



**UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO
DE MANABÍ**



FACULTAD

Ingeniería Industria y Arquitectura

CARRERA

Ingeniería Marítima

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del título de “Ingeniero Marítimo”

TEMA

ANÁLISIS DE VIBRACIONES COMO MÉTODO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN
MÁQUINAS ROTATIVAS

AUTOR


Carrera Bravo Edwin Aldahir

TUTOR

Ing. García Mejía Jonathan

Manta – Manabí – Ecuador

2024

	NOMBRE DEL DOCUMENTO: CERTIFICADO DE TUTOR(A).	CÓDIGO: PAT-04-F-004
	PROCEDIMIENTO: TITULACIÓN DE ESTUDIANTES DE GRADO BAJO LA UNIDAD DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	REVISIÓN: 1 Página 1 de 1

CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor(a) de la Facultad Ingeniería, Industria y Arquitectura de la Carrera de Ingeniería Marítima de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, CERTIFICO:

Haber dirigido, revisado y aprobado preliminarmente el Trabajo de Integración Curricular bajo la autoría del estudiante, **CARRERA BRAVO EDWIN ALDAHIR** legalmente matriculado/a en la carrera de Ingeniería Marítima, período académico 2024-2025(1) cumpliendo el total de 398 horas, cuyo tema del proyecto es **“ANÁLISIS DE VIBRACIONES COMO MÉTODO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN MÁQUINAS ROTATIVAS”**.

La presente investigación ha sido desarrollada en apego al cumplimiento de los requisitos académicos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico y en concordancia con los lineamientos internos de la opción de titulación en mención, reuniendo y cumpliendo con los méritos académicos, científicos y formales, y la originalidad del mismo, requisitos suficientes para ser sometida a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Lugar, 31 de julio de 2024.

Lo certifico,



Ing. Jonathan Israel García Mejía
Docente Tutor(a)
Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

La responsabilidad por los hechos, opiniones, ideas e información vertidas en este proyecto de titulación “Análisis de vibraciones como método de mantenimiento predictivo en máquinas rotativas” corresponden exclusivamente al autor y el patrimonio intelectual del trabajo de titulación pertenecerá a la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.



Carrera Bravo Edwin Aldahir

C.I. 2300422900



Ing. García Mejía Jonathan

C.I.: 1312620436

APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo al cumplimiento de los requisitos los requisitos de la ley, el tribunal de grado otorga la calificación de:

PRESIDENTE

CALIFICACIÓN

PRIMER VOCAL

CALIFICACIÓN

SEGUNDO VOCAL

CALIFICACIÓN

TOTAL

SECRETARIA/O

DEDICATORIA

A mis queridos padres, que con esfuerzo y sacrificio me han apoyado, guiado e inspirado a seguir adelante a lo largo de toda mi vida. Este logro no habría sido posible sin su amor incondicional, su apoyo emocional en mis momentos más difíciles y su inquebrantable fe que me otorgaron. Gracias por enseñarme el valor de la perseverancia, la dedicación y el trabajo duro. Ustedes siempre serán mi mayor fuente de inspiración.

Con todo mi amor y gratitud.

Edwin Aldahir Carrera Bravo.

AGRADECIMIENTO

A mis seres queridos,

Quiero expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas y entidades que han contribuido al desarrollo de esta tesis.

A mi tutor de tesis por su invaluable guía, dedicación, paciencia y sus conocimientos compartidos durante todo el proceso de investigación, que siempre nos apoyó.

A mis educadores por la dedicación y compromiso con nuestra educación. Su apoyo y orientación a lo largo de nuestros estudios han sido clave para alcanzar nuestras metas académicas.

A la empresa EUROFISH S.A. por brindarnos la oportunidad de realizar este trabajo en sus instalaciones.

RESUMEN

El mantenimiento predictivo basado en vibraciones tiene el propósito de identificar y anticipar fallas en las maquinarias antes de que ocurran fallos críticos, esto tiene un gran impacto positivo para las personas que laboran en el área de mantenimiento.

La presenta tesis tiene como objetivo la implementación de un software de análisis de vibraciones para mejorar el mantenimiento predictivo en maquinaria rotativa. Las muestras para este estudio fueron tomadas del área de compresores de amoniaco de la empresa EUROFISH S.A., las muestras fueron analizadas detalladamente y, en base a los resultados se le recomendó a la empresa como deben proceder.

Al anticipar problemas potenciales, se pueden tomar medidas de intervención de manera eficiente y en los tiempos oportunos, pero siempre dependerá de la magnitud del fallo como se podrá observa en el siguiente estudio.

Palabras clave: anomalías, espectros, frecuencia, desbalanceo

ABSTRACT

Predictive maintenance based on vibrations aims to identify and anticipate machinery failures before critical breakdowns occur. This has a significant positive impact on the personnel working in the maintenance area.

This thesis aims to implement vibration analysis software to improve predictive maintenance in rotating machinery. The samples for this study were taken from the ammonia compressors area of the company EUROFISH S.A. These samples were analyzed in detail, and based on the results, recommendations were made to the company on how to proceed.

By anticipating potential problems, intervention measures can be taken efficiently and in a timely manner, although the response will always depend on the magnitude of the fault, as will be observed in the following study.

Keywords: anomalies, spectra, frequency, imbalance

CONTENIDO

DECLARACIÓN DE AUDITORIA.....	Error! Bookmark not defined.
APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	IV
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTO.....	VI
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
CONTENIDO.....	IX
ÍNDICE DE IMÁGENES.....	XII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIII
CAPITULO I.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Justificación	3
1.4. Propuesta.....	4
1.5. Objetivo General	5
1.6. Objetivos Específicos	5
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	6
2.1. Historia	6
2.2. Tipos de Mantenimiento	7
2.2.1. <i>Mantenimiento Productivo Total (TPM)</i>	7
2.2.2. <i>Mantenimiento Correctivo</i>	7
2.2.3. <i>Mantenimiento Preventivo</i>	7
2.2.4. <i>Mantenimiento Predictivo</i>	8
2.2.5. <i>Ventajas del Mantenimiento Predictivo</i>	8
2.2.6. <i>Desventajas del Mantenimiento Predictivo</i>	9
2.3. Vibraciones	10
2.3.1. <i>Tipos De Vibración</i>	10
2.3.2. <i>Parámetros de la Vibración</i>	13
2.3.3. <i>Tácticas de Análisis de Vibraciones</i>	14
2.3.4. <i>Instrumentación y Equipos para el Análisis de Vibraciones</i>	17
2.3.5. <i>Diagnósticos de Fallos Mediante Análisis de Vibraciones</i>	18

2.4. Máquinas Rotativas	21
2.4.1. Principales Características de las Máquinas Rotativas.....	21
2.4.2. Clasificación de las Máquinas Rotativas	22
2.4.3. Ejemplos de Máquinas Rotativas.....	22
CAPITULO III. DESARROLLO DEL TRABAJO	24
3.1. Detalles Técnicos del HF+s PO (DynaPortable).....	24
3.2. Desarrollo de Competencias en el Uso del Software Dynapredict	26
3.2.1. Integrado	27
3.2.2. Predictivo	28
3.2.3. Sensitivo	29
3.3. Observación del Proceso Productivo.....	30
3.4. Recopilación de las Características de Diseño y Condición de Funcionamiento de los Equipos.....	30
3.5. Determinación de los Puntos de Medición	30
3.6. Definición de las Rutas de Medición de Vibración	31
3.6.1. Ruta A: Compresor 1.....	32
3.6.2. Ruta B: Compresor 2.....	32
3.7. Creación de la Base de Datos en el Software DynaPredict	32
3.8. Normativas ISO y Limitaciones de Vibraciones: Análisis y Aplicación en Maquinaria Rotativa	33
3.8.1. Normas ISO 10816.....	33
3.8.2. ISO 10816-3 Severidad de Vibración en Máquinas Críticas.....	34
3.8.3. 10816-8 Severidad de Vibración en Compresores Alternativos.....	36
CAPITULO IV. RESULTADOS.....	42
4.1. Compresor de tornillo 1	42
4.1.1. Lado libre del compresor.....	42
4.1.2. Lado de Acople del Compresor.....	47
4.1.3. Lado de Acople del Motor Eléctrico	50
4.1.4. Lado Libre del Motor Eléctrico	55
4.2. Compresor del tornillo dos	56
4.2.1. Lado Libre del Compresor.....	56
4.2.2. Lado Acople del Compresor	56
4.2.3. Lado de Acople del Motor Eléctrico	57
4.2.4. Lado Libre del Motor Eléctrico	57

4.3. Compresor de tornillo tres58

 4.3.1. *Lado Libre del Compresor*..... 58

 4.3.2. *Lado de Acople del Compresor*..... 58

 4.3.3. *Lado de Acople del Motor Eléctrico* 59

 4.3.4. *Lado Libre del Motor Eléctrico* 59

CONCLUSIONES63

RECOMENDACIONES64

BIBLIOGRAFÍA65

ANEXOS68

ÍNDICE DE IMÁGENES

<i>Imagen 1:</i> Curva PF para definir la frecuencia del monitoreo de condición.....	9
<i>Imagen 2:</i> Efecto de amortiguamiento vibración libre.....	11
<i>Imagen 3:</i> Vibración amortiguada.....	11
<i>Imagen 4:</i> Excitación determinística.....	12
<i>Imagen 5:</i> Excitación aleatoria	12
<i>Imagen 6:</i> Frecuencia y periodo de onda.....	13
<i>Imagen 7:</i> Amplitud	14
<i>Imagen 8:</i> Calculo de la fase	14
<i>Imagen 9:</i> Forma de onda en vibración.....	15
<i>Imagen 10:</i> Espectro de frecuencias de vibración	16
<i>Imagen 11:</i> Transformada rápida de Fourier	17
<i>Imagen 12:</i> HF+s PO (DynaPortable).....	24
<i>Imagen 13:</i> Posición correcta del sensor.....	26
<i>Imagen 14:</i> Sección de Integrado de DynaPredict.....	27
<i>Imagen 15:</i> Sección de Predictivo de DynaPredict.....	28
<i>Imagen 16:</i> Sección de Sensorial de DynaPredict	29
<i>Imagen 17:</i> Puntos de medición del compresor de tornillo GEA FES.....	31
<i>Imagen 18:</i> ISO 10816-3 tabla de evaluacion de las vibraciones en velocidad	35
<i>Imagen 19:</i> ISO 10816-3 tabla de evaluacion de la vibraciones en desplazamiento	35
<i>Imagen 19:</i> Valores constantes de desplazamiento en horizontal.....	36
<i>Imagen 20:</i> Valores constantes de desplazamiento en vertical.....	37
<i>Imagen 21:</i> Valores constantes de velocidad en horizontal.....	38
<i>Imagen 22:</i> Valores constantes de velocidad en vertical.....	39
<i>Imagen 23:</i> Valores constantes de aceleración en horizontal	40
<i>Imagen 24:</i> Valores constantes de aceleración en vertical	41
<i>Imagen 25:</i> Plano espectral en rango de velocidad- frecuencia (10/07/24)	42
<i>Imagen 26:</i> Plano espectral en rango de velocidad- frecuencia (12/07/24)	43
<i>Imagen 27:</i> Plano de frecuencia de paso del balón exterior (BPFO).....	44
<i>Imagen 28:</i> Plano de frecuencia de paso del balón interior (BPFI)	44
<i>Imagen 29:</i> Plano de frecuencia de giro de la bola (BSF).....	45

<i>Imagen 30:</i> Plano de frecuencia fundamental del tren (FTF)	45
<i>Imagen 31:</i> Plano espectral en rango de velocidad- frecuencia (15/07/24)	46
<i>Imagen 32:</i> Plano espectral en rango de velocidad- frecuencia (18/07/24)	46
<i>Imagen 33:</i> Plano espectral en cascada	47
<i>Imagen 34:</i> Plano espectral en rango de velocidad- frecuencia (10/07/24)	47
<i>Imagen 35:</i> Plano espectral en rango de velocidad- frecuencia (12/07/24)	48
<i>Imagen 36:</i> Plano espectral en rango de velocidad frecuencia (15/07/24).....	48
<i>Imagen 37:</i> Plano espectral en rango de velocidad- frecuencia (18/07/24)	49
<i>Imagen 38:</i> Plano espectral en cascada	50
<i>Imagen 39:</i> Plano espectral en rango de velocidad- frecuencia (10/07/24)	50
<i>Imagen 40:</i> Plano BPFO	51
<i>Imagen 41:</i> Plano BPFI	51
<i>Imagen 42:</i> Plano BSF.....	52
<i>Imagen 43:</i> Plano FTF.....	52
<i>Imagen 44:</i> Plano espectral en rango de velocidad- frecuencia (12/07/24)	53
<i>Imagen 45:</i> Plano espectral en rango de velocidad- frecuencia (15/07/24)	53
<i>Imagen 46:</i> Plano espectral en rango de velocidad- frecuencia (18/07/24)	54
<i>Imagen 47:</i> Plano espectral en cascada	54
<i>Imagen 48:</i> Plano espectral en cascada lado libre del motor eléctrico.....	55
<i>Imagen 49:</i> Plano en cascada de velocidad- frecuencia	56
<i>Imagen 50:</i> Plano en cascada de velocidad- frecuencia	56
<i>Imagen 51:</i> Plano en cascada de velocidad- frecuencia	57
<i>Imagen 52:</i> Plano de cascada de velocidad- frecuencia	57
<i>Imagen 53:</i> Plano en cascada de velocidad- frecuencia	58
<i>Imagen 54:</i> Plano en cascada de velocidad- frecuencia	58
<i>Imagen 55:</i> Plano en cascada de velocidad- frecuencia	59
<i>Imagen 56:</i> Plano en cascada de velocidad- frecuencia	60

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1:</i> Diagnóstico del desbalanceo.....	19
<i>Tabla 2:</i> Especificaciones técnicas del DynaPortable	25

<i>Tabla 3:</i> Comunicación y sistema del DynaPortable	25
<i>Tabla 4:</i> Monitoreo espectral y forma de onda	25
<i>Tabla 5:</i> Ficha de datos del compresor de tornillo GEA FES.....	33
<i>Tabla 6:</i> Límites de rango y velocidad y clases de máquinas.....	34
<i>Tabla 7:</i> Tabla comparativa Normas ISO 10816 con valores picos captados.....	60
<i>Tabla 8:</i> Resultados de tabla comparativa	61

CAPITULO I

1.1. Introducción

En un entorno industrial donde la eficiencia y confiabilidad operativa son importantes, el mantenimiento predictivo mediante análisis de vibraciones se presenta como un mecanismo esencial, el cual permite una intervención planificada antes de que se produzcan paradas inesperadas por averías, siendo una de las técnicas más eficaces para dicho mantenimiento.

Los primeros avances se dieron entre el año 1950 a 1960 donde las instrumentaciones eran primitivas en comparación con los estándares actuales, pero sentaron las bases para el desarrollo futuro, donde el método se basa en la monitorización continua de las señales de vibración producidas por las máquinas, con el objetivo de hallar patrones de anomalías que puedan indicar el desgaste o la falla próxima de elementos claves, como rodamientos, engranajes y ejes.

En la actualidad existen varios aparatos de medición de vibraciones, por ejemplo: acelerómetros, sensores o equipos costosos que hacen que las compañías opten por otros métodos o seguir con las medidas de mantenimiento comúnmente usadas. Por lo tanto, desconocen las nuevas tecnologías más económicas y eficientes.

El proyecto da a conocer una tecnología de sensores que monitorea de manera continua a las máquinas y presenta un software muy interesante donde se puede apreciar diferentes apartados para un mejor análisis de las vibraciones arrojadas por las máquinas.

1.2. Antecedentes

Los autores (Alcazaba & Derick, 2020) en su tesis titulada “Propuesta de mejora del mantenimiento predictivo por análisis vibracional para aumentar la disponibilidad de los equipos críticos del área de lavaderos de una empresa azucarera”, cuyo objetivo principal fue solventar los problemas próximos, fallas mecánicas y operaciones los cuales retrasan los tiempos operacionales. Se utilizaron métodos deductivos de la mano de una investigación preexperimental y la muestra de 20 equipos de la zona de lavaderos de la empresa azucarera. Como resultado se obtuvo, que de una disponibilidad de los equipos del 75.02%, utilizando un método de mantenimiento predictivo en base a análisis de vibraciones se incrementó la disponibilidad de estos a un 97.26%. Se concluye que implementar dichos mantenimientos predictivos son viables, pues se logró aumentar el rendimiento un 20,43 %.

El autor (Rivera Gomez, 2022, pág. 12) quien realizó la tesis “Detección de fallas en rodamientos basado en el análisis vibracional del compresor MVC DSP3 de la Planta ILO 1”, tiene como objetivo principal impulsar un método de monitoreo basados en la condición de los rodamientos antifricción utilizando el análisis de vibraciones. Se diferencio con las etapas de falla de rodamientos antifricción propuesto por el Technical Associates Of Charlotte, P. C. la cual ha demostrado cinco etapas de falla. Por tal razón, en la investigación se demostró la importancia de tener en cuenta los datos de vibración total en alta frecuencia, baja frecuencia e incluyendo un análisis espectral cada uno de ellos con una configuración según el tipo de rodamiento. En conclusión, se corrobora que es posible conseguir resultados que solidifiquen la relación de los espectros de falla con el nivel de daño del rodamiento antifricción.

1.3. Justificación

En la industria hay un problema significativo en las máquinas rotativas. Las fallas, estas ocasionan retrasos inesperados, reducción de manufactura, altos costos de mantenimiento e incluso riesgos en la seguridad humana. El tipo de mantenimiento tradicional se basa en tiempo o revisiones habituales no siempre son seguros para prevenir fallas, porque no las detectan en etapas tempranas.

El proyecto de titulación presenta al análisis de vibraciones como una ruta viable de la mano del mantenimiento predictivo, ya que ofrece métodos más efectivos para divisar y determinar anomalías en máquinas rotativas desde una etapa temprana. Para que las máquinas sigan de manera continua y periódica, monitoreando los patrones de vibración para identificar la presencia de rarezas que presenten un problema a futuro.

El análisis de vibraciones como mantenimiento predictivo es esencial, viable y cuenta con un gran potencial que puede beneficiar a zonas muy diversas en la sociedad. Que mejoran la confiabilidad y el rendimiento de máquinas rotativas, a reducción de costos en mantenimientos correctivos de las empresas, mejorar la producción y mantener la seguridad de las personas en su zona de trabajo.

1.4. Propuesta

La presente tesis propone implementar un software para el análisis vibraciones, con el objetivo de optimizar el mantenimiento predictivo en maquinaria rotativa. La investigación se centra en la aplicación práctica de este software en compresores de la empresa EUROFISH S.A., con el fin de identificar los patrones de vibración que puedan significar fallas futuras y como resultado intervenir antes de que se haga una parada inesperada.

Se espera que la implementación del software reduzca significativamente los costos operativos, reduzca el tiempo de inactividad y mejore la fiabilidad de los equipos, ejerciendo un mantenimiento eficiente en la empresa.

1.5. Objetivo General

Demostrar el análisis de vibración como herramienta para el mantenimiento predictivo, destinada a monitorear las vibraciones en máquinas rotativas y evitar fallas o averías en los equipos.

1.6. Objetivos Específicos

- Analizar las vibraciones de cada una de las máquinas para determinar su estado actual.
- Identificar a que frecuencia trabaja cada máquina rotativa, para establecer los niveles de vibración permitidos
- Realizar un mantenimiento predictivo en base a los resultados del análisis de vibraciones obtenidos, que incluya las tareas de mantenimiento necesarias para evitar potenciales fallas.
- Desarrollar un manual de uso para el software DynaPredict, optimizando su implementación.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Historia

Desde la antigüedad, los seres humanos debido a su instinto de supervivencia se destacaron en crear prácticas para su propio mantenimiento y protección (herramientas). Estas fueron evolucionando continuamente, conforme se avanzaba en la producción de bienes y servicios, el mantenimiento también lo hacía. (Perez, 2021)

La revolución industrial, que comenzó en el Reino Unido a mediados del siglo XVIII, trajo cambios drásticos en lo social, económico y tecnológico, transformando la economía agrícola y comercial en urbana e industrializada.

En esta época el primer tipo de mantenimiento industrial era el cual funcionaba hasta fallar, lo que significa que la máquina opera hasta que le ocurriera algún tipo de falla y se parara la producción. Y en tal caso esto son repercusiones de alto costo para la empresa. Que sus gastos aumenten exponencialmente por la sorpresiva falla de una máquina. (White, 2010)

En 1920, se hizo evidencio la necesidad de mejorar este diseño de mantenimiento industrial a un enfoque ingenieril, con el fin de reducir costos a gran escala, reducir accidentes laborales y aumenta la rentabilidad de las empresas mediante la disminución de paradas inesperadas. (Perez, 2021)

2.2. Tipos de Mantenimiento

2.2.1. Mantenimiento Productivo Total (TPM)

La empresa japonesa Nippondenso proveedora en el sector automotriz en 1960, innovo al implementar una nueva forma de realizar mantenimiento preventivo y autónomo, surgió la idea en base a que al automatizar sus procesos era necesario más personal de mantenimiento, por esto la empresa decidió que los propios operarios realizaran dichas tareas. Tras solidificar este nuevo tipo de mantenimiento, la empresa formo equipo con el personal de la compañía, creando el mantenimiento productivo, que tiene como objetivo maximizar el uso de las instalaciones y equipos, logrando una eficiencia un aumento de vida en los equipos de producción. (López, 2009)

Esta práctica fue inicialmente nombrada como “Total Member Participation” (Participación Total de los Miembros), haciendo referencia a que, lo primordial en este tipo de mantenimiento son las actividades del personal.

