sufrirán degradación típica con el paso del tiempo.

Este enfoque presenta un inconveniente, ya que el modo de operación y sus distintas variables afectan directamente la vida operativa normal de la maquinaria. Debido a esto, el Tiempo Medio entre Fallas (MTBF, por sus siglas en inglés) no será el mismo para dos equipos idénticos, operando bajo condiciones diferentes. El uso de MTBF estadísticos para programar las tareas de mantenimiento puede generar reparaciones innecesarias o fallas catastróficas, lo que da como resultado equipos reemplazados sin ser necesario o equipos que fallan y generan pérdidas de producción, situaciones en ambos casos indeseables. Es por ello que [Pistarelli \(2012\)](#) plantea que para aplicar un modelo de gestión de mantenimiento preventivo eficaz, es necesario que se cumplan algunas condiciones mínimas:

- Los ítems a intervenir tienen un período de vida útil conocido a partir del cual se presenta un rápido crecimiento del MTBF.
- La vida útil para todos los componentes iguales es muy parecida (baja dispersión).
- La mayoría de los elementos probados se mantienen sin fallas durante su vida útil.
- La intervención reestablece totalmente la condición básica del ítem.

Los objetivos fundamentales del mantenimiento preventivo son:

- Aumentar la disponibilidad de los equipos a través de la disminución de detenciones no programadas.
 - Minimizar las averías imprevistas de los equipos.
 - Mejorar el aprovechamiento de mano de obra por medio de la programación de tareas.
 - Mejorar la calidad de productos y servicios.
-

- Disminuir el riesgo para el personal en las operaciones de producción y mantenimiento.
- Minimizar los gastos debido a reparaciones de emergencia.

3.2.3. Mantenimiento Predictivo

La premisa del mantenimiento predictivo es el monitoreo regular de la condición de los equipos para asegurar el máximo intervalo de tiempo entre reparaciones, y minimizar el número y el costo de paradas inesperadas por fallas en los equipos. Se puede decir que el mantenimiento predictivo es una filosofía que, en pocas palabras, utiliza las condiciones operativas reales de los equipos y sistemas de una planta para optimizar la operación total. Un programa de gestión de mantenimiento predictivo completo, utiliza una combinación de las herramientas más rentables de monitoreo de condición (como son, por ejemplo: medición de vibraciones, termografía, tribología, ultrasonido, etc.), para conocer la condición operativa real de los equipos o sistemas de la planta, y basado en esa información real, programa todas las actividades de mantenimiento según sea necesario.

En vez de basarse en estadísticas de vida media de equipos de la industria o de la propia planta para programar las actividades de mantenimiento, el mantenimiento predictivo usa el monitoreo directo de la condición de los equipos para determinar el MTTF real, o la pérdida de eficiencia para cada tren de máquinas y sistema en la planta, con el objetivo de no permitir que la falla sintomática irreversible evolucione en una falla funcional. Esto proporciona la capacidad para optimizar la disponibilidad de la maquinaria y reducir en gran medida los costos de mantenimiento ([Moblely, 2004](#)).

Un programa de mantenimiento predictivo puede minimizar las paradas no programadas de todos los equipos mecánicos en la planta, y asegurar que las reparaciones mecánicas se realicen en condición aceptable. Además, puede identificar problemas en máquinas antes de que se conviertan en problemas serios, permitiendo predecir el tiempo hasta la aparición de la falla funcional. La mayoría de los problemas mecánicos pueden minimizarse si son identificados y reparados a tiempo.

3.2.4. Mantenimiento Proactivo

Surge como alternativa para anticiparse a una falla sintomática irreversible que luego se transforma en una falla funcional, y lograr revertir la situación. Es un método tendiente a mejorar la disponibilidad de los equipos, con modificaciones y soluciones técnicas diversas.

Es muy difícil definir con precisión el límite entre el mantenimiento predictivo, y el mantenimiento proactivo, ya que ambos buscan identificar fallas sintomáticas en forma prematura. La diferencia principal radica en el carácter de reversibilidad o irreversibilidad que le confieren a las fallas sintomáticas. En el caso del mantenimiento proactivo, la detección de la falla sintomática ocurre con mayor anticipación, lo que permite tomar acciones para desviar la tendencia natural hacia la falla funcional, y evitar en muchos casos la ocurrencia de la misma.

El mantenimiento proactivo presenta beneficios en su incorporación, como son la posibilidad de analizar la evolución de una falla sintomática reversible (prácticamente desde la aparición de la causa raíz), provee de información para actuar sobre las causas de las fallas, y reduce los gastos provocados por fallas sintomáticas irreversibles. Además, es importante destacar que las herramientas que incorpora el mantenimiento proactivo ofrecen un panorama muy definido del estado de los componentes de equipos, lo que permite decidir el momento más oportuno para su reemplazo o reparación, optimizando en muchas ocasiones el intervalo entre dos intervenciones preventivas.

Algunas herramientas del mantenimiento proactivo que se destacan son el análisis físico-químico de lubricantes, el recuento de partículas contaminantes, la verificación de metales y aleaciones, alineación y balanceo, seguimiento de niveles térmicos, y estudios de amperaje, entre otros.

3.3. Fundamentos del Análisis de Vibraciones

Las máquinas en movimiento, incluso en condiciones normales, exhiben fenómenos dinámicos que generan energía, manifestada a través de vibraciones. Cuando alguna parte de la máquina experimenta desgaste o deterioro, las vibraciones aumentan su intensidad, provocando variaciones en los niveles vibracionales. Aprovechando este fenómeno, muchos problemas asociados a equipos rotativos, denominados fallas sintomáticas, pueden ser detectados mediante la técnica de Análisis de Vibraciones.

Para que este método sea efectivo, es esencial que las fallas sintomáticas sean parámetros de salida claramente identificables y que exista una relación discernible entre la magnitud de estos parámetros y el grado de deterioro de la componente en cuestión (Pistarelli, 2012).

A continuación, se presentará la teoría y las técnicas fundamentales del Análisis de Vibraciones, con el propósito de identificar fallas sintomáticas en entornos industriales.

3.3.1. Definiciones preliminares

Dentro de este campo de estudio los términos movimiento, oscilación y vibración no poseen la misma significación. Tanto las oscilaciones como las vibraciones se extienden en el tiempo mediante un proceso de conversión entre diversos tipos de energía. Sin embargo, para considerar que un sistema mecánico está experimentando vibración, es necesario que surja la energía de deformación o la energía potencial elástica (o elastoplástica). Se identifican dos tipos fundamentales de vibración:

1. **Movimiento de cuerpo completo:** Este tipo de vibración implica el movimiento cíclico de una masa, que forma parte de un sistema elástico, alrededor de su posición de equilibrio. Se asume que el cuerpo es rígido.
2. **Ondas de presión:** Estas se generan por impactos que producen ondas longitudinales, propagándose a la velocidad del sonido. En este caso, el cuerpo no se considera rígido.

Los movimientos de cuerpo completo son aquellos que se detectan con sensores de vibraciones. El sistema máquina-soportes puede ser representado como un sistema masa-

resorte-amortiguador. En una máquina rotativa, la masa que se desplaza suele ser el rotor, con un desequilibrio residual que genera una fuerza centrífuga deformando el eje, los cojinetes y los soportes. Estos últimos componentes poseen rigidez y actúan como el resorte en el sistema elástico. Además, existe amortiguamiento, proporcionado por histéresis interna, fricción sólida y fluida (Wowk, 1991).

3.3.2. Señales de Vibración

Las señales de vibración son patrones de variación a lo largo del tiempo que representan el movimiento oscilatorio o vibratorio de un objeto o sistema. Estas señales son cruciales en el análisis de vibraciones para comprender el comportamiento dinámico de maquinaria y estructuras. Aquí se presentan algunas características y tipos comunes de señales de vibración:

Características Principales:

- **Amplitud:** representa la magnitud máxima del movimiento vibratorio. Es la distancia desde la posición de equilibrio hasta el punto más alejado alcanzado por la vibración.
- **Frecuencia:** indica la cantidad de ciclos vibracionales que ocurren en un segundo. Se mide en hertz (Hz).
- **Fase:** refleja la posición relativa de la vibración en un instante dado dentro de un ciclo. La fase se mide en grados o radianes.
- **Forma de Onda:** describe la geometría y el patrón de la señal de vibración a lo largo del tiempo. Puede ser sinusoidal, triangular, cuadrada, entre otras.

Tipos Comunes de Señales de Vibración:

- **Senoidal:** representa una vibración simple y periódica. La forma de onda sigue la función seno o coseno. Es común en sistemas bien equilibrados.
 - **Armónicas:** señales que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. Pueden indicar la presencia de componentes adicionales en el sistema.
-

- Impulsivas: caracterizadas por una alta amplitud y corta duración. A menudo están asociadas con impactos o eventos bruscos.
- Aleatorias: no siguen un patrón regular y están asociadas con vibraciones provenientes de fuentes no controladas o no periódicas.
- Banda Ancha: contienen una amplia gama de frecuencias y son típicas de vibraciones complejas y aleatorias.

Método de Análisis:

- Espectro de Frecuencia: descompone una señal en sus componentes frecuenciales para identificar las frecuencias dominantes y sus amplitudes.
- Análisis en el Dominio del Tiempo: examina la forma de onda directamente, evaluando amplitudes, duraciones y frecuencias sin transformaciones.
- Análisis Modal: identifica las frecuencias naturales y modos de vibración de una estructura.
- Análisis de Forma de Onda: evalúa visualmente la forma de onda para identificar patrones anómalos o características distintivas.

Representación Gráfica:

En la Figura 3 se presentan los diversos parámetros que definen una onda senoidal. Estos parámetros, que se detallan a continuación, son esenciales para caracterizar una onda senoidal y proporcionan información valiosa sobre su comportamiento, permitiendo un análisis detallado de sus propiedades y características.

- Amplitud Pico (Pk, por sus siglas en inglés): representa la distancia máxima desde el punto cero o posición de equilibrio hasta el punto más alto de la onda.
 - Amplitud Pico a Pico (Pk-Pk, por sus siglas en inglés): se refiere a la distancia total desde una cresta negativa hasta una cresta positiva de la onda.
-

- Amplitud Raíz del Promedio de los Cuadrados (RMS, por sus siglas en inglés): es la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de los valores de la onda. Este valor RMS está directamente relacionado con el área bajo la curva y se recomienda su uso en todos los cálculos de fuerza o energía en forma de onda.
- Fase: constituye una medida de la diferencia de tiempo entre dos ondas senoidales. Aunque la fase representa una diferencia temporal real, se mide comúnmente en términos de ángulo, ya sea en grados o radianes. Esta normalización del tiempo requiere un ciclo completo de la onda, independientemente de su verdadero periodo temporal.

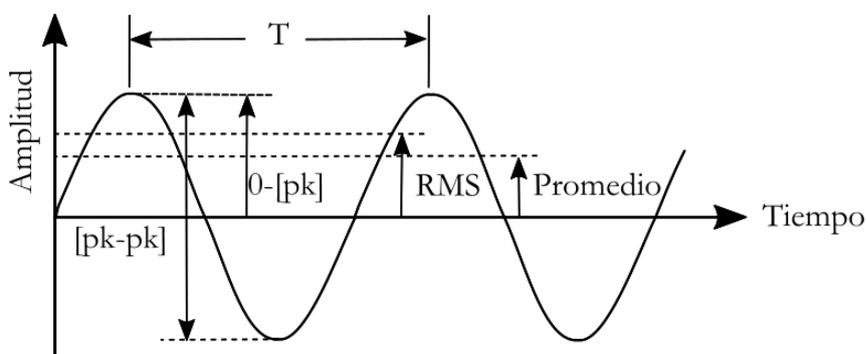


Figura 3. Parámetros de una señal senoidal.

3.3.3. Análisis de Señales de Vibración

A diferencia de la sencilla onda senoidal, la señal proveniente de un punto de una máquina es extremadamente compleja debido a que usualmente hay muchas fuentes generadoras de vibraciones (ver Figura 4). Cada fuente genera su propia señal, pero estas se suman y originan una señal vibratoria compleja, llamada poliarmónica. Esta señal puede ser presentada usualmente de dos formas:

1. **Señal en el dominio del tiempo:** se refiere a la representación gráfica de una magnitud física o fenómeno a lo largo del eje del tiempo. En el contexto de las vibraciones mecánicas, como las generadas por máquinas o sistemas dinámicos, una señal en el dominio del tiempo muestra cómo varía la amplitud de la vibración en función del tiempo. En este tipo de representación, el eje horizontal suele ser el tiempo,

mientras que el eje vertical representa la magnitud de la señal, que en el caso de vibraciones puede ser la aceleración, la velocidad o el desplazamiento, dependiendo de la aplicación. Este enfoque temporal permite analizar patrones, periodicidades y cualquier cambio en el comportamiento de la vibración a lo largo de un período específico.

2. **Señal en el dominio de la frecuencia:** es una representación de una magnitud física en términos de sus componentes de frecuencia. En el contexto de las vibraciones mecánicas, este tipo de señales muestra la distribución de energía en función de las diferentes frecuencias presentes en la señal. Esta representación se obtiene a través de técnicas matemáticas, como la Transformada de Fourier, que descompone la señal en sus componentes sinusoidales fundamentales. Una señal en el dominio de la frecuencia proporciona información valiosa sobre las frecuencias predominantes y sus amplitudes en una señal dada. Esto es especialmente útil para identificar patrones característicos, picos de frecuencia y anomalías en las vibraciones mecánicas, lo que facilita el diagnóstico de posibles problemas en maquinaria o sistemas. En un gráfico típico como el de la Figura 4, el eje horizontal representa las diferentes frecuencias, mientras que el eje vertical muestra la amplitud o la intensidad de cada componente de frecuencia.

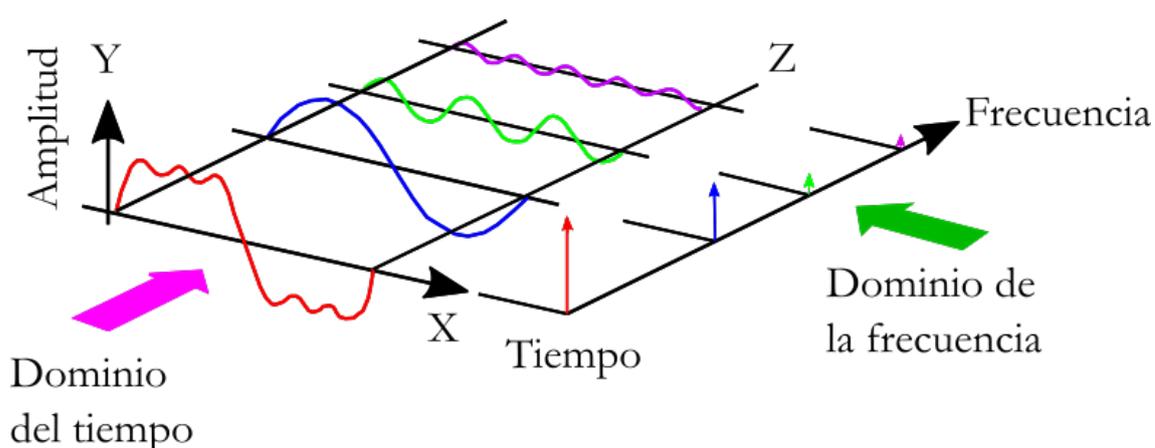


Figura 4. Señal de vibración en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia.

En numerosas investigaciones, la relación entre las vibraciones en distintos puntos de la estructura o en diferentes direcciones de vibración es tan crucial como los propios datos de vibración individuales. Por esta razón, se han desarrollado analizadores de señales multicanales que incorporan funciones de análisis de doble canal, permitiendo así obtener las relaciones tanto de amplitud como de fase en la señal.

Las señales analógicas provenientes de un transductor pueden ser procesadas mediante sistemas analógicos o digitales. En el pasado, se empleaban sistemas analógicos que involucraban filtros, amplificadores, registradores, integradores y otros componentes para modificar la señal, aunque no alteraban su carácter analógico. Actualmente, se evidencian cada vez más las ventajas de digitalizar las señales. Un Convertidor Analógico-Digital (ADC) realiza un muestreo rápido de la señal analógica y la transforma en una serie de valores numéricos, como se ilustra en la Figura 5, donde los niveles de voltaje se convierten en señales digitales que representan cada nivel de muestra (White, 2010).

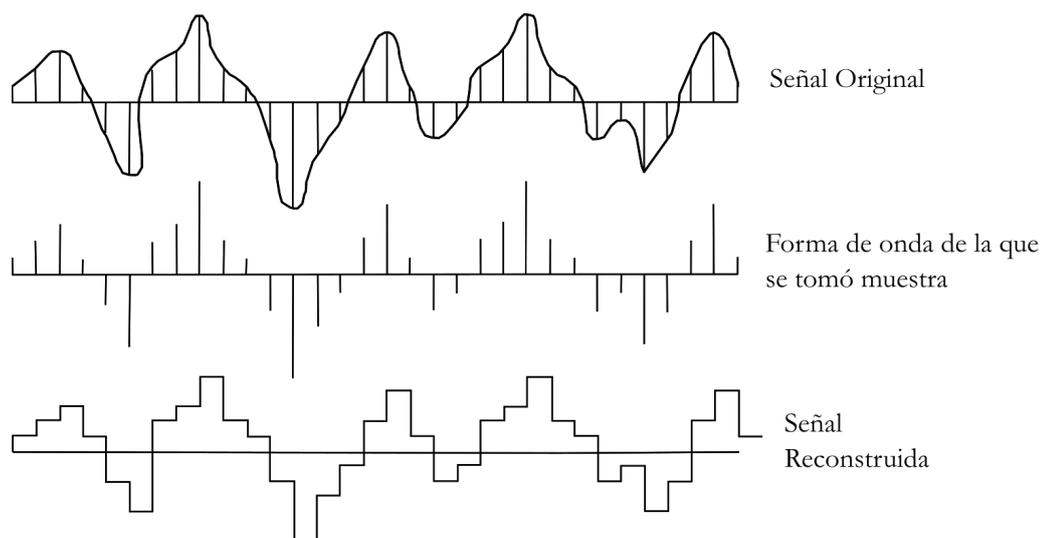


Figura 5. Transformación de señal analógica a digital (White, 2010).

Las señales de vibración suelen necesitar algún tipo de acondicionamiento antes de su registro, con el propósito de obtener niveles de tensión apropiados para el registro o para eliminar ruidos u otros componentes no deseados. Los registros de vibraciones pueden llevarse a cabo en términos de desplazamiento (x), velocidad (v) o aceleración (a). Generalmente, se prefiere uno de estos parámetros según la gama de frecuencias de interés. Las señales de baja frecuencia son más notorias al utilizar el desplazamiento, mientras que las señales de alta frecuencia son más evidentes al emplear la aceleración. Es posible

convertir una señal de vibración en otra magnitud mediante procesos de integración o diferenciación. Al integrar la aceleración con respecto al tiempo, se obtiene la velocidad, y al integrar la velocidad, se obtiene el desplazamiento, mientras que la diferenciación realiza el proceso contrario. A tal fin, para el movimiento armónico, se emplean las siguientes expresiones:

$$x = \int v dt = \iint a dt \quad (2)$$

$$v = \frac{dx}{dt} = \int a dt \quad (3)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (4)$$

Aunque cualquiera de estos tres parámetros puede emplearse para supervisar la condición de una máquina, lo más común es utilizar el espectro de velocidad, ya que suele presentar una respuesta más uniforme, indicando que el rango de amplitudes de velocidad es más reducido. Dado que el cambio en la amplitud de la velocidad es fácil de observar en un espectro de velocidad más plano, se prefiere utilizar este parámetro como indicador principal para el monitoreo de la condición de la máquina (Rao, 2012).

Existen tres tipos fundamentales de filtros para el acondicionamiento y análisis de señales:

1. Filtros de paso bajo: permiten el paso de componentes de baja frecuencia y bloquean las de alta frecuencia por encima del límite del filtro. Algunos ejemplos incluyen *antialiasing* o aquellos que excluyen componentes de alta frecuencia no deseados para investigaciones específicas, como fallas por desbalanceo de engranajes.
2. Filtros de paso alto: se utilizan para excluir el ruido de baja frecuencia del transductor, como el ruido térmico, y otros componentes no deseados de la señal. Este tipo de filtro es esencial, ya que los componentes no deseados, aunque no sean de interés, pueden reducir significativamente el rango dinámico útil del equipo de medición.
3. Filtros de paso de banda: sirven para aislar diferentes rangos de frecuencia. Los

más comunes son los filtros de octava o los filtros de 1/n octava, utilizados para correlacionar las mediciones de vibraciones con las de ruido.

Al emplear filtros para aislar una componente de frecuencia específica y examinar la forma de onda, se debe asegurar que el filtro excluya cualquier componente de frecuencia diferente al de interés. Asimismo, se han desarrollado métodos específicos para el análisis de vibraciones con el fin de identificar fallas características, tales como:

- Detección de alta frecuencia (HFD): se aplica un filtro paso alto (5 kHz - 60 kHz) a la señal para medir solo los picos generados por pequeños defectos. El HFD generalmente se mide en Gs (gravidades) con valores picos o RMS.
- Envolvente de aceleración (ENV): su objetivo es filtrar las bajas frecuencias y detectar los componentes repetitivos relacionados con los impactos generados por defectos en los rodamientos, dentro del rango de frecuencias típicas de falla. Este parámetro ha demostrado ser útil para determinar el progreso del fallo en rodamientos. La empresa SKF (www.skf.com) patentó esta técnica y ha publicado artículos que muestran su efectividad para identificar fallos, incluso en rodamientos que operan a baja velocidad (Berry, 2000).
- Tecnología PeakVue: desarrollada por la empresa Emerson (www.emerson.com), es similar a la envolvente con alta sensibilidad para la detección de impactos y tendencias, cuantificando defectos en elementos rodantes, pistas de rodamientos y dientes de engranajes. Esta técnica es un análisis de ondas de esfuerzo que distingue la demodulación, pulsos de choques y picos de energía.
- Técnica de Medición en RMS: representa la raíz cuadrada del promedio de la suma de los cuadrados de la señal, ayudando a identificar la desviación estándar tanto en señales de velocidad como de aceleración.

3.3.4. Transductores de Vibración

Los transductores de vibraciones son dispositivos que convierten las vibraciones mecánicas en señales eléctricas, permitiendo así medir y analizar las características de la

vibración de un sistema. Uno de los transductores comúnmente utilizados para este propósito es el acelerómetro.

Un acelerómetro es un transductor electromecánico que genera una carga eléctrica proporcional a una aceleración mecánica. Para obtener las magnitudes reales de la vibración, la tensión de salida se multiplica por un factor de calibración, que considera la sensibilidad del transductor y las ganancias del amplificador y el registro. Los acelerómetros piezoeléctricos son los preferidos actualmente debido a que ofrecen características superiores y cubren un rango más amplio de frecuencias en comparación con otros sensores de vibraciones. La Figura 6 muestra los distintos componentes de un acelerómetro.

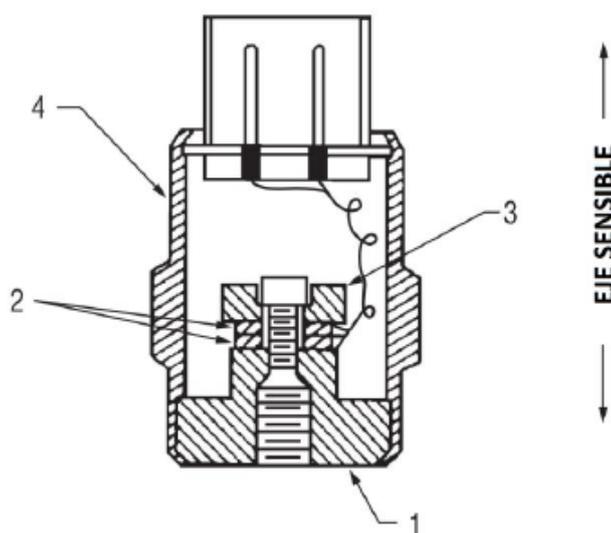


Figura 6. Diagrama esquemático de un acelerómetro (Moblely, 2004).

Referencias: (1) Base, (2) Cristales piezoeléctricos, (3) Masa sísmica, (4) Carcasa.

El núcleo de un acelerómetro consiste en un material piezoeléctrico, generalmente un cerámico ferroeléctrico polarizado artificialmente. Estos elementos tienen la propiedad de generar una carga eléctrica proporcional a la deformación y, por ende, a la fuerza aplicada, ya sea en situaciones de compresión o corte. En la práctica, el diseño de los acelerómetros implica cargar los elementos piezoeléctricos con una masa y preajustarlos con un resorte. Cuando el sistema experimenta vibraciones, las masas aplican una fuerza variable al elemento piezoeléctrico, directamente proporcional a la aceleración.

Al seleccionar un acelerómetro, es crucial considerar varios parámetros para asegurarse de que sea adecuado para la aplicación específica. A continuación, se detallan algunos de los parámetros clave a tener en cuenta:

- **Rango de Medición:** indica el rango de aceleración que el sensor puede medir con precisión. Se expresa en unidades de gravedad (g) o metros por segundo al cuadrado (m/s^2). Debe seleccionarse un rango que cubra las aceleraciones esperadas en la aplicación, pero sin excederlo para evitar la saturación del sensor.
- **Ancho de Banda:** es el rango de frecuencias sobre el cual el acelerómetro puede proporcionar mediciones precisas. Se expresa en Hertz (Hz). La elección del ancho de banda depende de las frecuencias esperadas en la aplicación.
- **Tipo de Salida:** los acelerómetros pueden tener salidas en forma de voltajes analógicos, corriente, o digitales como pulsos o comunicación serial. La elección depende de la compatibilidad con el sistema de adquisición de datos y la conveniencia para la aplicación específica.
- **Frecuencia de Resonancia:** es la frecuencia a la cual el acelerómetro tiene la máxima sensibilidad. Es crucial conocer esta frecuencia para evitar mediciones inexactas en su entorno resonante (ver Figura 7).