2.2.2. Mantenimiento Correctivo

Este tipo de mantenimiento se lo conoce también por mantenimiento reactivo, que en los países Latinoamericanos y otros países subdesarrollados es mayormente utilizado. El mantenimiento correctivo se utiliza al momento de que las máquinas dejan de funcionar, por el motivo de alguna falla y tiene como objetivo repararla, este mantenimiento cuenta con muchas desventajas las cuales serían tiempos largos en reparación (en caso de que la falla sea complicada), menor producción y mayores costos de mantenimiento. (Peréz, 2021, pág. 37)

2.2.3. Mantenimiento Preventivo

Se basa en una lista de actividades planificadas con antelación que se van cumpliendo en un periodo de tiempo, con el objetivo de “prevenir” fallas. Para mantener su operación a los niveles

específicos, esto quiere decir que estas maquinarias trabajen en la producción de manera regular, siguiendo las recomendaciones del manual de fabricación. (Alavedra, y otros, 2016)

2.2.4. Mantenimiento Predictivo

El mantenimiento predictivo permite monitorear los equipos y realizar un análisis basado en estos, para prevenir fallas antes de que ocurra, este mantenimiento puede tenerse en constantemente o cada cierto tiempo y no obstaculiza el funcionamiento de la máquina o planta su actividad. (Olarte, Botero, & Cañon, 2010)

2.2.4.1 Como Funciona El Mantenimiento Predictivo.

El mantenimiento predictivo tiene varias técnicas para monitorear el estado de las máquinas:

Análisis de vibraciones: El método tiene como fuente principal de información el cambio de vibraciones, los cuales pueden terminar en fallos mecánicos.

Análisis de aceite: tomas registros del aceite de las máquinas y en base a la información obtenida se detectan el desgaste o contaminación.

Análisis termográfico: Se utilizan cámaras infrarrojas para buscar ciertos puntos calientes en la máquina, porque estos significan averías eléctricas o mecánicas.

Ultrasonidos: Se utilizan las ondas ultrasónicas para registrar alguna grieta, fuga u otros defectos.

2.2.5. Ventajas del Mantenimiento Predictivo

- Reduce el tiempo muerto no planificado, porque permite localizar fallas antes de que ocasionen problemas graves.

- Disminuye los costos de mantenimiento, ya que evita reparaciones no programadas, optimizando los recursos.
- Aumenta la confiabilidad de los equipos en el proceso de producción.
- Esta técnica no perjudica ni detiene la productividad del equipo en su producción.

2.2.6. Desventajas del Mantenimiento Predictivo

- La instalación de los mantenimientos predictivos es una inversión a gran escala por lo que no es accesible a todo tipo de empresas.
- Requiere un personal altamente capacitado para lograr maniobrar los instrumentos de alta tecnología.

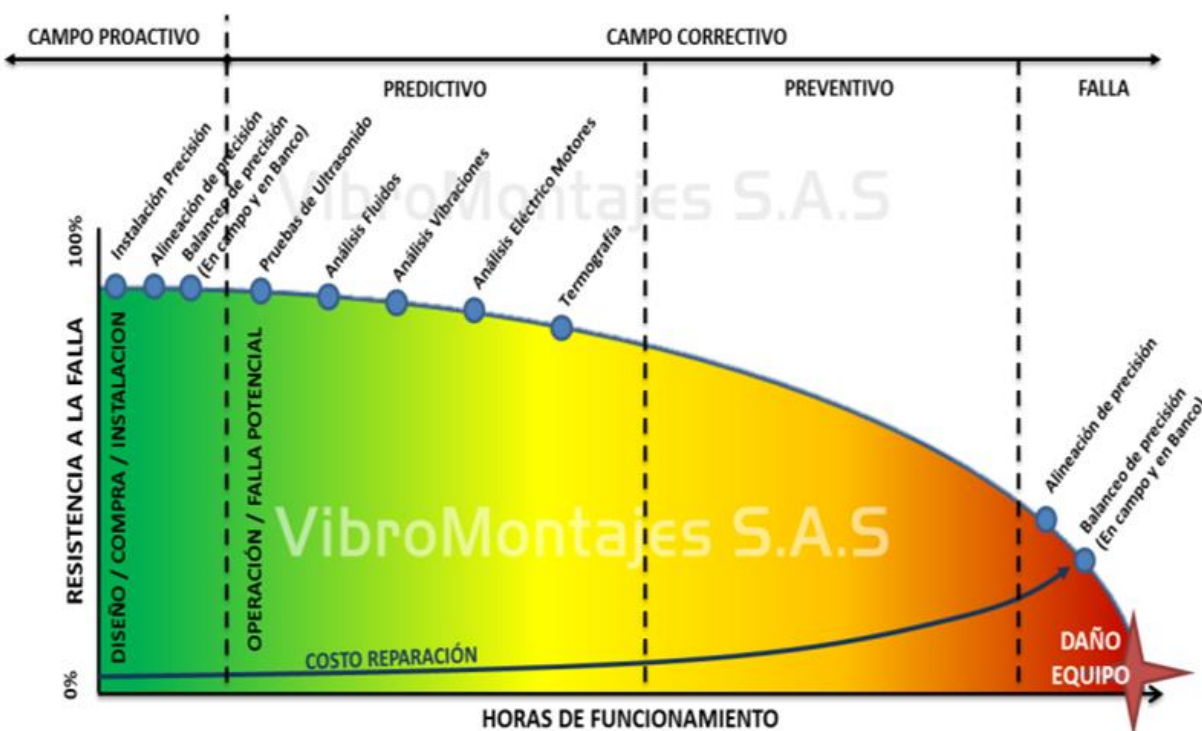


Imagen 1: Curva PF para definir la frecuencia del monitoreo de condición
Fuente: <https://www.linkedin.com/pulse/curva-pf-para-definir-la-frecuencia-del-monitoreo-de-condici%C3%B3n-sas/>

2.3. Vibraciones

Las vibraciones son un movimiento de una máquina o de alguna parte de la máquina en su punto de equilibrio. La vibración se caracteriza por sus términos comunes. La frecuencia que es el número de ciclos por segundo y se mide en la unidad de Hertz, la amplitud que es la distancia que recorre, si este aumenta pueden significar fallos en la parte mecánica. La amplitud se puede medir por el desplazamiento, velocidad o aceleración. (Saied, Mostafa, & Hussein, 2015)

2.3.1. Tipos De Vibración

2.3.1.1. Vibración Libre.

Si el objeto se mantiene vibrante después de alguna anomalía, dicha vibración se la conoce como vibración libre, ya que ninguna fuerza aparte actúa sobre esta. (Singiresu, 2012)

2.3.1.2. Vibración Forzada.

Es la contra parte de la vibración libre ya que si influye una fuerza externa que en la mayoría de los casos es repetitiva. (Singiresu, 2012)

2.3.1.3. Vibración No Amortiguada y Amortiguada.

Se conoce a la vibración no amortiguada, cuando no hay fuerzas externas que disipen la energía del sistema, esto ocasiona que continúe de manera constante indefinidamente. (Mosquera, De La Victoria, & Armas, 2001)

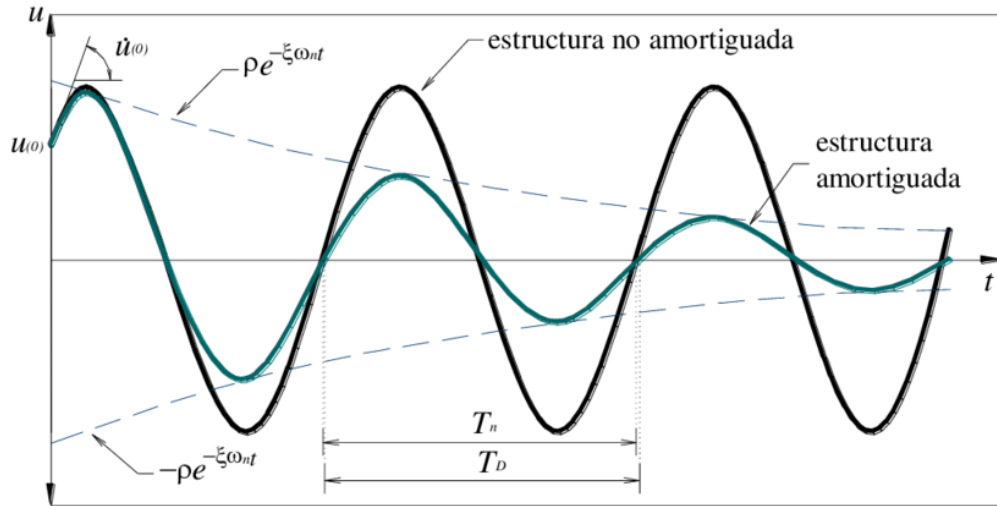


Imagen 2: Efecto de amortiguamiento vibración libre

Fuente: www.researchgate.net/figure/Figura-23-Efecto-del-amortiguamiento-vibracion-libre_fig2_277255393

En la vibración amortiguada existen fuerzas que van disipando la energía, esto ocasiona que la vibración vaya reduciéndose poco a poco hasta que se calme totalmente.

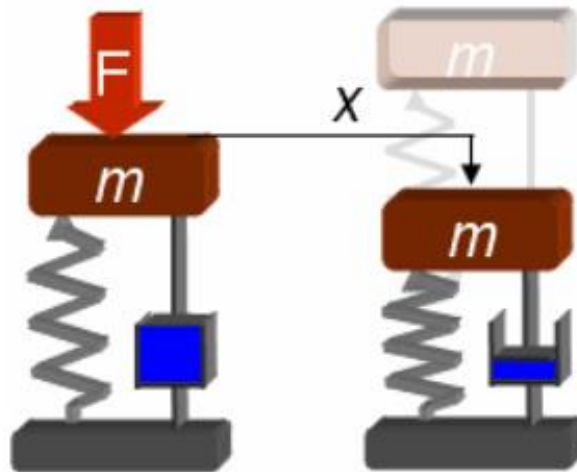


Imagen 3: Vibración amortiguada

Fuente: <https://iberisa.wordpress.com/2016/01/>

2.3.1.4. Vibración Lineal y No Lineal.

En caso de que los componentes que están asociados a la vibración (resorte, masa, amortiguador) están comportándose de manera lineal se la conoce como tal, pero si alguno de estos no lo es automáticamente se convierte en vibración no lineal. (Singiresu, 2012)

2.3.1.5. Vibración Determinística y Aleatoria.

En este caso el movimiento vibrante se determina absolutamente de sus condiciones iniciales, esto quiere decir que si se conoce dichas condiciones se puede “predecir” como se comportara el equipo a futuro. (Pastor, Calderon, & Gonzales, 2022)

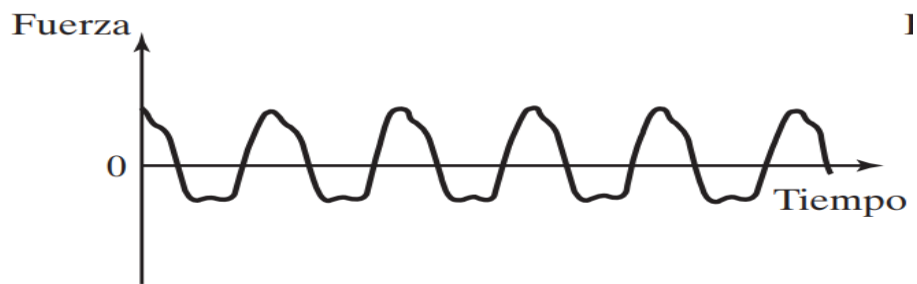


Imagen 4: Excitación determinística

Fuente: C:/Users/usuario%20Dell/Downloads/VIBRACIONES_MECANICAS_RAO.pdf

En el caso de las vibraciones aleatorias es totalmente diferente ya que, aunque se conozcan las condiciones iniciales, no se podrá predecir la condición del equipo a futuro, esto se debe ya que este sistema recibe fuerzas de manera aleatoria. (Pastor, Calderon, & Gonzales, 2022)

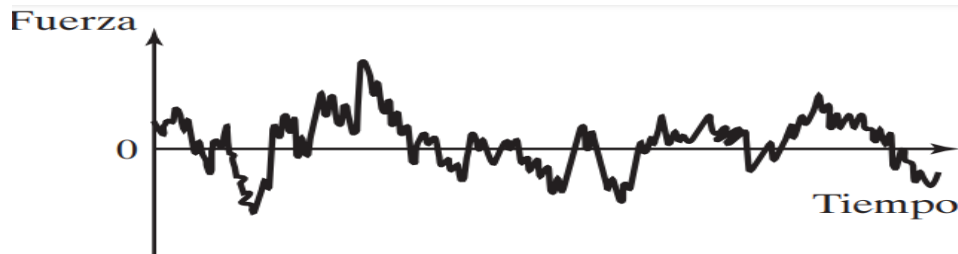


Imagen 5: Excitación aleatoria

Fuente: C:/Users/usuario%20Dell/Downloads/VIBRACIONES_MECANICAS_RAO.pdf

2.3.2. Parámetros de la Vibración

2.3.2.1. Frecuencia.

Comprender la frecuencia es esencial en el análisis de vibraciones ya que, es el número de ciclos de la vibración que se completa al segundo, esta se mide en hercios (Hz). Lo que significa que mientras más grande sea la frecuencia, las vibraciones que se generen serán mayores.

(TRACTIAN , s.f.)

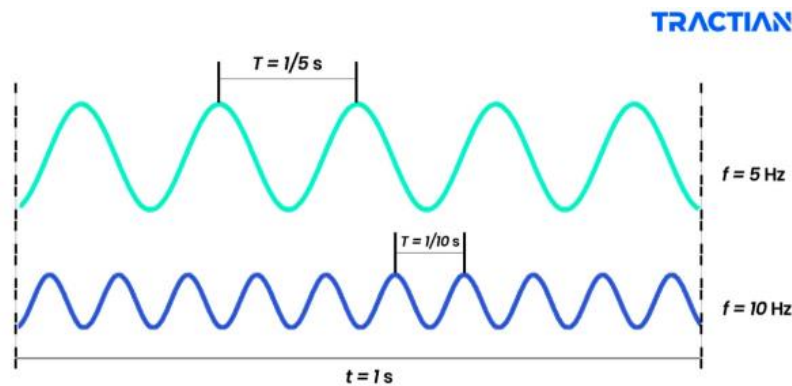


Imagen 6: Frecuencia y periodo de onda

Fuente: <https://traction.com/es/blog/analisis-de-vibraciones-e-interpretacion-de-datos>

2.3.2.2. Amplitud.

Se la conoce a la amplitud como la magnitud máxima que se desplaza en la vibración desde el punto de reposo. Su unidad de medida es metro o pulgada, y mientras mayor sea la amplitud, la intensidad incrementara. (Predictiva21, 2023)

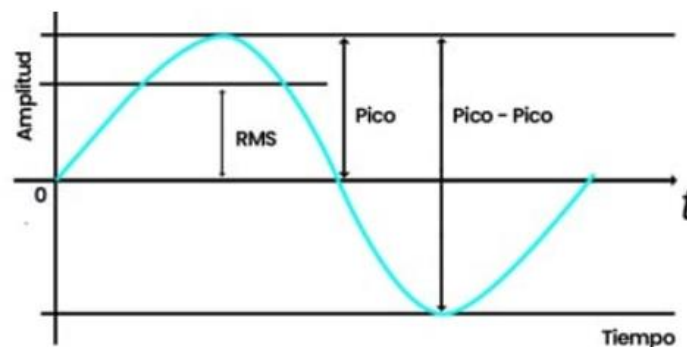


Imagen 7: Amplitud

Fuente: <https://predictiva21.com/vibracion-amplitud-velocidad-desplazamiento/>

2.3.2.3. Fase.

La fase es la medida de la posición en su ciclo, esta se puede medir en grados o radianes. Y sirve para compararse con otras fases de distintas vibraciones y determinar la diferencia de sus tiempos. (Fernandez, s.f.)

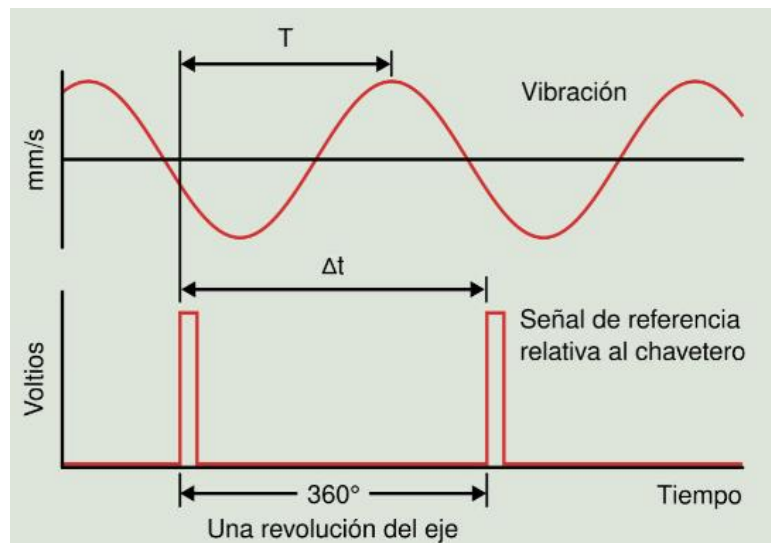


Imagen 8: Cálculo de la fase

Fuente: <https://power-mi.com/es/content/medida-de-fase>

2.3.3. Tácticas de Análisis de Vibraciones

2.3.3.1. Análisis de Dominio del Tiempo.

En esta técnica la señal del transductor o el sensor se lo califica como forma de onda y se la gráfica como el dominio del tiempo, (TRACTIAN , s.f.)

2.3.3.1.1. Forma de Onda.

Saber la importancia de la forma de onda es crucial, ya que determina fallos tales como: desequilibrios, rodamientos defectuosos y holguras excesivas.

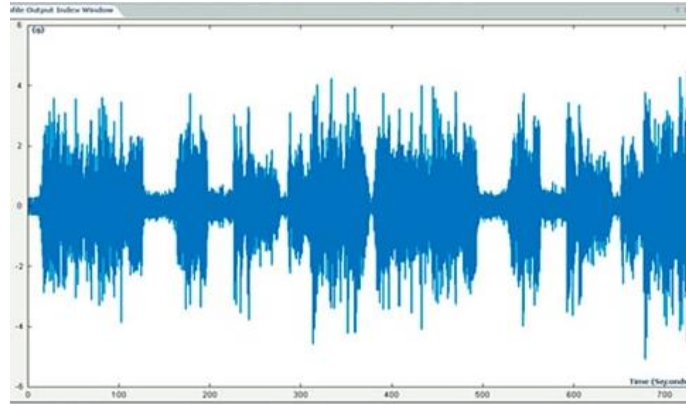


Imagen 9: Forma de onda en vibración

Fuente: <https://midebien.com/producto/control-de-vibraciones-de-replica-de-forma-de-onda-bruel-kjaer/>

2.3.3.1.2. Valor Máximo (peak).

Este determina la amplitud máxima de las vibraciones en un periodo en cuestión. Son necesarios ya que valora la profundidad del daño.

2.3.3.1.3. Valor Medio (RMS).

En caso opuesto al valor máximo este se encarga de determinar la magnitud promedio que se halla en una vibración mediante la siguiente formula:

$$RMS = \sqrt{\text{Amplitud}^2/2} = 0.707 * \text{Amplitud} \quad \text{E.c 2.1}$$

2.3.3.2. Análisis de Dominio de la Frecuencia.

Se realizan con la finalidad de obtener una gráfica de la amplitud de onda en base a la frecuencia, para obtener estos resultados se realiza un análisis de espectro. (TRACTIAN , s.f.)

2.3.3.2.1. Espectro de Frecuencias.

El rango de frecuencias muestra cómo se distribuye la energía de vibración en diversas frecuencias. Esto resulta ser útil para identificar la raíz de un problema, ya que cada tipo de fallo presenta rasgos espectrales únicos. (Fernandez, Power-MI, s.f.)

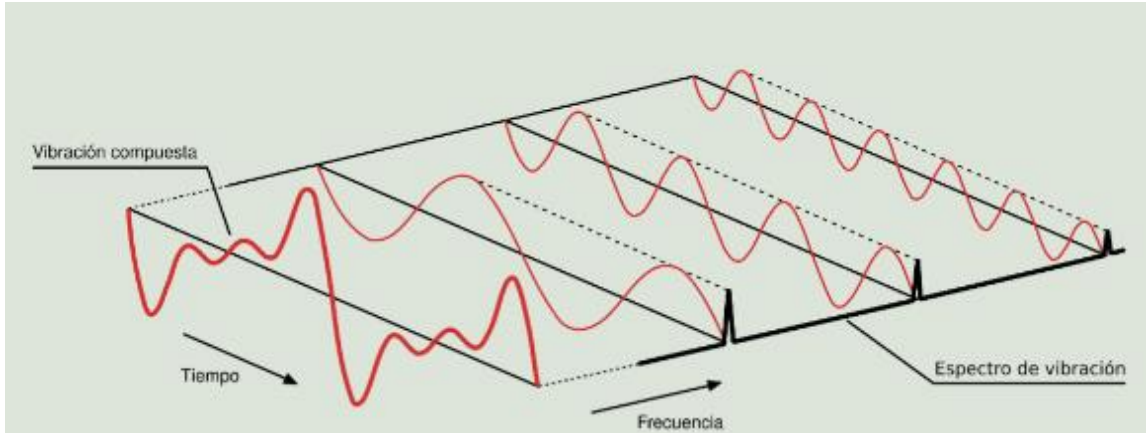


Imagen 10: Espectro de frecuencias de vibración

Fuente: <https://power-mi.com/es/content/estudio-de-las-vibraciones>

2.3.3.2.2. Armónicos.

Los armónicos sirven para determinar algunos fallos que se presenten en las máquinas ya sean rodamientos dañados o engranajes desgastados.

2.3.3.2.3. Frecuencia Natural.

Se refiere a la frecuencia a la cual un sistema vibra de forma autónoma, sin influencia de fuerzas externas. Identificar esta frecuencia es crucial para prevenir la resonancia, fenómeno que puede aumentar considerablemente la vibración y causar daños en el sistema. (Erbessd, s.f.)

2.3.3.3. Transformada de Fourier (FFT) y su Aplicación en Vibraciones.

Es un método utilizado para calcular el espectro de una forma de onda temporal, se trata de un proceso que separa una señal de vibración de una máquina en todas sus frecuencias de rotación o movimiento para cada uno de sus componentes. La FFT convierte la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. (TRACTIAN , s.f.)

Esta técnica de análisis de son necesarias para identificar tres parámetros principales en las vibraciones: aceleración, velocidad (RMS) y desplazamiento. Cada uno resalta ciertos rangos de frecuencia y pueden ser examinados juntos para diagnosticar posibles problemas.

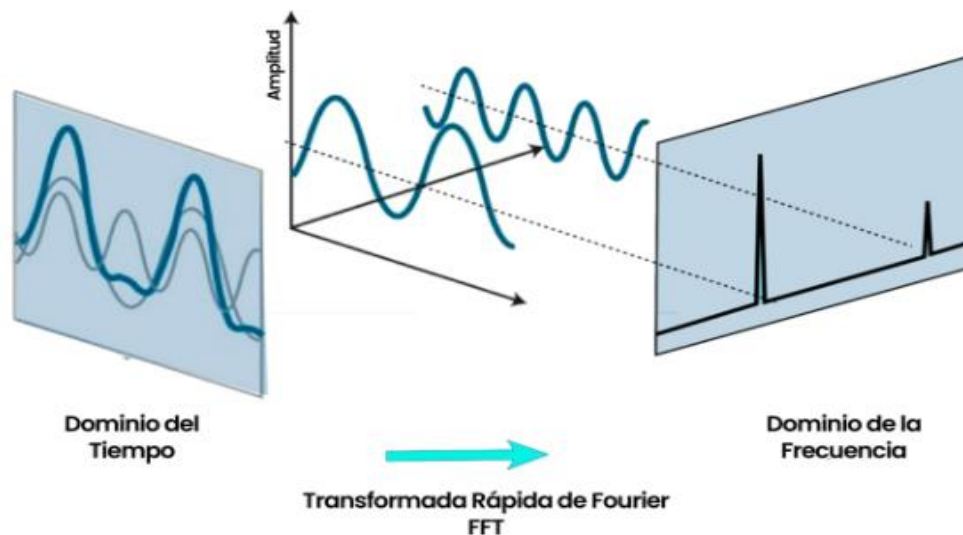


Imagen 11: Transformada rápida de Fourier

Fuente: <https://tractian.com/es/blog/analisis-de-vibraciones-e-interpretacion-de-datos>

2.3.4. Instrumentación y Equipos para el Análisis de Vibraciones

Para recolectar las muestras necesarias de las máquinas rotativas se pueden utilizar diversos aparatos, que se utilizan para detectar y diagnosticar las fallas en las máquinas, dependiendo el tipo de recolector que se utilice se obtendrán muestras más precisas o datos adicionales. (Saavedra, s.f)

2.3.4.1. Sensores y Transductores.

Los sensores y transductores son componentes muy recurrentes en el análisis de vibraciones, ya que transforman las vibraciones mecánicas en señales eléctricas que puede medirse y analizarse, estos sensores son de lo más efectivo ya que pueden ser sensores fijos o portátiles y de esta manera obtener muestras constantes o revisar máquinas de aleatorias. (Corona, Abarca, & Mares, 2014)

2.3.4.2. Acelerómetros.

Son del tipo más común para monitorear vibraciones, sirven para medir la aceleración y su tasa de cambio de la vibración.

2.3.4.3. Instrumentos de Medición y Análisis.

Estos son los software o equipos que están asociados a los equipos de medición, que es donde se exportan las muestras y se las examina.

2.3.5. Diagnósticos de Fallos Mediante Análisis de Vibraciones

Luego de conocer los diferentes tipos de vibraciones y su forma de analizar sus espectros, se identifica los picos espectrales, esto normalmente se los considera como componentes 1x según el análisis de vibraciones por Glen White. La sección siguiente se considerarán los más comunes fallos por vibraciones.

2.3.5.1. Desbalanceo.

El desbalance se lo conoce como esa distribución dispereja de la masa alrededor de un eje de rotación.

Según (White) habla del desbalance como “Una masa excéntrica, girando como una piedra atada a un cordón generará una fuerza centrífuga en su pivote central a la frecuencia de una vez la velocidad de revolución” (pág. 105), por lo que generará la dirección de esta fuerza hacia afuera y de manera radial. Esta fuerza se la calcula de la siguiente manera:

$$F = I_m r \omega^2 \quad \text{E.c 2.2}$$

Donde:

F = fuerza de desbalance



$m =$ masa

$r =$ distancia del pivot

Las condiciones de desequilibrio que afectan a las máquinas son principalmente estáticas y dinámicas. El desequilibrio estático ocurre cuando el centro de giro de un rotor no coincide con su centro de masa, o su centro de gravedad no está en su eje de giro. Según (White) dice que “Esto resulta en una fuerza centrífuga, que se aplica en el rodamiento a la frecuencia ω . Esta fuerza F es proporcional al cuadrado de la velocidad del rotor” (pág. 106), lo que significa que las máquinas de gran velocidad necesitan un balanceo con mucha más precisión que las máquinas de poca velocidad. El desequilibrio dinámico se lo conoce como la suma de dos desbalances, el desbalance estático y el desbalance de par de fuerza, que no es más que la fuerza centrífuga en los rodamientos que están en fase opuesta, cuando esto están girando.

2.3.5.1.1. Gravedad de Desbalanceo.

La gravedad de desbalanceo dependerá del tamaño de la máquina, el tipo de máquina y del nivel de vibración que está generando. Tomaremos como guía máquinas de 1800 a 3600 RPM.

Tabla 1: Diagnóstico del desbalanceo

1X Nivel de vibración (VdB)	Diagnóstico	Prioridad de reparación
Menos de 108 VdB	Ligero desbalanceo	Ninguna recomendación
108 VdB - 114 VdB	Desbalanceo moderado	Deseable
115 VdB – 124VdB	Desbalanceo grave	Importante
Más de 125 VdB	Desbalanceo extremo	Obligatorio

Fuente: <https://termogram.com/images/pdf/analisis-vibraciones/introduccion-al-analisis-de-vibraciones-azima-dli.pdf>

2.3.5.1.2. Problemas de desbalanceo

Algunos problemas que causan desbalanceo en las máquinas son los siguientes:

- La acumulación de polvo en los rotores
- Las partes coladas, como burbujas, agujeros de soplado y porosidad, no son uniforme
- Una excentricidad en el rotor
- Flexión con rodillos, particularmente en máquinas de papel
- Errores producidos por máquinas

2.3.5.2 Desalineación.

La desalineación ocurre cuando las líneas centrales de flechas acopladas no corresponden. La desalineación está dividida en dos partes, la cual corresponde la desalineación paralela donde nos indica que, si las líneas centrales de las flechas son paralelas, pero estas no coinciden, y la desalineación angular, la cual ocurre cuando dos flechas se unen, pero no son paralelas. (Royo, Rabanaque, & Torres, s.f)

2.3.5.2.1 Causas.

Las diferentes desalineaciones son provocadas por algunas condiciones, las cuales son:

- Mal ensamble
- Después de hacer el respectivo ensamble, los componentes tienen a desplazarse o cambiar su posición inicial
- Distorsión causada por diferentes fuerzas
- El aumento de la temperatura extiende la estructura de la máquina

2.3.5.3 Fallos en Rodamientos.

Los rodamientos deben tratarse con la mayor precisión posible porque son la base dinámica de cualquier equipo o máquina rotativa, la cual producirá un efecto vibratorio si no se coloca adecuadamente (Royo, Rabanaque, & Torres, s.f), además de esto existen diferentes causas que hace que el rodamiento falle y produzca este efecto vibratorio las cuales se señalan a continuación:

- Sobrecarga o montaje inadecuado
- Falta de lubricación
- Contaminación
- Corrosión por rozamiento
- Corrosión por humedad
- Erosión eléctrica
- sobrecalentamiento

2.4. Máquinas Rotativas

La característica principal en estas máquinas está en su movimiento rotativo de uno o varios de sus componentes. Dicho movimiento se genera mediante energía, las cuales pueden ser mecánica, eléctrica, hidráulica o neumática.

La utilización de las máquinas rotativas está fuertemente visto en los sectores industriales, ya sea manufacturación, agricultura o generación de energía, esto se debe a su confiabilidad y a su producción de niveles de potencia altos. (Cabanas, Melero, Orcajo, Cano, & Sariego, 1998)

2.4.1. Principales Características de las Máquinas Rotativas

- Movimiento rotativo
- Conversión de energía

- Amplia gama de aplicaciones
- Versatilidad
- Eficiencia
- Altos niveles de potencia

2.4.2. Clasificación de las Máquinas Rotativas

Dichas máquinas tienen una amplia diversidad de categorías debido a su versatilidad de estas, ya sea dependiendo el tipo de energía utilizado, el movimiento que realizan o la función que desempeñan.

- **Máquinas rotativas hidráulicas**, son las cuales tienen como fuente de energía el agua el cual genera su movimiento rotativo.
- **Máquinas rotativas neumáticas**, utilizan el aire comprimido como fuente de energía.
- **Máquinas rotativas eléctricas**, la energía que genera el movimiento rotativo es la eléctrica.

2.4.3. Ejemplos de Máquinas Rotativas

- **Motores**; motores de combustión interna, motores eléctricos, motores hidráulicos, motores neumáticos, etc.
- **Bombas**; bombas centrífugas, bombas de desplazamiento positivo, bombas hidráulicas, bombas neumáticas, etc.
- **Turbinas**; turbinas hidráulicas, turbinas de vapor, turbinas eólicas, turbinas de gas, etc.
- **Compresores**; compresores dinámicos, compresores de desplazamiento positivo, compresores centrífugos, compresores de tornillo.

- **Generadores eléctricos;** generadores de inducción, generadores síncronos, generadores de corriente continua.

CAPITULO III. DESARROLLO DEL TRABAJO

En este apartado se detallará la metodología que se siguió para cumplir los objetivos de este proyecto “Análisis de vibraciones como método de mantenimiento predictivo en máquinas rotativas”. De igual forma todas sus etapas, procedimientos y datos requeridos para su desarrollo.

3.1. Detalles Técnicos del HF+s PO (DynaPortable)

Este sensor inalámbrico está diseñado para detectar síntomas de fallos o defectos en maquinaria y equipos en diversas aplicaciones de campo. Consta con un amplio rango de frecuencias, y proporciona un monitoreo triaxial completo en vibraciones, adecuado para equipos de alta y baja rotación. Además, viene asociado a una plataforma en línea, evitando las instalaciones de algún equipo o programa adicional, y ofrece herramientas adicionales que ayudan en el análisis de datos y permiten un monitoreo constante en los activos. (Dynamox, 2024)



Imagen 12: HF+s PO (DynaPortable)
Fuente: <https://dynamox.net/es/dynaportable>

Tabla 2: Especificaciones técnicas del DynaPortable

Modelo	HF+s PO
Dimensión	39 x 39 x 64 mm
Material de la carcasa	LEXAN™
Material del pasador y de la base	INOX 316 L
Fijación	Base magnética
Acelerómetro	MEMS triaxial
Límite de impacto del acelerómetro	10.000 g en 0,2 ms
Temperatura de operación^{1,2}	$-10^{\circ}\text{C} \leq T \leq 84^{\circ}\text{C}$

Fuente: <https://content.support.dynamox.net/wp-content/uploads/2024/07/HFSPO-072024-01-EN.pdf>

Tabla 3: Comunicación y sistema del DynaPortable

Bluetooth	BLE 5.3 / 2400 – 2483,5 MHz
Alcance⁴	100 m
Potencia de salida RF	0,4 dBm
Comunicación con la App	Android e IOS

Fuente: <https://content.support.dynamox.net/wp-content/uploads/2024/07/HFSPO-072024-01-EN.pdf>

Tabla 4: Monitoreo espectral y forma de onda

Herramientas de análisis	Espectro
	Filtros de frecuencia
	Cepstrum
	Cascada espectral
	Autocorrelación
	Forma de onda circular y orbital
	Métricas avanzadas: RMS em multibandas, Peak to Peak, Curtosis, FC, FC+, Energía de Carpet y Envolverte RMS

Respuesta de frecuencia ($\pm 5\%$)	5 kHz
Respuesta de frecuencia ($\pm 3\text{dB}$)	5kHz
Densidad de ruido espectral	$<75 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
Frecuencia de muestreo	Hasta 26 kHz
Resolución mín. en frecuencia	0.006 Hz (8 bits) y 0, 012 Hz (16 bits)
Resolución mín. en amplitud¹	16 mg (8 bits) y 61 μg (16 bits)
Rango de amplitude	Hasta $\pm 16\text{g}$
Líneas de resolución (LOR)	98.304 (uniaxial) y 32.768 (triaxial)
Frecuencia máxima	571 Hz hasta 13 kHz (configurable)
Tiempo máx. de adquisición	172,2 s (uniaxial) y 57.3 s (triaxial)

Fuente: <https://content.support.dynamox.net/wp-content/uploads/2024/07/HFSPO-072024-01-EN.pdf>

Para una adecuada recolección de muestras es necesario colocar el sensor alineado con el eje central de la máquina.

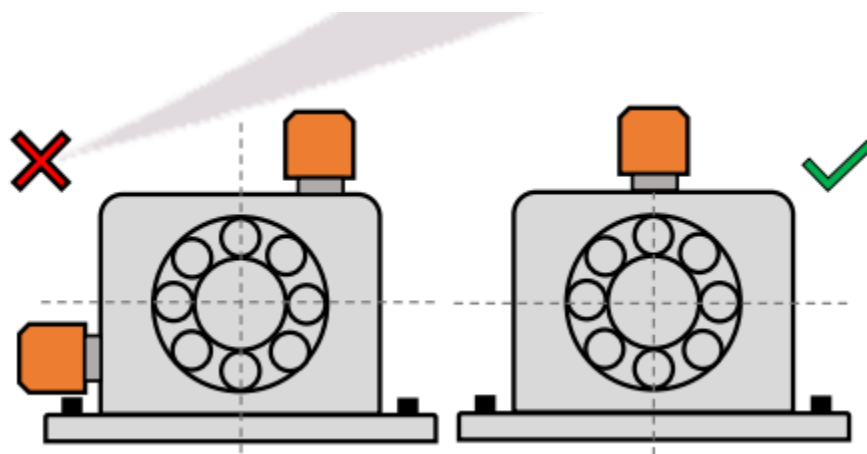


Imagen 13: Posición correcta del sensor

Fuente: <https://content.support.dynamox.net/wp-content/uploads/2024/07/HFSPO-072024-01-EN.pdf>

3.2. Desarrollo de Competencias en el Uso del Software Dynapredict

Este software DynaPredict opera en una plataforma en línea, para todos los clientes de Dynamox, esto con el fin de subir las muestras recogidas a la nube obteniendo varios beneficios

como son: acceso remoto y colaboración con personas especializadas en el campo, almacenamiento y gestión de datos, procesamiento y análisis avanzado. (Dynamox, 2024)

Para lograr acceder y crear el árbol de activos de forma correcta se deberán obtener ciertos permisos en la etapa de creación de cuenta, y de ahí se podrá acceder a la interfaz principal donde de lado izquierdo se podrán observar tres apartados principales: Integrado, predictivo y sensorial.

3.2.1. Integrado

En este apartado se muestra una visión general de los activos agregados de nuestra área de trabajo, que se dividen en otras funciones.

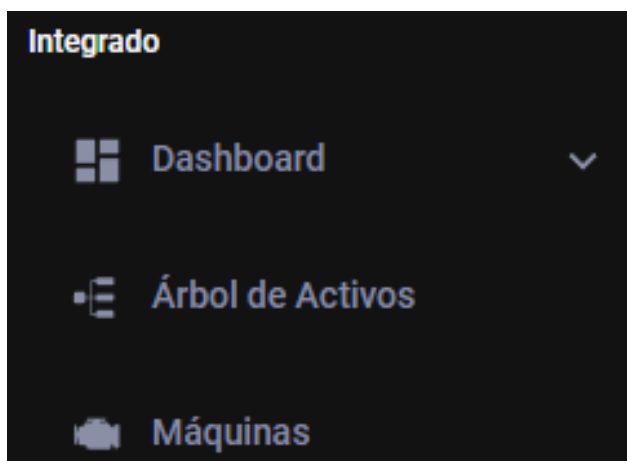


Imagen 14: Sección de Integrado de DynaPredict
Fuente propia.

3.2.1.1. Dashboard

Esta sección agrupa los datos obtenidos tanto de predicción y sensitivo, las cuales son:

Indicadores de salud: Aquí se muestra el estado de los activos por sectores tomando en cuenta los módulos predictivos y sensoriales.

Informes: Se muestra todos los análisis predictivos y sensitivos realizados

3.2.1.2 Árbol de Activos.

Permite visualizar en orden todos los activos creados de la empresa, teniendo como objetivo la organización y gestión de los activos.

3.2.1.3. Máquinas.

Se muestra las máquinas añadidas a nuestro árbol de activos, así como los spots de cada máquina al ingresar a estas, tomando en cuenta el módulo predictivo y sensitivo se exponen las anomalías detectadas que presentan.

3.2.2. Predictivo

En esta sección, se presenta las funciones más importantes las cuales son para el monitoreo predictivo, teniendo presente los datos obtenidos de los sensores de vibración y temperatura de Dynamox (DynaPortable).

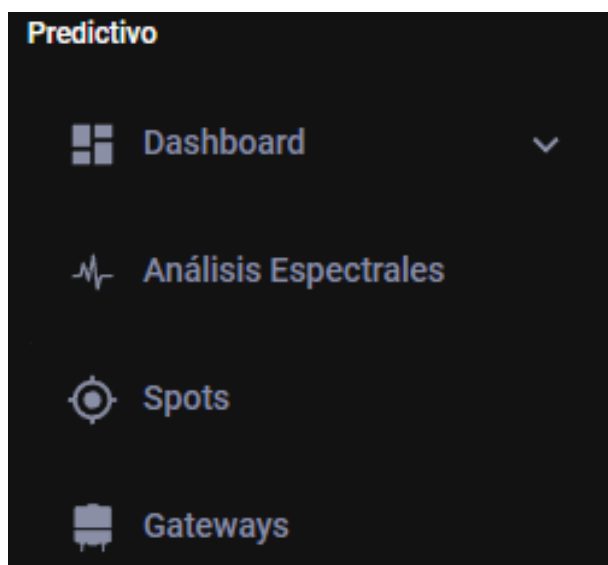


Imagen 15: Sección de Predictivo de DynaPredict
Fuente propia

Dashboard DMA: Es el panel de ayuda en toma de decisiones, ya que se indica la salud de los activos, según la configuración agregada en cada spot saltara alguna alarma.

Análisis espectral: Se visualizan todos los espectros realizados por spots y máquinas.

Spots: Se muestran todos los puntos de seguimiento de las máquinas creados.

Gateways: Es el dispositivo de recolecta de datos de los sensores que se agregan permanentemente a los activos.

3.2.3. *Sensitivo*

En esta sección se encuentran disponibles varias funciones para la creación y administración de rutas. Estas funciones incluyen un Dashboard que consta de seis paneles para la toma de decisiones sobre las rutas y anomalías reportadas, un panel de Grupos de Adherencia que muestra un grupo de usuarios para el control de cumplimiento de las rutas, una lista de Gerente de Rutas con todas las rutas de inspección y opciones para crear y administrar nuevas o existentes, y por último una sección de Modelos de Checklist que permite gestionar y crear listas de verificación.