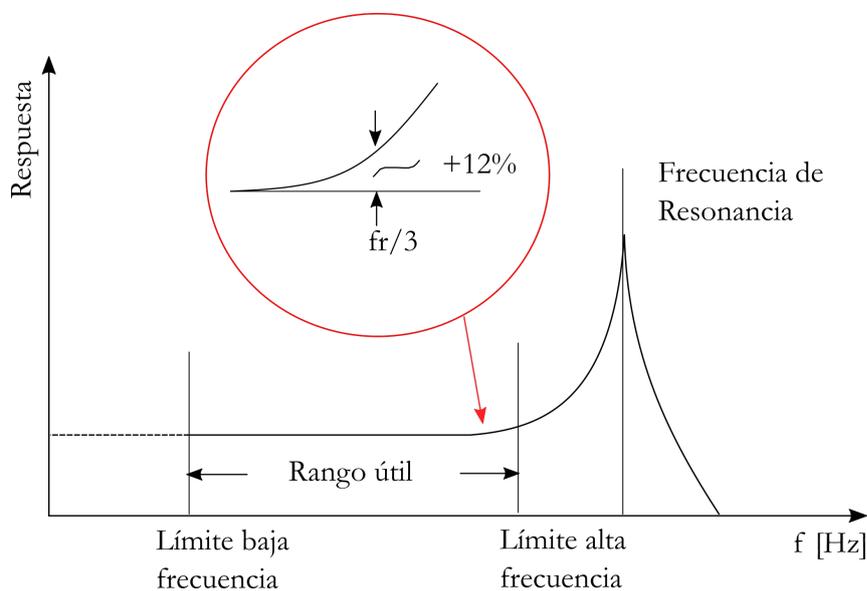


Figura 7. Frecuencia de resonancia de un acelerómetro.

- **Sensibilidad:** indica la cantidad de carga eléctrica generada por unidad de aceleración. Se mide en picoCoulombs por gravedad (pC/g) o voltios por gravedad (V/g). La sensibilidad adecuada depende de la aplicación y de la amplitud de la señal que se espera medir (ver Figura 8).

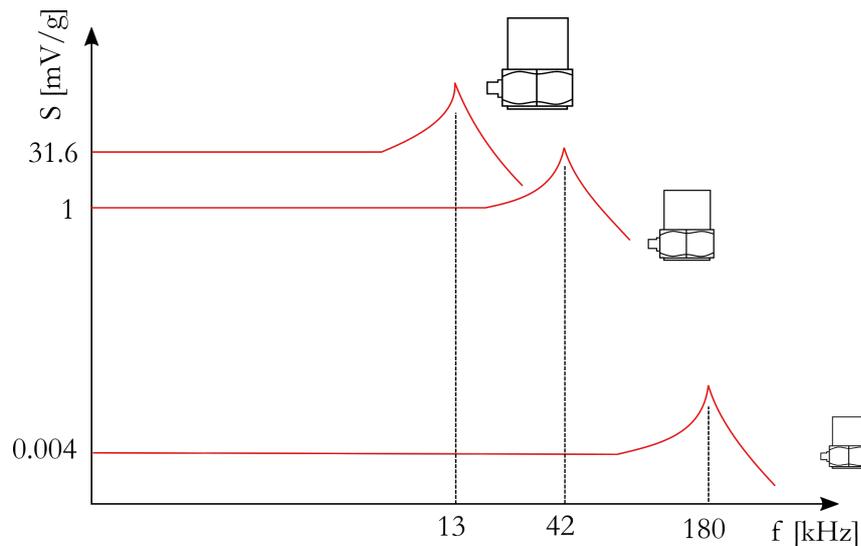


Figura 8. Sensibilidad de un acelerómetro.

- **Temperatura de Operación:** la temperatura ambiente puede afectar el rendimiento del acelerómetro. Asegúrese de que el sensor pueda operar dentro del rango de temperatura requerido para la aplicación.
- **Estabilidad a Largo Plazo:** algunas aplicaciones pueden requerir una alta estabilidad a lo largo del tiempo. La estabilidad a largo plazo se refiere a la capacidad del acelerómetro para mantener sus características de calibración en el tiempo.
- **Tamaño y Peso:** en aplicaciones donde el espacio y el peso son críticos, es importante seleccionar un acelerómetro que cumpla con restricciones de tamaño y peso.
- **Robustez y Protección Ambiental:** si el acelerómetro estará expuesto a condiciones ambientales adversas, como humedad, polvo o vibraciones extremas, es esencial elegir un sensor robusto y con una clasificación adecuada de protección ambiental.
- **Costo:** el presupuesto también es un factor determinante. Es importante equilibrar el rendimiento requerido con el costo del acelerómetro.

Considerar cuidadosamente estos parámetros garantizará que el acelerómetro seleccionado sea compatible y cumpla con los requisitos específicos de la aplicación.

3.3.5. Identificación de Fallas Típicas en Máquinas Rotativas

Desbalance

El desbalance se manifiesta cuando el centro de masa del elemento rotante no coincide con la línea central geométrica del cuerpo. Este fenómeno es común en todas las máquinas y se caracteriza por una componente predominante en las direcciones radiales con una frecuencia igual a la del giro del rotor (1X). Se distinguen tres tipos de desbalance:

1. Desbalance estático: este es el tipo más simple de desbalance y es dinámicamente equivalente a un solo peso ubicado fuera del eje central geométrico (ver Figura 9). La denominación estático indica que puede detectarse incluso cuando el rotor no está en movimiento. Este tipo de desbalance se observa comúnmente en rotores no esbeltos, con una longitud inferior al 50 % del diámetro. En el espectro, se identifica la frecuencia fundamental (1X) sin armónicos. Las señales vibratorias en ambos extremos del rotor están en fase y su amplitud es uniforme en todas las direcciones radiales. Sin embargo, la dirección con la menor rigidez de apoyo, generalmente la horizontal, tiende a mostrar mayores lecturas de amplitud.

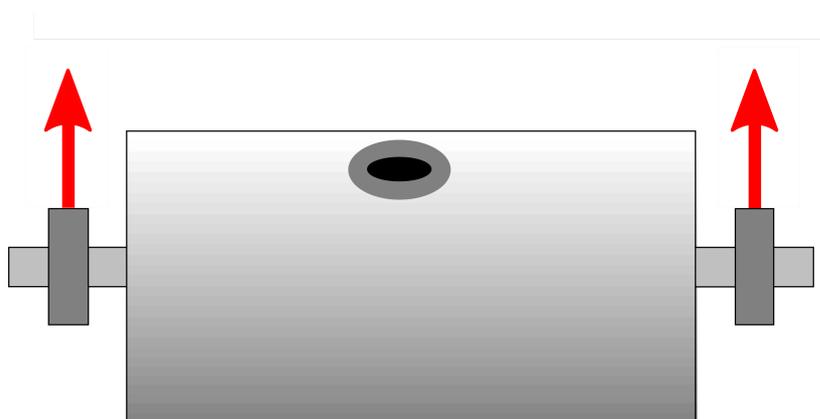


Figura 9. Desbalance estático (White, 2010).

2. Desbalance de cupla: se produce cuando un rotor está estáticamente balanceado, pero al girar genera fuerzas en los cojinetes desfasadas 180° entre sí. Esto es dinámicamente equivalente a dos pesos idénticos colocados en posiciones opuestas del rotor (ver Figura 10).

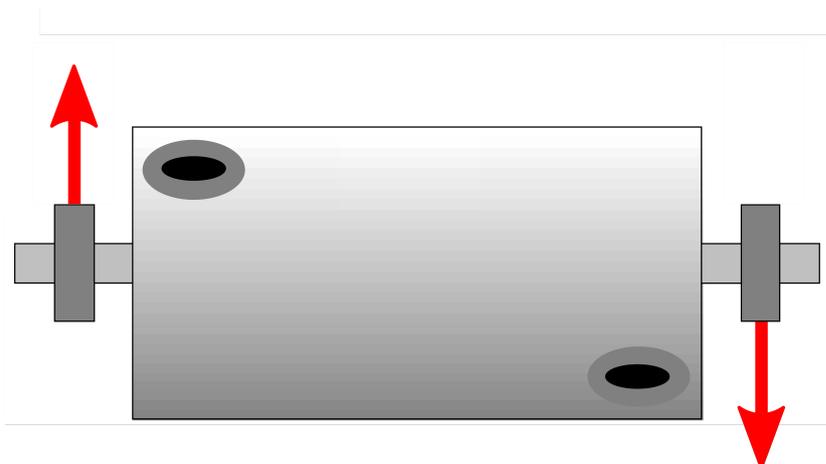


Figura 10. Desbalance en cupla (White, 2010).

3. Desbalance dinámico: este tipo de desbalance combina elementos de desbalance estático con desbalance de cupla. Es más común en rotores esbeltos, con una longitud significativa en comparación con el diámetro. Puede generar armónicos como 2X, 3X e incluso 4X, pero con amplitudes menores que la frecuencia fundamental (1X).

Las causas del desbalance en bombas centrífugas pueden atribuirse a varios factores, entre los cuales se incluyen:

- Variaciones en la distribución de masa: irregularidades en la distribución de masa a lo largo del rotor, como acumulación desigual de sedimentos, corrosión o desgaste asimétrico, pueden provocar desbalance.
- Desgaste o deterioro de componentes: el desgaste prolongado de componentes como impulsores, álabes o cojinetes puede llevar a un cambio en la distribución de masa y, por ende, a un desbalance.
- Errores en el ensamblaje o montaje: problemas durante el ensamblaje, instalación o montaje incorrecto de componentes pueden introducir desbalance en el sistema.
- Problemas de fabricación: defectos en la fabricación, como variaciones en las propiedades del material o imperfecciones geométricas, pueden contribuir al desbalance.

- Desalineación del eje: una mala alineación del eje de la bomba puede generar fuerzas desiguales y contribuir al desbalance.
- Cambios en las condiciones de operación: alteraciones en las condiciones operativas, como variaciones en el caudal o la presión, pueden afectar la distribución de masa y provocar desbalance.
- Presencia de contaminantes: la acumulación de contaminantes, como depósitos o residuos, en componentes críticos puede generar desbalance.
- Desgaste en sellos y empaques: Fugas o desgaste en sellos mecánicos o empaques pueden modificar la distribución de masa y contribuir al desbalance.
- Problemas en la alineación de poleas o acoplamientos: desalineaciones en sistemas de poleas o acoplamientos también pueden ser una fuente de desbalance en bombas centrífugas.

Desalineación

La desalineación se refiere a una condición en la que las líneas centrales en el acople del eje no coinciden. Se pueden distinguir dos tipos principales de desalineación: paralela y angular. En el caso de la desalineación paralela, las líneas centrales del eje son paralelas pero no coinciden (ver Figura 11a). Por otro lado, en la desalineación angular, las líneas del eje se encuentran pero no son paralelas (ver Figura 11b). En la práctica, muchas desalineaciones son una combinación de estos dos tipos.

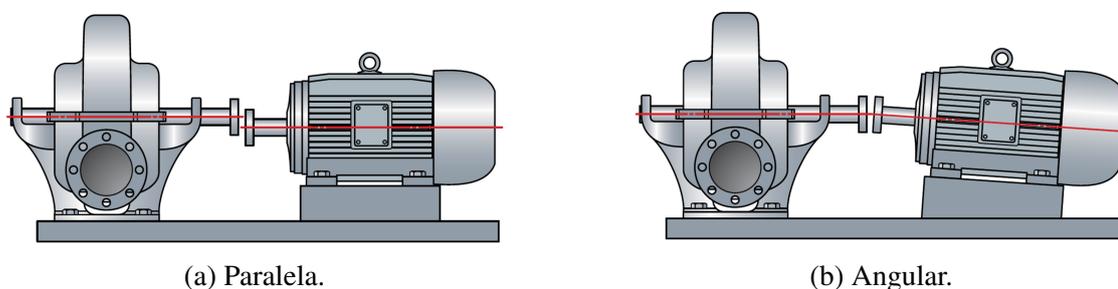


Figura 11. Desalineación en bombas centrífugas (www.skf.com).

Para identificar estas diferencias, es fundamental comprender cómo se manifiestan en el sistema para cada caso:

1. Desalineación paralela (ver Figura 60a):

- El espectro de vibraciones característico presenta altas vibraciones radiales al 1X y al 2X de la frecuencia de giro de manera predominante con un leve aporte del 3X de la frecuencia de giro. Además, frecuentemente la amplitud del 2X de la frecuencia de giro será mayor que la amplitud del 1X de la frecuencia de giro.
- Para un análisis de fases, el mismo debería tener un desfase de 180° grados a través del acople, en la dirección radial.
- Cuando la desalineación paralela llega a ser severa, puede generar unos elevados picos de amplitud a unos armónicos de la frecuencia de giro mucho más altos (4X-8X), o incluso una serie completa de armónicos de alta frecuencia similar en aspecto a la holgura mecánica.

2. Desalineación Angular (ver Figura 60c):

- El espectro de vibraciones característico presenta altas vibraciones axiales al 1X y al 2X de la frecuencia de giro de manera predominante con un leve aporte del 3X de la frecuencia de giro.
- Para un análisis de fases, el mismo debería tener un desfase de 180° grados a través del acople, en la dirección axial.
- Cuando la desalineación axial llega a ser severa, puede generar unos elevados picos de amplitud a unos armónicos de la frecuencia de giro mucho más altos (4X-8X), o incluso una serie completa de armónicos de alta frecuencia similar en aspecto a la holgura mecánica.

Es importante destacar que las reglas de diagnóstico mencionadas anteriormente no siempre se manifiestan de la misma manera en todas las máquinas desalineadas. Esto significa que los espectros típicos no son completamente confiables en todas las situaciones, ya que el comportamiento de las vibraciones puede variar según la forma en que el sistema mecánico se mueva, introduciendo posibles variaciones en las reglas de diagnóstico establecidas.

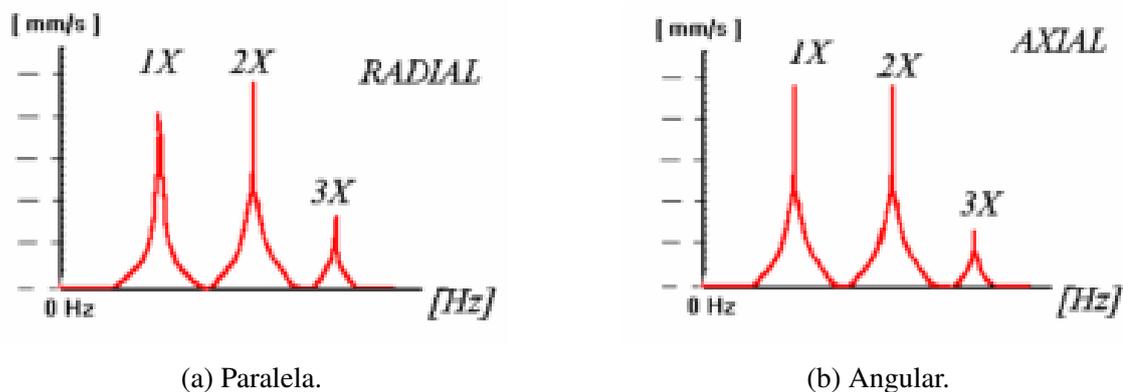


Figura 12. Espectros característicos asociados a desalineación.

Las causas de desalineación en bombas centrífugas pueden ser diversas y están relacionadas con factores tanto durante la instalación inicial como durante la operación continua. Algunas de las causas comunes de desalineación en bombas centrífugas incluyen:

- Errores durante la instalación: una alineación incorrecta puede deberse a errores durante la instalación inicial de la bomba y el motor. Esto puede incluir problemas con la alineación del acoplamiento, la nivelación de la base y la posición de los elementos.
- Desgaste o deformación de componentes: el desgaste o la deformación de elementos como cojinetes, ejes, acoplamientos o bases pueden conducir a la desalineación con el tiempo.
- Impactos o golpes: impactos inesperados o golpes pueden causar desalineación al afectar la posición relativa de la bomba y el motor.
- Vibraciones: las vibraciones excesivas durante la operación pueden desalinear gradualmente los componentes. Esto puede ser resultado de desequilibrios, cavitación u otros problemas en el sistema.
- Problemas en los cimientos: un cimiento inadecuado o mal diseñado puede provocar movimientos no deseados y contribuir a la desalineación.
- Problemas de ajuste del acoplamiento: un ajuste incorrecto del acoplamiento entre la bomba y el motor puede resultar en desalineación.

- Variaciones en las condiciones de carga: cambios en las condiciones operativas, como variaciones en la carga o el caudal, pueden afectar la alineación de la bomba y el motor.
- Fallos en el sistema de control: problemas en el sistema de control de la bomba, como fallas en las válvulas o mal funcionamiento de los dispositivos de regulación, pueden contribuir a la desalineación.
- Desgaste en componentes de acoplamiento: el desgaste en elementos de acoplamiento, como bujes, puede afectar la alineación y provocar desalineación.
- Problemas en el montaje de poleas o engranajes: desalineaciones en sistemas de poleas o engranajes también pueden ser una fuente de desalineación en bombas centrífugas.

Eje doblado o flexionado

Este fenómeno suele observarse principalmente en rotores o ejes esbeltos. El espectro característico revela componentes a la velocidad de giro (1X) en las direcciones horizontal y vertical, y en algunos casos, se puede identificar también la segunda armónica (2X). Además, se generan picos de vibración axiales elevados en 1X y 2X. Dado que comparte similitudes en el patrón de vibraciones con la desalineación, es susceptible de confusión. No obstante, su detección se facilita al observar la falta de reducción en las componentes de vibración, especialmente en las altas vibraciones axiales. Tal lo reportado por [McMillan \(2004\)](#), la clave para identificar la desalineación o un eje torcido radica en las altas vibraciones axiales.

Como consecuencia de los empujes radiales y axiales producidos por la desalineación y/o desbalanceo se puede dar lugar a problemas en la empaquetadura/sello mecánico o falla en el eje (ver Figura 13). Los fallos del eje suelen producirse en la mitad del eje de las bombas multietapas. También pueden producir aumentos de temperatura en los rodamientos reduciendo así su vida útil como consecuencia de la desalineación o falta de lubricación ([McKee et al., 2012](#)).



Figura 13. Eje doblado o flexionado (White, 2010).

Soltura mecánica

Las solturas mecánicas ocurren a consecuencia de aflojamientos en distintas partes de una máquina (soportes, anclajes, cajas de cojinetes, entre otros). Pueden ocurrir en el plano vertical (Figura 26) u horizontal (Figura 27), creando diferentes patrones de vibraciones. En algunos casos, se excita la frecuencia fundamental y sus armónicas (1X, 2X, 3X) (Mobley, 2004). En otros casos se excitan las componentes múltiplos de la mitad de la frecuencia fundamental (0.5X, 1.5X, 2.5X). En general, existen múltiples armónicas considerables, pero que van decreciendo conforme aumenta la frecuencia.

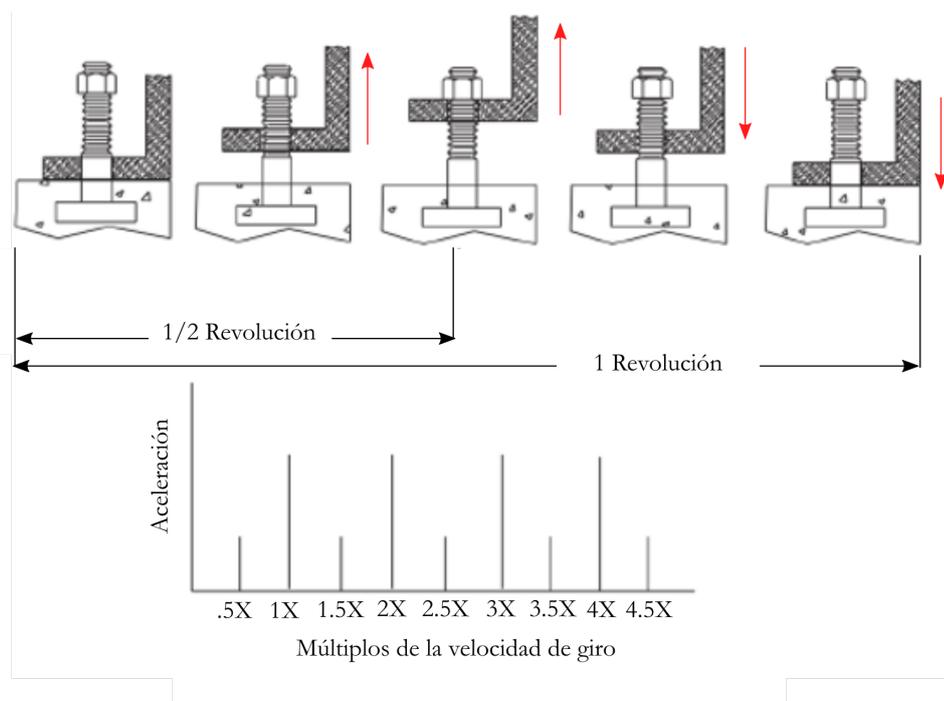


Figura 14. Soltura mecánica vertical (Mobley, 2004).

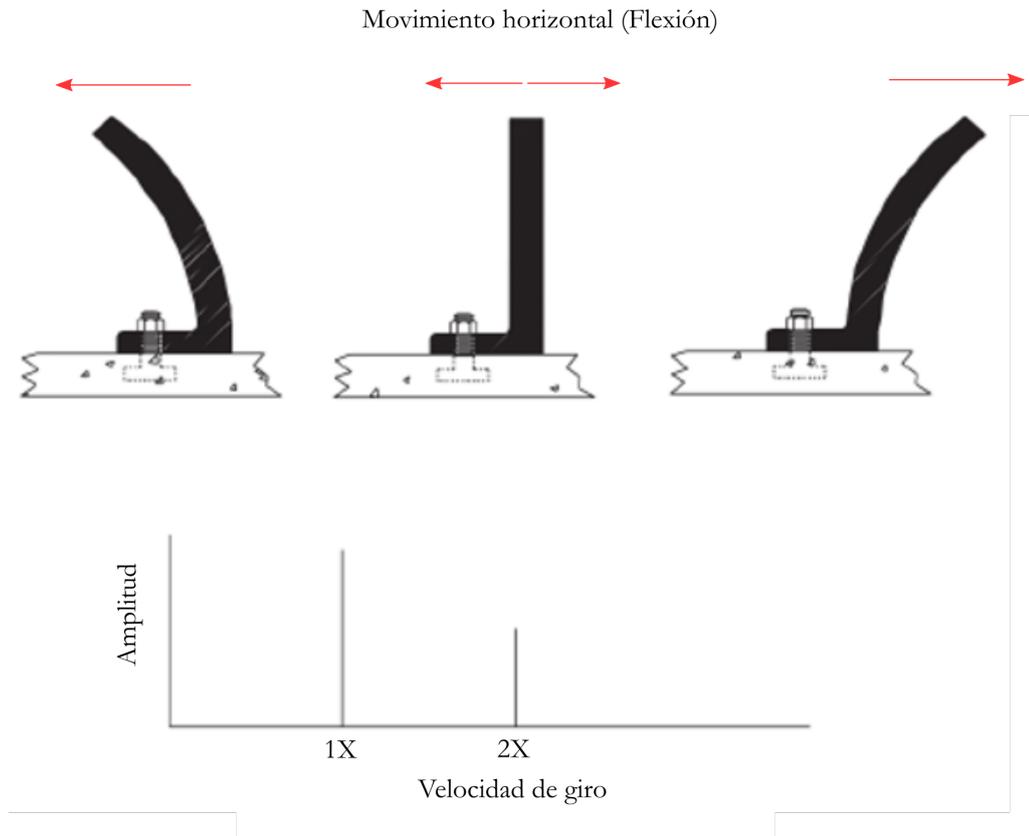


Figura 15. Soltura mecánica horizontal (Moblely, 2004).

Rodamiento

Los rodamientos son componentes de elevada precisión comúnmente presentes en máquinas rotantes, se fabrican comúnmente a partir de acero especial de alta dureza. Un rodamiento se compone de un aro interior y exterior, bolas o rodillos, una jaula, y, si se desea, puede estar cerrado con sellos o una placa protectora. La Figura 16 muestra las partes típicas de un rodamiento. La lubricación, ya sea con grasa o aceite, es esencial para lograr el espesor adecuado de la película lubricante que separa los elementos rodantes y las superficies de rodadura. Es fundamental seleccionar, ajustar e instalar un rodamiento específicamente para cada máquina, asegurándose de que esté bien lubricado y libre de contaminantes. Al examinar posibles signos de daño, resulta crucial comprender la geometría interna del rodamiento y cómo se ha diseñado para operar.