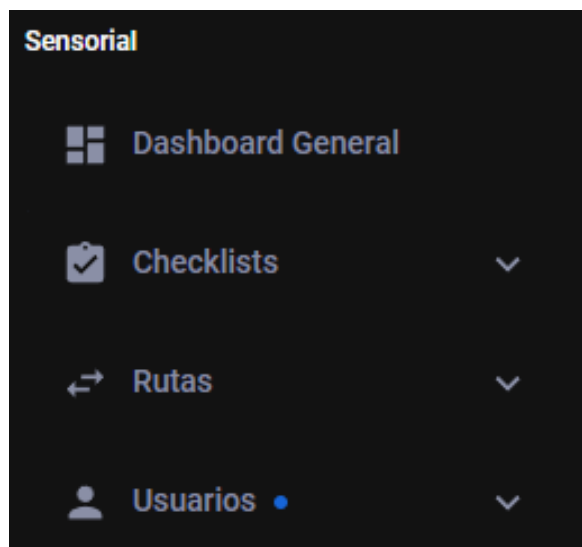


Imagen 16: Sección de Sensorial de DynaPredict

Fuente propia

3.3. Observación del Proceso Productivo

Antes de poder ingresar a la empresa se tuvo que adquirir ciertos conocimientos básicos, como son las normas de seguridad y los riesgos que se pueden presentar en el área de la planta (Sala de compresores de amoniaco). Posteriormente en compañía del supervisor de mantenimiento del área se realizó un recorrido por la sala, para la explicación de los procesos que se llevan a cabo y que tipo de mantenimiento se les realiza a dichos compresores así mismo como las fallas que pueden surgir.

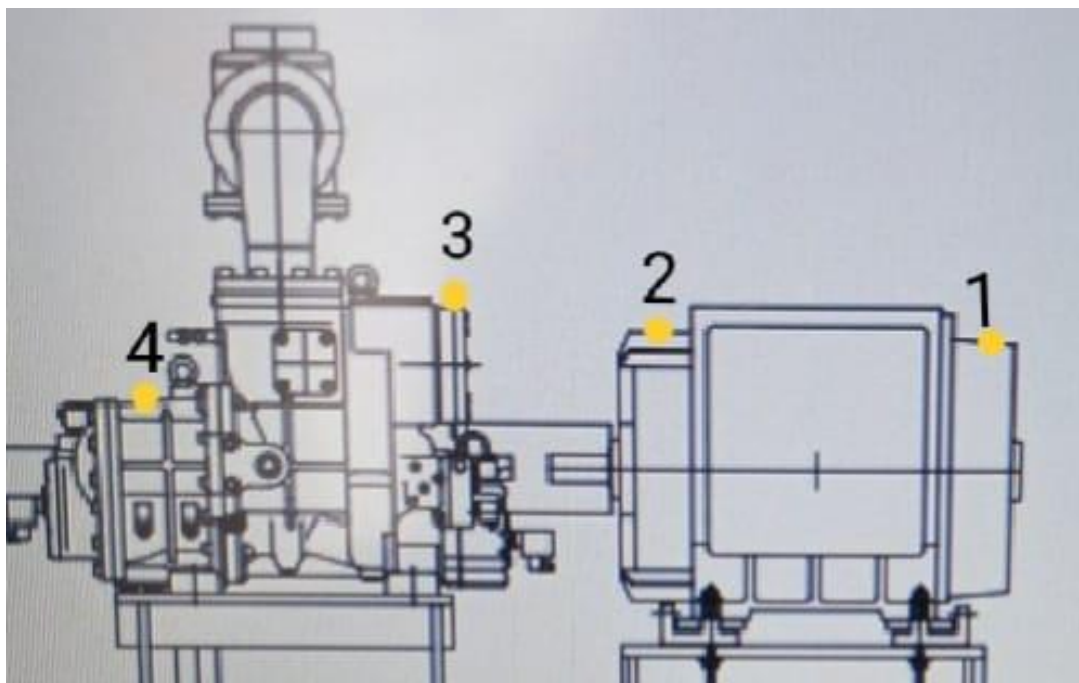
3.4. Recopilación de las Características de Diseño y Condición de Funcionamiento de los Equipos

Para la recopilación de las características y funcionamiento de los activos fue necesario revisar los manuales de fabricante, en este caso los tres compresores a los que se le saco la muestra eran iguales, de igual manera también se revisó la placa de la máquina.

3.5. Determinación de los Puntos de Medición

En esta etapa se determinó los puntos de medición (spots) de los compresores, con el fin de medir en un solo lugar para lograr obtener datos uniformes a lo del mantenimiento, hay dos spots por el lado del motor que están en lado de acople y no acople de los rodamientos, y por parte del compresor también se ubicaron dos spots en el lado de acople y no acople de los engranajes, dando un total de cuatro spots por compresor.

Se determino un punto en cada lado de acople y no acople por el motivo de que el sensor es triaxial (lee las vibraciones en las tres direcciones, vertical (V), horizontal (H) y axial (A)), pero dependiendo del equipo de medición que se utilice puede existir más puntos de medición.



Compresor		Motor eléctrico	
Spot N°3	Lado de acople	Spot N°1	Lado de no acople
Spot N°4	Lado de no acople	Spot N°2	Lado de acople

Imagen 17: Puntos de medición del compresor de tornillo GEA FES
Fuente: Manual de fabricante GEA FES, Inc

3.6. Definición de las Rutas de Medición de Vibración

Es necesario llevar un orden para evitar cualquier tipo de confusión que pueda existir al momento de tomar las muestras, por esto se organizó una ruta de medición que facilitaron el trabajo.

En este caso se estableció tres rutas para una medición organizada en la sala de compresores de amoniaco:

3.6.1. Ruta A: Compresor 1

- Motor Eléctrico del compresor GEA FES lado de no acople (spot 1)
- Motor Eléctrico del compresor GEA FES lado de acople (spot 2)
- Compresor GEA FES lado de acople (spot 3)
- Compresor GEA FES lado no acople (spot 4)

3.6.2. Ruta B: Compresor 2

- Motor Eléctrico del compresor GEA FES lado de no acople (spot 1)
- Motor Eléctrico del compresor GEA FES lado de acople (spot 2)
- Compresor GEA FES lado de acople (spot 3)
- Compresor GEA FES lado no acople (spot 4)

3.6.3. Ruta C: Compresor 3

- Motor Eléctrico del compresor GEA FES lado de no acople (spot 1)
- Motor Eléctrico del compresor GEA FES lado de acople (spot 2)
- Compresor GEA FES lado de acople (spot 3)
- Compresor GEA FES lado no acople (spot 4)

3.7. Creación de la Base de Datos en el Software DynaPredict

Ya teniendo creado el árbol de activos en el software se requirió implantar los datos del compresor de tornillo:

Tabla 5: Ficha de datos del compresor de tornillo GEA FES

Potencia de salida	150 HP (110 kW)
Velocidad Nominal	3555 rpm
Frecuencia	60Hz
Polos	2
Deslizamiento	1.25%
Voltaje nominal	460 V
Corriente nominal	162 V

Fuente: Manual de compresor de tornillo GEA

3.8. Normativas ISO y Limitaciones de Vibraciones: Análisis y Aplicación en Maquinaria Rotativa

3.8.1. Normas ISO 10816

La normativa ISO 10816 es un grupo de estándares donde se define los parámetros de vibraciones de las máquinas rotativas en función de su tipo de montaje y tamaño, para determinar si es necesario realizar acciones de mantenimiento. Podemos dividir en 4 clases o grupos las diferentes máquinas eléctricas:

Clase 1: Unidades con conductor y conducido separados o unidades acopladas que comprenden maquinaria operativa aproximadamente de 15KW (aproximadamente 20 hp).

Clase 2: Motores eléctricos de 15KW (20hp) a 75KW (100hp) sin cimentación especial o motores montados rígidamente, motores hasta 300KW (400hp) montados sobre cimentación especial.

Clase 3: Grandes motores primarios y otras maquinarias grandes con grandes conjuntos giratorios montados sobre cimientos rígidos y pesados que son razonablemente rígidos en la dirección de la vibración.

Clase 4: Incluye grandes motores primarios y otras máquinas grandes con grandes conjuntos giratorios montados sobre cimientos que son relativamente blandos en la dirección de la vibración medida (es decir, generadores de turbina y turbinas de gas con potencia superior a 10 MW (aproximadamente 13500 hp).

Tabla 6: Límites de rango y velocidad y clases de máquinas

Velocidad		Límites de rango de velocidad y clases de máquinas			
mm/s RMS	Pulg/s Pico	Máquinas pequeñas clase I	Máquinas medianas clase II	Máquinas grandes	
				Soportes rígidos clase III	Soportes menos rígidos clase IV
0.28	0.02	Bien	Bien	Bien	Bien
0.45	0.03				
0.71	0.04				
1.12	0.06	Satisfactorio	Satisfactorio	Satisfactorio	Bien
1.80	0.10				
2.80	0.16	Insatisfactorio	Insatisfactorio	Satisfactorio	Satisfactorio
4.50	0.25				
7.10	0.40	Inaceptable	Inaceptable	Insatisfactorio	Insatisfactorio
11.20	0.62				
18.00	1.00				
28.00	1.56				
45.00	2.51				

Fuente: <https://sedisaservicios.com/activos-industria/normas-iso-para-evaluar-la-severidad-de-vibracion-en-maquinas-rotativas/>

3.8.2. ISO 10816-3 Severidad de Vibración en Máquinas Críticas

Estas mediciones generales son específicamente para evaluar las vibraciones de máquinas industriales, con una potencia de 15KW y un rango de velocidad de 120 rmp a 15000 rpm.

Imagen 18: ISO 10816-3 tabla de evaluación de las vibraciones en velocidad

Velocidad mm/s (RMS)	GRUPO 2&4		GRUPO 1&3	
	Flexible	Rigido	Flexible	Rigido
	Ocurre daño			
11				
7.1		Operación Restringida		
4.5		Operación sin restricciones		
3.5				
2.8				
2.3				
1.4				
	Recien puesto en servicio			

Fuente: <https://sedisaservicios.com/activos-industria/normas-iso-para-evaluar-la-severidad-de-vibracion-en-maquinas-rotativas/>

Imagen 19: ISO 10816-3 tabla de evaluación de la vibraciones en desplazamiento

Desplazamiento μm (Pico a Pico)	GRUPO 4		GRUPO 3	
	Flexible	Rigido	Flexible	Rigido
	Ocurre daño			
396				
320				
255				
158		Operación Restringida		
102		Operación sin restricciones		
79				
62				

51			
31	Recien puesto en servicio		

Fuente: <https://sedisaservicios.com/activos-industria/normas-iso-para-evaluar-la-severidad-de-vibracion-en-maquinas-rotativas/>

3.8.3. 10816-8 Severidad de Vibración en Compresores Alternativos

En este apartado se pueden apreciar las recomendaciones de severidad de vibración en sus diferentes valores.

Imagen 19: Valores constantes de desplazamiento en horizontal

Valores de desplazamiento de vibración r.m.s. para compresores horizontales mm	Límite de la zona de evaluación	Severidad de vibración					
		Fundación	Bastidor (superior)	Cilindro (lateral)	Cilindro (vástago)	Amortiguadores	Tubería
0.454		D	D	D	D	D	D
0.382		D	D	D	D	D	D
0.310		D	D	D	D	D	D
0.302		D	D	D	D	D	D
0.255		D	D	D	D	D	D
0.207		D	D	D	D	D	D
0.202		D	D	D	D	D	D
0.191		D	D	D	D	D	D
0.170		D	D	D	D	D	D
0.139		D	D	D	D	D	D
0.127		D	D	D	D	D	D
0.084		D	D	D	D	D	D
0.072		D	D	D	D	D	D
0.048		C	C	C	C	C	C
0.032		B	B	B	B	B	B
		A	A	A	A	A	A

Fuente: <https://sedisaservicios.com/activos-industria/normas-iso-para-evaluar-la-severidad-de-vibracion-en-maquinas-rotativas/>

Imagen 20: Valores constantes de desplazamiento en vertical

Valores de desplazamiento de vibración r.m.s. para compresores verticales mm	Límite de la zona de evaluación	Partes del sistema de compresor					
		Fundación	Bastidor (superior)	Cilindro (lateral)	Cilindro (vástago)	Amortiguadores	Tubería
0.454					D	D	D
0.382				D			
0.310					C	C	C
0.302				C			
0.255						B	B
0.207							
0.202							
0.191			D		B		
0.170				B			
0.139			C				
0.127							
0.084			B				A
0.072		D				A	
0.048		C			A		
0.032		B		A			
		A	A				

Fuente: <https://sedisaservicios.com/activos-industria/normas-iso-para-evaluar-la-severidad-de-vibracion-en-maquinas-rotativas/>

Imagen 21: Valores constantes de velocidad en horizontal

Valores de velocidad de vibración r.m.s. para compresores horizontal mm/s	Límite de la zona de evaluación						
		Fundación	Bastidor (superior)	Cilindro (lateral)	Cilindro (vástago)	Amortiguadores	Tubería
28.5					D	D	D
24.0				D			
19.5						C	C
19.0					C		
16.0				C			
13.0						B	B
12.7							
12.0			D		B		
10.7				B			
8.7				C			
8.0							
5.3			B				A
4.5		D				A	
3.0		C			A		
2.0		B		A			
		A	A				
Partes del sistema de compresor		Fundación	Bastidor (superior)	Cilindro (lateral)	Cilindro (vástago)	Amortiguadores	Tubería

Fuente: <https://sedisaservicios.com/activos-industria/normas-iso-para-evaluar-la-severidad-de-vibracion-en-maquinas-rotativas/>

Imagen 22: Valores constantes de velocidad en vertical

Valores de velocidad de vibración r.m.s. para compresores verticales mm/s	Límite de la zona de evaluación						
		Fundación	Bastidor (superior)	Cilindro (lateral)	Cilindro (vástago)	Amortiguadores	Tubería
28.5				D	D	D	D
24.0				D			
19.5						C	C
19.0					C		
16.0				C			
13.0						B	B
12.7							
12.0			D		B		
10.7				B			
8.7							
8.0							A
5.3			B			A	
4.5		D					
3.0		C			A		
2.0		B		A			
		A	A				

Fuente: <https://sedisaservicios.com/activos-industria/normas-iso-para-evaluar-la-severidad-de-vibracion-en-maquinas-rotativas/>

Imagen 23: Valores constantes de aceleración en horizontal

Valores de aceleración de vibración r.m.s. para compresores horizontal m/s ²	Límite de la zona de evaluación						
		Fundación	Bastidor (superior)	Cilindro (lateral)	Cilindro (vástago)	Amortiguadores	Tubería
35.8					D	D	D
30.2				D			
24.5					C	C	C
23.9					C		
20.1				C			
16.3						B	B
16.0							
15.1		D			B		
13.5				B			
10.9			C				
10.1							
6.7			B				A
5.7		D				A	
3.8		C			A		
2.5			B	A			
		A	A				

Fuente: <https://sedisaservicios.com/activos-industria/normas-iso-para-evaluar-la-severidad-de-vibracion-en-maquinas-rotativas/>

Imagen 24: Valores constantes de aceleración en vertical

Valores de aceleración de vibración r.m.s. para compresores vertical m/s ²	Límite de la zona de evaluación						
		Fundación	Bastidor (superior)	Cilindro (lateral)	Cilindro (vástago)	Amortiguadores	Tubería
35.8					D	D	D
30.2				D			
24.5						C	C
23.9					C		
20.1				C			
16.3						B	B
16.0							
15.1			D		B		
13.5				B			
10.9			C				
10.1							
6.7			B				A
5.7		D				A	
3.8		C			A		
2.5		B		A			
		A	A				

Fuente: <https://sedisaservicios.com/activos-industria/normas-iso-para-evaluar-la-severidad-de-vibracion-en-maquinas-rotativas/>

CAPITULO IV. RESULTADOS

4.1. Compresor de tornillo 1

4.1.1. Lado libre del compresor

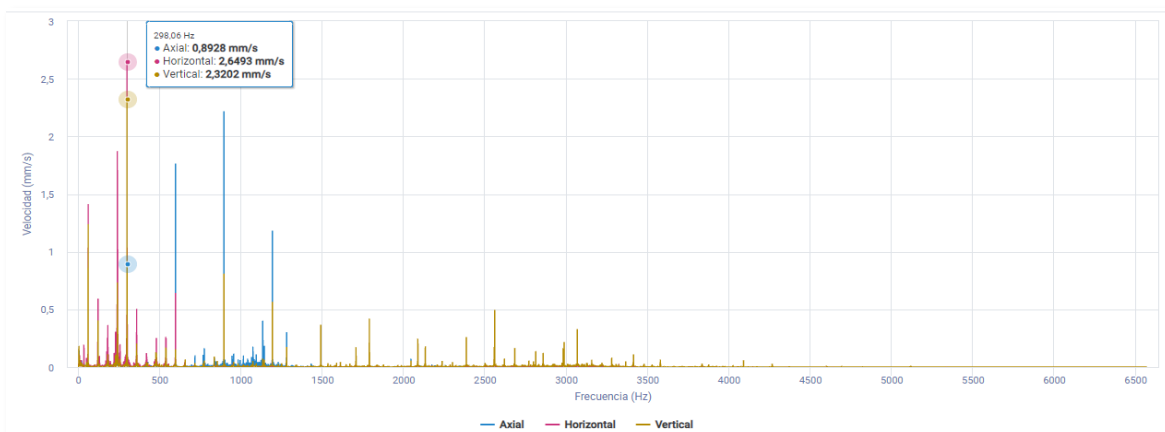


Imagen 25: Plano espectral en rango de velocidad- frecuencia (10/07/24)

Fuente propia

Como se observa en la gráfica, se presentan picos altos que demuestran posibles anomalías en la parte libre del compresor. De acuerdo con la normativa ISO 10816, los valores de estos picos son admisibles, pero se encuentran a punto de llegar al rango de sus límites. En este caso, es necesario monitorear con más frecuencia estos picos para evitar que superen los límites establecidos y garantizar el correcto funcionamiento del compresor.

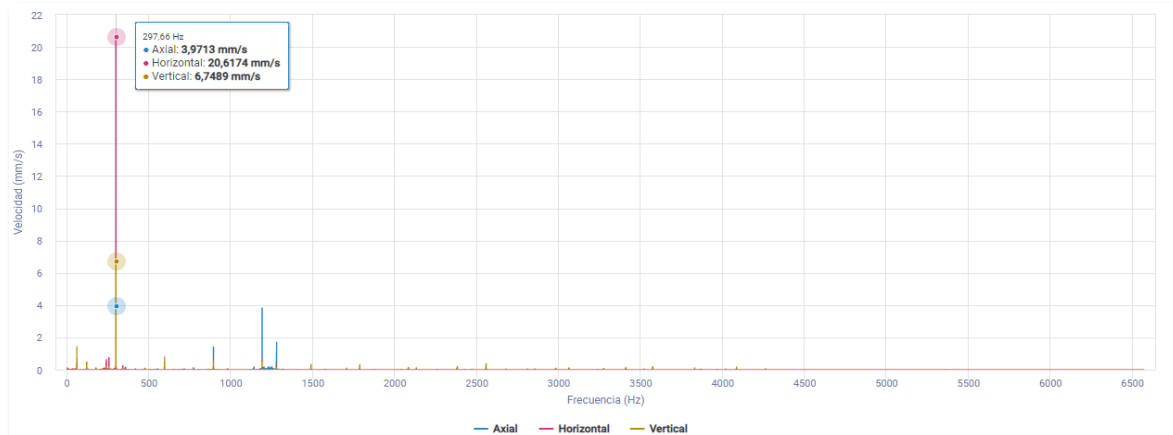


Imagen 26: Plano espectral en rango de velocidad- frecuencia (12/07/24)

Fuente propia

Se tomó una muestra nueva, donde se observa un pico más elevado que en la gráfica anterior.

De acuerdo con la normativa ISO 10816, los valores de este pico no son permisibles, lo que indica la presencia de un problema. Lo siguiente que se debe hacer es desplegar un número específico de gráficas del rodamiento para identificar una zona determinada de falla y continuar observando los picos altos.

A continuación, se muestra varias gráficas del rodamiento en sus diferentes aspectos como son los BPFO, BPFI, BSF, FTF, esto con el fin de determinar con más precisión las diferentes fallas de dicho rodamiento.

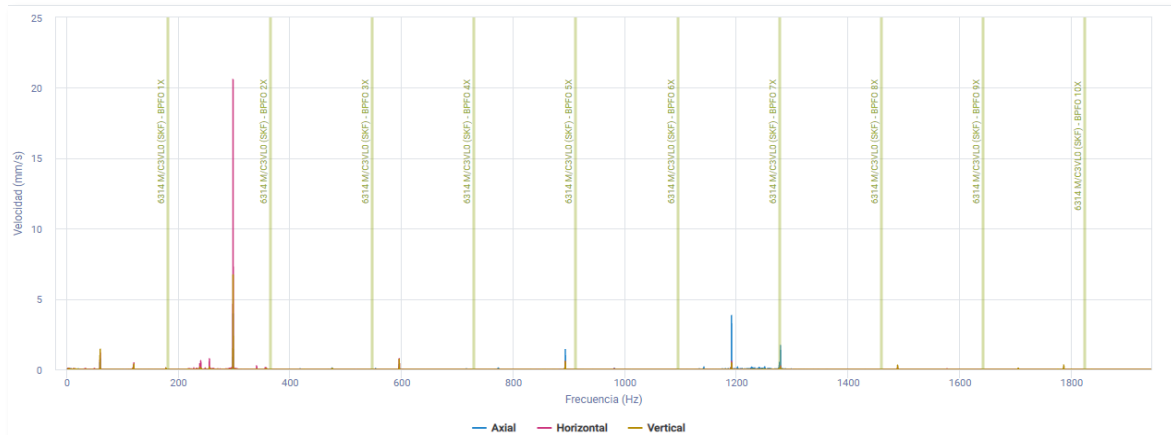


Imagen 27: Plano de frecuencia de paso del balón exterior (BPFO)

Fuente propia

En la gráfica se muestra la frecuencia de deterioro de la pista exterior del rodamiento, donde las franjas indican los posibles puntos de fallo. Si estas franjas coinciden con algún pico elevado, se demostrará que existe una falla en esa parte del rodamiento. Como se observa, hay un pico que coincide, pero no es grave; por lo tanto, no hay falla en la pista exterior del rodamiento.

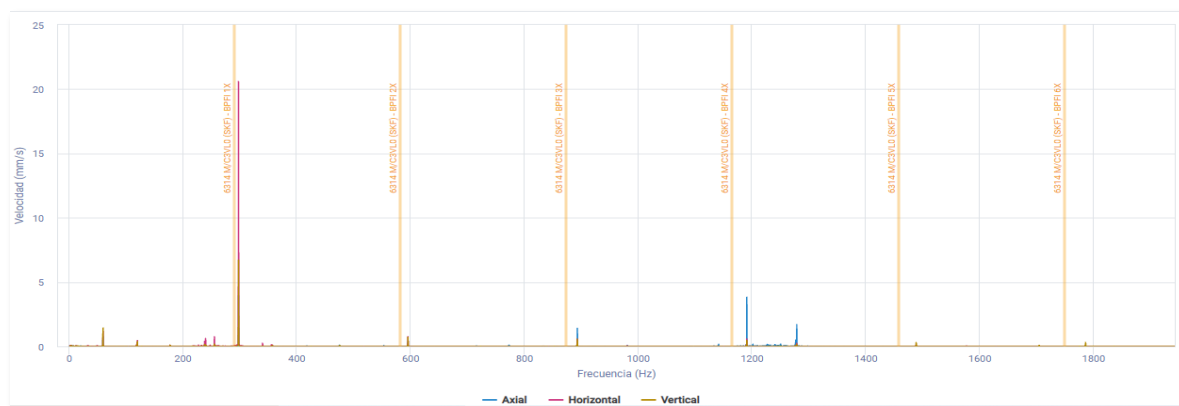


Imagen 28: Plano de frecuencia de paso del balón interior (BPFI)

Fuente propia

La gráfica muestra la frecuencia de deterioro de la pista interna del rodamiento, donde las franjas indican los posibles puntos de fallo. Si estas franjas coinciden con algún pico elevado, se demostrará que existe una falla en esa parte del rodamiento. Se observa que no hay ninguna coincidencia, por lo tanto, no hay falla en la pista interna del rodamiento.

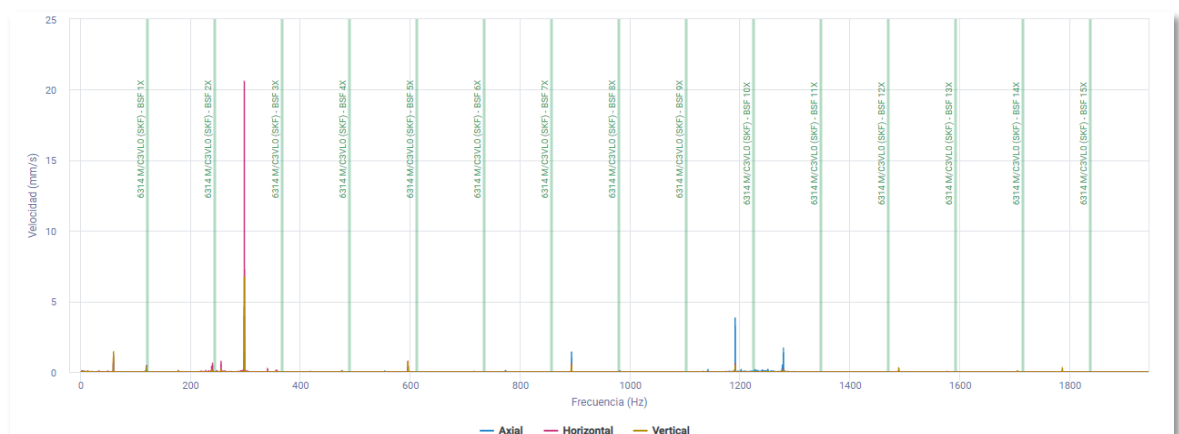


Imagen 29: Plano de frecuencia de giro de la bola (BSF)

Fuente propia

La gráfica muestra la frecuencia de deterioro de los elementos rodantes, donde las franjas indican los posibles puntos de fallo. Si estas franjas coinciden con algún pico elevado, se demostrará que existe una falla en esa parte del rodamiento. Como se observa, hay un pico que coincide, pero no es grave; por lo tanto, no hay falla en los elementos rodantes del rodamiento.

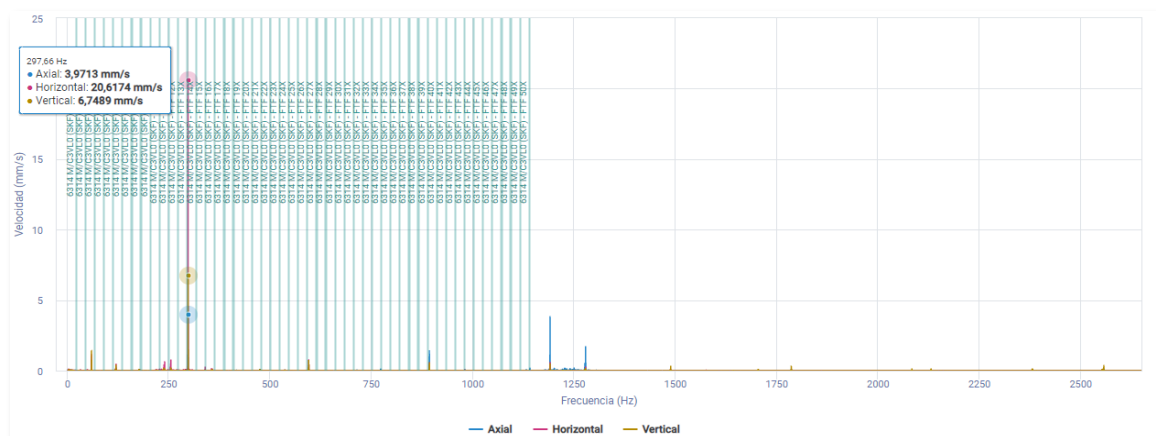


Imagen 30: Plano de frecuencia fundamental del tren (FTF)

Fuente propia

La gráfica muestra la frecuencia de deterioro de la jaula, donde las franjas indican los posibles puntos de fallo. Si estas franjas coinciden con algún pico elevado, se demostrará que existe una falla en esa parte del rodamiento. Como se observa, hay un pico muy elevado que coincide, lo que sugiere que la posible falla sea un deterioro de la jaula del rodamiento. En todo caso, este pico debe seguir en observación para ver su evolución y, al final, determinar si realmente hay un problema.

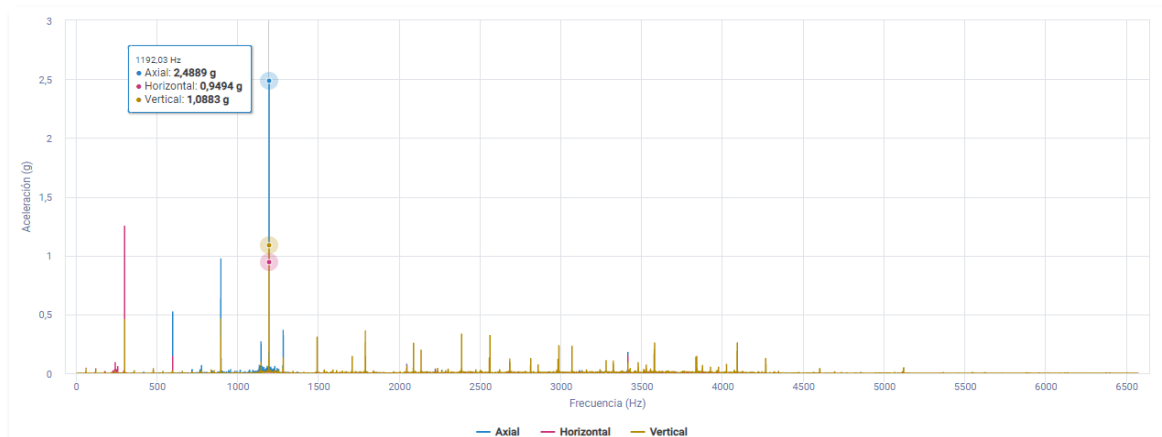


Imagen 31: Plano espectral en rango de velocidad- frecuencia (15/07/24)

Fuente propia

Se continúan analizando las muestras de vibraciones y se observa en la gráfica que existen picos altos que indican una posible anomalía en la parte libre del compresor. De acuerdo con la normativa ISO 10816, los valores de estos picos son admisibles, pero están a punto de alcanzar sus límites. Por lo tanto, se seguirá monitoreando el progreso de estos picos para evaluar su evolución y, finalmente, llegar a una conclusión.

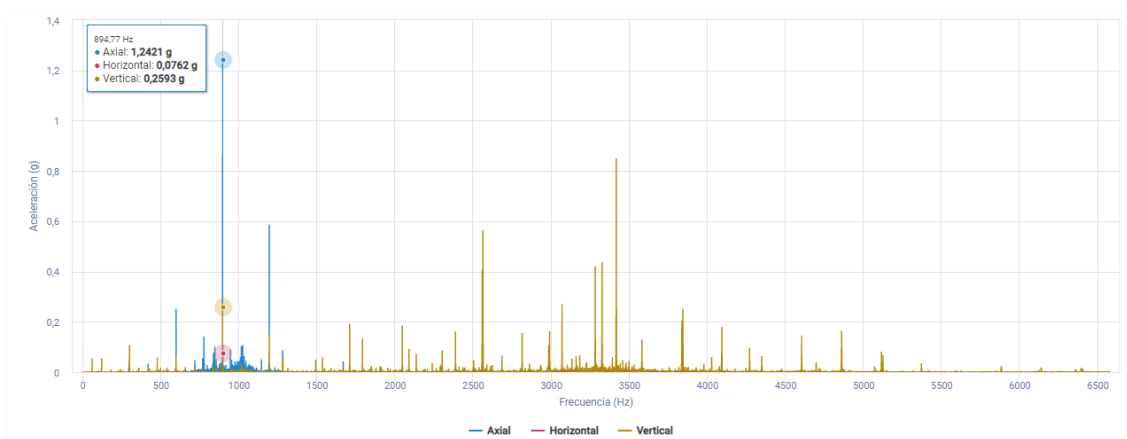


Imagen 32: Plano espectral en rango de velocidad- frecuencia (18/07/24)

Fuente propia

En la muestra tomada el 18 de julio, se pueden observar picos altos que indican la posible existencia de una anomalía. Sin embargo, de acuerdo con la normativa ISO 10816, los valores de estos picos son admisibles y no representan ningún problema.

Al final se muestra una grafica en cascada para ver la evolucion de los picos de vibraciones llegando a concluir que hubo un punto intermedio donde se alcanzó un pico muy alto de vibración y gracias al mantenimiento que se llevó a cabo, los picos disminuyeron.

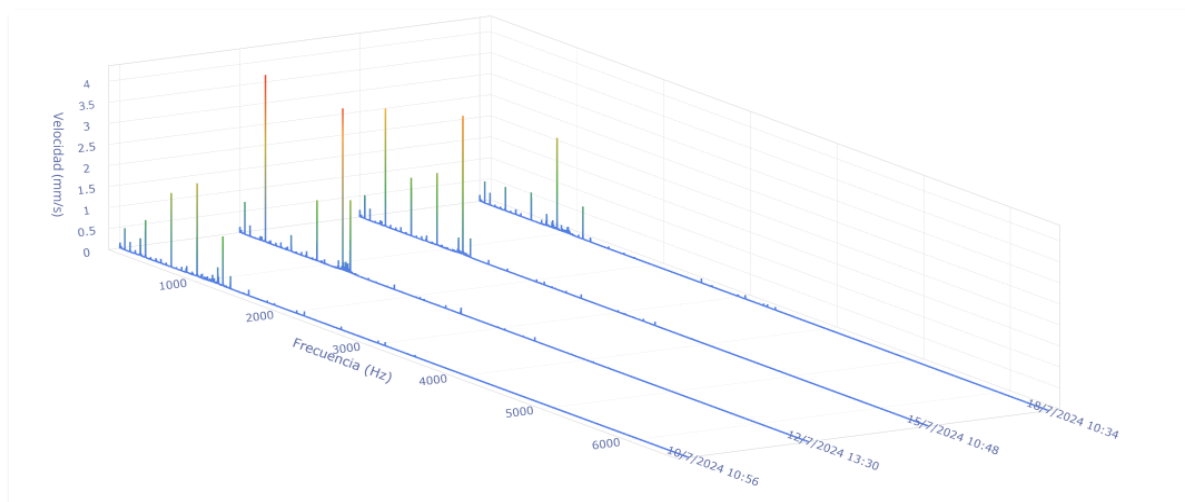


Imagen 33: Plano espectral en cascada
Fuente propia

4.1.2. Lado de Acople del Compresor

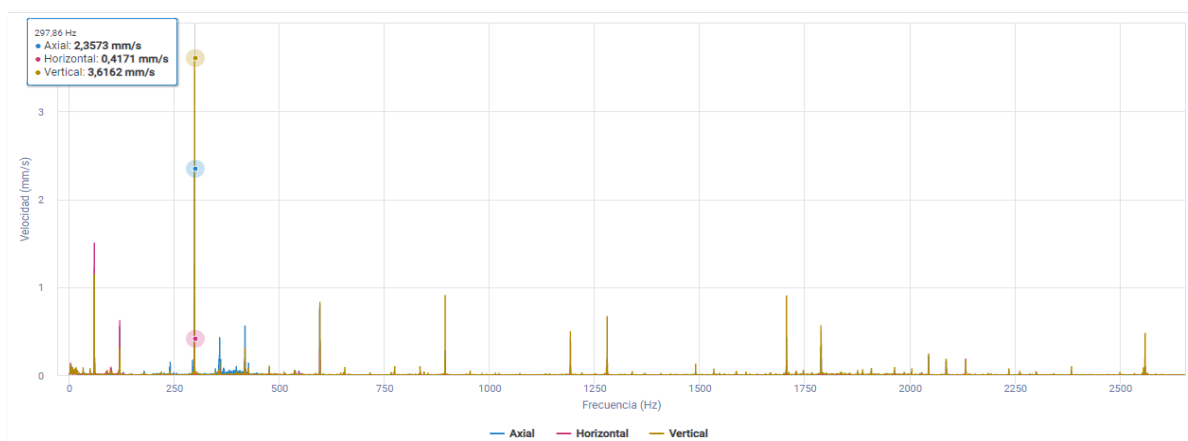


Imagen 34: Plano espectral en rango de velocidad- frecuencia (10/07/24)
Fuente propia

A continuación, se observa la gráfica del otro lado del compresor, que está acoplado con el motor eléctrico. Se presentan picos altos que indican la presencia de un nuevo problema similar al detectado en la parte libre del compresor. De acuerdo con la normativa ISO 10816, los valores de

estos picos son admisibles, aunque están cerca de alcanzar sus límites. Por lo tanto, es necesario obtener más muestras para monitorear su evolución.

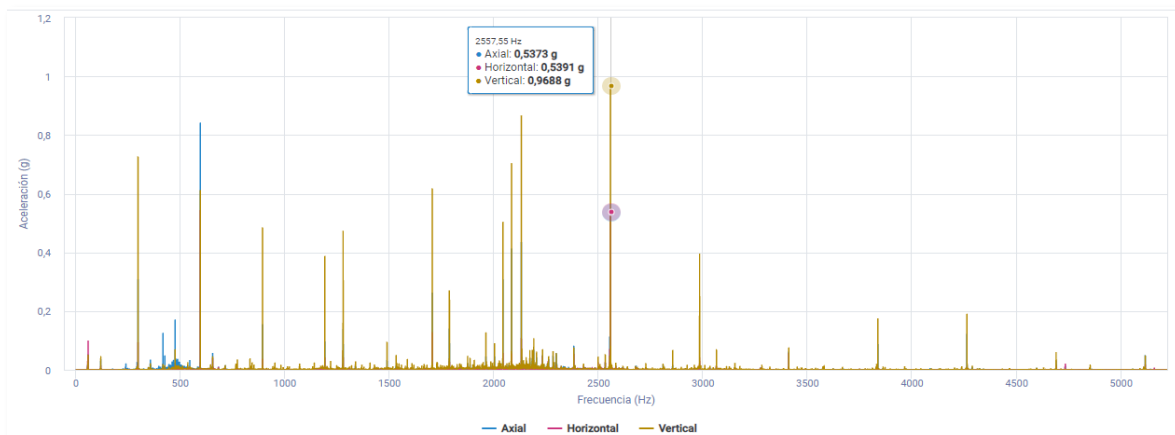


Imagen 35: Plano espectral en rango de velocidad- frecuencia (12/07/24)

Fuente propia

Se tomaron muestras después del 10 de julio para evaluar la evolución de los picos. En la gráfica, se observa un aumento en la cantidad de picos elevados. De acuerdo con la normativa ISO 10816, los valores de estos picos son normales, aunque están cerca de alcanzar el rango de valores que aún son admisibles. Se puede resaltar que, hasta el momento, no se han encontrado problemas en este lado del acople.

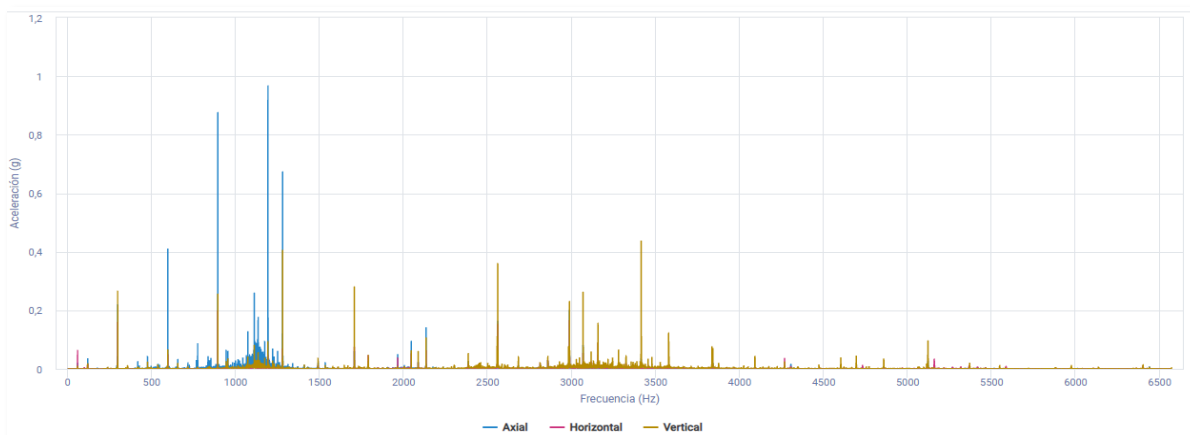


Imagen 36: Plano espectral en rango de velocidad frecuencia (15/07/24)

Fuente propia

Se continúa analizando las muestras de vibraciones, resultando en una gráfica con algunos picos elevados con el paso de la frecuencia, pero en base a la normativa ISO 10816 los valores del pico son normales a punto de pasar al rango de valores que aún son admisibles.

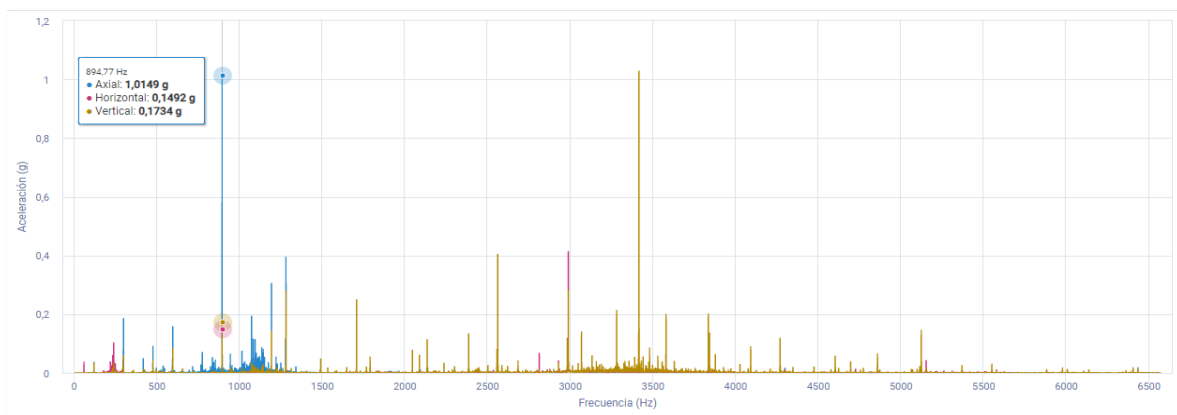


Imagen 37: Plano espectral en rango de velocidad- frecuencia (18/07/24)

Fuente propia

En la gráfica se puede observar la última muestra de vibración tomada, en la cual se destacan nuevamente los picos elevados. Sin embargo, de acuerdo con la normativa ISO 10816, los valores de estos picos son normales, aunque están cerca de alcanzar el rango de valores que aún son admisibles.