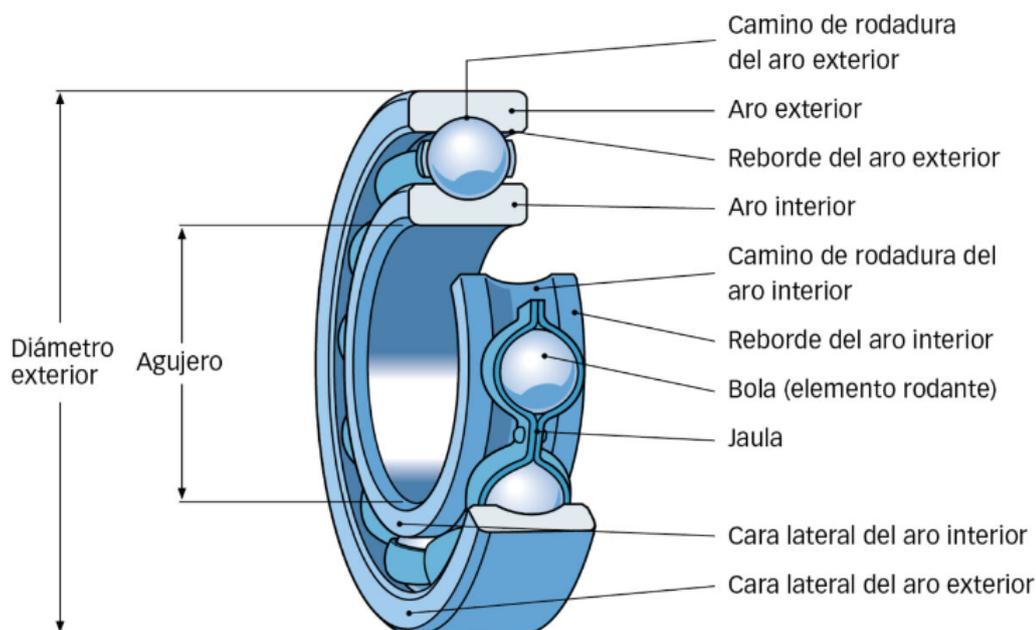


Figura 16. Terminología rodamiento rígido de bolas (www.evolution.skf.com).

Las fallas en rodamientos son un problema común en maquinaria rotativa y pueden ser causadas por diversas razones. La Norma [ISO 15243 \(2017\)](#) categoriza los modos de fallo que surgen mientras el rodamiento se encuentra instalado en el equipo/máquina y en pleno funcionamiento, excluyendo defectos relacionados con la fabricación, como la falta de piezas. Según esta Norma, los modos de fallo se clasifican en seis categorías:

1. Fatiga por contacto rodante: para este tipo de falla se debe distinguir entre fatiga iniciada en la subsuperficie o en la superficie, según se detalla a continuación.
 - **Fatiga subsuperficial:** en un rodamiento, ocurren cambios cíclicos de tensión debajo de las superficies de contacto de los caminos de rodadura y elementos rodantes. Considerando el aro interior giratorio de un rodamiento radial con una carga radial que actúa sobre él. A medida que el aro gira, un punto específico del camino de rodadura entra en la zona de carga y continúa a través de un área hasta alcanzar una carga máxima (tensión) antes de salir de la zona de carga. Durante cada revolución, a medida que ese punto del camino de rodadura entra y sale de la zona de carga, se producen tensiones de compresión y de corte (ver Figura 17). Según la carga, la temperatura y la cantidad de ciclos

de tensión en un período de tiempo, hay una acumulación de tensiones residuales que hacen que el material cambie de una estructura granular orientada al azar a planos de fractura.

En estos planos se desarrollan las llamadas microgrietas debajo de la superficie, en la ubicación más débil, alrededor de la zona de máxima tensión de cizallamiento, por lo general a una profundidad de 0,1 a 0,5 mm. La profundidad depende de la carga, del material, de la limpieza, la temperatura y la microestructura del acero. Finalmente, la grieta se propaga a la superficie y se produce el descascarillado.

El rodamiento se daña tan pronto como ocurre el descascarillado. Esto no significa que el rodamiento no pueda seguir en servicio. El descascarillado aumenta gradualmente y origina los niveles de ruido y vibración en el equipo. El equipo se debe detener y reparar antes de que el rodamiento colapse. El tiempo desde el descascarillado inicial a la falla depende del tipo de equipo y de sus condiciones de funcionamiento.

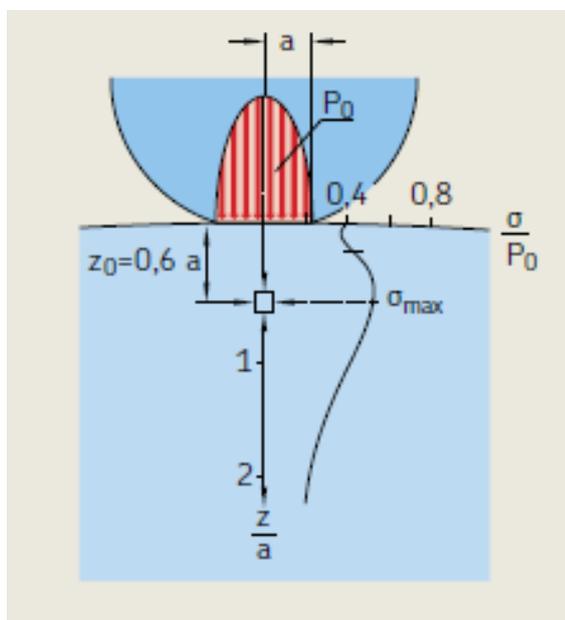


Figura 17. Estado de tensiones debajo del camino de rodadura (www.skf.com).

- Fatiga superficial: se produce, básicamente, a partir del daño a las asperezas de la superficie de contacto rodante, que por lo general se debe a lubricación inadecuada. Distintos factores pueden ser la causa de la lubricación inadecua-

da. Si la superficie está dañada, por ejemplo, por el rolado de los contaminantes sólidos, la lubricación ya no es óptima y la película de lubricante se reduce o se torna inadecuada. Esto también puede ocurrir si la cantidad o el tipo de lubricante no es adecuada para la aplicación y las superficies de contacto no están correctamente separadas.

El contacto metal-metal resultante hace que las asperezas superficiales cizallen unas con otras, y junto con el microdeslizamiento entre las superficies del área de contacto rodante, crea una superficie bruñida o acristalada. A partir de allí, pueden ocurrir microgrietas en las asperezas, seguidas de microdescascarillado, que finalmente conducen a fatiga iniciada en la superficie. Existe el riesgo de fatiga iniciada en la superficie en todos los rodamientos, si la película de aceite no separa por completo las superficies de contacto rodantes.

El riesgo se incrementa si hay deslizamiento en el área de contacto rodante. Todos los rodamientos de rodillos muestran algún microdeslizamiento en el área de contacto rodante, debido a su geometría específica y a la deformación elástica de los elementos rodantes y los caminos de rodadura bajo carga.

Otra causa de fatiga iniciada en la superficie, que con frecuencia se pasa por alto, es el uso de aditivos de extrema presión. Este tipo de aditivos pueden volverse agresivos, especialmente a temperaturas elevadas, y acelerar el microdescascarillado.

2. Desgaste: en este tipo de falla se debe distinguir entre desgaste abrasivo y por adherencia, según se detalla a continuación.

- Desgaste abrasivo: este tipo de daño involucra la eliminación gradual del material. La mayor parte del tiempo, el desgaste abrasivo real se debe a la lubricación inadecuada o al ingreso de contaminantes sólidos y se caracteriza por lo general, por superficies opacas.

Es un proceso degenerativo que eventualmente destruye la microgeometría donde las partículas abrasivas pueden desgastar rápidamente los caminos de rodadura de aro y elementos rodantes, así como también las cavidades de las jaulas (ver Figura 18).

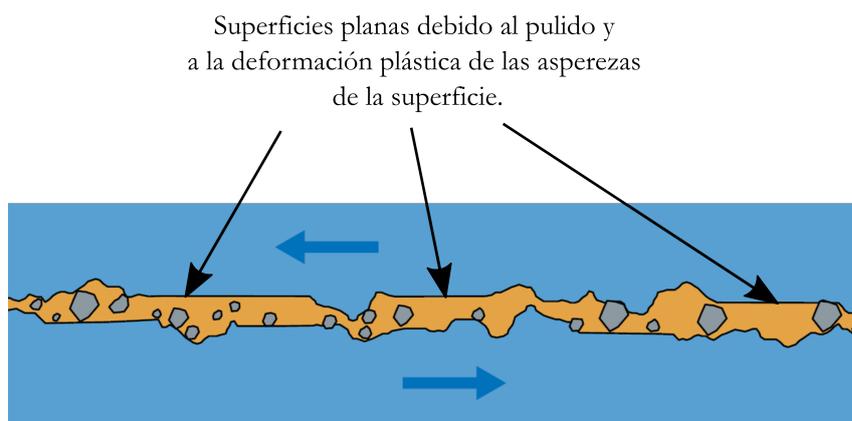


Figura 18. Principio de desgaste abrasivo en un rodamiento (www.skf.com).

- **Desgaste adherente:** es un tipo de daño relacionado con la lubricación que ocurre entre dos superficies de contacto que se deslizan una respecto de la otra. Se caracteriza por la transferencia de material de una superficie a otra (adherencia).

Por lo general, está acompañado por el calor producido de la fricción entre las superficies que puede revenir o templar las superficies de contacto. El calor por fricción produce concentración de tensiones locales, que pueden ocasionar grietas o descascarillado en las áreas de contacto.

Los elementos rodantes están sometidos a una rápida aceleración cuando entran en la zona de carga, esta aceleración repentina puede causar deslizamiento, y este puede generar suficiente calor, de modo que las dos superficies se funden en los puntos de contacto metal-metal. Este proceso de soldadura hace que el material se transfiera de una superficie a otra, lo que también conduce a mayor fricción (ver Figura 19).

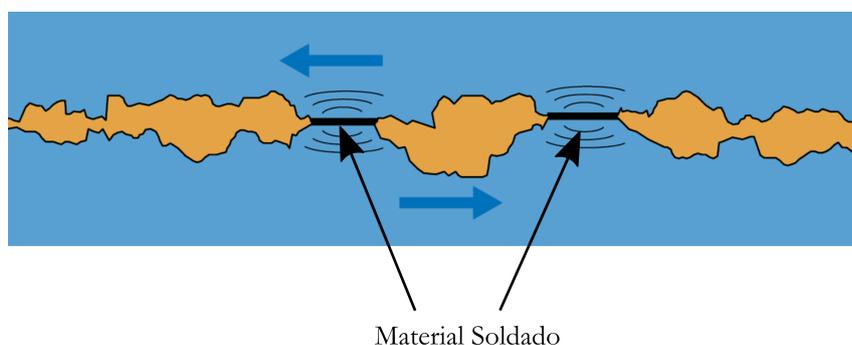


Figura 19. Principio de desgaste por adherencia en un rodamiento (www.skf.com).

3. Corrosión: en algunas ocasiones los líquidos a los que puede ser expuesto el rodamiento o la humedad pueden provocar que éste se quede sin la lubricación necesaria para su correcto funcionamiento, cuando esto sucede en poco tiempo se puede presentar un daño mayor o grave en todo el sistema donde están operando los rodamientos. Además de la humedad, la presencia de ácidos, el uso de lubricantes de baja calidad o que han sido diluidos y procesos de condensación causados por cambios de temperatura pueden provocar que aparezca corrosión en los rodamientos, la corrosión es abrasiva con las superficies donde aparece y provoca grandes fallas en los rodamientos.

Para detectar los fenómenos asociados a la corrosión es importante observar con detenimiento el componente en búsqueda de depósitos o manchas rojas/marrones en cualquier parte del rodamiento, ya sea en sus elementos rodantes como en las pistas o jaulas. También se puede observar si se han incrementado las vibraciones ocasionando desgastes en los componentes, si ha habido un aumento de la holgura radial o pérdidas en la precarga. En función de lo expuesto, se pueden distinguir distintos tipos de corrosión, a saber:

- Corrosión por condensación: se deben atender las estrías que se producen cuando hay humedad, en algunas ocasiones puede entrar agua a un rodamiento como vapor o por condensación, esto también puede suceder por fallas en el sellado de las obturaciones.
 - Corrosión por oxidación: este tipo de corrosión afecta mayormente a la superficie de los anillos y los elementos rodantes. El deterioro es causado por la exposición a temperaturas elevadas que provoca altos niveles de humedad en periodos de inactividad. Ya que este tipo de corrosión suele afectar más a las máquinas que se mantienen en largos periodos de inactividad, aún más si se encuentran en ambientes húmedos, es conveniente usar algún tratamiento antioxidante como medida preventiva.
-

4. Erosión eléctrica: este modo de falla se puede producir por exceso de corriente o por fuga de corriente, y tiene como consecuencia la eliminación gradual del material. El mecanismo de la erosión por exceso de corriente es la más conocida y se presenta en la Figura 20 donde una corriente eléctrica al pasar de un aro a otro por los elementos rodantes, genera un proceso similar a la soldadura por arco eléctrico (alta densidad de corriente sobre una superficie de contacto pequeña) que al solidificarse se desprende debido a la rotación del elemento rodante.

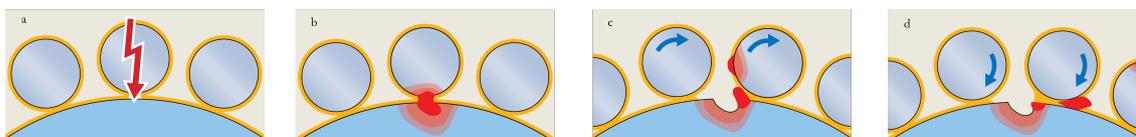


Figura 20. Mecanismo de erosión por exceso de corriente en un rodamiento (www.skf.com).

5. Deformación plástica: existen varios motivos por los que los rodamientos pueden deformarse como la sobrecarga estática, las cargas de impacto o manipulación incorrecta. En cualquiera de estos dos casos, el daño resultante tiene el mismo aspecto, por lo que se los combina en un único submodo de falla.
6. Fractura: los rodamientos pueden fallar por fracturas, para su distinción se clasifican según el detalle siguiente.
- Fractura forzada: se produce cuando las concentraciones de tensiones exceden la resistencia a la rotura del material. La sobrecarga local y el exceso de tensión son dos causas comunes de una fractura forzada.
 - Fractura por fatiga: comienza cuando se excede la resistencia a la fatiga de un material bajo flexión cíclica. Las flexiones repetidas causan una grieta filiforme que se propaga hasta el aro o la jaula desarrollando una grieta completa.
 - Agrietamiento térmico: dos superficies que se deslizan una contra otra generan calor por fricción. Si el deslizamiento es sustancial, el calor puede causar grietas, que por lo general están en ángulo recto con respecto a la dirección del deslizamiento.

La estructura de un rodamiento permite establecer un modelo de posibles fallos, donde se presentan frecuencias características en función de la localización del defecto. Existen cuatro frecuencias características a las que pueden producirse fallos:

1. Frecuencia de Pista Interna (BPFI, por sus siglas en inglés).
2. Frecuencia de Pista Externa (BPFO, por sus siglas en inglés).
3. Frecuencia de Giro de la Bola (BSF, por sus siglas en inglés).
4. Frecuencia de Jaula (FTF, por sus siglas en inglés).

Uno de los parámetros implementados para la detección de defectos en rodamientos es la Detección de Alta Frecuencia (HFD, por sus siglas en inglés) donde se realiza un filtro paso alto (5KHz – 60KHz) a la señal, para dejar en la medida solo los picos generados por pequeños defectos. La HFD generalmente se mide en unidades de gravedad (Gs), con valores pico o RMS. La envolvente de aceleración es un parámetro que tiene por objetivo filtrar las bajas frecuencias y detectar los componentes repetitivos relacionados con los impactos generados por defectos en los rodamientos en el rango de las frecuencias típicas de fallo. Como se mencionó anteriormente la empresa SKF patentó esta técnica, y puede consultarse en publicaciones específicas para conocimiento en mayor detalle ([Barratt, 2002](#)) ([Pistarelli, 2012](#)).

En la Figura 21, a modo de ejemplo, se presenta la evolución de una falla en un rodamiento a medida que incrementa su deterioro. A continuación, se detallan las cuatro etapas de detección temprana:

- Etapa 1: los principales síntomas que se detectan cuando existen problemas en los rodamientos aparecen en las frecuencias ultrasónicas que van desde los 250 a 350 KHz, luego cuando aumenta el desgaste, usualmente cae aproximadamente en el rango entre 20 y 60 KHz. Estas frecuencias son evaluadas en la zona D mediante el pico de energía g, HFD y el impulso de choque dB.
 - Etapa 2: a medida que se empieza a incrementar el tamaño de los defectos, comienzan a excitarse las frecuencias naturales de los componentes del rodamiento, esto
-

ocurre predominantemente en la zona C, en el rango de 30 a 120 KHz. Estas frecuencias naturales, pueden estar asociadas también a resonancias de la estructura de soporte del rodamiento. Al final de esta etapa, aparecen frecuencias de banda lateral por encima y por debajo del pico de frecuencia natural. El pico de energía (*overall*) crece por encima de 0,25 a 0,5g.

- Etapa 3: aparecen picos en las frecuencias de defectos de los componentes del rodamiento y sus armónicos en la zona B. Cuando el desgaste progresa, aumenta el número de frecuencias armónicas y de bandas laterales. El pico de energía (*overall*) se sigue incrementando por encima de los 0,5g. El desgaste es ahora visible, y se puede prolongar a la periferia del rodamiento, particularmente cuando bandas laterales bien formadas acompañan a las armónicas de la frecuencia de defecto del rodamiento. En esta etapa, es recomendable el reemplazo del rodamiento independientemente de la amplitud de frecuencia del defecto.
 - Etapa 4: hacia la parte final, la amplitud en 1X es incluso afectada. Crece y normalmente causa el aumento de numerosos armónicos de la velocidad de giro en la zona A. De hecho los defectos del rodamiento y sus frecuencias naturales comienzan a desaparecer, y son reemplazados por un ruido aleatorio inusual, de banda ancha y alta frecuencia. Además las amplitudes del ruido de piso de alta frecuencia y el pico de energía disminuyen, sin embargo justo antes de que ocurra la falla catastrófica, el pico de energía y el HFD crece por lo general a amplitudes excesivas en la zona D.
-

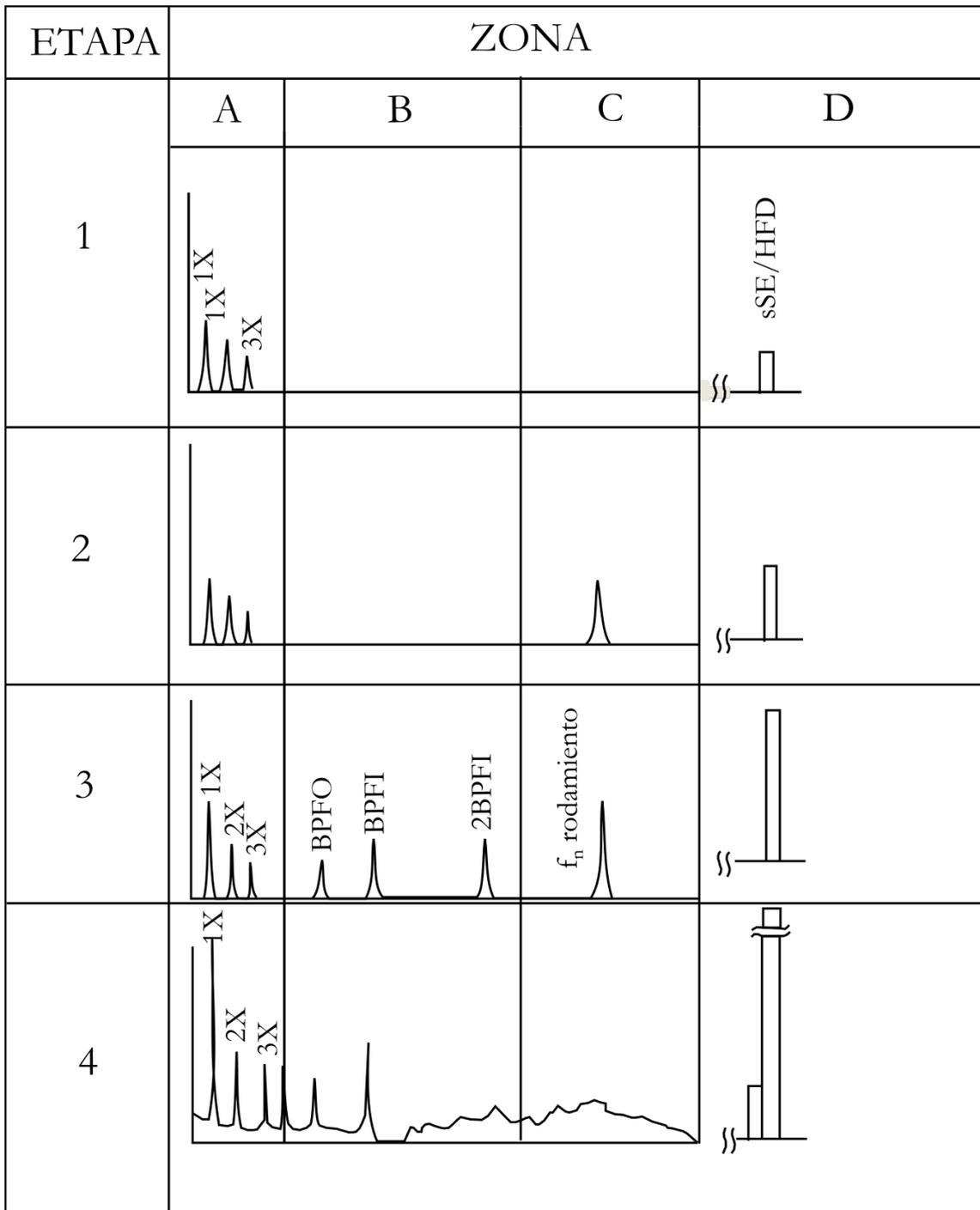


Figura 21. Etapas en la identificación de fallas de un rodamiento (Berry, 2000).

4. METODOLOGÍA

La implementación del mantenimiento bajo condición, conforme al procedimiento recomendado por la Norma [ISO 17359 \(2018\)](#), se llevó a cabo siguiendo las etapas principales delineadas en el diagrama de flujo presentado en la Figura 23. Se realizaron evaluaciones periódicas durante estas etapas para garantizar la viabilidad del proyecto. Este enfoque se basa en los siguientes lineamientos clave:

1. **Análisis del Contexto Operacional:** es una evaluación exhaustiva de los factores internos y externos que influyen en las operaciones de una organización. Este proceso implica identificar y comprender el entorno en el cual la entidad lleva a cabo sus actividades, considerando elementos como la cultura organizacional, las partes interesadas, requisitos legales, riesgos y oportunidades. La finalidad de este análisis es proporcionar una comprensión holística que sirva como base para la toma de decisiones estratégicas. En el contexto de la gestión de activos según la Norma [ISO 55000 \(2015\)](#), este análisis asegura que las estrategias de gestión se alineen con los objetivos organizacionales y las expectativas de las partes interesadas, optimizando así la eficiencia y el rendimiento de los activos a lo largo de su ciclo de vida.
 2. **Auditoría del Equipo:** se realiza un análisis detallado de la máquina, sus componentes y procesos típicos. Esto incluye la identificación clara de todos los equipos en el sistema y la determinación de sus funciones y condiciones operativas.
 3. **Auditoría de Confiabilidad y Criticidad:** se propone la elaboración de un diagrama de bloques de confiabilidad simple y se evalúa la criticidad de las máquinas. Esto se logra mediante la consideración de factores como el costo del tiempo de inactividad, tasas de falla, tiempo medio de reparación, costos de reposición, entre otros.
 4. **Selección de Estrategia de Mantenimiento:** se recomienda la utilización del análisis de modo y efecto de falla (AMFE) para identificar fallas esperadas y sus síntomas potenciales. La estrategia de mantenimiento se elige según los resultados obtenidos, considerando aspectos como la frecuencia de inspección, registros de parámetros, ubicación de medición y criterios de alerta.
-

5. Selección de Métodos de Monitoreo: se eligen técnicas de medición apropiadas basadas en parámetros específicos y en la información recopilada durante la selección de estrategias. La adquisición de datos puede realizarse con sensores permanentes, semipermanentes o mediante instrumentación portátil, teniendo en cuenta la viabilidad de la medición y los requisitos de seguridad.
 6. Adquisición de Datos y Análisis de Información: se pone énfasis en la adquisición precisa de datos y su comparación con mediciones históricas, tendencias y datos de referencia. Las decisiones de mantenimiento se toman en función de la información recopilada, lo que puede incluir acciones como mantener la rutina de monitoreo, ajustar intervalos de medición o realizar mantenimiento correctivo.
 7. Determinar Acciones de Mantenimiento: se toman decisiones respecto a acciones de mantenimiento, y se registran los cambios realizados en la máquina. La retroalimentación incluye detalles de repuestos utilizados, habilidades aplicadas y cualquier falla descubierta durante la reparación o restauración.
 8. Revisión del Programa: el proceso de monitoreo es continuo e incluye una revisión periódica para evaluar la efectividad de las técnicas implementadas. Se reevalúan las estrategias y se eliminan aquellas que ya no son necesarias, garantizando una gestión de datos eficaz y sostenible. Estos pasos contribuyen a establecer un programa de mantenimiento bajo condición efectivo y adaptable a las necesidades cambiantes del entorno operacional.
-

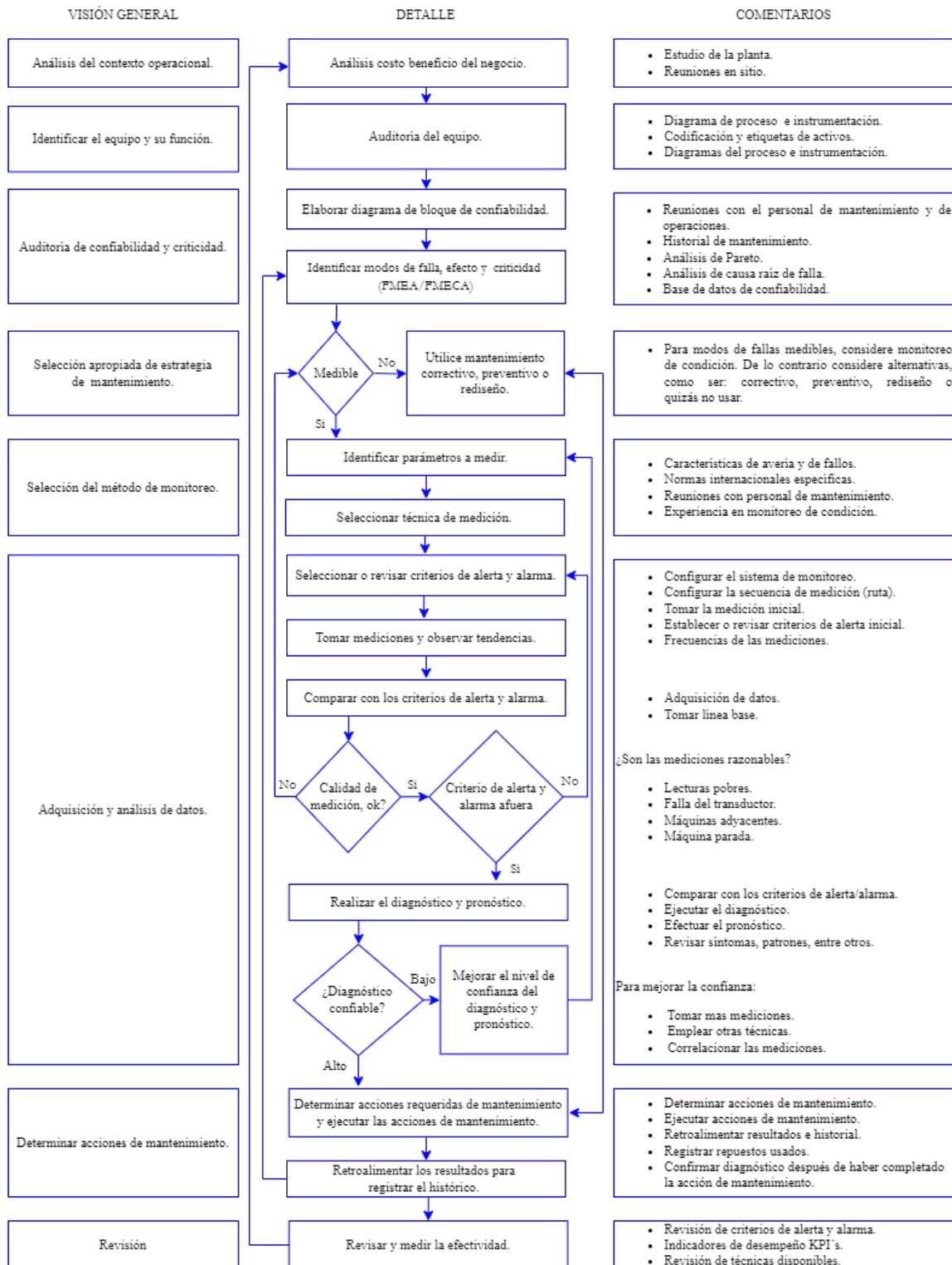


Figura 22. Diagrama de Flujo Metodología.