Al final se muestra una grafica en cascada para observar la evolucion de los picos de vibraciones llegando a concluir que este lado de acople del compresor esta sin problemas, ya que los picos varian un poco, pero estan dentro de los valores aceptables según la normativa.

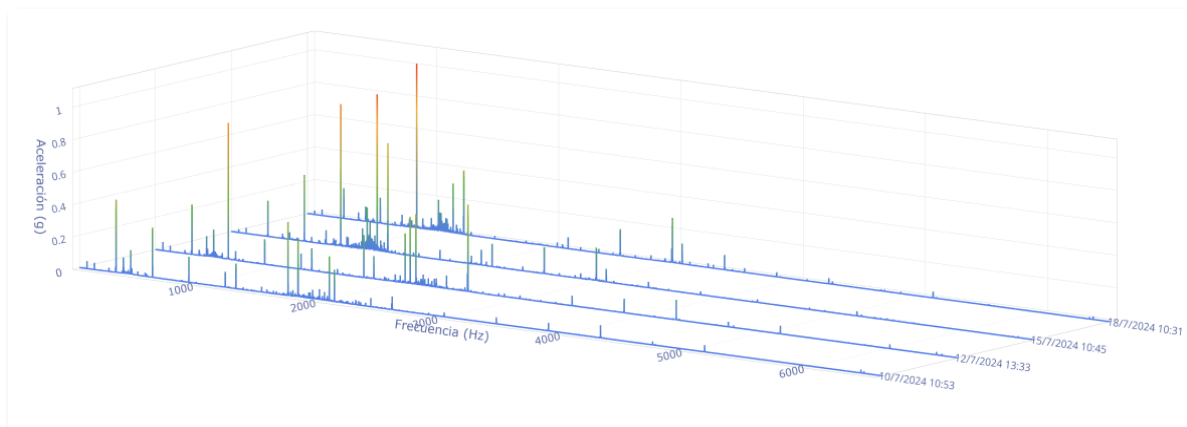


Imagen 38: Plano espectral en cascada
Fuente propia

4.1.3. Lado de Acople del Motor Eléctrico

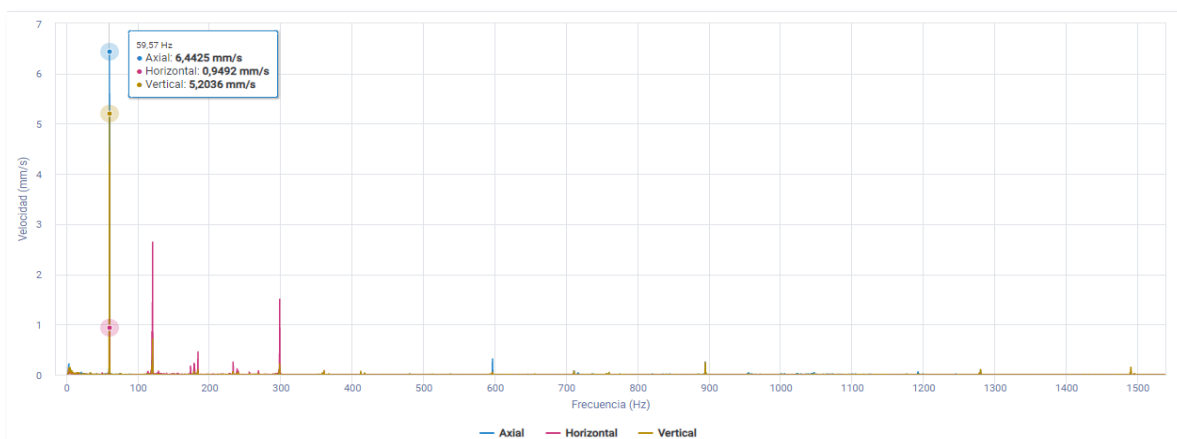


Imagen 39: Plano espectral en rango de velocidad- frecuencia (10/07/24)
Fuente propia

Se tomó una muestra del lado de acople del motor eléctrico, donde se observa un pico muy elevado. De acuerdo con la normativa ISO 10816, los valores de este pico están en el límite y, si empeoran, podrían alcanzar el rango de valores no permisibles. Lo siguiente que se realizará es desplegar las gráficas del rodamiento para identificar la zona específica de la falla y continuar con el monitoreo de los picos altos.

A continuación, se muestran las gráficas del rodamiento en sus diferentes aspectos como son los BPFO, BPFI, BSF, FTF, esto con el fin de determinar con más precisión las diferentes fallas de dicho rodamiento.

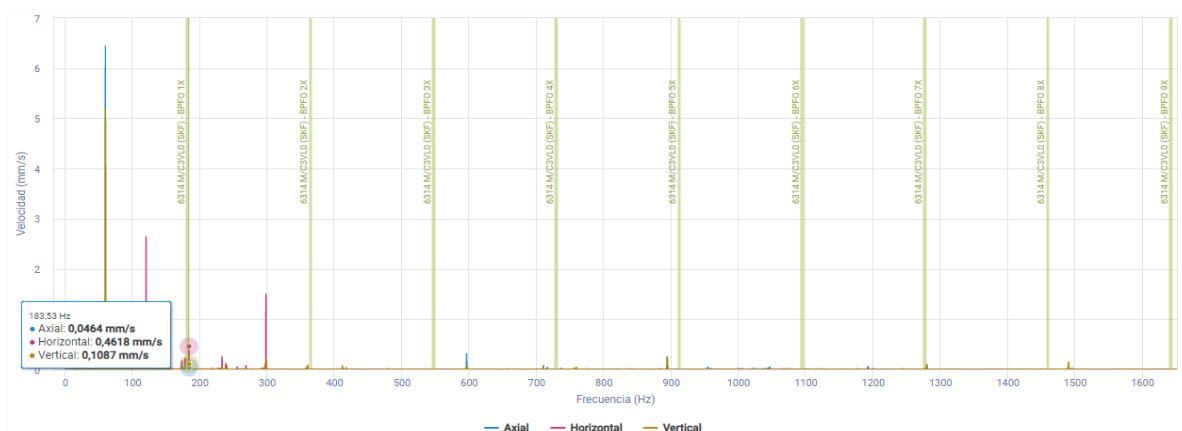


Imagen 40: Plano BPFO

Fuente propia

Como se observa hay un pico que coincide con las líneas BPFO, pero no es grave ya que muestra valores normales según la normativa.

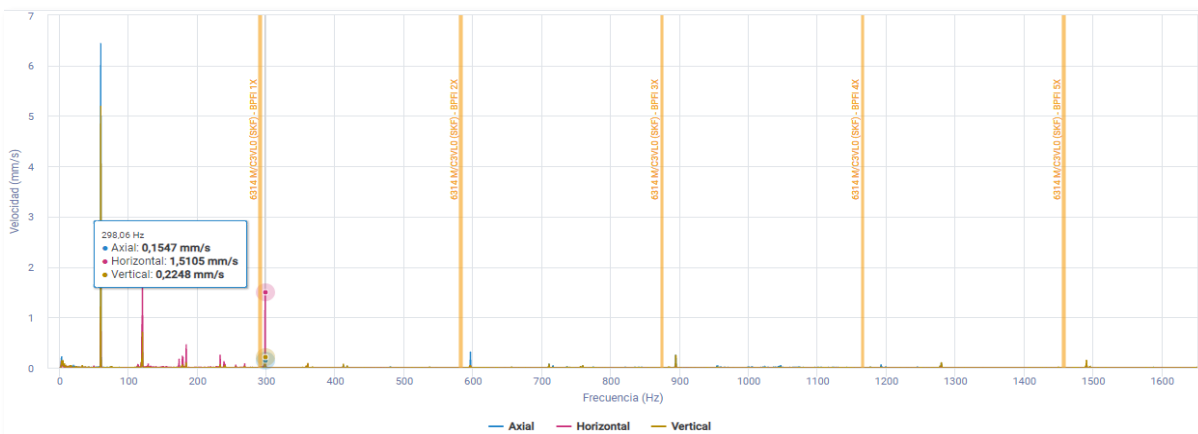


Imagen 41: Plano BPFI

Fuente propia

Se realizó una nueva gráfica con otro punto de vista del rodamiento, donde se observa que hay un pico que coincide con las líneas BPFI, se vuelve a resaltar que no es grave ya que muestra valores normales y admisibles según la normativa.

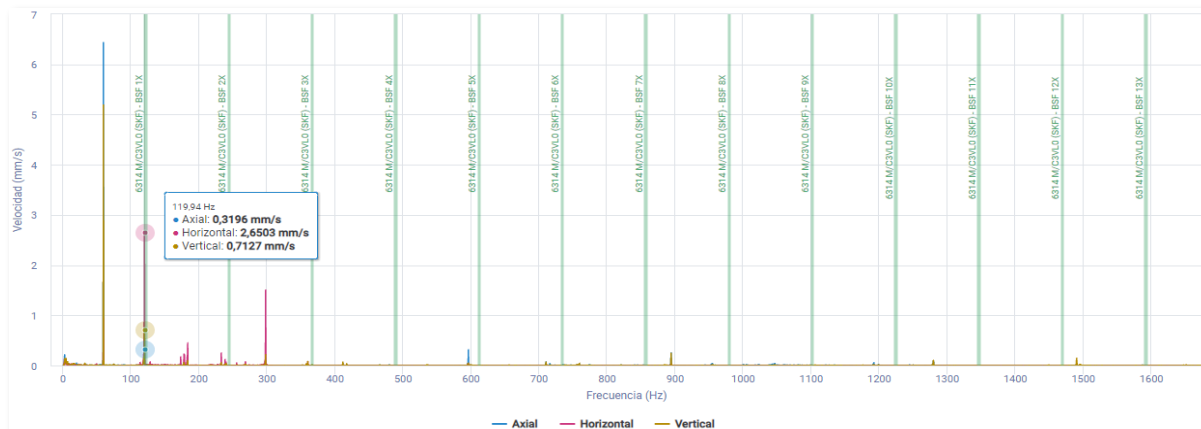


Imagen 42: Plano BSF
Fuente propia

Se realizó una nueva gráfica desde otro punto de vista del rodamiento, donde se puede observar que hay un pico que coincide con las líneas BSF. El valor de este pico es más elevado que los de las gráficas anteriores, ubicándose en el rango límite permitido por la normativa.

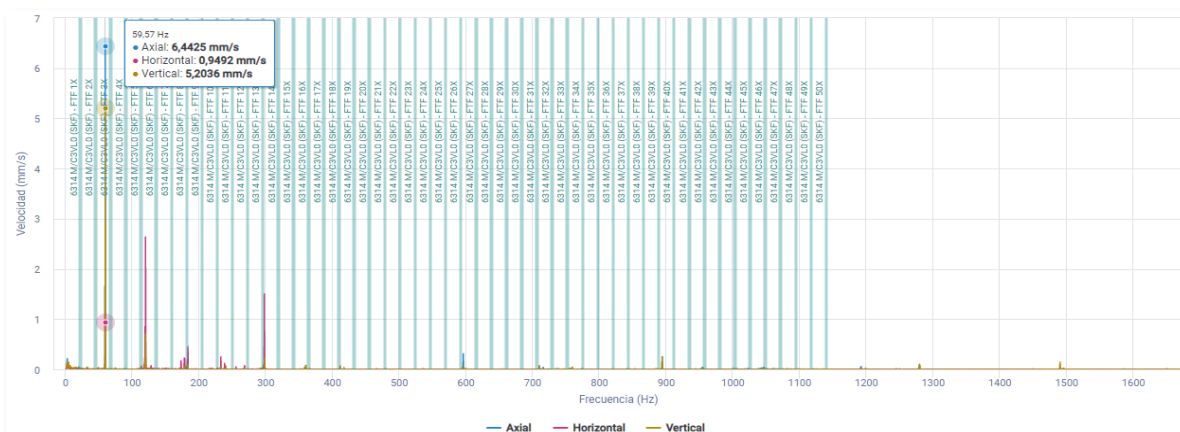


Imagen 43: Plano FTF
Fuente propia

La última gráfica de las especificaciones del rodamiento muestra picos aún más elevados, alcanzando valores límite y entrando en el rango de valores no permisibles para la máquina, según la normativa ISO 10816. Esto indica la presencia de fallas en la jaula, lo que también podría estar causando las fallas en los elementos rodantes observadas anteriormente.

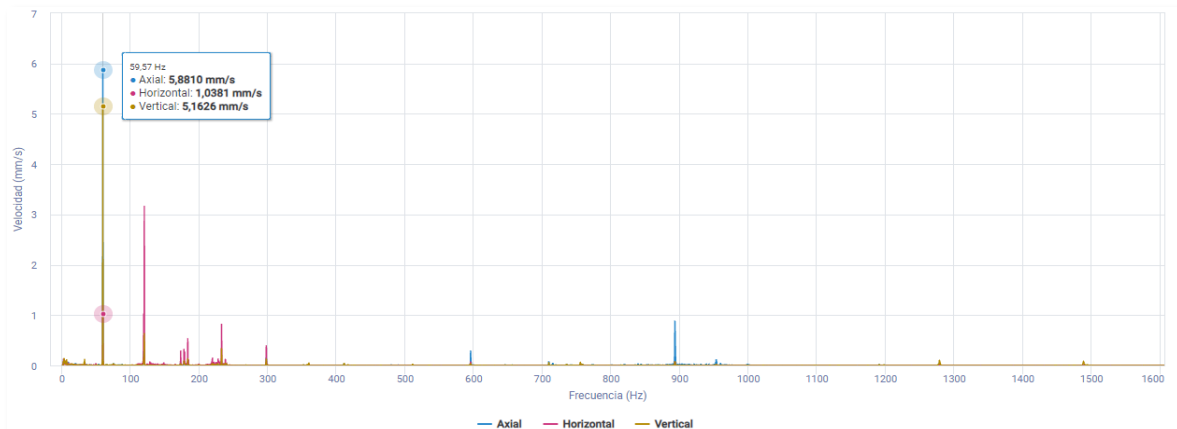


Imagen 44: Plano espectral en rango de velocidad- frecuencia (12/07/24)

Fuente propia

Como se puede apreciar en la nueva muestra tomada, no hay diferencia con las muestras anteriores así que se procede a detallar que los picos elevados persisten ya que aún no se toma una medida de mantenimiento para que los picos se normalicen según la normativa.

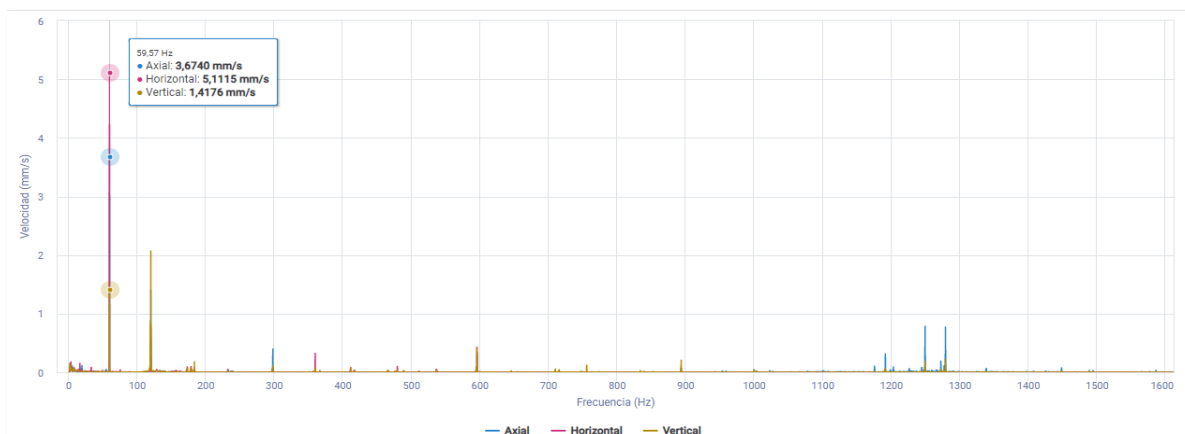


Imagen 45: Plano espectral en rango de velocidad- frecuencia (15/07/24)

Fuente propia

Nuevamente, se puede apreciar que no hay mucha diferencia con las muestras anteriores. Por lo tanto, se puede concluir que no se ha detectado corrosión en el sistema.

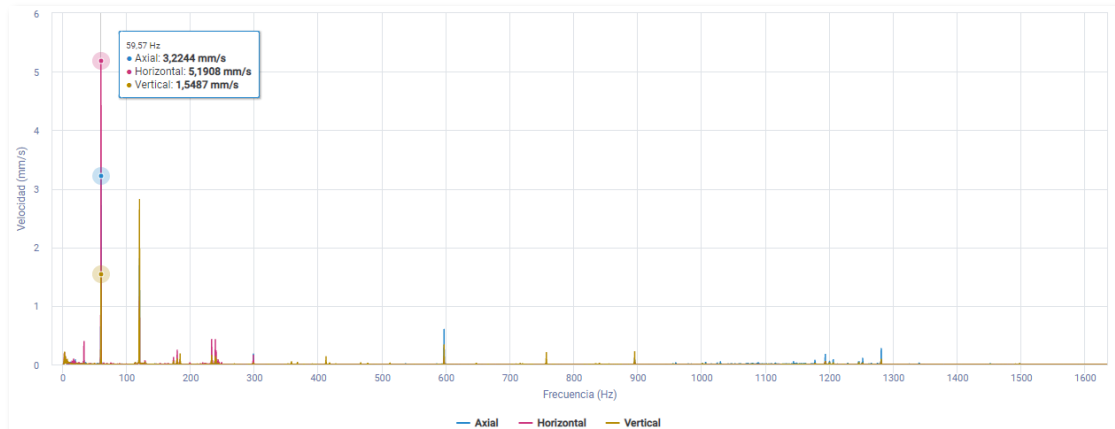


Imagen 46: Plano espectral en rango de velocidad- frecuencia (18/07/24)

Fuente propia

La última muestra tomada muestra picos elevados. Utilizando como referencia la normativa ISO 10816, se concluye que, hasta el momento, no se ha tomado ninguna medida para corregir este pico elevado. Al final, se presenta una gráfica en cascada para observar la evolución de los picos de vibración. Aunque se muestra una ligera disminución en los valores, esto sigue siendo perjudicial para la máquina.

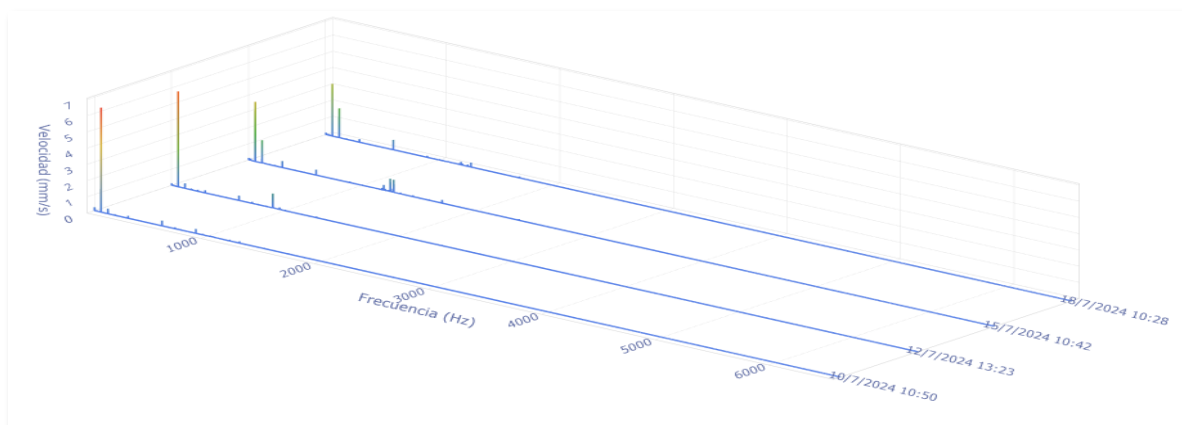


Imagen 47: Plano espectral en cascada

Fuente propia

4.1.4. Lado Libre del Motor Eléctrico

En este último punto, se pretende realizar un análisis general y más ágil utilizando el plano en cascada. Este enfoque permitirá detallar todos los días en que se tomaron muestras, simplificando así el análisis del caso.

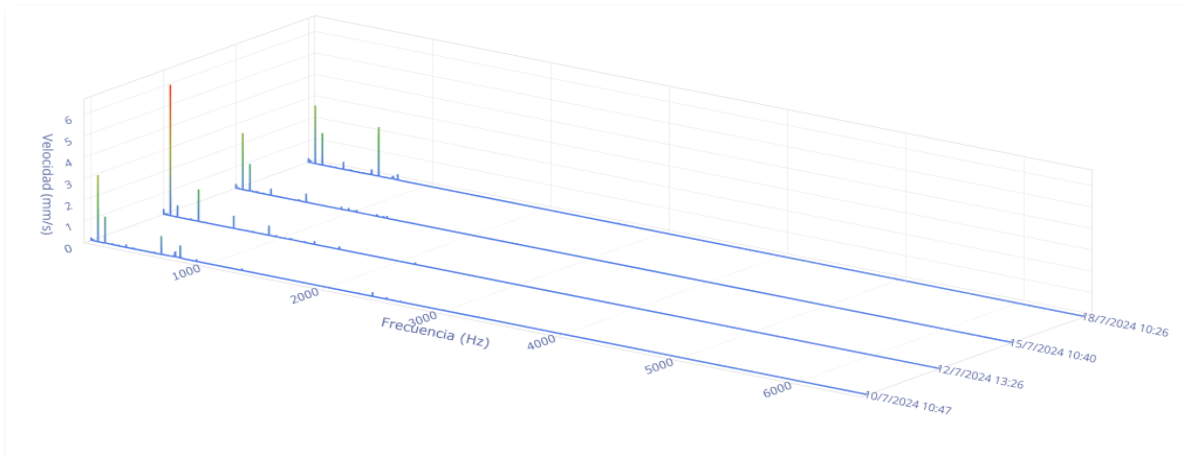


Imagen 48: Plano espectral en cascada lado libre del motor eléctrico
Fuente propia

En la gráfica se puede observar una similitud con el caso del lado libre del compresor, donde se alcanzó un pico muy alto de vibración en un punto intermedio, que luego disminuyó. Sin embargo, la vibración no descendió a niveles normales o admisibles, sino que se mantuvo en el rango de valores límite permitidos para la máquina según la normativa ISO. Esto sugiere que se realizó una corrección rápida, pero no particularmente eficiente.

4.2. Compresor del tornillo dos

4.2.1. Lado Libre del Compresor

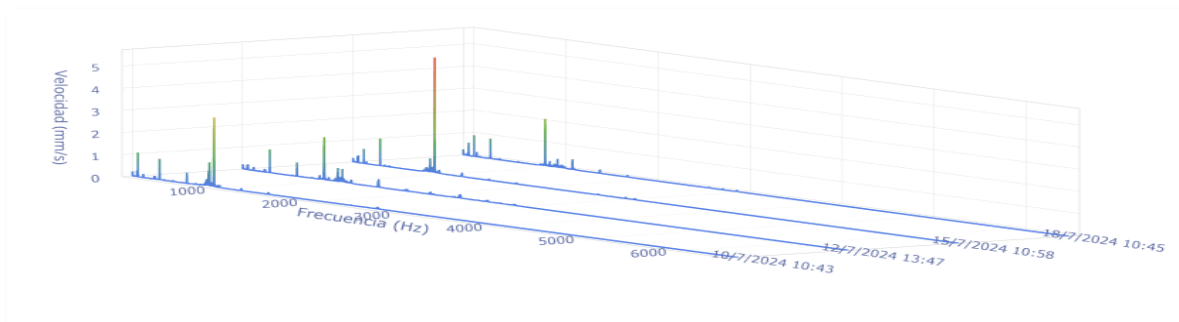


Imagen 49: Plano en cascada de velocidad- frecuencia
Fuente propia

En la gráfica se observa que el 10 de julio se encontró un pico alto dentro de los datos admisibles y al borde de entrar en el rango de valores límite, pero sin problemas significativos por el momento. El 15 de julio, el pico se elevó hasta valores no permisibles, lo que llevó a avisar al jefe de mantenimiento para buscar una solución. El 18 de julio, el pico descendió a valores admisibles, indicando que se había encontrado una solución al problema. Sin embargo, es necesario continuar revisando los picos con frecuencia para detectar cualquier otro problema que pueda surgir.

4.2.2. Lado Acople del Compresor

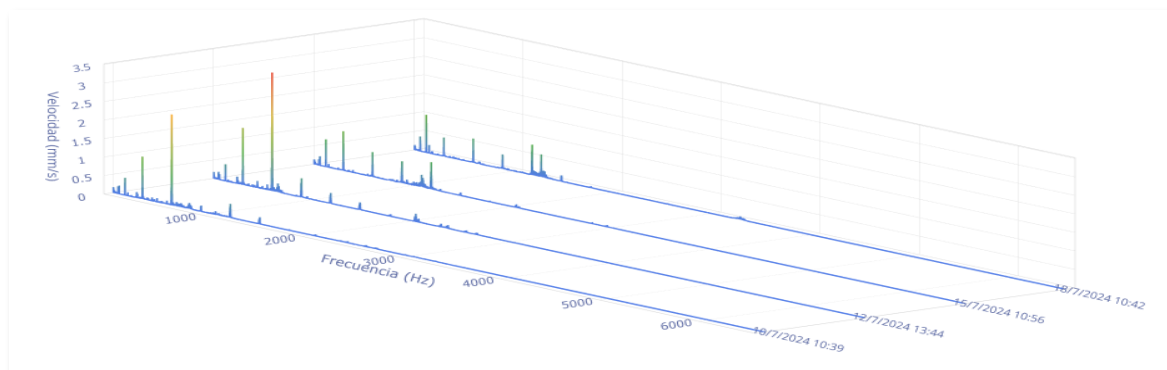


Imagen 50: Plano en cascada de velocidad- frecuencia
Fuente propia

En la gráfica se observa que existen picos elevados, pero que no causan problema ya que son valores admisibles y rozan el rango de límites permitido según la normativa ISO. En este caso se tiene que seguir en monitoreo para ver si se elevan estos picos.

4.2.3. Lado de Acople del Motor Eléctrico

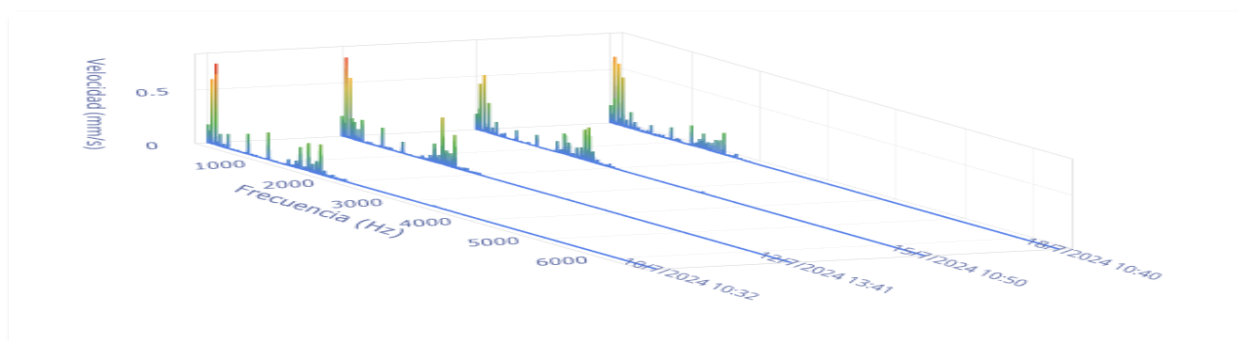


Imagen 51: Plano en cascada de velocidad- frecuencia

Fuente propia

En la gráfica se observa que no hay ningún problema ya que marcan picos con valores bajos, según la normativa estos valores están en rango de vibraciones normales.

4.2.4. Lado Libre del Motor Eléctrico

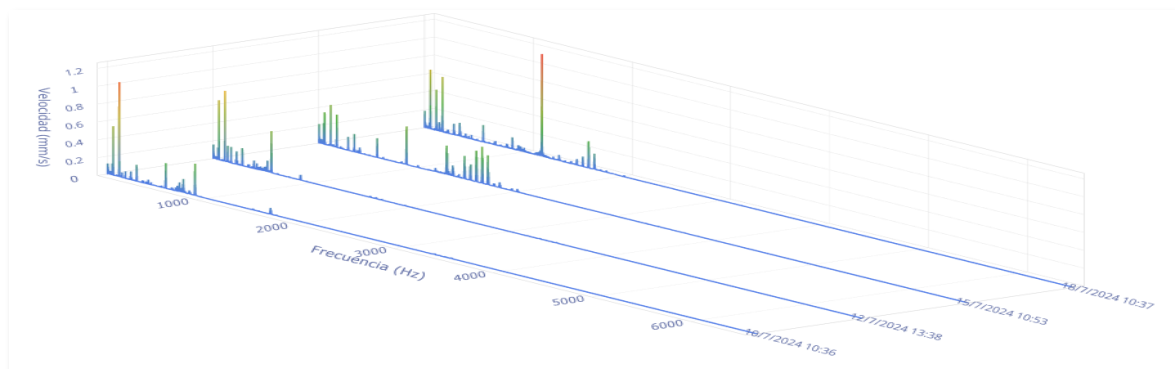


Imagen 52: Plano de cascada de velocidad- frecuencia

Fuente propia

Se toman la gráfica en cascada para visualizar las diferentes muestras, dando así picos con valores elevados de vibraciones normales y otras llegando a valores admisibles, por lo tanto, se

considera que no hay ningún problema por el momento, la única observación es que se siga monitoreando para observar la evolución de estos picos.

4.3. Compresor de tornillo tres

4.3.1. Lado Libre del Compresor

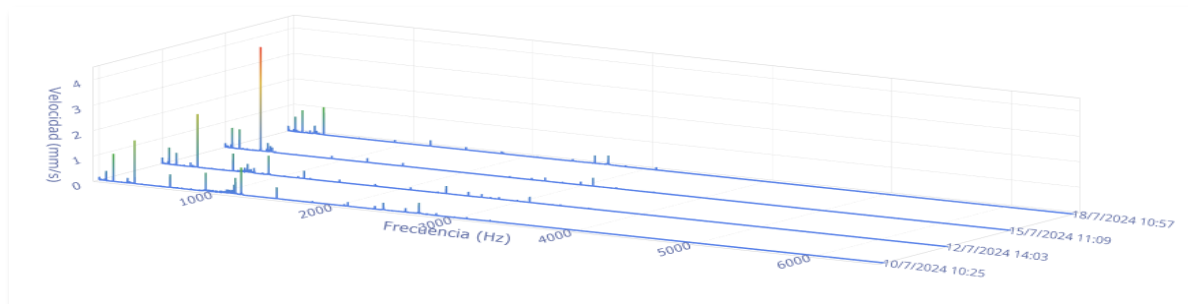


Imagen 53: Plano en cascada de velocidad- frecuencia
Fuente propia

En la gráfica se observa la evolución de un pico elevado que comenzó con la primera muestra tomada el 10 de julio y alcanzó valores límite el 15 de julio. Esta situación fue corregida, y para el 18 de julio, los picos volvieron a valores normales de vibración, de acuerdo con la normativa ISO.

4.3.2. Lado de Acople del Compresor

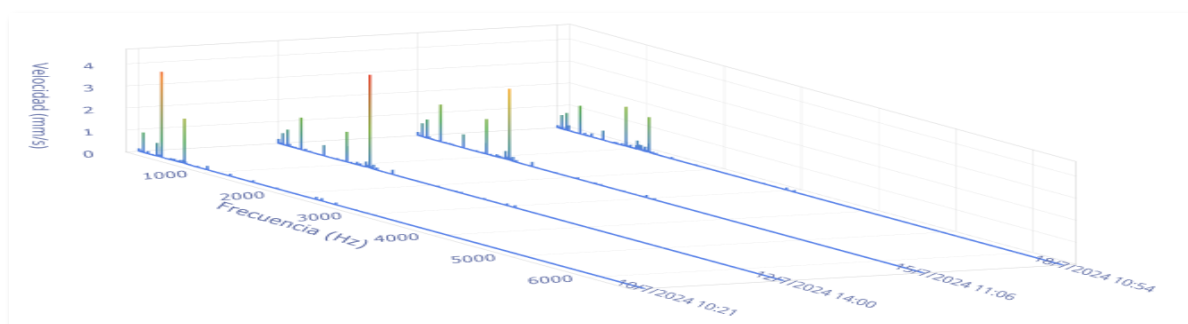


Imagen 54: Plano en cascada de velocidad- frecuencia
Fuente propia

En la gráfica se observa que desde el primer día hay picos elevados en valores límite según la normativa ISO, que luego disminuyen con el paso del tiempo. Esto puede deberse a varios motivos, como el desgaste de componentes, acomodación de las partes móviles, eliminación de impurezas, entre otros. Por lo tanto, es importante revisar el plan de mantenimiento para verificar si se realizaron reparaciones o ajustes en los parámetros operativos.

4.3.3. Lado de Acople del Motor Eléctrico

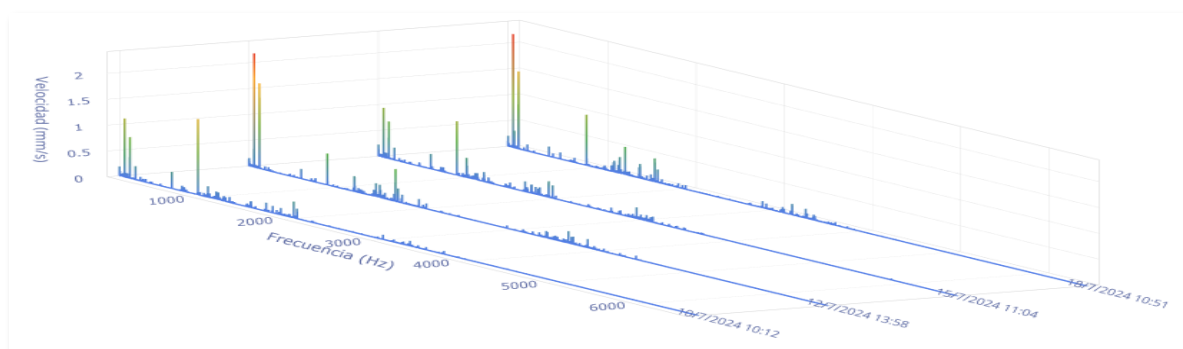


Imagen 55: Plano en cascada de velocidad- frecuencia

Fuente propia

En la gráfica se observan picos con valores altos, pero que son admisibles en la máquina según la normativa. Este caso requiere más observación, ya que estos picos podrían subir hasta rangos que estarían al límite permisible, también se toma en cuenta que los valores suben y bajan, dando indicios de igual manera a un problema de mal ajuste de elementos rodantes.

4.3.4. Lado Libre del Motor Eléctrico

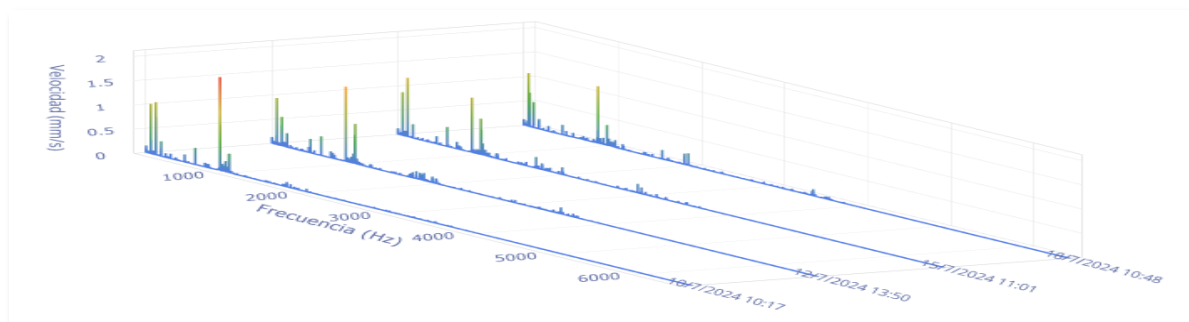


Imagen 56: Plano en cascada de velocidad- frecuencia

Fuente propia

En la gráfica se pueden observar picos altos, pero sin ninguna problemática por el momento ya que tienen picos con valores normales y admisibles de vibraciones de la máquina según la normativa. Se recomienda seguir con el monitoreo continuo de la máquina para ver el progreso de dichos picos elevados y predecir aun fallo a futuro.

Tabla 7: Tabla comparativa Normas ISO 10816 con valores picos captados.

	Medidas en velocidad (mm/s)	Valores normales	Valores admisibles	Valores límite	Valores captados (mayor pico)
Compresor 1	Lado libre compresor	0.28 – 1.79	1.80 – 4.49	4.50 – 7.10	3.97
	Lado acople compresor	0.28 – 1.79	1.80 – 4.49	4.50 – 7.10	2.35
	Lado acople motor eléctrico	0.28 – 1.79	1.80 – 4.49	4.50 – 7.10	6.44
	Lado libre motor eléctrico	0.28 – 1.79	1.80 – 4.49	4.50 – 7.10	6.11
Compresor 2	Lado libre compresor	0.28 – 1.79	1.80 – 4.49	4.50 – 7.10	5.21
	Lado acople compresor	0.28 – 1.79	1.80 – 4.49	4.50 – 7.10	3.20
	Lado acople motor eléctrico	0.28 – 1.79	1.80 – 4.49	4.50 – 7.10	0.76
	Lado libre motor eléctrico	0.28 – 1.79	1.80 – 4.49	4.50 – 7.10	1.14
Compresor 3	Lado libre compresor	0.28 – 1.79	1.80 – 4.49	4.50 – 7.10	4.09
	Lado acople compresor	0.28 – 1.79	1.80 – 4.49	4.50 – 7.10	4.24
	Lado acople motor eléctrico	0.28 – 1.79	1.80 – 4.49	4.50 – 7.10	2.19
	Lado libre motor eléctrico	0.28 – 1.79	1.80 – 4.49	4.50 – 7.10	1.92

Fuente propia

Tabla 8: Resultados de tabla comparativa

	Medidas en velocidad (mm/s)	Valores captados (mayor pico)	Observaciones
Compresor 1	Lado libre compresor	3.97	El pico de mayor amplitud se registró en el eje axial, lo cual podría indicar un desplazamiento del rodamiento a lo largo del eje. Sin embargo, al analizar su magnitud, se determina que este se encuentra dentro de los rangos de vibración admisibles.
	Lado acople compresor	2.35	Su magnitud se encuentra dentro de los rangos de vibración admisibles y no presenta un problema significativo en este momento
	Lado acople motor eléctrico	6.44	La magnitud se encuentra en los valores límites, en el eje axial lo cual puede ser un desplazamiento de rodamientos a lo largo del eje, por lo que se deben tomar medidas correctivas.
	Lado libre motor eléctrico	6.11	La magnitud se encuentra en los valores límites, en el eje axial lo cual puede ser un desplazamiento de rodamientos a lo largo del eje, por lo que se deben tomar medidas correctivas.
Compresor 2	Lado libre compresor	5.21	El pico de mayor amplitud en el eje axial sugiere un posible desplazamiento del rodamiento a lo largo del eje. Aunque el valor se encuentra en el límite de vibración admisible, se recomienda mantener este punto en observación.
	Lado acople compresor	3.20	Su magnitud se encuentra dentro de los rangos de vibración admisibles y no presenta un problema significativo en este momento
	Lado acople motor eléctrico	0.76	Se encuentra en rangos de vibraciones normales, sin mayor problema en la máquina.
	Lado libre motor eléctrico	1.14	Se encuentra en rangos de vibraciones normales, sin mayor problema en la máquina.

Compresor 3	Lado libre compresor	4.09	Se encuentra en rangos de vibraciones admisibles.
	Lado acople compresor	4.24	Se encuentra en rangos de vibraciones admisibles.
	Lado acople motor eléctrico	2.19	Se encuentra en rangos de vibraciones admisibles, sin mayor problema en la máquina.
	Lado libre motor eléctrico	1.92	Se encuentra en rangos de vibraciones admisibles, sin mayor problema en la máquina.
Fuente propia			

CONCLUSIONES

- A través del estudio detallado de las gráficas espectrales, se determinó que las máquinas no están en un estado óptimo, aunque aún pueden operar, se encuentran en una condición de alerta que requiere atención.
- Mediante el manual de especificaciones se pudo observar a que Frecuencia (Hz), Potencia (Hp) y RPM trabajan dichas máquinas, se determinó los límites de vibraciones permitidos con la norma ISO 10816, las cuales pertenecen al grupo II de 15kW a 75kW sin base especial y de 300 kW con base especial.
- Mediante el análisis de las gráficas espectrales de aceleración, velocidad y desplazamiento, se dedujo que existen picos elevados de vibración en el eje axial. Estos picos elevados indican problemas en los rodamientos y engranajes, evidenciados por las vibraciones anómalas en este eje. Por otro lado, en los ejes vertical y horizontal se observaron pequeñas vibraciones. Estas pequeñas vibraciones podrían ser indicativas de grietas, ralladuras o desgaste en los componentes de la máquina.
- Se desarrollo un manual para el software DynaPredict, el cual proporciona guías paso a paso para su configuración, recolección de muestras e interpretación de resultados, asegurando una utilización efectiva y eficiente del software en el mantenimiento predictivo de las máquinas rotativas.