5. DESARROLLO

En este capítulo se presenta el desarrollo de las distintas etapas según la metodología propuesta para la implementación del sistema de monitoreo.

5.1. Contexto Operacional

La producción de petróleo y gas no convencional requiere que se inyecte agua con aditivos químicos y arena a alta presión (también llamado lodo), durante la fractura hidráulica (o *fracking*) de la formación rocosa. El fluido de inyección generalmente comprende 90 % de agua y 9 % de arena, y el resto es una mezcla de aditivos químicos, incluidos reductores de fricción, biocidas, inhibidores de incrustaciones, surfactante y ácidos (Karapataki, 2012).

Con el objetivo de asegurar el suministro de agua requerido para las operaciones, la Empresa productora instaló una estación de bombeo para el traslado del fluido desde una toma sobre el Río Neuquén, en el yacimiento Loma La Lata, hacia las piletas del cargadero de camiones ubicado en la zona denominada La Amarga Chica, del yacimiento Loma Campana de la provincia de Neuquén. El acueducto principal consiste en una línea troncal de acero al carbono, de diámetro 16 pulgadas y de 10 kilómetros de longitud aproximadamente, cuya traza se presenta en la Figura 23.



Figura 23. Traza del acueducto (Río Neuquén - La Amarga Chica).

En la Figura 24 se pueden observar los 129 metros de altura geodésica que debe vencer el sistema de bombeo para llevar el agua a destino. Debido a su longitud, traza y planialtimetría, esta línea fue dotada de válvulas de purga de aire, válvulas antiarriete (para evitar sobrepresiones por corte de energía a las bombas o un cierre brusco de la descarga), y válvula sostenedora de presión en el punto de destino, esta última para evitar el ingreso de aire en la línea y situaciones de vacío y/o eventual vaporización del fluido.

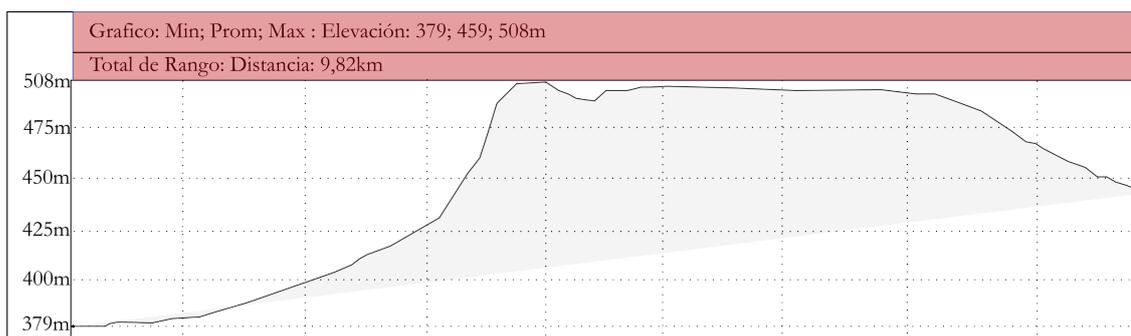


Figura 24. Planialtimetría del acueducto (Río Neuquén - La Amarga Chica).

El sistema de bombeo, como se puede observar en la Figura 25, se compone de seis bombas centrífugas verticales de velocidad variable, ubicadas dentro de cámaras dispuestas a tal fin, las cuales se llenan por efecto de vasos comunicantes a través de dos filtros antialgas.



Figura 25. Detalle de las bombas centrífugas verticales del sistema de captación.

Los filtros mencionados, cuentan con sistemas auto limpiantes, mediante retro lavado permanente con agua presurizada, captada desde la descarga de las mismas bombas. Este sistema, además presenta una línea para recircular a las cámaras de toma, la cual es habilitada por bajo caudal y evita recalentamiento de las unidades ante demanda nula de la red de distribución. Las condiciones de diseño del sistema de bombeo son las siguientes:

- Temperatura: 20°C.
- Caudal de operación deseado: 818,9 m³/h.
- Presión de impulsión de bomba: 19 kg/cm².

En la Figura 26 se presentan la curva del sistema y las curvas de las bombas. Para un sistema de cinco bombas en paralelo se puede transferir un caudal de 818,9 m³/h a una presión de 19 kg/cm², con regulación a través de la válvula de descarga ($\Delta P = 1.18$ kg/cm²), contemplando un equipo en reserva (*stand by*) para suplir eventuales fallas o tareas de mantenimiento programado de los equipos en operación.

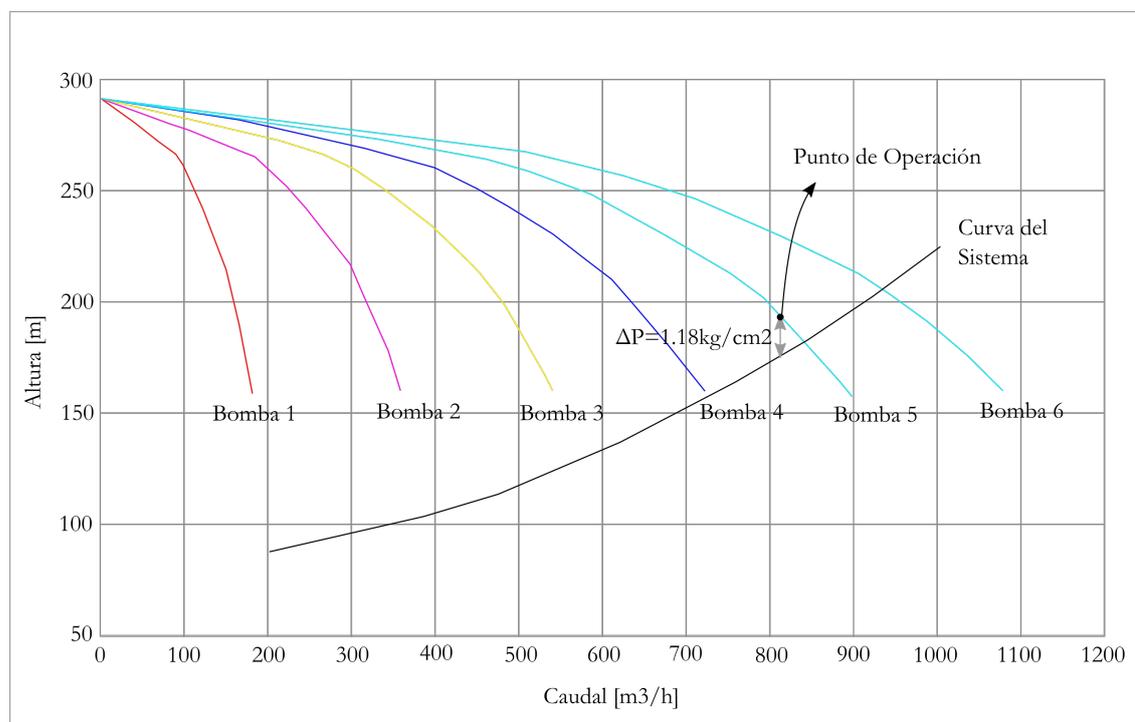


Figura 26. Curva del sistema de bombeo.

El mantenimiento predictivo de este sistema fue gestionado hasta mediados del año 2022 por un contratista, cuya responsabilidad incluía la ejecución de un muestreo periódico.

dico de vibraciones en cada una de las bombas de la planta. Los espectros resultantes eran sometidos a análisis por parte del departamento de ingeniería con el propósito de evaluar el estado del equipo. En situaciones donde se identificaban parámetros no admisibles, se emitía un diagnóstico detallado junto con las acciones correctivas correspondientes.

Para los equipos considerados como críticos, cuyo mal funcionamiento tiene un impacto sustancial en la producción, seguridad y medio ambiente, se contempló la instalación de transmisores de vibraciones inalámbricos. Este enfoque se adoptó con el objetivo de mejorar la confiabilidad de dichos equipos mediante una monitorización más avanzada y en tiempo real.

Esta decisión ha planteado un nuevo desafío para la organización: el desarrollo de una herramienta que permita evaluar el estado de los equipos y detectar de manera temprana posibles fallas incipientes en las bombas. Después de un año de recopilación de información por parte de los sensores, se dispone de datos de alta calidad que permiten establecer tendencias y configurar de manera precisa las alarmas, ajustándolas de manera óptima al estado real de los equipos.

5.2. Identificación de los Equipos

Los equipos instalados en la locación descrita previamente son bombas centrífugas multietapa verticales modelo WVR 125/10 KSB (www.ksb.com), estos equipos cumplen con la norma [API 610 \(2004\)](#) que establece los requisitos para este tipo de equipos que trabajan en servicios de procesos de la industria de petróleo, petroquímica y gas. A su vez, también cumplen con los requisitos dados por la norma [API 681 \(2021\)](#) referida a los sellos mecánicos.

La bomba es impulsada por un motor eléctrico de 160 kW de potencia, el cual transmite el par torsor a través de un acoplamiento que vincula ambos ejes. En la Figura 27 se presenta una vista en corte longitudinal de la bomba, contemplando la parte inferior (izquierda) y superior (derecha), en la cual se indican sus componentes principales.

Dada su extensa longitud, el eje se compone de cuatro segmentos. En su extremo inferior cuenta con diez rotores solidarios a un mismo eje (denominado eje superior), el cual esta soportado por un cojinete de entrada y uno de salida. Estos son los encargados de absorber los esfuerzos radiales y axiales generados por el cambio de dirección del fluido

en el impulsor y en la carcasa de la bomba, que genera un empuje el cual debe ser compensado. En función de esto, es necesario mantener las tolerancias críticas entre la parte rotativa y la estacionaria de la bomba. Luego, se presentan dos ejes intermedios acoplados mediante un acople cónico y soportados por dos cojinetes, los cuales son lubricados por el propio fluido de proceso (agua).

Por último, el cuarto segmento es el denominado “eje de bomba” el cual se comunica con el motor impulsor mediante un acople tipo *metastream*. Esta vinculación es soportada por un rodamiento SKF QJ 317N2MA y cuenta con un sello mecánico, el cual evita la fuga de agua hacia el exterior por el huelgo que existe entre el eje y el cuerpo de salida.

En la Tabla 1 se presentan las especificaciones técnicas nominales proporcionadas por el fabricante. Finalmente, en la Figura 28 se presenta una vista del equipo en el que se indican las dimensiones generales. En el Anexo I (A) se presentan las curvas características de la bomba proporcionadas por el fabricante.

Tabla 1. Especificaciones técnicas bomba centrífuga multietapa vertical.
Modelo WVR 125/10 KSB (www.ksb.com).

Datos del Motor Eléctrico	
Fabricante	WEG
Motor Tipo	315S/M
Potencia Motor [kW]	160
Posición	Vertical
Tensión [V]	380
Coseno Φ	0,88
Corriente [A]	288
Frecuencia [Hz]	50
Velocidad [RPM]	1475
Datos de Operación de la Bomba	
Caudal [m ³ /h]	170
Altura [m]	190
Potencia [kW]	130,3
Velocidad [RPM]	1450
Eficiencia [%]	67,5
Densidad [kg/m ³]	1000
Altura Neta Positiva de Succión (NPSHr) [m]	0
Temperatura [°C]	20
Número de Etapas	10

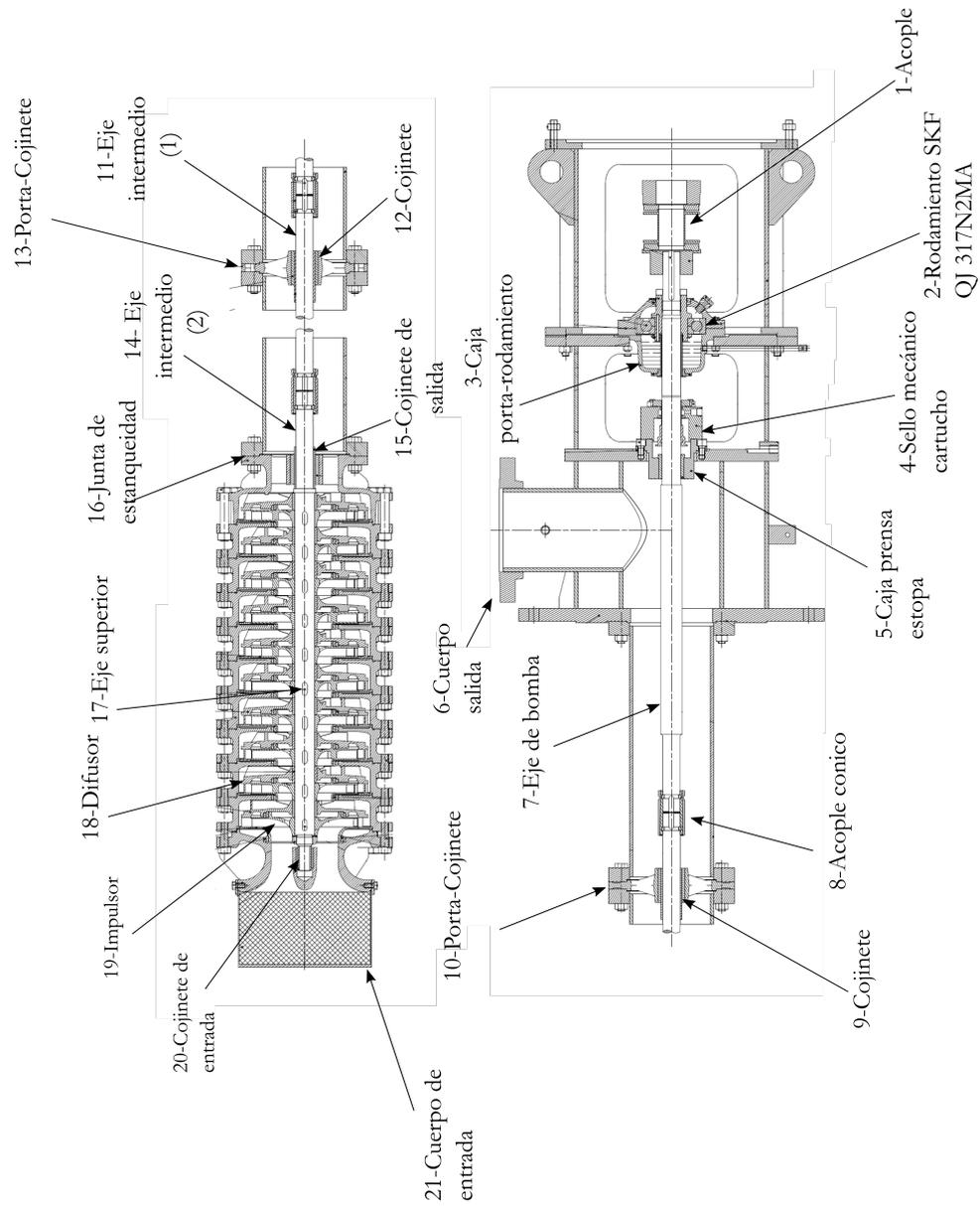


Figura 27. Vista en corte longitudinal bomba centrífuga multietapa vertical. Modelo WVR 125/10 KSB (www.ksb.com).

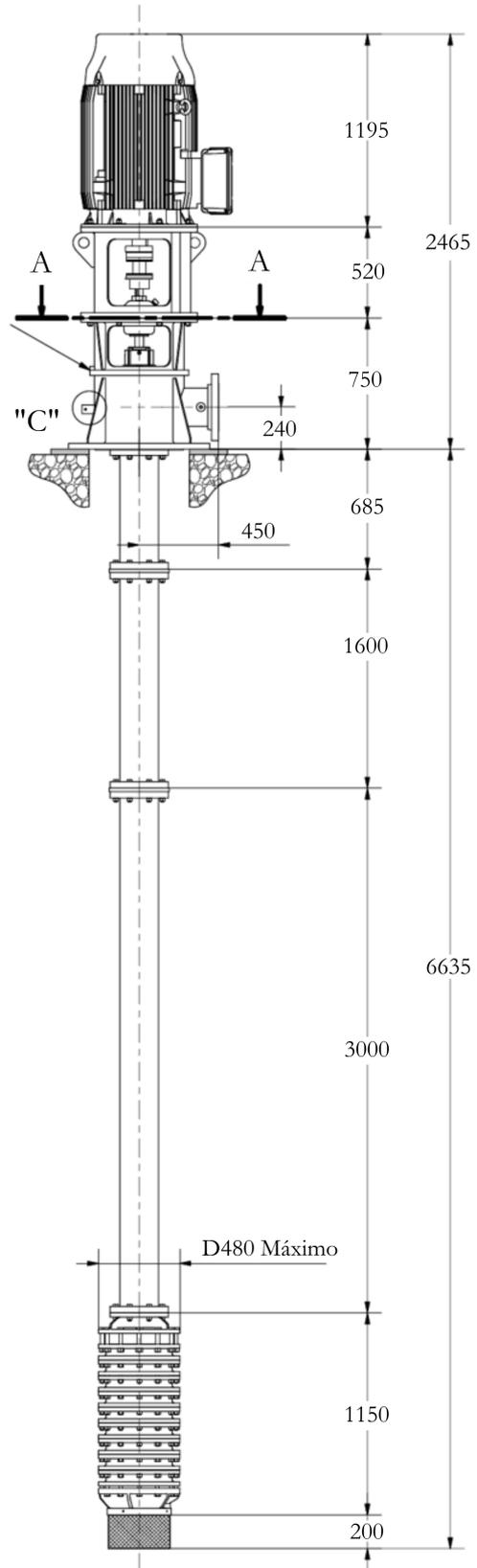


Figura 28. Dimensiones generales bomba centrífuga multietapa vertical.
Modelo WVR 125/10 KSB (www.ksb.com).

5.3. Análisis de Confiabilidad y Criticidad

5.3.1. Análisis del Registro de Fallas

La recopilación de datos en el ámbito del mantenimiento es fundamental para la implementación de estrategias efectivas. En esta fase, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de los registros de datos históricos, los cuales fueron extraídos de los informes diarios proporcionados por el sector operativo y los informes de la empresa contratista encargada del mantenimiento. Como consecuencia de este proceso, se generaron estadísticas específicas para cada uno de los equipos que integran la planta, detallando y tipificando las principales fallas identificadas.

En la Figura 29 se presenta un resumen que muestra el estado de los equipos registrado en los últimos cinco años, así como la identificación de los componentes con mayor frecuencia de fallos. Se puede observar que las bombas BA-102 y BA-105 han experimentado un mayor número de fallas en comparación con los otros equipos.

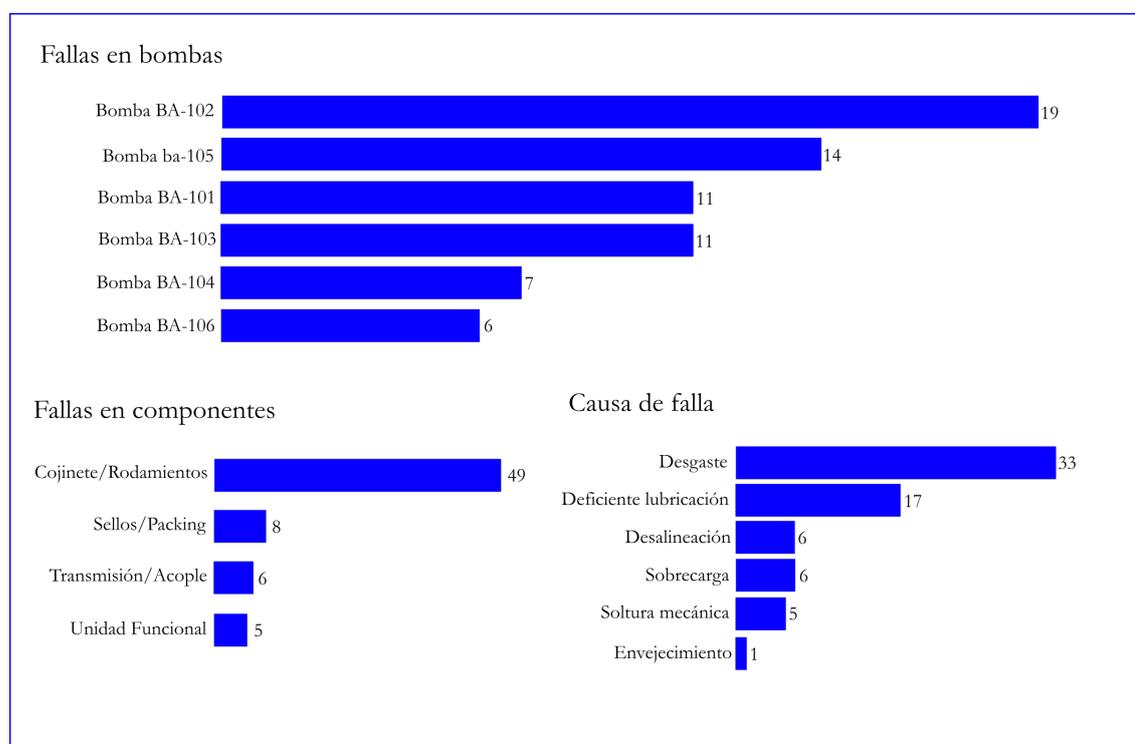


Figura 29. Cantidad de fallas para cada bomba según tipificación adoptada.

Los datos procesados proporcionan información valiosa sobre los componentes que requieren mayor atención al momento de fijar las estrategias de mantenimiento, ya sea

preventivo (para incrementar el tiempo promedio entre fallas) o predictivo (para detectar de manera temprana posibles desviaciones en los parámetros característicos de falla). Se destaca que las averías más recurrentes están relacionadas con los rodamientos y cojinetes. Cabe recordar que cada bomba cuenta con cinco cojinetes, un rodamiento, un sello mecánico y un acoplamiento.

Analizando en particular las causas de fallas en cada uno de los componentes se identificó lo siguiente:

1. La mayor cantidad de fallas se registró en los rodamientos y cojinetes. La Figura 30 ilustra que las causas de las fallas en estos componentes se asocian principalmente a desgaste y lubricación deficiente. Ante la detección de un defecto en un rodamiento, para abordar íntegramente la situación y evitar recurrencias, se aconseja investigar la raíz del problema, incluyendo posibles causas como desalineación, desbalance, falta de lubricación, entre otros.