RECOMENDACIONES

- Realizar análisis constantes para revisar las vibraciones y asegurarse de que no exista ninguna perturbación en las máquinas.
- La implementación de más sensores sería eficaz para reducir el tiempo en la toma de muestras y acorta las rutas de mantenimiento.
- Determinar niveles de pre-alarma y alarma una vez creado un registro de vibraciones.
- Siempre estarse informando de las nuevas tecnologías en sensores de vibración, ya que es un tema muy amplio y está en constante evolución.
- Revisar los manuales y actualizarlo en caso de ser necesarios, para mejorar su funcionalidad o cambios en las prácticas de mantenimiento.
- Recopilar y analizar el feedback de mantenimientos pasados para un entendimiento más a profundidad sobre la máquina.

BIBLIOGRAFÍA

- Alavedra, C., Gastelu, Y., Méndez, G., Minaya, C., Pineda, B., Prieto, K., . . . Moreno, C. (2016). Gestión de mantenimiento preventivo y su relación con la disponibilidad de la flota de camiones 730e Komatsu-2013. *Gestión de la producción*, 11-26. Obtenido de https://revistas.ulima.edu.pe/index.php/Ingenieria_industrial/article/view/529/1354
- Alcazaba, L., & Derick, J. (2020). *Propuesta de mejora del mantenimiento predictivo por análisis vibracional para aumentar la disponibilidad de los equipos críticos del área de lavaderos de una empresa azucarera*. Trujillo: Universidad César Vallejo . Obtenido de file:///C:/Users/usuario%20Dell/Downloads/Leyva_AJD-SD.pdf
- Cabanas, M., Melero, M., Orcajo, G., Cano, J., & Sariego, J. (1998). *Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas*. Barcelona: MARCOMBO, S.A. Obtenido de https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=X3p4bZfoqEC&oi=fnd&pg=PA1&dq=máquinas+rotativas+&ots=xGWwg_kbXs&sig=rXJ9s2-Gri2YaiLzNu6FUcSx_7Y#v=onepage&q=máquinas%20rotativas&f=false
- Corona, L., Abarca, G., & Mares, J. (2014). *Sensores y actuadores*. Azcapotzalco: Grupo Editorial Patria, S.A. DE C.V. Obtenido de <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=wMm3BgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=sensores+y+transductores&ots=6P31fD940B&sig=B5SkX-P6IH-DdvxPo8X6QJVzsYo#v=onepage&q=sensores%20y%20transductores&f=false>
- Dynamox. (Febrero de 2024). *HF+s PO (DynaPortable)*. Obtenido de <https://content.support.dynamox.net/wp-content/uploads/2024/07/HFSPO-072024-01-EN.pdf>
- Dynamox. (Julio de 2024). *Manual de la Plataforma Web DynaPredict*. Obtenido de <https://content.support.dynamox.net/wp-content/uploads/2024/07/Manual-da-Plataforma-Web-ES-05072024.pdf>
- Erbessd, T. (s.f.). *Erbessd Instruments*. Obtenido de <https://www.erbessd-instruments.com/es/articulos/resonancia-y-frecuencia-natural/>
- Fernandez, A. (s.f.). *Power-MI*. Obtenido de <https://power-mi.com/es/content/medida-de-fase>
- Fernandez, A. (s.f.). *Power-MI*. Obtenido de Estudio de las vibraciones: <https://power-mi.com/es/content/estudio-de-las-vibraciones>
- López, E. (2009). *El mantenimiento productivo total TPM y la importancia del recurso humano para su exitosa implementación*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. Obtenido de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/7276/Tesis262.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

- Mosquera, G., De La Victoria, M., & Armas, R. (2001). *Las vibraciones mecánicas y su aplicación al mantenimiento predictivo*. Caracas: Centro de Altos Estudios Gerenciales ISID. Obtenido de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/40872429/vibraciones-mecanicas-libre.pdf?1451142661=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DVibraciones_mecanicas.pdf&Expires=1722280210&Signature=gMrMocfVWsk78unSEd25MA~T4~1tLY5POnyuox8MCchJ5jYwEVRYecEINK2
- Olarte, W., Botero, M., & Cañon, B. (2010). *Técnicas de mantenimiento predictivo utilizadas en la industria*. Pereira: Universidad Tecnología de Pereira.
- Pastor, B., Calderon, D., & Gonzales. (2022). Evaluación de la respuesta sísmica utilizando la teoría de vibraciones aleatorias en tres perfiles de suelo de Lima, Perú. *TECNIA*, 1-12. Obtenido de <https://revistas.uni.edu.pe/index.php/tecnia/article/view/1420/1986>
- Perez, F. (2021). *Conceptos generales en la gestión del mantenimiento industrial*. Bucaramanga: USTA. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/33276/9789588477923.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Peréz, F. (2021). *Conceptos Generales en la Gestión del Mantenimiento Industrial*. Bucaramanga: USTA. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/33276/9789588477923.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Predictiva21*. (24 de Noviembre de 2023). Obtenido de <https://predictiva21.com/vibracion-amplitud-velocidad-desplazamiento/>
- Rivera Gomez, P. S. (2022). *Detección de Fallas en Rodamientos Basado en el Análisis Vibracional de Compresor MVC DSP3 de la Planta ILO 1*. Moquegua: Universidad José Carlos Mariátegui. Obtenido de https://repositorio.ujcm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12819/1500/Percy_tesis_t%c3%a dtulo_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Royo, J., Rabanaque, G., & Torres, F. (s.f). *Análisis de vibraciones e interpretación de datos*. Zaragoza: DIDYF. Obtenido de <https://www.guemisa.com/articulos/vibraciones.pdf>
- Saavedra, P. (s.f). *La medición y analisis de las vibraciones como tecnica de inspeccion de equipos y componentes, aplicaciones, normativas y certificación*. Concepción: Universidad de Concepción. Obtenido de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/34500322/Sensores_de_vibracion-libre.pdf?1408622362=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DLA_MEDICION_Y_ANALISIS_DE_LAS_VIBRACIONE.pdf&Expires=1722291566&Signature=V9gp5A8Pqr0F0H1~-q5bQXrKV~kBOc0SqipwqMOx

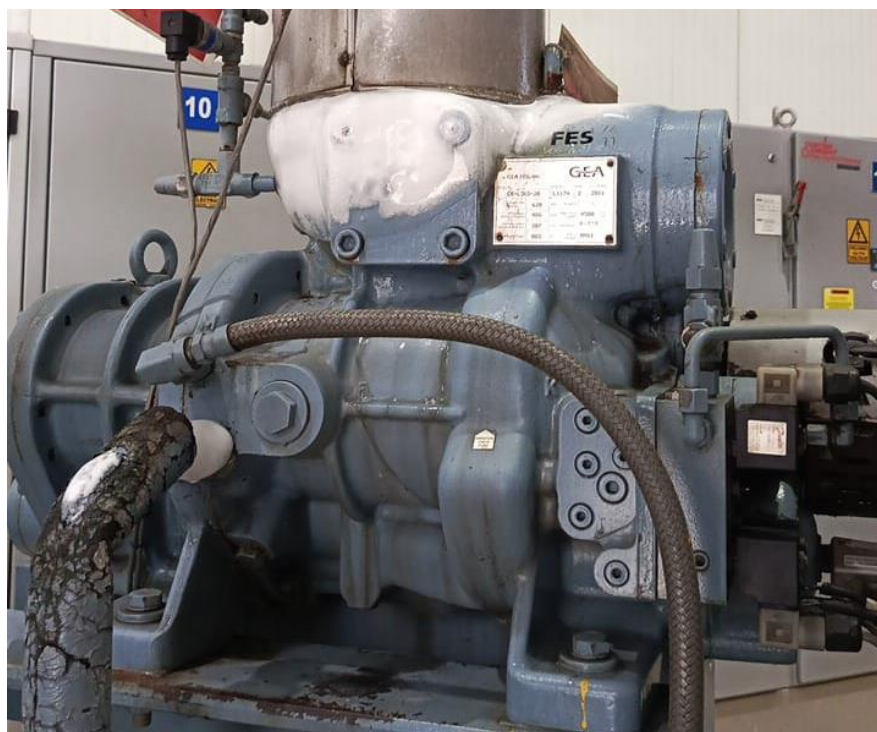
- Saied, R., Mostafa, M., & Hussein, H. (2015). *Predictive Maintenance Program Based on Vibration Monitoring [Programa de mantenimiento predictivo basado en la supervisión de vibraciones]*. Springer.
- Singiresu, R. (2012). *Vibraciones Mecánicas*. Estado de Mexico: Pearson Educación. Obtenido de file:///C:/Users/usuario%20Dell/Downloads/VIBRACIONES_MECANICAS_RAO.pdf
- TRACTIAN . (s.f.). Obtenido de <https://tractian.com/es/blog/analisis-de-vibraciones-e-interpretacion-de-datos>
- White, G. (2010). *Introducción al Análisis de Vibraciones* . Woburn: Azima DLI. Obtenido de <https://termogram.com/images/pdf/analisis-vibraciones/introduccion-al-analisis-de-vibraciones-azima-dli.pdf>
- White, G. (s.f). *Termogram*. Obtenido de Termogram: <https://termogram.com/images/pdf/analisis-vibraciones/introduccion-al-analisis-de-vibraciones-azima-dli.pdf>

ANEXOS

Anexo 1: Sistema de compresión



Anexo 2: Compresor de tornillo



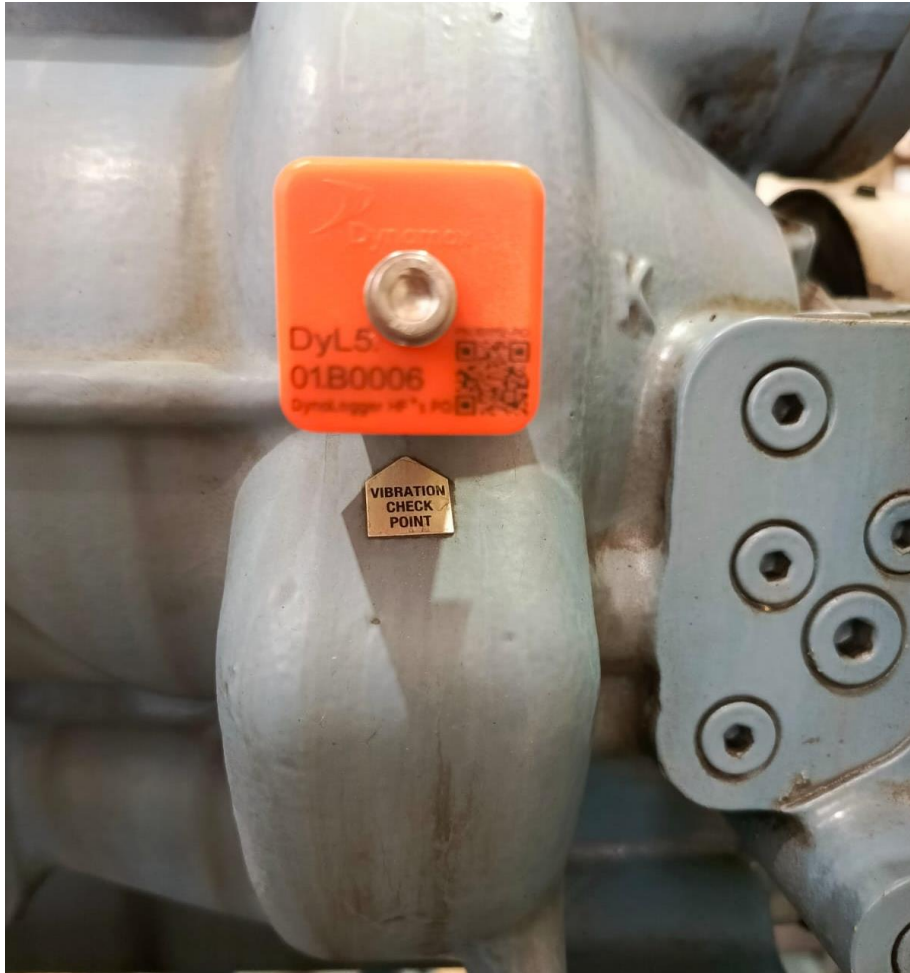
Anexo 3: Motor eléctrico



Anexo 4: Punto de medición del motor eléctrico



Anexo 5: Punto de medición del compresor de tornillo



Anexo 6: Puesta del sensor



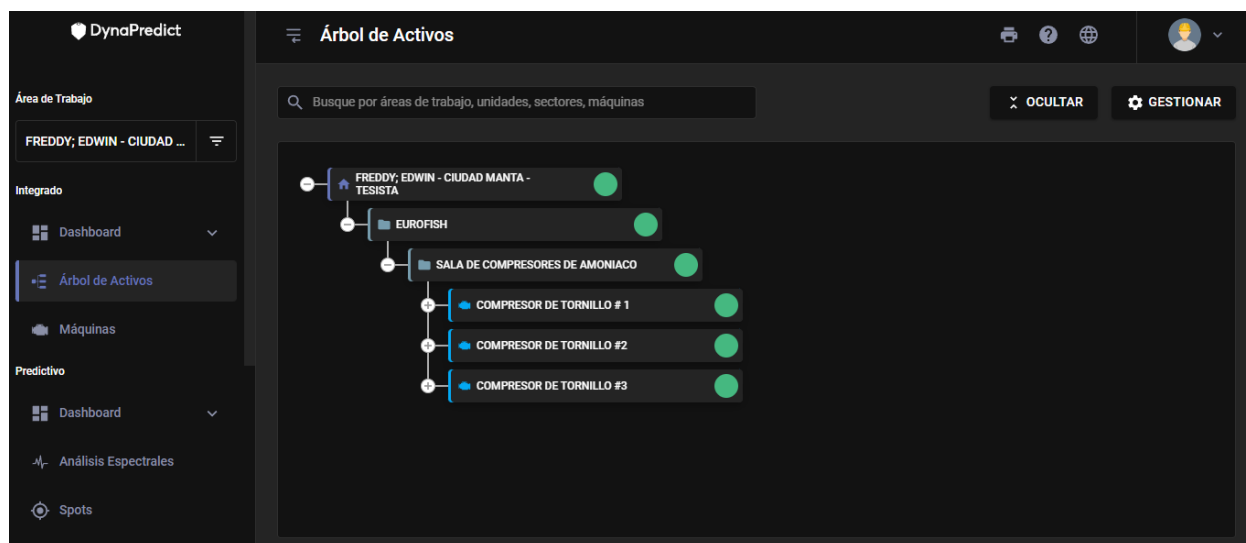
Anexo 7: Sensor DynaPortable



Anexo 8: Interfaz software DynaPredict

Estado	Pronóstico A2	Informe	Máquina	Spot	Tendencia	Vel. media (mm/s)	Temp. media (°C)	Acel. media (g)	MEM	Gateway	Sincronización
—	—	📄	COMPRESOR DE TORNILLO # 1	COMPRESOR LADO ACOUPLE	—	2,34	30,36	1,55	🟢	—	hace 6 días
—	—	📄	COMPRESOR DE TORNILLO # 1	COMPRESOR LADO LIBRE	—	5,38	30,40	2,68	🟢	—	hace 6 días
—	—	📄	COMPRESOR DE TORNILLO # 1	MOTOR ELECTRICO LADO ACOUPLE	—	0,05	26,95	0,01	🟢	—	hace 2 días
—	—	📄	COMPRESOR DE TORNILLO # 1	MOTOR ELECTRICO LADO LIBRE	—	5,14	29,87	1,50	🟢	—	hace 6 días
—	—	📄	COMPRESOR DE TORNILLO #3	COMPRESOR LADO DE ACOUPLE	—	3,82	34,29	1,63	🟢	—	hace 6 días
—	—	📄	COMPRESOR DE TORNILLO #3	COMPRESOR LADO LIBRE	—	4,04	35,53	2,57	🟢	—	hace 6 días
—	—	📄	COMPRESOR DE TORNILLO #3	MOTOR ELÉCTRICO LADO ACOUPLE	—	5,41	35,35	2,98	🟢	—	hace 6 días
—	—	📄	COMPRESOR DE TORNILLO #3	MOTOR ELÉCTRICO LADO LIBRE	—	4,32	36,36	1,57	🟢	—	hace 6 días
—	—	📄	COMPRESOR DE TORNILLO #2	COMPRESOR LADO ACOUPLE	—	2,82	33,24	1,86	🟢	—	hace 6 días
—	—	📄	COMPRESOR DE TORNILLO #2	COMPRESOR LADO LIBRE	—	6,91	33,99	3,31	🟢	—	hace 6 días
—	—	📄	COMPRESOR DE TORNILLO #2	MOTOR ELECTRICO LADO ACOUPLE	—	3,24	33,56	0,68	🟢	—	hace 6 días
—	—	📄	COMPRESOR DE TORNILLO #2	MOTOR ELECTRICO LADO LIBRE	—	3,67	33,86	1,19	🟢	—	hace 6 días

Anexo 9: Árbol de activos



Anexo 10: Spots

DynaPredict

Spots

Área de Trabajo

FREDDY, EDWIN - CIUDAD ...

Integrado

- Dashboard
- Árbol de Activos
- Máquinas

Predictivo

- Dashboard
- Análisis Espectrales
- Spots**
- Gateways

Busque por máquinas, subconjuntos, componentes, spots, ID's

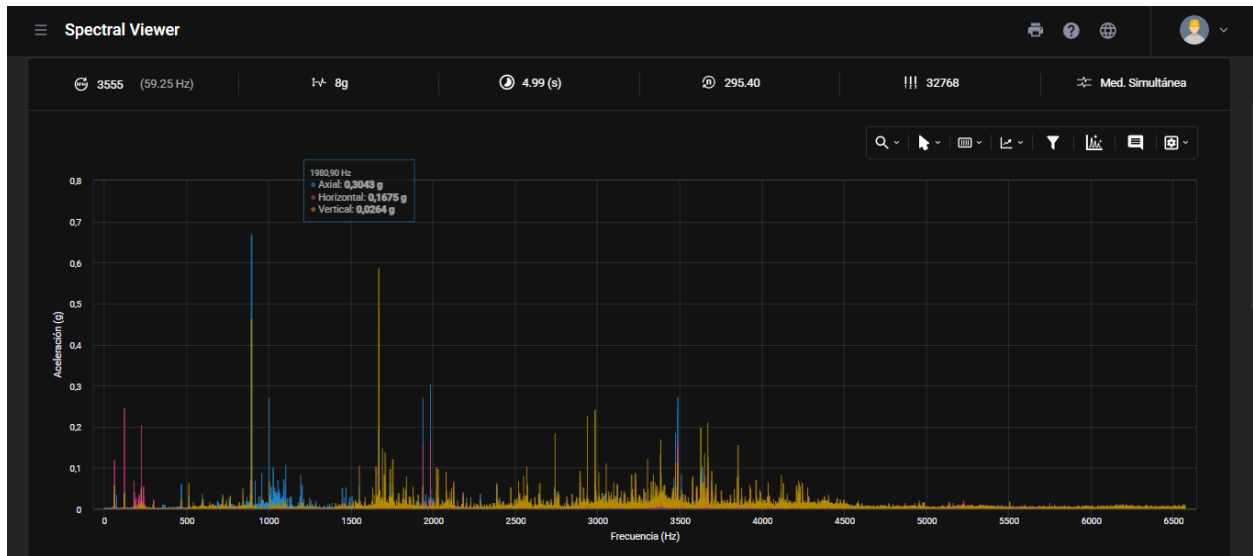
0 **CONFIGURAR SPOTS EN MASA**

Máquina	Spot ↓	Modelo	RPM	Local de monitoreo	Orientación de los ejes
COMPRESOR DE TORNILLO #3	MOTOR ELECTRICO LADO LIBRE	DynaPortable	3555	Cojinete de rodamiento	<input checked="" type="checkbox"/> Axial <input checked="" type="checkbox"/> Horizontal <input checked="" type="checkbox"/> Vertical
COMPRESOR DE TORNILLO #3	MOTOR ELECTRICO LADO ACOUPLE	DynaPortable	3555	Cojinete de rodamiento	<input checked="" type="checkbox"/> Axial <input checked="" type="checkbox"/> Horizontal <input checked="" type="checkbox"/> Vertical
COMPRESOR DE TORNILLO #1	MOTOR ELECTRICO LADO LIBRE	DynaPortable	3555	Cojinete de rodamiento	<input checked="" type="checkbox"/> Axial <input checked="" type="checkbox"/> Horizontal <input checked="" type="checkbox"/> Vertical
COMPRESOR DE TORNILLO #2	MOTOR ELECTRICO LADO LIBRE	DynaPortable	3555	Cojinete de rodamiento	<input checked="" type="checkbox"/> Axial <input checked="" type="checkbox"/> Horizontal <input checked="" type="checkbox"/> Vertical
COMPRESOR DE TORNILLO #1	MOTOR ELECTRICO LADO	DynaPortable	3555	Cojinete de rodamiento	<input checked="" type="checkbox"/> Axial <input checked="" type="checkbox"/> Horizontal <input checked="" type="checkbox"/> Vertical

Columnas seleccionadas: 8/24

Líneas por página: 20 1-12 de 12

Anexo II: Spectral Viewer



Anexo 12: Capacitación virtual del software de parte de Dynamox