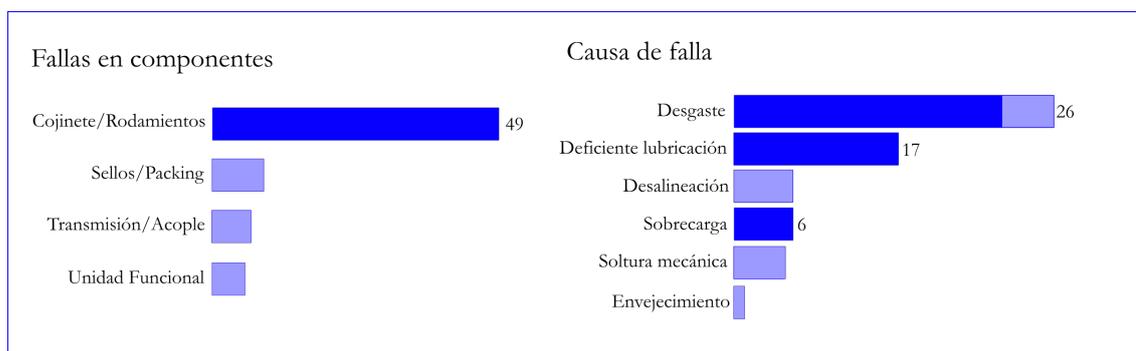


Figura 30. Identificación de las causas de fallas en rodamientos y cojinetes.

2. En la Figura 31, se evidencia que los sellos mecánicos representan el segundo componente con mayor incidencia de fallas. Cabe mencionar que diversos factores contribuyen a la reducción de su ciclo de vida, a saber: operación inadecuada del equipo, mantenimiento insuficiente y mal funcionamiento de los sistemas auxiliares (lubricación, fluido amortiguador/barrera, venteos, entre otros).

El desgaste de las caras del sello se origina por desalineación, desbalance, soltura mecánica o fallas en los rodamientos, lo que provoca la pérdida de compresión entre las caras del sello y su eventual separación, permitiendo la entrada de sólidos que actúan como abrasivos.



Figura 31. Identificación de las causas de fallas en sellos mecánicos.

3. En la Figura 32 se exhiben las fallas registradas en la transmisión y acoplos, componentes que absorben una cantidad significativa de los esfuerzos generados durante el movimiento rotativo del eje. Estas fallas están comúnmente asociadas a una alineación inadecuada.

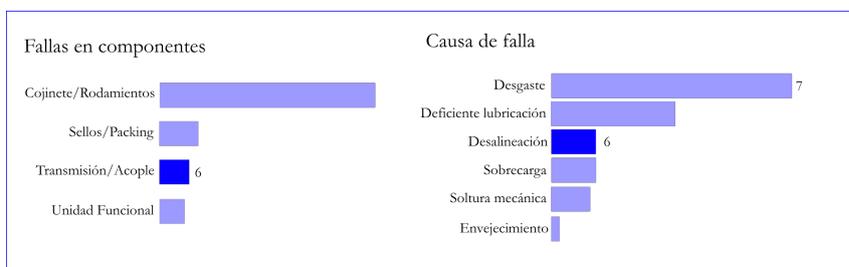


Figura 32. Identificación de las causas de fallas en la transmisión y acoplamiento.

4. El concepto de unidad funcional se relaciona con la estructura general de la bomba, y como se ilustra en la Figura 33, las fallas registradas están asociadas principalmente a un mal ajuste del equipo a la base. Esta situación es motivo de gran preocupación, ya que la soltura mecánica provoca vibraciones generales en el equipo, las cuales se transmiten a todos sus componentes, afectando su estabilidad y rigidez de manera significativa. Por lo tanto, también contribuyen significativamente a la desalineación del equipo.

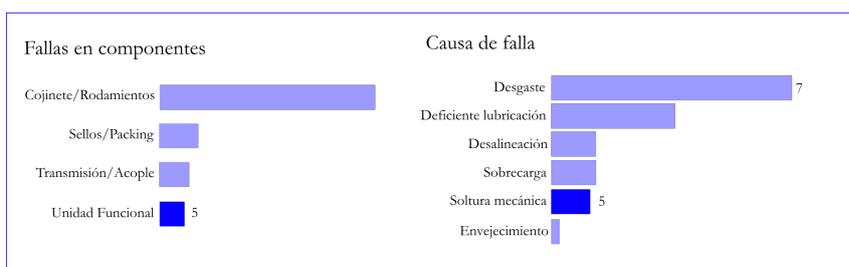


Figura 33. Identificación de las causas de fallas en la unidad funcional.

5.3.2. Análisis de Confiabilidad

Para el cálculo de la confiabilidad $C(t)$ se asumió un modelo exponencial, considerando que los elementos están sujetos a fallos de diversas causas y no a una causa predominante. Para el análisis independiente de cada bomba, se utilizó la Ecuación 5 que define la confiabilidad como la probabilidad de que un equipo cumpla con sus funciones requeridas, sin presentar fallas, en un período de tiempo t analizado.

$$C(t) = e^{-t/MTTF} \quad (5)$$

La probabilidad de fallas $P_f(t)$ se define como la probabilidad de ocurrencia de un fallo en un tiempo t , y viene dado por la siguiente ecuación:

$$P_f(t) = 1 - C(t) \quad (6)$$

En la Figura 34 se presentan los resultados obtenidos para cada bomba contemplando los registros obtenidos hasta el año 2022 inclusive.

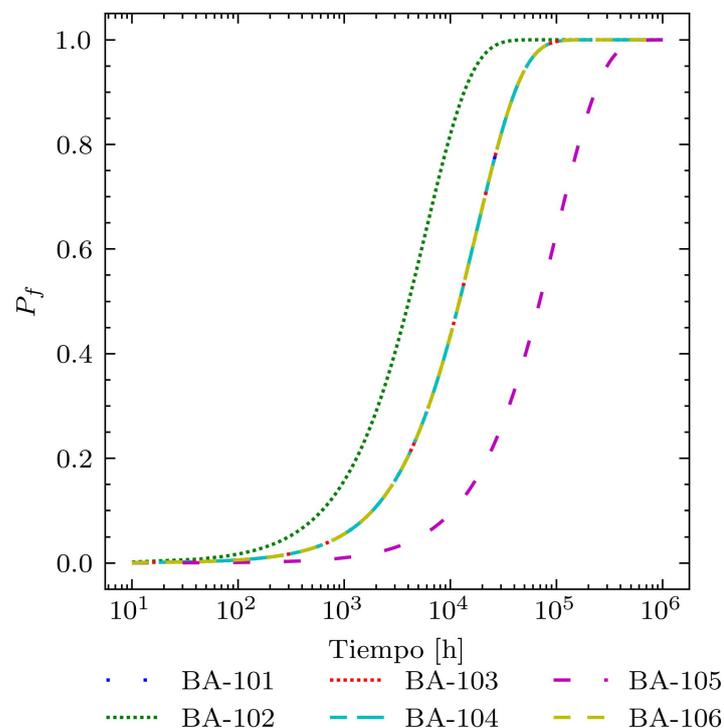


Figura 34. Probabilidad de fallos para cada bomba.

Complementariamente, se estableció un modelo de confiabilidad para analizar el sistema de bombeo contemplando la cantidad de bombas en modo reserva o *stand by*, los cuales permiten establecer sistemas redundantes en forma pasiva de tal forma que ante la falla de un equipo el sistema automáticamente habilite el servicio con otra bomba de reserva. Si se tienen n bombas y $n - 1$ es la cantidad en reserva, el sistema quedará fuera de servicio cuando fallen las n bombas en el tiempo t . Asumiendo que cualquier fallo sobre el elemento interrumpe completamente su funcionamiento, la confiabilidad del sistema C_s viene dada por:

$$C_s(t) = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{[(\lambda t)^i e^{-\lambda t}]}{i!} \quad (7)$$

Cabe destacar que la planta cuenta con un equipo en reserva, por lo que al fallar al menos un equipo, la misma entra en pérdida de producción. Los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la Ecuación 7 se presentan en la Figura 35.

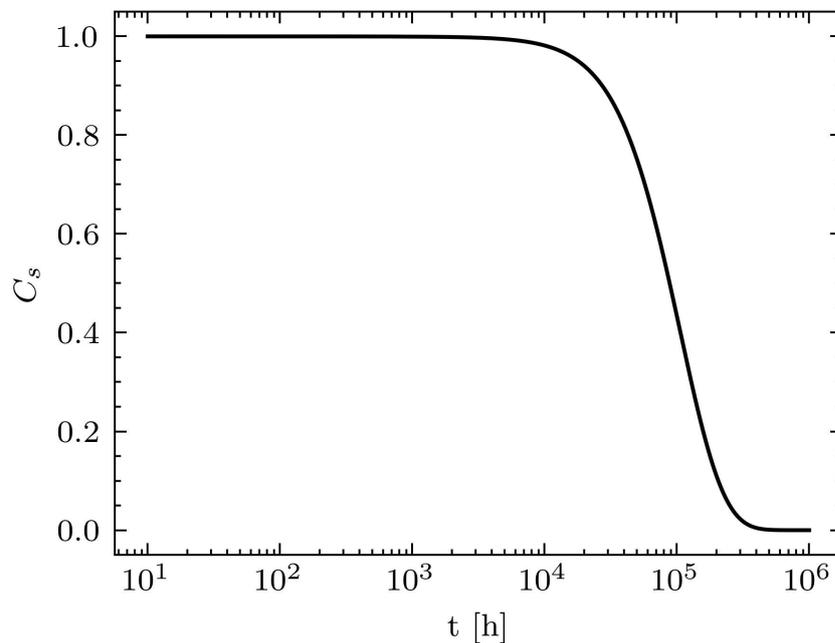


Figura 35. Confiabilidad del sistema de bombeo.

5.3.3. Análisis de Criticidad

El análisis de criticidad es una técnica de fácil comprensión y manejo, donde se establecen rangos relativos para representar la probabilidad y/o frecuencia de eventos, así como sus consecuencias asociadas. El estudio de la criticidad de los equipos puede ser ponderado considerando diversos factores clave, entre ellos:

- Costo de tiempo de inactividad de la máquina o pérdida de productividad.
- Índice de fallo y tiempo medio de reparación.
- Daños consecuenciales o secundarios.
- Costo de sustitución de la máquina.
- Costo de mantenimiento o repuestos.
- Costo del ciclo de vida.
- Consideraciones de seguridad e impacto medioambiental.

La matriz resultante, con la clasificación de criticidad operativa, se convierte en una herramienta invaluable para priorizar la ejecución de análisis de optimización, implementación de planes de mantenimiento y la realización de trabajos correctivos. Se enfoca especialmente en los módulos funcionales críticos. Sin embargo, también se presta atención a los semicríticos y no críticos, ya que mejoras potenciales o cambios (ya sean obras u operaciones) pueden alterar la condición de estos módulos funcionales. Este enfoque holístico permite una gestión proactiva y adaptativa de los recursos de mantenimiento, optimizando la eficiencia y la confiabilidad operativa. La fórmula para determinar la Criticidad Operativa (CO) adoptada por la Empresa, viene dada por la siguiente expresión:

$$CO = [(IP + TMSF) \times STBY + COP] \times FF \quad (8)$$

Donde:

- **IP:** Impacto en la Producción. Evalúa la incidencia de la pérdida neta de producción asociada a la falla del módulo funcional.

- **TMSF**: Tiempo Medio Fuera de Servicio. Se determina a partir de las órdenes de trabajo correctivas, considerando el tiempo medio requerido para la reparación.
- **STBY**: Existencia de Equipos en Reserva. Indica la presencia o ausencia de módulos funcionales en *stand by* en la instalación evaluada.
- **COP**: Costo Promedio de Reparación. Se estima considerando los costos de repuestos y mano de obra de la cuadrilla mecánica y eléctrica. Además, se respalda con el costo asociado de las órdenes de trabajo correctivas.
- **FF**: Frecuencia de Falla. Se obtiene a partir del histórico de mantenimiento de los equipos, analizando la frecuencia de falla de todas las órdenes de trabajo asociadas a mantenimiento correctivo.

A continuación, en la Tabla 2 se presenta la valoración de la criticidad para cada una de las bombas obtenidas a partir de la Ecuación 8 y según los niveles de criticidad definidos por la Organización (ver Figura 36). En la Tabla 3 se detallan los factores de ponderación de cada una de las variables involucradas en el cálculo de la criticidad operativa.

Tabla 2. Matriz de criticidad.

Parámetro	BBA-101	BBA-102	BBA-103	BBA-104	BBA-105	BBA-106
IP	200	200	200	200	200	200
TMSF	25	25	25	25	25	25
STBY	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
COP	30	50	50	30	30	15
FF	7	20	15	7	20	7
CO	1312,5	4150	3112,5	1312,5	3750	1207,5
Valoración	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA

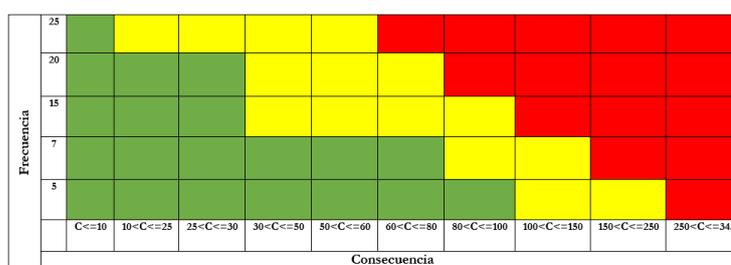


Figura 36. Niveles de criticidad.

Referencias: ALTA (rojo), MEDIA (amarillo), y BAJA (verde).

Tabla 3. Factores de ponderación para determinar la Criticidad Operativa.

Frecuencia de Fallas (FF)	Ponderación
Menos de 1 vez por año	5
De 1 a 3 veces por año	7
De 4 a 6 veces por año	15
De 7 a 9 veces por año	20
Más de 10 veces por año	25
Impacto en Producción (IP)	Ponderación
Menos del 0,5 % de la producción neta del Activo	5
Entre el 0,6 % y el 1,5 % de la producción neta del Activo	15
Entre el 1,6 % y el 3 % de la producción neta del Activo	50
Entre el 3,1 % y el 5 % de la producción neta del Activo	60
Entre el 5,1 % y el 10 % de la producción neta del Activo	125
Entre el 10,1 % y el 15 % de la producción neta del Activo	160
Más del 15 % de la producción neta del Activo	200
Tiempo Medio Fuera de Servicio (TMFS)	Ponderación
Menos de 4 horas	5
Entre 4 × 8 horas	10
Entre 8 y 24 horas	15
Entre 24 y 48 horas	20
Más de 48 horas	25
Existencia de Equipos en Reserva (STBY)	Ponderación
Sin reserva	1
Una reserva compartida	0,7
Una reserva directa	0,5
Costo Promedio de Reparación (COP)	Ponderación
Menos de 500 U\$D	5
Entre 500 U\$D y 1500 U\$D	10
Entre 1501 U\$D y 5000 U\$D	15
Entre 5001 U\$D y 15000 U\$D	30
Entre 15001 U\$D y 25000 U\$D	50
Entre 25001 U\$D y 50000 U\$D	90
Más de 50000 U\$D	120

5.3.4. Análisis de Modos de Fallas y Efectos

En este apartado se realizó un Análisis de Modos de Falla y Efectos (AMFE) con el objetivo de identificar las posibles fallas, así como los síntomas y parámetros asociados que deben medirse para detectar la presencia de averías. Este proceso sistemático permite anticiparse a posibles problemas, estableciendo medidas preventivas y contribuyendo a una gestión proactiva del mantenimiento.

Los parámetros críticos que requieren monitoreo para evaluar el estado y rendimiento óptimo de los equipos abarcan una variedad de aspectos fundamentales. Entre ellos se encuentran:

1. **Niveles de Vibración:** la vibración es un indicador clave de la salud mecánica de la bomba. Mediciones regulares permiten detectar posibles desequilibrios, desalineaciones o desgastes en los componentes rotativos.
 2. **Temperatura del Motor:** un aumento inusual en la temperatura del motor puede señalar problemas en el sistema de lubricación, rodamientos o incluso obstrucciones en la bomba. Monitorear la temperatura es esencial para prevenir sobrecalentamientos y posibles daños.
 3. **Presión de Descarga:** la presión en el sistema de descarga es un indicador directo del rendimiento hidráulico de la bomba. Variaciones anómalas pueden indicar obstrucciones, desgastes o problemas en la tubería.
 4. **Niveles de Ruido:** un cambio repentino en los niveles de ruido puede indicar problemas en los rodamientos, impulsores o incluso cavitación. Un monitoreo constante permite identificar cualquier anomalía en las condiciones de operación.
 5. **Consumo de Energía:** el seguimiento del consumo energético proporciona información valiosa sobre la eficiencia del equipo. Variaciones inesperadas pueden indicar problemas en el sistema de bombeo.
 6. **Niveles de Caudal:** supervisar el caudal de la bomba es esencial para garantizar un rendimiento constante y adecuado. Desviaciones en los niveles de caudal pueden señalar obstrucciones en las líneas de succión o problemas en el sistema hidráulico.
-

En la Tabla 4 se presentan los parámetros que deben ser monitoreados en relación con los aspectos de interés presentados previamente.

Tabla 4. Parámetros operativos.

Parámetro	Motor eléctrico	Bomba
Temperatura	X	X
Presión		X
Flujo de caudal		X
Corriente	X	
Tensión	X	
Resistencia	X	
Fase eléctrica	X	
Potencia de entrada	X	
Potencia de salida	X	X
Vibración	X	X
Consumo de aceite		X
Termografía	X	X
Velocidad	X	X

A continuación, en las Tablas 5 y 6 se detallan los posibles tipos de fallas que podrían presentarse, en las bombas y los motores respectivamente, así como los síntomas y las técnicas de medición (Beebe, 2004).

Tabla 5. Fallas típicas y síntomas asociados a bombas centrífugas.

Tipo de Falla \ Síntoma	Fuga de fluido	Potencia	Presión o vacío	Velocidad	Vibración	Temperatura	Lubricante contaminado	Fuga de lubricante
Daño en el rotor		X	X	X	X	X	X	
Daño en juntas	X		X	X	X			
Rodete excéntrico		X	X	X	X	X		
Daño en rodamiento		X		X	X	X	X	X
Montaje inadecuado					X			
Desequilibrio					X			
Desalineación		X			X			
Daño en sello mecánico	X	X			X			

Tabla 6. Fallas típicas y síntomas asociados en motores eléctricos.

Tipo de Falla \ Síntoma	Corriente	Tensión	Resistencia	Descarga Parcial	Potencia	Torque	Velocidad	Vibración	Temperatura	Flujo Axial	Lubricante contaminado
Devanado del rotor	X				X	X	X	X	X	X	
Devanado del estator	X							X	X	X	
Rotor excéntrico	X									X	
Falla de escobillas	X	X			X	X		X	X		
Daño en rodamientos	X					X		X	X		X
Deterioro del aislamiento	X	X	X	X							
Pérdida de fase	X	X						X		X	
Desequilibrio								X			
Desalineación								X			

Como se puede observar en las tablas anteriores, se destaca la medición de vibraciones como una de las técnicas más exhaustivas para identificar fallas en el sistema de bombeo. Antes de analizar un espectro, es fundamental reconocer los componentes que generan vibraciones en la máquina. Esta identificación posibilita la detección, diagnóstico y predicción de fallas mediante la medición de parámetros específicos en los equipos.

A continuación, para cada uno de los componentes principales, se detallan las posibles fallas y sus espectros característicos asociados (Pistarelli, 2012).

1. Rotor:

- Fuerza hidráulica:

- Frecuencia paso de álabe: 7x (radial).
- Cavitación: 20KHz a 40KHz (aleatorio, radial).

- Rozamiento:

- Frecuencias: 0,5x; 1x; 1,5x; 2x; 2,5x; 3x; 3,5x; 4x; 4,5x; 5x (radial).

2. Eje:

- Desbalanceo estático: 1x (radial).

- Desbalanceo dinámico: 1x (radial).
- Desbalanceo de rotor en voladizo: 1x (axial y radial).
- Eje deformado: 1x; 2x (axial).
- Desalineación angular: 1x; 2x; 3x (axial).
- Desalineación paralela: 1x; 2x; 3x (radial).
- Desalineación de rodamiento sobre eje: 1x; 2x; 3x (axial).

3. Acoplamiento:

- Mordaza de tres espárragos: 3x (radial y axial).

4. Unidad funcional:

- Holgura de la base: 0,5x; 1x (radial).
- Holgura portarodamiento: 0,5x; 1x; 2x; 3x (radial).
- Holgura portarodamiento/eje: 0,5x; 1x; 1,5x; 2x; 2,5x; 3x; 4x; 5x; 6x; 7x; 8x; 9x; 10x (radial).

5.4. Estrategia de Mantenimiento

A partir de los modos de fallas identificados anteriormente y la criticidad de los equipos, es posible definir la estrategia de mantenimiento que mejor aplica al sistema de bombeo. Al considerarse equipos críticos se les asignaron mantenimientos preventivos con frecuencia semestrales al conjunto motor, bomba y sistema de control. A su vez, para mejorar la confiabilidad de los mismos se implementó el mantenimiento predictivo, el cual permite monitorear los equipos y evitar de esta forma llegar a la rotura.

En el presente trabajo, se focalizó la atención en el mantenimiento predictivo, por lo tanto, en la sección siguiente se procede al desarrollo del mismo dejando de lado las tareas asociadas y cuestiones técnicas del mantenimiento preventivo.

5.5. Selección del Método de Monitoreo

En función de los distintos modos de fallas existentes en el conjunto motor-bomba (identificados en la Tabla 5 y 6), se estableció que el monitoreo de las vibraciones se constituye en una poderosa herramienta para diagnosticar de forma efectiva los síntomas característicos asociados a las eventuales fallas que presentan este tipo de equipos.

En el mercado existen distintos instrumentos de medición en función de la falla que se pretenda identificar. En este caso se implementaron acelerómetros triaxiales inalámbricos con sensores de temperatura. También se incorporó un sensor especial de alto rendimiento tipo *PeakVue*, que se utiliza para medir los impactos de alta frecuencia en la máquina. Este tipo de sensores permiten mejorar, por ejemplo, la detección de defectos en rodamientos e identificar fenómenos asociados a la cavitación de la bomba. Ver detalle de las especificaciones técnicas en el Anexo II (B).

Los datos obtenidos se procesan en conjunto con algoritmos avanzados, para identificar automáticamente la velocidad del eje de la máquina y correlacionar las mediciones con tipos específicos de defectos. El monitor de vibraciones inalámbrico puede monitorear hasta trece parámetros a la vez para facilitar una rápida evaluación del estado de la máquina. Los parámetros en base a los cuáles se establecen las tendencias de monitoreo, se indican a continuación:

1. Condición del eje:
 - Eje X: velocidad.
 - Eje Y: velocidad.
 - Eje Z: velocidad.
 2. Impacto:
 - Eje Z: aceleración (*PeakVue*).
 3. Detección de fallas de baja frecuencia:
 - Velocidad 1.
 - Velocidad 2.
-

4. Detección de fallas de alta frecuencia:

- Aceleración 1.
- Aceleración 2.

5. Diagnóstico prescriptivo:

- Falla mecánica/rodamiento.
- Falla de lubricación.

6. Velocidad de giro (RPM):

- Cálculo de la velocidad.

7. Fricción:

- Temperatura superficial.

8. Autonomía de la batería:

- Voltaje de suministro.

Los parámetros de velocidad y aceleración se pueden configurar como se muestra en la Figura 37, centrandó la atención en características específicas de la máquina que indiquen el estado del activo o rendimiento del proceso.

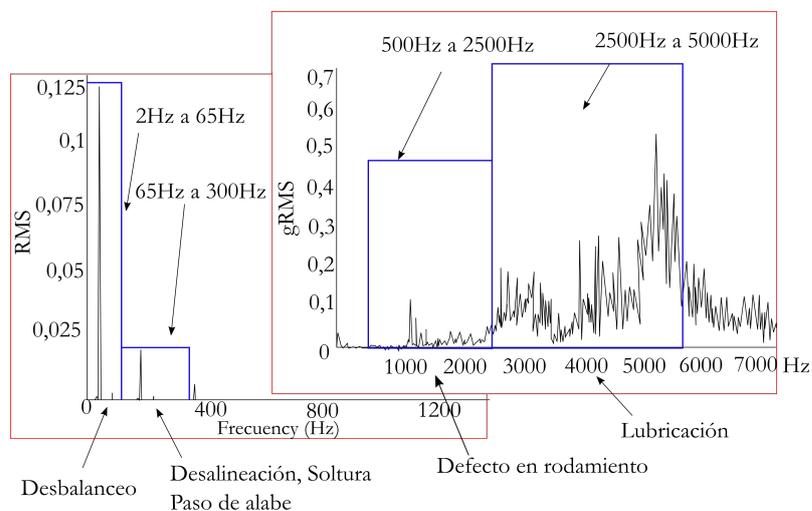


Figura 37. Identificación de parámetros de medición.

Específicamente, el monitor de vibraciones inalámbrico permite cuatro tipos de configuraciones para analizar parámetros (dos de velocidad y dos de aceleración) a partir de los cuales se pueden identificar distintos tipos de fallas:

- Desbalanceo y solturas (intervalo de frecuencia entre 2 y 65 Hz).
- Desalineación y solturas, paso de álabes (intervalo de frecuencia entre 65 y 300 Hz).
- Defectos en rodamientos (intervalo de frecuencia entre 500 y 2500 Hz).
- Lubricación deficiente y fenómenos asociados a la cavitación (intervalo de frecuencia entre 2500 y 5000 Hz).

5.5.1. Intervalo de Medición

El intervalo de medición es un aspecto crucial que debe ser cuidadosamente ponderado en cualquier sistema de monitoreo. La elección adecuada del intervalo no solo impacta en la precisión de la detección de fallos, sino también en consideraciones prácticas y económicas.

Una frecuencia de medición elevada presenta desafíos significativos, especialmente cuando se utilizan transmisores inalámbricos alimentados por baterías. Este enfoque puede llevar a un aumento notable en el consumo de energía, lo que resulta en una necesidad frecuente de reemplazo de baterías. Además, cuando se despliegan equipos a lo largo de extensas áreas o locaciones, llevar un registro detallado de las horas de operación de cada dispositivo puede volverse complejo. La frecuencia de mantenimiento también se incrementa, junto con la necesidad de realizar revisiones más frecuentes de los informes generados, lo que a su vez implica un mayor gasto en horas laborales.

Por otro lado, un intervalo de medición con una baja frecuencia de muestreo podría conllevar el riesgo de no detectar fallas o cambios en las condiciones a tiempo. Esto podría resultar en un mantenimiento reactivo en lugar de un enfoque más eficaz y predictivo.

En la determinación del intervalo entre mediciones, se han considerado principalmente factores como la naturaleza de las operaciones, la criticidad de los equipos monitoreados y los recursos disponibles. La optimización de este intervalo es esencial para garantizar

un monitoreo efectivo y una gestión eficiente de los recursos en el contexto específico del sistema de monitoreo de vibraciones.

Las diversas fallas que pueden surgir en el conjunto motor/bomba generalmente no exhibirán una rápida propagación, a menos que las condiciones de funcionamiento experimenten cambios sustanciales. Dado que las bombas están equipadas con un sistema de control que les permite operar de manera segura, la velocidad de propagación de las fallas y las condiciones de funcionamiento no se convierten en aspectos críticos para el sistema. Además, el costo asociado a las fallas es relativamente bajo para los repuestos rutinarios, pero puede ser significativo para componentes más específicos, como pueden ser el eje, el rotor y el sello.

La criticidad de los equipos sigue siendo el factor más destacado, como se analizó previamente. Es por ello que se ha establecido una frecuencia de medición diaria durante los primeros meses de ejecución. Durante este período inicial, es necesario recopilar una cantidad sustancial de datos de las bombas para comprender su comportamiento natural. A medida que se obtuvo la información necesaria para identificar el estado típico del equipo, se contempló la posibilidad de extender el intervalo de medición hasta un máximo de quince días. Sin embargo, esta extensión solo se implementará si no se identifican desviaciones significativas que justifiquen un seguimiento más riguroso del equipo.

Esta estrategia intentó equilibrar la necesidad de recopilar datos detallados en la fase inicial con la eficiencia en el uso de recursos a medida que se adquirió un mayor conocimiento sobre el comportamiento de las bombas. En última instancia, el objetivo fue realizar un monitoreo efectivo que permita identificar y abordar posibles problemas sin incurrir en costos y esfuerzos innecesarios.

5.5.2. Registro de los Parámetros

La recopilación de información se implementó mediante el *software* específico proporcionado por el proveedor del sistema de monitoreo, el cual contempla una solución basada en la nube para el almacenamiento de la información. Para facilitar la integración de los transmisores de vibración con el sistema de almacenamiento, se utiliza el un sistema *wireless*, que permite establecer una conexión segura a través de *routers* 4G mediante una conexión VPN.

La elección de montar la estructura del sistema en la nube tiene varias ventajas. En primer lugar, proporciona acceso seguro a la información y a los datos, en cualquier momento y lugar, para el personal autorizado. Esto se traduce en una mayor flexibilidad en la gestión y supervisión del sistema.

La información es presentada de manera clara y estructurada en una ficha técnica, según lo requerido por la Norma [ISO 17359 \(2018\)](#). Esta ficha técnica contiene los detalles esenciales para lograr una identificación clara del equipo y las mediciones realizadas, proporcionando una base sólida para el análisis y la toma de decisiones. Este enfoque basado en la nube respalda la eficiencia operativa al proporcionar acceso remoto y centralizado a los datos, optimizando así la gestión del monitoreo de vibraciones en el conjunto motor/bomba.

5.5.3. Puntos de Medición

El punto de medición es el lugar de la máquina donde se posiciona el sensor de vibraciones en una o más orientaciones o direcciones. Un acelerómetro debe montarse de forma que su eje principal, en el que la sensibilidad es máxima, coincida con la dirección de medida de interés. Conviene recordar que los acelerómetros también son ligeramente sensibles a las vibraciones en la dirección transversal. Sin embargo, esta sensibilidad transversal suele ser inferior al 5 % de la sensibilidad en el eje principal y, en general, puede despreciarse.

Normalmente, la posición del punto de medida se selecciona en función del motivo por el que medimos la vibración del objeto. Por ejemplo, si se analiza el alojamiento de un rodamiento, las medidas de aceleración se utilizan para monitorizar el estado de funcionamiento del eje y del propio rodamiento. Por lo tanto, el acelerómetro debe colocarse de forma tal que reciba directamente la vibración del rodamiento.

Si bien es imposible establecer una regla general para el montaje, existen recomendaciones dadas por los especialistas (www.hbm.com). Como por ejemplo, para los rodamientos se podría obtener información valiosa a efectos de monitorización midiendo tanto en la dirección axial como en una de las direcciones radiales, preferiblemente la que presente menor rigidez.

La respuesta de los objetos mecánicos a las vibraciones forzadas es un fenómeno com-

plejo y lo habitual es registrar diferencias importantes de un punto a otro en los niveles de vibración y espectros de frecuencia. Incluso en puntos de medida próximos entre sí en un mismo elemento de la máquina.

En este caso, el montaje se realizó a través de un perno roscado sobre una superficie plana y suave, lo más cercano posible al apoyo del eje (rodamiento o cojinete). Dado que el monitor de vibración inalámbrico instalado está equipado con un acelerómetro triaxial, se decidió colocar un transductor por cada punto de apoyo del eje, como se muestra en la Figura 38, obteniendo las mediciones en los ejes X, Y y Z.

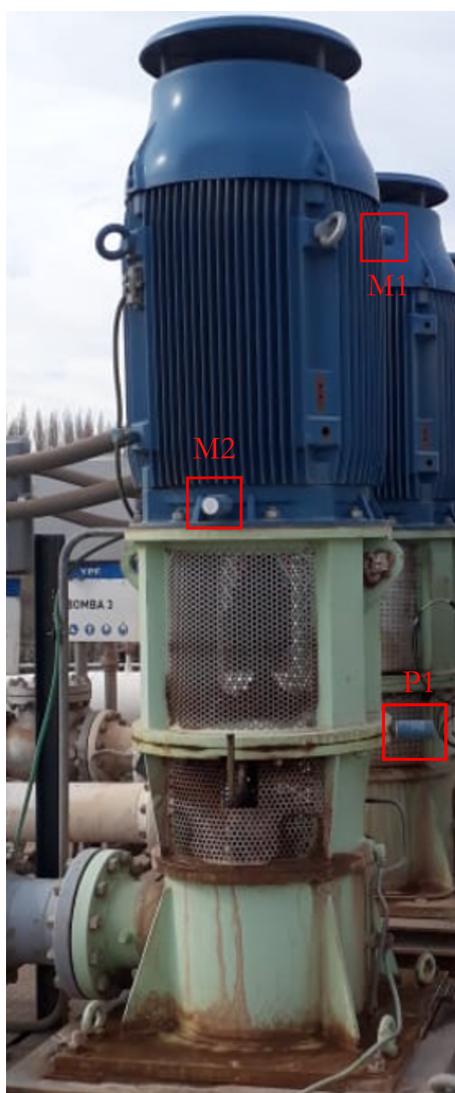


Figura 38. Esquema de montaje del acelerómetro en el conjunto motor/bomba.

Referencias: (M1) Lado libre motor, (M2) Lado acople motor, y (P1) Lado acople bomba.

5.5.4. Criterios de Alertas/Alarmas

Existen cuatro formas de determinar cuál es el nivel de vibración adecuado para el funcionamiento correcto de una máquina, a saber:

1. Comparación de límites normalizados: en este método se adopta una norma nacional o internacional que contemple la experiencia adquirida de otros sistemas. De esta forma se tiene un nivel estándar de vibración aceptable medido mediante el valor RMS de la señal.
2. Comparación dada por el fabricante: este método se basa en recopilar la información y compararla mediante los datos que entregue el fabricante. Cabe señalar que la vibración varía dependiendo de las condiciones de operación.
3. Comparación entre máquinas gemelas: se pueden comparar máquinas de similares características, tomando como referencia una máquina sana o que opera en condiciones normales. Si una máquina está fallando, se compara su espectro con el de la máquina sana y se podría llegar a ver o ratificar esta falla, asociando frecuencias y amplitudes.
4. Evaluación por tendencia: esta es la mejor forma para evaluar y tener un registro histórico de funcionamiento de la máquina, ya que periódicamente se va recopilando información, y a partir de estos datos se puede ir comparando constantemente la condición de la máquina mediante análisis espectral.

En la implementación del sistema de monitoreo, se consideró una combinación de las distintas metodologías a medida que se fueron recopilando los datos desde la fecha de instalación de los transductores de vibraciones. Los criterios de alerta se fueron ajustando en base a los datos previos de la máquina recopilados de forma constante y del estado de la máquina durante ese tiempo.

La Norma [ISO 10816-1 \(2009\)](#) establece las condiciones y procedimientos generales para la medición y evaluación de las vibraciones, utilizando mediciones realizadas sobre partes no rotativas de las máquinas. Los equipos incluidos en este trabajo se encuadran en el apartado 3 de la Norma [ISO 10816-3 \(2009\)](#), el cual aplica a maquinaria industrial con potencias nominales por encima de 15 KW y velocidades entre 120 y 15000 RPM. Los

criterios incluidos son aplicables solo para vibraciones producidas por la propia máquina y no para vibraciones que son transmitidas a la máquina desde fuentes externas.

El valor eficaz RMS de la velocidad de la vibración, se utiliza para determinar la condición general de la máquina. Proporciona un valor de amplitud que está relacionado directamente con el contenido de energía y por tanto, con la capacidad destructiva inherente a la vibración. En la Figura 39, se presenta los niveles de severidad tomados como referencia al momento de evaluar el requerimiento normativo.

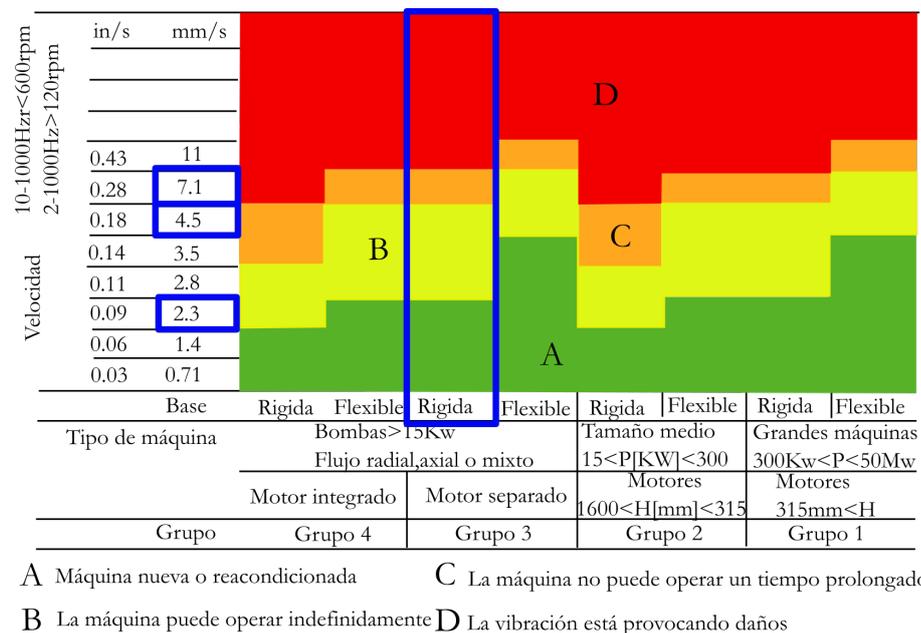


Figura 39. Severidad de las vibraciones según Norma ISO 10816-3 (2009).

En la figura anterior, el tipo de máquina de aplicación corresponde al Grupo 3 “Bombas con impulsor de múltiples álabes y con motor separado (flujo centrífugo, axial o mixto) con potencias superiores a 15 KW. Además la flexibilidad del soporte se los clasifica como “Rígido” dado que la primer frecuencia natural del sistema máquina-soporte en la dirección de la medición, es mayor que su frecuencia principal de excitación en al menos un 25 %. En base a la norma, se consideran los siguientes parámetros de referencia (en valores RMS) para fijar las alarmas:

- Alarma: 2,3 mm/s RMS.
- Advertencia: 4,5 mm/s RMS.
- Peligro: 7,1 mm/s RMS.

Aunque la implementación de este procedimiento resulta muy sencillo, la señal de la velocidad total utilizada para comparación quizá no proporcione, en todos los casos, una advertencia suficiente del daño de la máquina. Por lo tanto, a partir del análisis de los datos históricos de los equipos previo a la implementación de los transductores de vibraciones, se identificaron todas las fallas reportadas por la empresa contratista encargada del mantenimiento predictivo, estableciéndose la correlación con sus respectivos niveles de vibraciones. A medida que los datos recopilados por los transductores se fueron incrementando y marcando una tendencia, se tomaron parámetros de cada uno de los equipos y se los compararon entre sí para mejorar y optimizar el estado real del equipo.

5.6. Adquisición y Análisis de Datos

Es muy importante determinar la gravedad de un fallo concreto dado que algunos componentes pueden vibrar a niveles muy altos y seguir funcionando dentro de límites aceptables, mientras que otros pueden vibrar a niveles bajos y estar fuera de condición. Así pues, la amplitud es relativa, por lo que debe considerarse todo el sistema bajo estudio y adecuar los valores de alarma en función del estado natural del equipo.

La primera aproximación para la configuración del sistema de adquisición se realizó con la información registrada al momento de su implementación. Luego, a medida que el registro de datos recolectados se incrementó, se fueron ajustando los niveles de alerta/alarma. A continuación, se describe el desarrollo realizado durante el primer año para la adquisición y análisis de los datos.

1. Parametrización de los espectros de vibraciones: se ajustaron los filtros de señal correspondientes con el objetivo de identificar de una manera más sencilla las fallas detectadas. A tal fin, se definió la siguiente estructura de datos:
 - Desbalanceo y solturas: intervalo de banda 2 a 65 Hz.
 - Desalineación, solturas, paso de álabe: intervalo de banda 65 a 300 Hz.
 - Falla temprana en rodamientos/cavitación: intervalo de banda 500 a 1000 Hz.
 - Falla avanzada en rodamiento: intervalo de banda 10 a 500 Hz.
 - Parámetro *PeakVue*: defectos en los rodamientos, lubricación insuficiente o cavitación de la bomba.
-

- *Overall waveform RMS* [mm/s]: estado general a baja frecuencia.
- Temperatura [°C].
- Velocidad de rotación [RPM].

De cada uno de los parámetros de interés, se identificaron los valores máximos y mínimos registrados por el sistema de adquisición, y se calcularon los valores promedio, Se filtraron todos aquellos datos de mala calidad, los cuales no se consideran valores representativos de las señales ya sea porque el valor presentaba una desviación mayor al 30 % de los valores promedios o excede en gran medida los límites identificados en la etapa anterior.

A partir de los valores promedio calculados para cada una de las bombas y de lo recomendado por [Berry \(2000\)](#), se propuso establecer los siguientes niveles de severidad de alarma:

- Aviso: 1/3 del valor máximo admisible.
- Advertencia: 2/3 del valor máximo admisible.
- Crítico: valor máximo admisible.

De esta manera se ajustaron las alertas/alarmas en función de los datos históricos y tendencias de los equipos. Una vez definido el nuevo criterio de alarma, se centró la atención en:

- Medir las vibraciones y evaluar la tendencia del equipo.
- Analizar la calidad de la medición.
- Comparar la medición con los criterios de alerta/alarma.
- Analizar los espectros.
- Contrastar con los posibles modos de falla de los componentes de la bomba.

Para el desarrollo de estas tareas, se implementó un tablero de control para facilitar la búsqueda de cada equipo e identificar rápidamente los que se encuentren en estado de

alarma/aviso/peligro, posibilitando de esta manera visualizar de forma simple las máquinas que necesitan ser atendidas inmediatamente.

El tablero de control se presenta en la Figura 40, el mismo se puede actualizar periódicamente con las mediciones más recientes. Dentro de la información que se comunica, se incluye: el equipo y en que módulo (conductor o conducido) se presenta la alerta, la posición donde se localiza el desvío y, por último, las mediciones realizadas en cada uno de los intervalos de bandas preseleccionados.

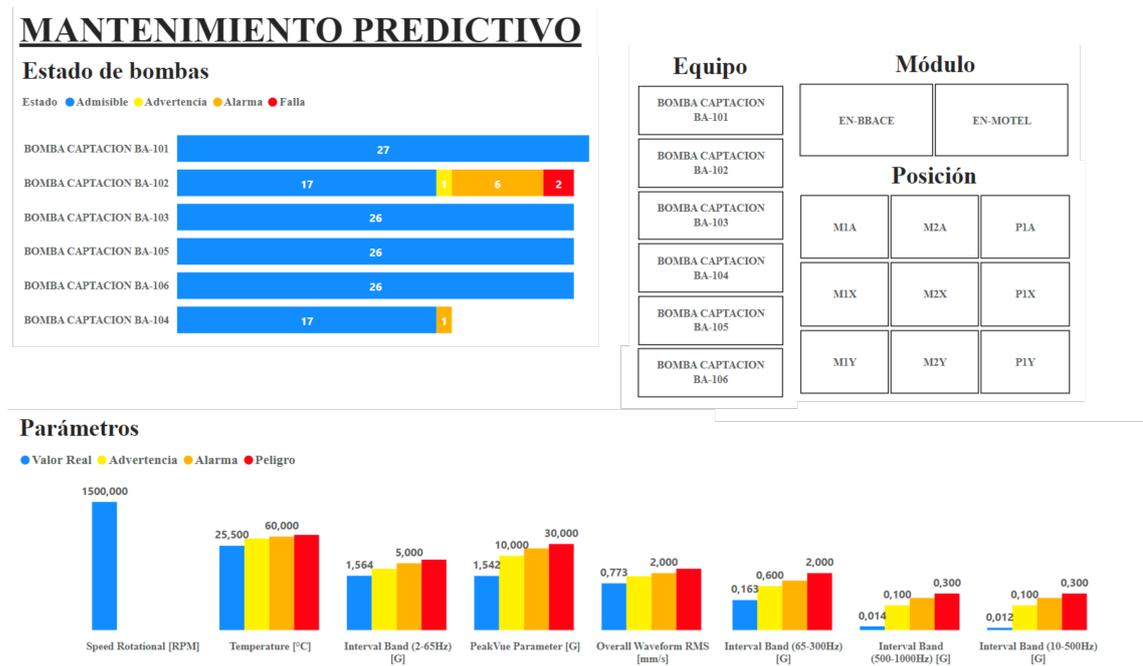


Figura 40. Tablero de control.

A partir de este tablero, se identificaron en qué equipos se presentaron alertas y en qué intervalos de bandas se produjeron, por lo que a continuación, se presenta a modo de ejemplo, los casos más representativos detectados con el sistema implementado.

5.7. Identificación de Fallas Típicas a través del Sistema de Monitoreo

5.7.1. Soltura mecánica

Una de las fallas detectadas con mayor recurrencia fue la soltura mecánica. Los síntomas de mayor gravedad se manifestaron específicamente en las bombas BBA-102 y BBA-103, mientras que en el caso de la BBA-101 se registraron parámetros muy elevados pero que no alcanzaron el nivel de alerta.

Al momento de analizar los registros históricos de la bomba BBA-102, para intervalos de frecuencia de 2 a 65 Hz (ver Figura 41), se observó un incremento continuo en los valores RMS hasta superar el nivel crítico en septiembre de 2022. Luego, estos valores disminuyeron en un corto lapso de tiempo comenzando a aumentar paulatinamente hasta el último día analizado. La tendencia ubica al equipo en la zona de peligro.

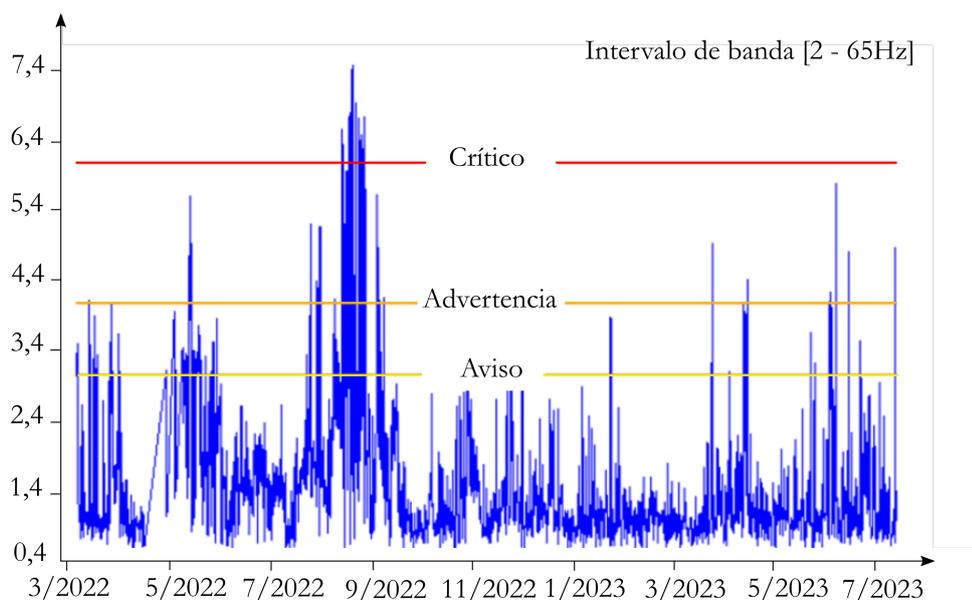


Figura 41. Registro histórico BB-102 (intervalo de banda 2 a 65 Hz).

A partir de esta alerta, se analizó el espectro de vibraciones para contrastar con los posibles modos de falla. Dado que el intervalo de banda es de baja frecuencia, se analizó la señal en función de la velocidad identificando un pico en el subarmónico a 9,375 Hz con una frecuencia de giro de 24,5 Hz y un valor de RMS de 4,328 mm/s (ver Figura 42). Contrastando estas mediciones con las posibles frecuencias características de falla,

se observó que si bien no coincide exactamente con el subarmónico a 0,5X se asocia con una posible falla de soldadura mecánica por holgura en la base.

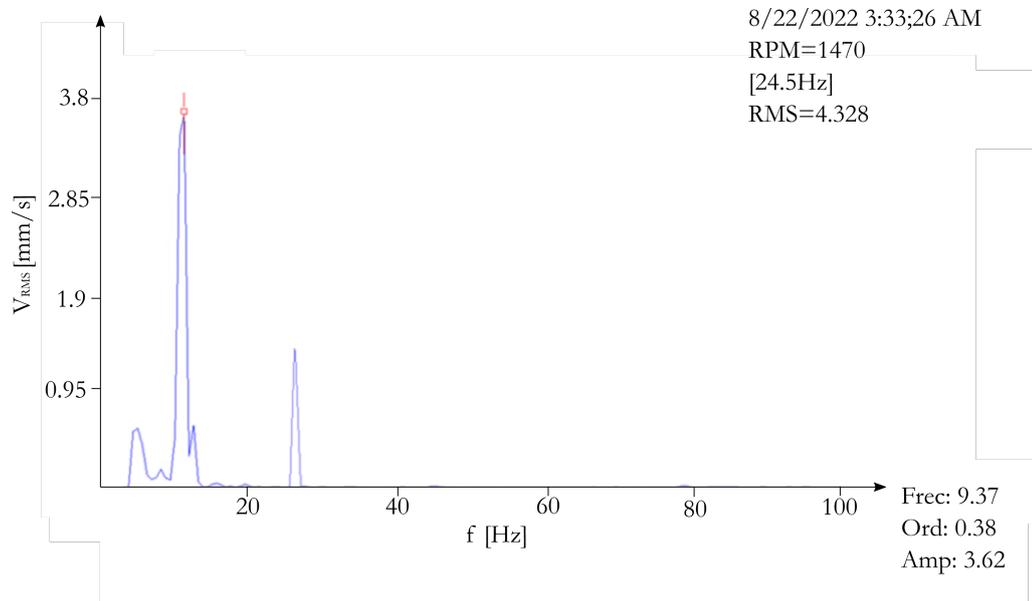


Figura 42. Espectro de vibraciones BBA-102 (intervalo de banda de 0 a 100 Hz).

Para el caso de la bomba BBA-103, se procedió a realizar el mismo análisis que en la bomba anterior. En este equipo se observó una disminución en cuanto a los valores RMS a lo largo del tiempo, no obstante, se analizaron los espectros correspondientes a aquellos valores que reportaron una alerta en el año 2022, como se muestra en la Figura 43.

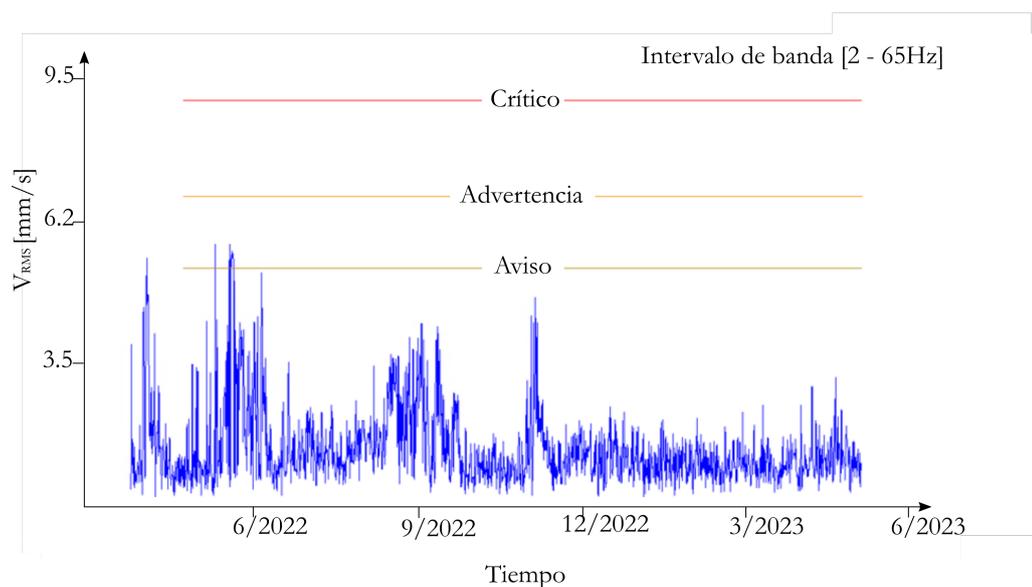


Figura 43. Registro histórico BBA-103 (intervalo de banda 2 a 65 Hz).

En la Figura 44 se presenta el espectro analizado. Se puede observar que presentó un comportamiento similar al de la bomba BBA-102, pero con un nivel de vibración menor. Esta tendencia, permite inferir que se produjo la misma falla de soltura mecánica pero con una severidad menor. En este caso, se identificó un pico en el subarmónico a 10,6 Hz con una frecuencia de giro de 24,8 Hz y un valor de RMS de 3.1 mm/s.

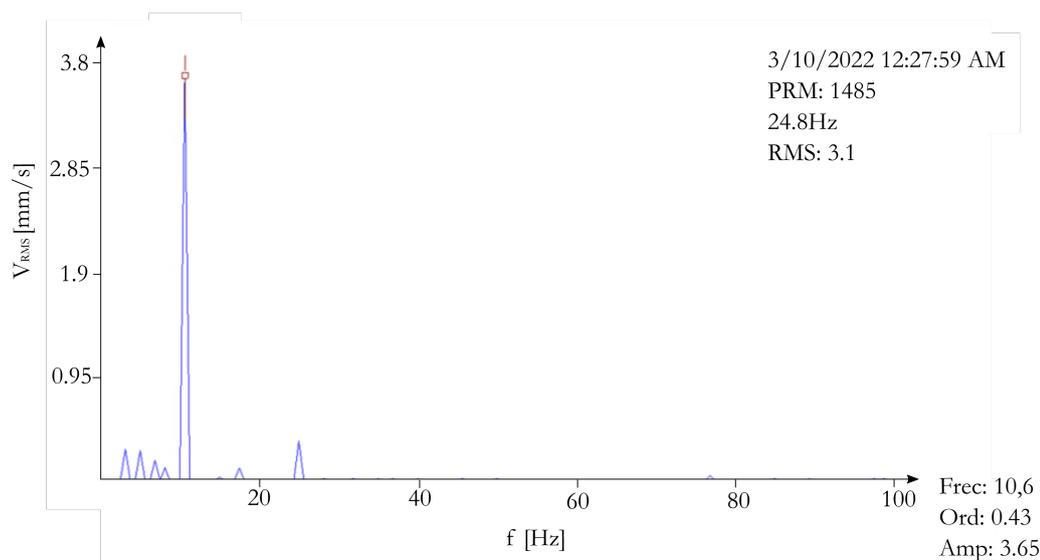


Figura 44. Espectro de vibraciones BBA-103 (intervalo de banda de 0 a 100 Hz).

En el caso de la bomba BBA-101, si bien no reportó ninguna alerta durante el tiempo de medición, los niveles detectados son muy próximos al seteo de alerta, tal como puede observarse en la Figura 45. Dada esta situación, se consideró oportuno realizar una evaluación del equipo con el objetivo de anticipar un agravamiento de los síntomas de falla de acuerdo a lo observado en los equipos BBA-102 y BBA-103.

En el espectro que se presenta en la Figura 46 se pudo identificar el mismo patrón de falla visualizado en las bombas BBA-102 y BBA-103. En este caso, con un pico máximo en el subarmónico a 10 Hz, una frecuencia de giro de 24,1 Hz y un valor de RMS de 1,6 mm/s.

Por lo tanto, si bien el nivel de intensidad de la vibración fue bajo, se infiere que el síntoma comenzó a manifestarse de forma temprana. En este caso, se deja en evidencia la importancia de realizar un seguimiento más detallado con el objetivo de evaluar el momento en donde comienza a tornarse crítico el fenómeno asociado a la falla.

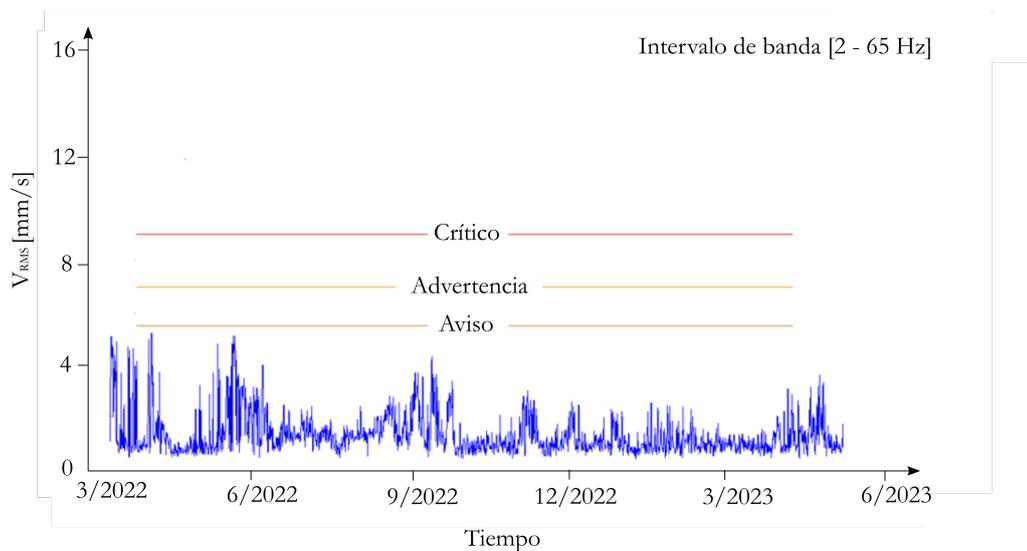


Figura 45. Registro histórico BBA-101 (intervalo de banda 2 a 65 Hz).

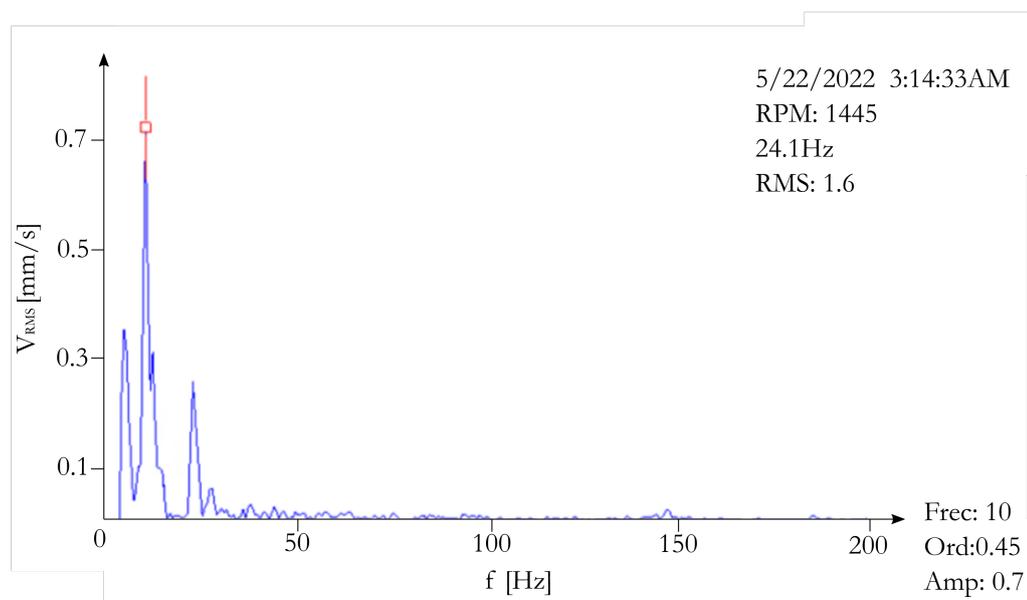


Figura 46. Espectro de vibraciones BBA-101 (intervalo de banda de 0 a 200 Hz).

Dado que los resultados del análisis realizado a las bombas BBA-101, BBA-102 y BBA-103, arrojaron evidencias en mayor o menor grado, del mismo fenómeno, se completó el estudio con la revisión de los espectros de las restantes bombas en operación.

De esta manera, se identificó que las bombas BBA-104 y BBA-105 presentaron también un espectro característico de falla por soltura mecánica. La tendencia marca un incremento a partir del mes de marzo de 2023, sin considerarse que los niveles de vibración se encuentren en un estado crítico.

En el caso de la bomba BBA-104, en los registros analizados (ver Figuras 47 y 48) se observa un pico máximo en el subarmónico a 10 Hz, una frecuencia de giro de 24,7 Hz y un valor RMS de 2,356 mm/s. Asimismo, para la bomba BBA-105 (ver Figuras 49 y 50), se observó un pico máximo en el subarmónico a 12,5 Hz, frecuencia de giro de 24,7Hz y un valor RMS de 3,093 mm/s.

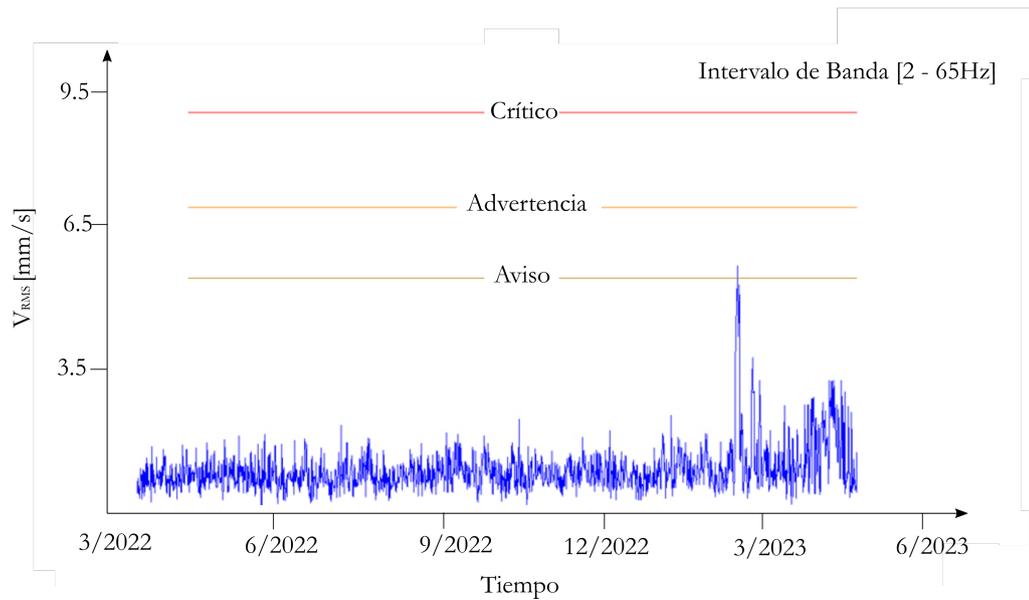


Figura 47. Registro histórico BBA-104 (intervalo de banda 2 a 65 Hz).

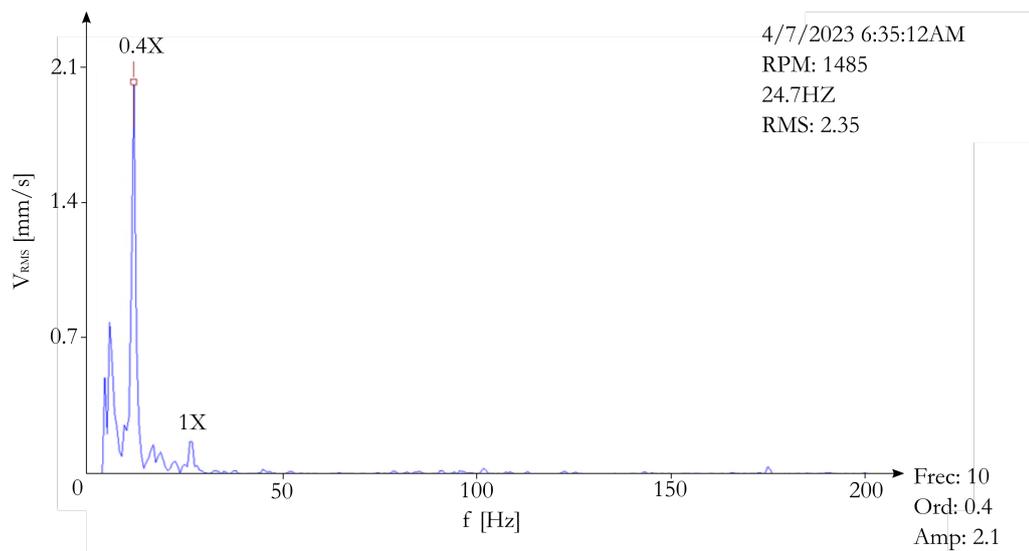


Figura 48. Espectro de vibraciones BBA-104 (intervalo de banda de 0 a 200 Hz).

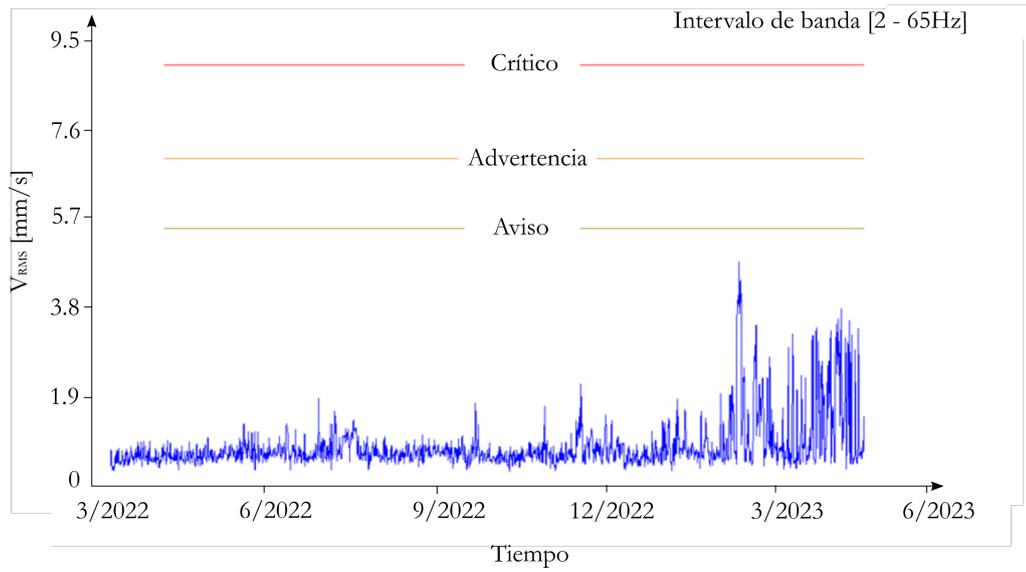


Figura 49. Registro histórico BBA-105 (intervalo de banda 2 a 65 Hz).

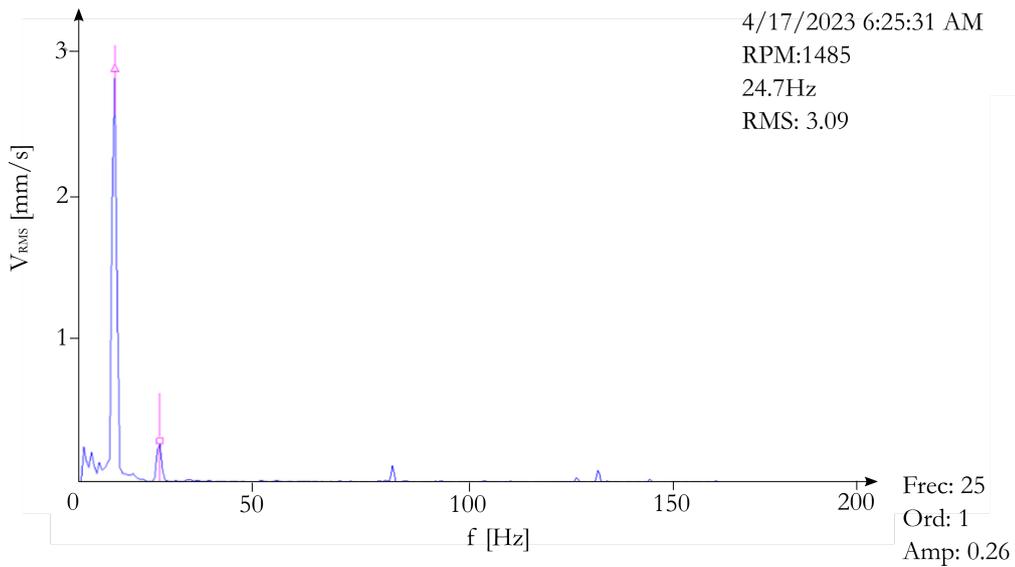


Figura 50. Espectro de vibraciones BBA-105 (intervalo de banda de 0 a 200 Hz).

5.7.2. Rodamientos

En la Figura 51 se presenta el registro histórico de los valores medidos del parámetro *PeakVue*, en el rodamiento de la bomba BA-102. Los valores de RMS superan ampliamente las alertas establecidas, por lo que indica una clara evidencia de falla por impacto en algún componente del rodamiento. El aumento progresivo en los valores de aceleración, se deben a un deterioro cada vez mayor en el rodamiento.

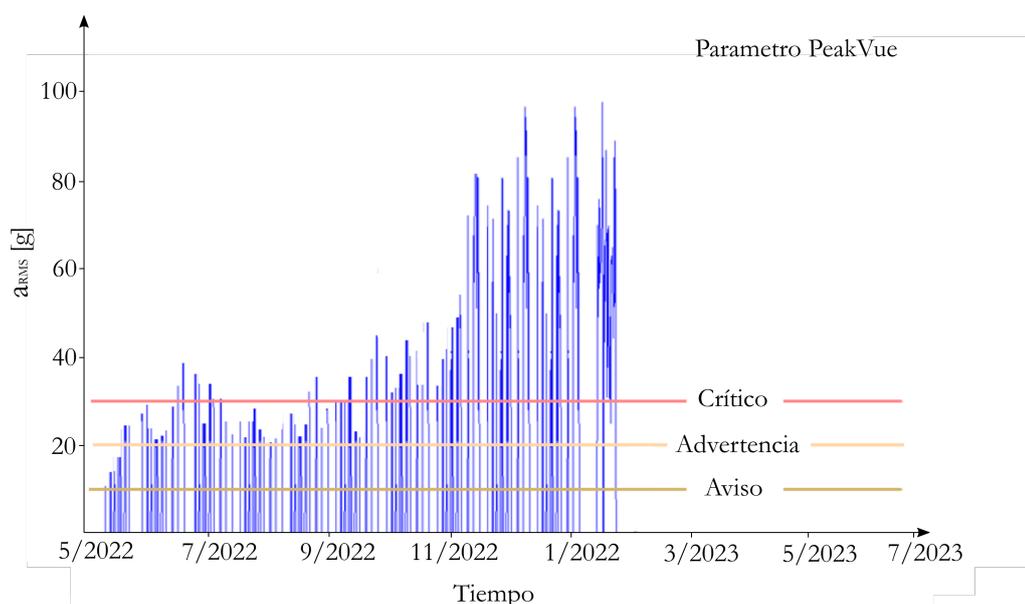


Figura 51. Registro histórico BBA-102 (parámetro *PeakVue*).

A continuación, se enumeran las características técnicas del rodamiento de la bomba, y las frecuencias de falla asociadas con sus componentes principales:

- Tipo de rodamiento: QJ 317 N2MA.
- Diámetro interior: 85 mm.
- Diámetro exterior: 180 mm.
- Frecuencia de Pista Interna (BPFI): 161,94 Hz.
- Frecuencia de Pista Externa (BPFO): 76,69 Hz.
- Frecuencia de Giro de la Bola (BSF): 105,22 Hz.
- Frecuencia de la Jaula (FTF): 10,09 Hz.

A partir del análisis del espectro de vibración (ver Figura 52), se identificó que los picos de frecuencia coinciden con la frecuencia de falla de la pista externa del rodamiento. Dado que la etapa de falla del rodamiento se encuentra muy avanzada, se recomienda el reemplazo del mismo.

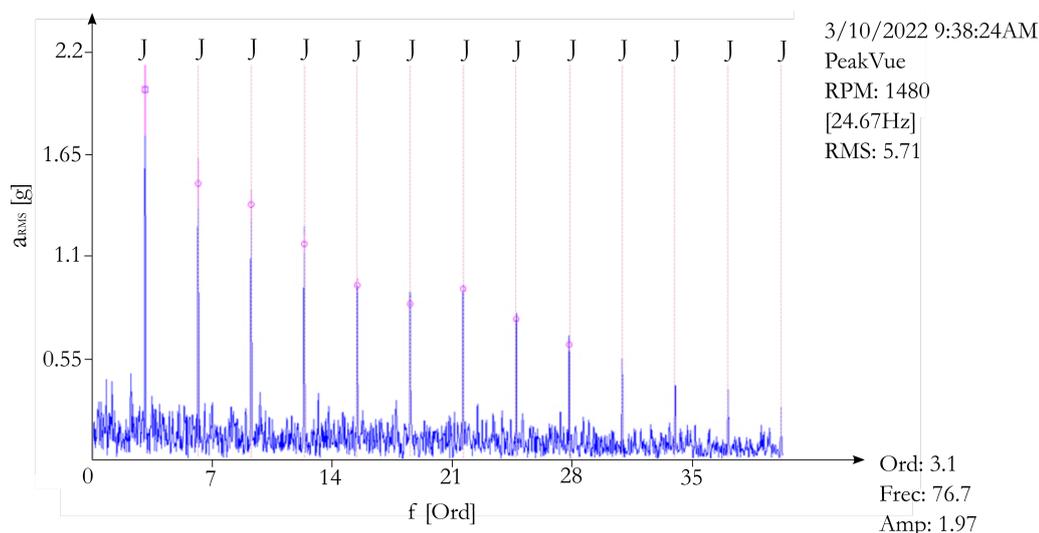


Figura 52. Espectro de vibraciones BBA-102 (intervalo de banda de 0 a 1000 Hz - 1X = 24,7 Hz).

5.7.3. Desalineación

En el registro histórico de la bomba BBA-105, se observaron altos niveles de vibración en el intervalo de banda entre 65 y 300 Hz, como se muestra en la Figura 53. Dado el rango de frecuencias analizado, es de esperar que presenten eventuales fallas asociadas a desalineación, paso de álabe o solturas mecánicas. Para evaluar la causa raíz del disparo de la alarma, se analizó el espectro registrado tanto en la dirección radial como axial.

En la Figura 54 se puede observar que el espectro en dirección radial (con una frecuencia de giro 1X a 24,7Hz y armónicos de segundo y tercer orden) se puede correlacionar con una desalineación paralela. A su vez, cuando se analizó el espectro en la dirección axial (ver Figura 55) se presentó un patrón similar, lo cual proporciona evidencia de que la desalineación se da por una combinación de falta de paralelismo y rectitud en el acoplamiento del motor con la bomba.

De forma complementaria, para reforzar el diagnóstico realizado se midió la temperatura con un medidor infrarrojo en la misma caja porta rodamiento donde fueron adquiridas

las mediciones de vibraciones, registrándose una temperatura de 70°C. Este valor de temperatura se considera elevado, y se infiere que se debe a la sobrecarga en el rodamiento generada por la desalineación del conjunto motor/bomba.

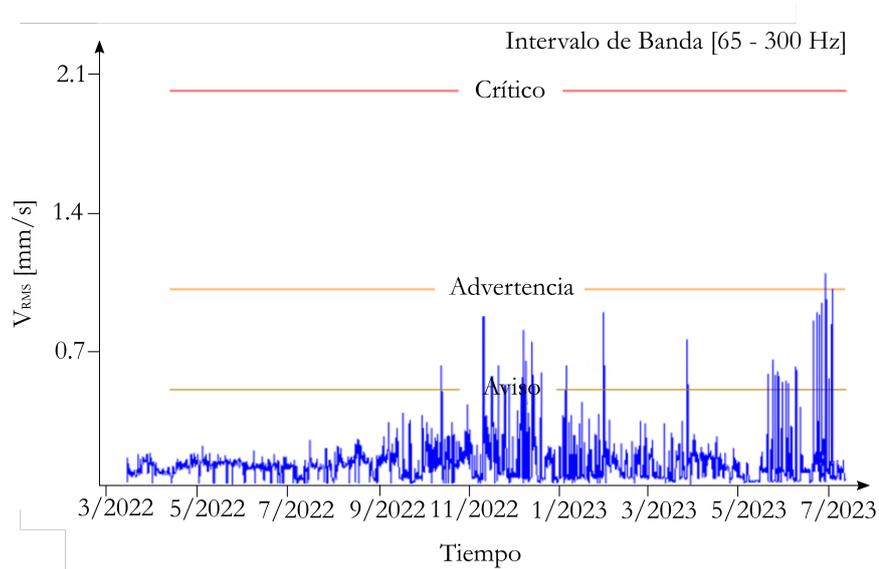


Figura 53. Registro histórico BBA-105 (intervalo de banda 6 a 300 Hz).

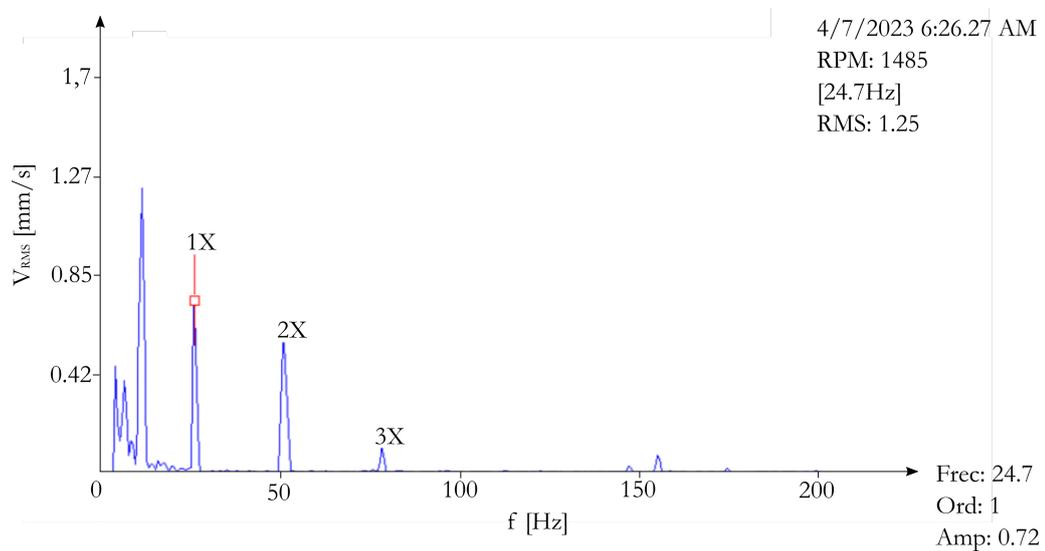


Figura 54. Espectro de vibraciones en dirección radial BBA-105 (intervalo de banda de 0 a 200 Hz).

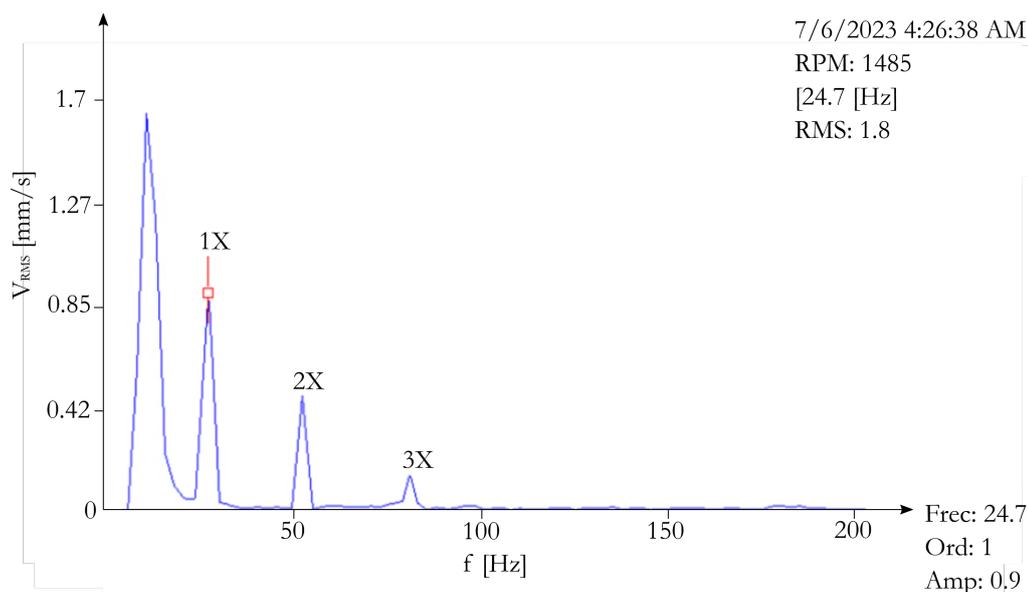


Figura 55. Espectro de vibraciones en dirección axial BBA-105 (intervalo de banda de 0 a 200 Hz).

5.8. Acciones de Mantenimiento

A partir del diagnóstico de las fallas, realizado mediante la técnica de vibraciones, se evidenció que se presentaban síntomas asociados a soltura mecánica, en mayor o menor medida, en todos los equipos. Esta situación, generó un alerta en el tablero de control. Esto motivó que se generen acciones desde el sector de mantenimiento para identificar la causa raíz del problema, dado que de mantenerse en el tiempo el funcionamiento de los equipos en estas condiciones podría desencadenar en múltiples consecuencias (como ser: desalineación, falla en rodamientos, falla en sellos mecánicos, entre otras).

Como primera medida, se emitió una orden de trabajo para el reajuste de las uniones atornilladas de la base, así como también una revisión general de todas las bombas con el fin de identificar cualquier anomalía presente en los equipos. Luego de las acciones tomadas, se procedió a medir nuevamente las vibraciones para evaluar si el diagnóstico considerado era el correcto, pero no se identificaron mejoras en los parámetros.

Dado que la falla se detectó en todas las bombas que se encuentran ubicadas sobre una misma plataforma se realizó una inspección con una cámara de amplificación de movimiento a fin de evaluar el comportamiento general de las bombas sobre la estructura. Este tipo de equipos miden la desviación, desplazamiento y vibración no visible al ojo humano. Esta tecnología transforma cada movimiento captado por el sensor de la cámara

y lo transforma en movimiento vibratorio con un alto grado de precisión. A su vez se utiliza un *software* para procesar y extraer datos significativos como la forma de onda y el espectro, tanto horizontal como vertical del sistema bajo estudio.

En la Figura 56 se presenta una imagen obtenida durante la jornada de inspección, en la que se puede observar la disposición adoptada para la instalación del equipo, la cual contempla el montaje del trípode de la cámara sobre una base rígida. Cabe destacar que cada pata del trípode permite aislar las vibraciones de la base e impedir que se transmitan al instrumento.



Figura 56. Inspección con cámara de amplificación de movimiento.

En primera instancia, las mediciones se realizaron manteniendo operativas las bombas BBA-101 y BBA-103 y la bomba BBA-102 en *stand by*. En estas condiciones de operación, el equipo que se mantuvo en reserva (BBA-102), registró oscilaciones verticales a una frecuencia de 9,6 Hz (ver Figura 57). Al momento de entrar en operación, la vibración se redujo en más de un 70 % como puede observarse en la Figura 58. De esta forma, se pudo cuantificar el efecto que generan las vibraciones inducidas por los equipos circundantes y que se traduce en esfuerzos adicionales sobre el equipo en reserva, por lo cual se infiere que el fenómeno detectado puede estar asociado a un inadecuado diseño

del sistema en relación a la rigidez de la estructura soporte.

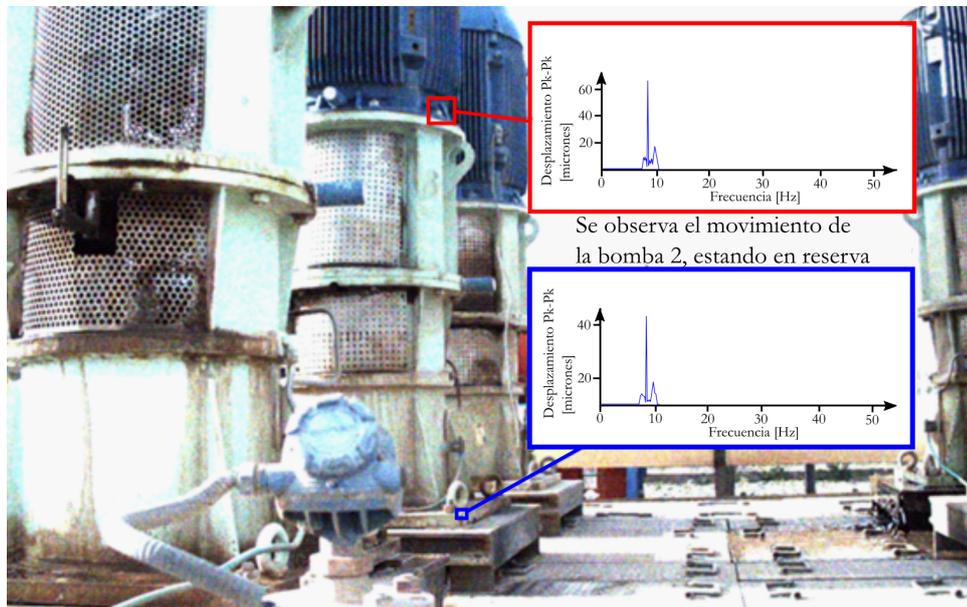


Figura 57. Espectro de vibraciones BBA-102 en reserva.

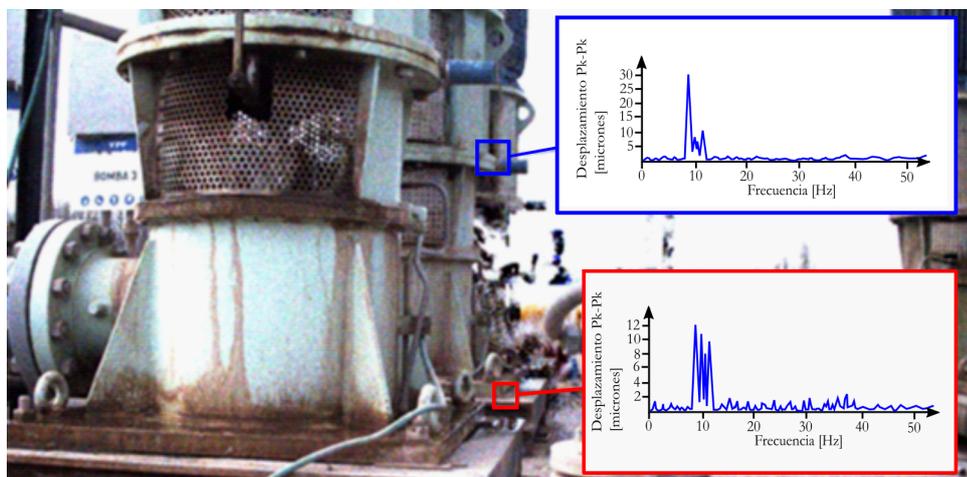


Figura 58. Espectro de vibraciones BBA-102 en operación.

Por lo expuesto, mediante las distintas técnicas implementadas se detectó que la causa raíz de las vibraciones a baja frecuencia son provocadas por la falta de rigidez de la plataforma sobre la cual se encuentran montadas las bombas. Es por esto que se adoptó, como acción correctiva, realizar un rediseño que incluya una detallada verificación estructural del sistema, con el objetivo de mitigar el nivel de vibraciones. Estas acciones exceden el alcance de este Proyecto Integrador.

5.9. Revisión

En la actualidad, la implementación de un sistema de monitoreo continuo con un enfoque proactivo se ha convertido en un elemento crítico para la gestión eficiente de activos industriales. Sin embargo, la complejidad inherente a cada cadena productiva y la escasez de personal capacitado plantean un desafío considerable en este proceso. Es por esta razón, que la Organización tiene tendencia tercerizar este servicio, lo cual si bien proporciona soluciones, también conlleva riesgos asociados con la protección de datos sensibles.

Es esencial destacar que el mantenimiento basado en condición requiere un diagnóstico detallado, logrado mediante un análisis exhaustivo de los equipos. En este contexto, el análisis vibracional, cuando se integra con algoritmos de seguimiento, emerge como una herramienta fundamental para la identificación y prevención proactiva de posibles fallas.

La convergencia del mantenimiento bajo condición con la inspección y análisis vibracional ha revelado problemas no anticipados durante la etapa de diseño del sistema, como por ejemplo el caso de soldadura mecánica detectado.

Simultáneamente, las estrategias de mantenimiento predictivo generan un volumen considerable de datos provenientes de diversos análisis y ensayos. Estos datos pueden ser estructurados y aprovechados mediante algoritmos o sistemas de análisis, como la inteligencia artificial (IA) y el *Big Data*. En el futuro, se espera que la evolución del sistema esté vinculada a una mayor integración entre estos sistemas, potenciando así la eficacia del mantenimiento predictivo.

En resumen, el sistema desarrollado se constituyó en una herramienta efectiva para incrementar la disponibilidad de los equipos, mientras que el análisis vibracional se posiciona como una técnica crucial para llevar a cabo monitoreos precisos y evaluar la condición de los equipos.

Para los próximos períodos, la aspiración de la Organización es consolidar el éxito de esta estrategia, ajustando planes de mantenimiento y redes diseñadas para elevar los indicadores de disponibilidad operativa de los equipos. Este enfoque de mejora continua y optimización de los sistemas contribuirá decididamente al rendimiento sostenible de los activos físicos de la planta de bombeo.

6. CONCLUSIONES

El presente Proyecto Integrador Profesional se desarrolló de manera exitosa, logrando alcanzar los objetivos establecidos desde el inicio. A lo largo del proyecto, se establecieron criterios sólidos para evaluar el estado real de los equipos, mejorando la calidad de la información necesaria para la toma de decisiones al evaluar la condición de un equipo. Este enfoque ha contribuido significativamente a extender los ciclos de vida de los equipos, incrementando su disponibilidad y confiabilidad. Además, ha promovido una operación más segura, rentable y respetuosa con el ambiente. Un logro destacado del proyecto fue la reducción del mantenimiento reactivo, implementando así un enfoque de mantenimiento a condición. Esta modificación se tradujo en una disminución de los costos asociados a repuestos y mano de obra, optimizando recursos y permitiendo enfocar los esfuerzos en los equipos más críticos.

Durante la ejecución de este trabajo, tuve la oportunidad de aplicar y consolidar una parte significativa de los conocimientos adquiridos a lo largo de mi formación universitaria. En particular, pude centrar mi trabajo en una especialidad de gran relevancia en la industria, como lo es el análisis de vibraciones mecánicas aplicadas a equipos rotantes. Este proyecto no solo amplió mis habilidades prácticas, sino que también me capacitó para desempeñar un papel crucial en la mejora de los planes de mantenimiento predictivo de la Organización, una responsabilidad de alta demanda para un ingeniero mecánico en la industria actual.

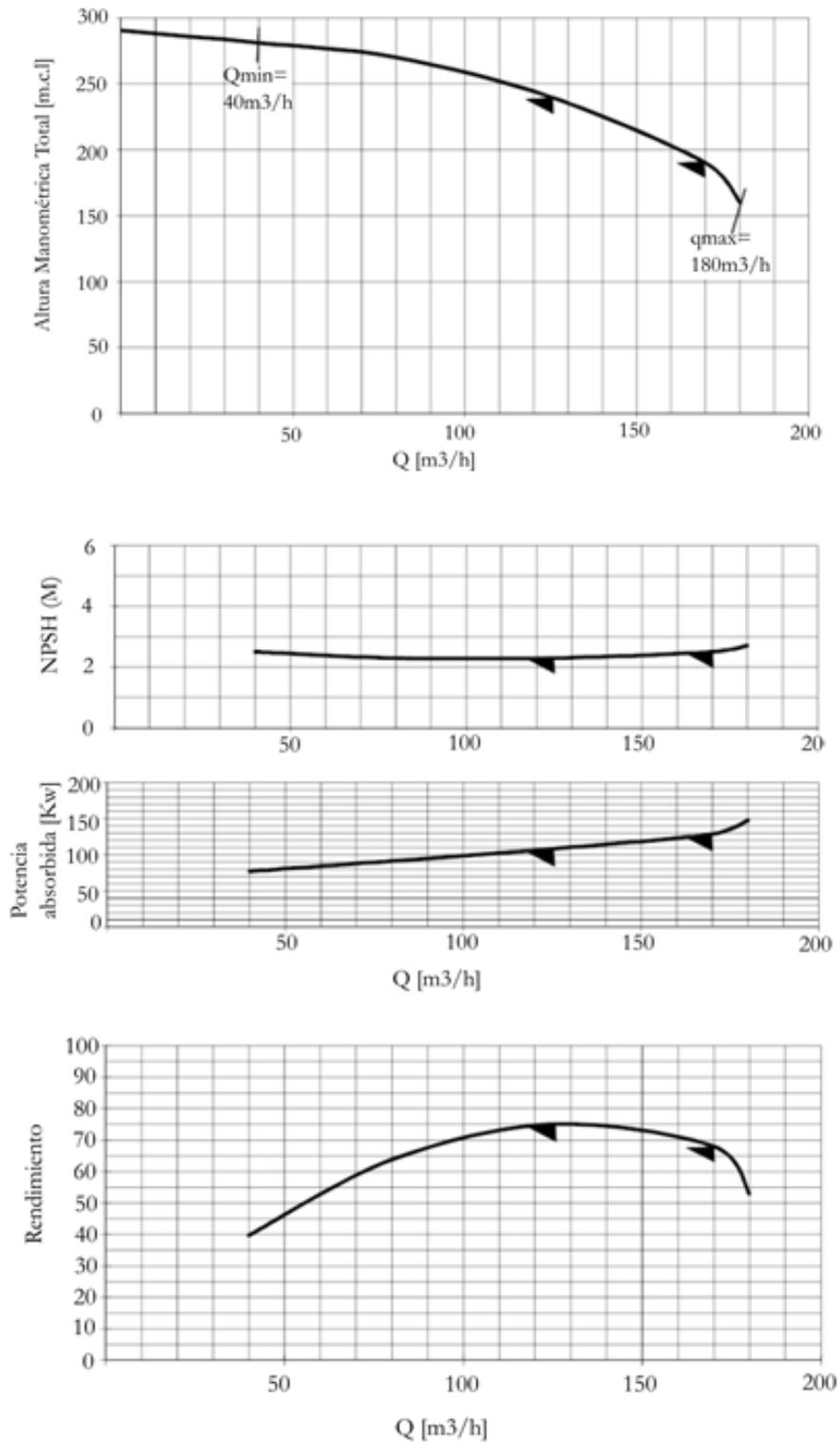
En resumen, este proyecto no solo cumplió con éxito sus metas iniciales, sino que también proporcionó una valiosa experiencia que ha fortalecido mi perfil profesional y ha contribuido significativamente a la eficiencia operativa y económica de la Organización. Estoy convencido de que los aprendizajes obtenidos durante este proyecto seguirán siendo esenciales en mi desarrollo profesional a lo largo de mi carrera.

7. REFERENCIAS

- Amendola, L. (2015). *Organización y Gestión del mantenimiento*.
- API 610. (2004). *API 610 : Centrifugal pumps for petroleum, petrochemical and natural gas industries*. American Petroleum Institute.
- API 681. (2021). *API 681 : Liquid Ring Vacuum Pumps and Compressors for Petroleum, Chemical, and Gas Industry Services*. American Petroleum Institute.
- Barratt, M. (2002). Low speed bearing monitoring-A case study of low speed bearing monitoring in a paperboard plant. *An application paper from SKF reliability system*.
- Beebe, R. (2004). *Predictive Maintenance of Pumps Using Condition Monitoring*. Elsevier Science.
- Berry, J. (2000). *Proven Method for Specifying Spectral Band Alarm Levels and Frequencies Using Today's Predictive Maintenance Software Systems*. Technical Associates of Charlotte.
- Cárcel Carrasco, F. J., Grau Carrión, J., & Pascual Guillamón, M. (2016). Elementos del conocimiento en la ingeniería del mantenimiento industrial. *Mantenimiento en Latinoamérica*, 8(1), 9-14.
- Dixon, S., & Hall, C. (2013). *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery*. Elsevier Science.
- Engeda, A. E. (1998). Early Historical Development of the Centrifugal Impeller. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:110694450>
- Girdhar, P., & Moniz, O. (2005). *Practical Centrifugal Pumps*. Elsevier Science.
- ISO 10816-1. (2009). *Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts — Part 1: General guidelines*. International Organization for Standardization.
- 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 120 r/min and 15 000 r/min when measured in situ*. International Organization for Standardization.
- ISO 12489. (2009). *Risk Management - Risk Assessment Techniques*. International Organization for Standardization.
-

- ISO 15243. (2017). *Rolling bearings damage and failures – terms, characteristics and causes*. International Organization for Standardization.
- ISO 17359. (2018). *Condition monitoring and diagnostics of machines - General guidelines*. International Organization for Standardization.
- ISO 31000. (2018). *Risk Management*. International Organization for Standardization.
- ISO 31010. (2015). *Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Reliability modelling and calculation of safety systems*. International Organization for Standardization.
- ISO 55000. (2015). *Asset Management*. International Organization for Standardization.
- ISO 55001. (2015). *Asset Management - Management systems - Requirements*. International Organization for Standardization.
- ISO 55002. (2015). *Asset Management - Management systems - Guidelines for the application of ISO 55001*. International Organization for Standardization.
- Karapataki, C. (2012). *Techno-Economic Analysis of Water Management Options for Unconventional Natural Gas Developments in the Marcellus Shale*. Massachusetts Institute of Technology, Engineering Systems Division, Technology; Policy Program.
- Mataix, C. (1975). *Turbomáquinas hidráulicas*. ICAI.
- McKee, K. K., Forbes, G., Mazhar, I., Entwistle, R., Hodkiewicz, M., & Howard, I. (2012). A single cavitation indicator based on statistical parameters for a centrifugal pump. *7th World Congress on Engineering Asset Management*.
- McMillan, R. (2004). *Rotating Machinery: Practical Solutions to Unbalance and Misalignment*. Fairmont Press.
- Mobley, R. K. (2004). *Maintenance fundamentals*. Elsevier Butterworth Heinemann.
- Mora, L. (2009). *Mantenimiento - planeación, ejecución y control*. Alfaomega Grupo Editor.
- Pistarelli, A. (2012). *Manual de Mantenimiento, Ingeniería, Gestión y Organización*. Buenos Aires.
- Rao, S. (2012). *Vibraciones mecánicas*. Pearson Educación.
- Torres, L. (2015). *Gestión Integral de Activos Físicos y Mantenimiento*. Alfaomega Grupo Editor.
-

- UNE-EN 13306. (2018). *Mantenimiento. Terminología del mantenimiento*. Asociación Española de Normalización.
- White, G. (2010). *Introducción al Análisis de Vibraciones*. Azima DLI.
- Wowk, V. (1991). *Machinery Vibration: Measurement and Analysis*. McGraw-Hill Education.
-

A. Anexo I: Curvas Características Bomba WVR 125/10Figura 59. Curvas Bomba WVR 125/10 (www.ksb.com).

B. Anexo II: Especificaciones Técnicas Sistema de Monitoreo

Número de pieza			
Avanzado	A9530V3-T0X		
Estándar	A9530V1-T0X		
Sensor	Amplitud	Frecuencia máxima	Frecuencia de muestreo
Vibración Global X	Hasta 16 g	Hasta 1000Hz	2.6Hz
Vibración general Y	Hasta 16 g	Hasta 1000Hz	2.6Hz
Vibración Global Z	Hasta 80 g	Hasta 20.000Hz	51.2kHz
PeakVue Z	Hasta 80 g	Hasta 5000Hz	51.2kHz
Temperatura	-40°C a 85°C		
Variables del dispositivo			
Valores en máquina	Eje Z Total		
	Eje X Total		
	Eje Y Total		
	PeakVue del eje Z (Pico máximo en la forma de onda)		
	Temperatura de la máquina		
Tensión de alimentación			
Diagnóstico avanzado			
Parámetros admisibles	2 bandas de velocidad (Por defecto: 2-65Hz y 65-300Hz)		
	2 bandas de aceleración (Predeterminado: 10-500Hz y 500 a 1000Hz)		
Análisis prescriptivo	Rodamiento / gravedad mecánica		
	Severidad de la lubricación		
	Velocidad calculada de la máquina (RPM)		
Forma de onda y espectro de vibración	Eje principal (Z):		
	Frecuencia máxima seleccionable por el usuario: 100Hz, 200Hz, 500Hz, 1kHz, 2kHz, 5kHz, 10kHz, 20kHz		
	Frecuencia mínima seleccionable por el usuario: 2Hz, 10Hz		
	Resolución seleccionable por el usuario: 100, 200, 400, 800, 1600, Línea de resolución.		
	Ejes secundarios (X, Y)		
	Frecuencia máxima seleccionable por el usuario: 200, 500 y 1000Hz		
	Líneas o resolución seleccionables por el usuario: 100, 200, 400, 800, 1600		
Espectro en miniatura de diagnóstico	Velocidad y PeakVue basados en 1600 líneas de resolución		
Condición de funcionamiento			
Temperatura de funcionamiento	-40 a 85°C		
Humedad de funcionamiento	95%, sin condensación		
Protocolo Inalámbrico			
Protocolo	IEC 62591 WirelessHART		
Alcance de difusión	Línea de visión de 100 m		
Bandas RF	2405 – 2480 MHz		
Potencia nominal de salida	8dBm o 0.0063 W		
Certificaciones de ubicaciones peligrosas			
EE.UU / Canadá	Clase I, División 1		Clase II, División 1
	Grupos: A, D.		Grupos: E, F, G.
ATEX	Zona 0, Ex ia IIC T4		Directiva ATEX (94/9/CE)
IECEx	Zona 0, Ex ia IIC T4		

(a) Especificaciones técnicas.



(b) Transductor y monitor de vibraciones.

(c) Sistema de comunicación.

Figura 60. Sistema de monitoreo (www.emerson.com).