



**UNS**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DEL SANTA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECÁNICO

**“Análisis Vibracional del Motor Trifásico de 150 HP  
para mejorar la confiabilidad del equipo de compresor  
de frío, Hayduk”**

---

AUTORES:

- ✓ Bach. Quispe Vigo, Frank Diego
- ✓ Bach. Hurtado Pulido, Franz Mahatma

ASESOR:

- ✓ MSc. Ing. Risco Ojeda, Rusber Alberto

NUEVO CHIMBOTE – PERÚ  
2023



**HOJA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR**

El presente informe de tesis titulado: “ANÁLISIS VIBRACIONAL DEL MOTOR TRIFÁSICO DE 150 HP PARA MEJORAR LA CONFIABILIDAD DEL COMPRESOR DEL FRÍO EN LA EMPRESA HAYDUL”, elaborado por los bachilleres Quispe Vigo, Frank Diego y Hurtado Pulido Franz Mahatma, para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico, ha conestado con el asesoramiento de quien deja constancia de su aprobación. Por tal motivo, firmo el presente trabajo en calidad de asesor.

---

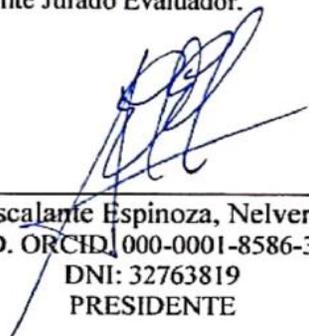
Msc. Risco Ojeda, Rusber Alberto  
COD. ORCID. 0000-0003-0194-169X  
DNI: 32903454  
ASESOR



**HOJA DE CONFORMIDAD DEL JURADO EVALUADOR**

El presente informe de tesis titulado: “ANÁLISIS VIBRACIONAL DEL MOTOR TRIFÁSICO DE 150 HP PARA MEJORAR LA CONFIABILIDAD DEL COMPRESOR DEL FRÍO EN LA EMPRESA HAYDUL”, elaborado por los bachilleres Quispe Vigo, Frank Diego y Hurtado Pulido Franz Mahatma, para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico.

Fue revisado y aprobado por el siguiente Jurado Evaluador.



---

Msc. Escalante Espinoza, Nelver Javier  
COD. ORCID. 000-0001-8586-3021  
DNI: 32763819  
PRESIDENTE



---

Msc. Calderón Rodríguez, Luis Carlos  
COD. ORCID. 0000-0002-9447-2257  
DNI: 32977058  
SECRETARIO



---

Msc. Risco Ojeda, Rusber Alberto  
COD. ORCID. 0000-0003-0194-169X  
DNI: 32903454  
INTEGRANTE

### ACTA DE SUSTENTACIÓN INFORME FINAL DE TESIS

A los doce días del mes de setiembre del año dos mil veintitrés, siendo las 12:00 pm., el Jurado Evaluador designado mediante Resolución N° 292-2023-UNS-CFI, integrado por los docentes: **Msc. Nelter Javier Escalante Espinoza (Presidente)**, **Msc. Luis Carlos Calderón Rodríguez (Secretario)** y el **Msc. Rusber Alberto Risco Ojeda (Integrante)** y de expedito según Resolución Decanal N° 632-2023-UNS-FI, y en concordancia a lo dispuesto en Oficio Múltiple N° 034-2022-UNS-CU-SG, el Jurado Evaluador, titular, da inicio a la sustentación de la Tesis titulada **ANÁLISIS VIBRACIONAL DEL MOTOR TRIFÁSICO DE 150 HP PARA MEJORAR LA CONFIABILIDAD DEL COMPENSOR DE FRIO EN LA EMPRESA HAYDUCK<sup>®</sup>**, perteneciente al bachiller: **HURTADO PULIDO FRANZ MAHATMA** con código de matrícula N° 0201316039 quien fue asesorado por el **Msc. Rusber Alberto Risco Ojeda**, según Resolución Decanal N° 425-2021-UNS-FI.

El Jurado Evaluador, después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo, y con las sugerencias pertinentes en concordancia con el Reglamento General de Grados y Títulos, vigente, declaran aprobar:

BACHILLER	PROMEDIO VIGESIMAL	PONDERACIÓN
HURTADO PULIDO FRANZ MAHATMA	16	REGULAR

Siendo las 12:30 pm del mismo día, se dio por terminado el acto de sustentación, firmando la presente acta en señal de conformidad.

Nuevo Chimbote, setiembre 12 de 2023



Msc. Nelter Javier Escalante Espinoza  
PRESIDENTE



Msc. Luis Carlos Calderon Rodriguez  
SECRETARIO



Msc. Rusber Alberto Risco Ojeda  
INTEGRANTE

### ACTA DE SUSTENTACIÓN INFORME FINAL DE TESIS

A los doce días del mes de setiembre del año dos mil veintitrés, siendo las 12:00 a.m., el Jurado Evaluador designado mediante Resolución N° 292-2023-UNS-CFI, integrado por los docentes: **Msc. Nelder Javier Escalante Espinoza (Presidente)**, **Msc. Luis Carlos Calderón Rodríguez (Secretario)** y **el Msc. Rusber Alberto Risco Ojeda (Integrante)** y de expedito según Resolución Decanal N° 632-2023-UNS-FI, y en concordancia a lo dispuesto en Oficio Múltiple N° 034-2022-UNS-CU-SG, el Jurado Evaluador, titular, da inicio a la sustentación de la Tesis titulada **ANÁLISIS VIBRACIONAL DEL MOTOR TRIFÁSICO DE 150 HP PARA MEJORAR LA CONFIABILIDAD DEL COMPENSADOR DE FRIO EN LA EMPRESA HAYDUCK**, perteneciente al bachiller: **QUISPE VIGO FRANK DIEGO** con código de matrícula N° 0201316003 quien fue asesorado por el Msc. Rusber Alberto Risco Ojeda, según Resolución Decanal N° 425-2021-UNS-FI.

El Jurado Evaluador, después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo, y con las sugerencias pertinentes en concordancia con el Reglamento General de Grados y Títulos, vigente, declaran aprobar:

BACHILLER	PROMEDIO VIGESIMAL	PONDERACIÓN
QUISPE VIGO FRANK DIEGO	16	REGULAR

Siendo las 12:30 a.m. del mismo día, se dio por terminado el acto de sustentación, firmando la presente acta en señal de conformidad.

Nuevo Chimbote, setiembre 12 de 2023

  
Msc. Nelder Javier Escalante Espinoza  
PRESIDENTE

  
Msc. Luis Carlos Calderon Rodriguez  
SECRETARIO

  
Msc. Rusber Alberto Risco Ojeda  
INTEGRANTE



## Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: FRANZ MAHATMA HURTADO PULIDO  
Título del ejercicio: TESIS FINAL  
Título de la entrega: ANÁLISIS VIBRACIONAL DEL MOTOR TRIFÁSICO  
Nombre del archivo: IFT.\_Quispe\_Vigo\_Hurtado\_Pulido.pdf  
Tamaño del archivo: 2.8M  
Total páginas: 91  
Total de palabras: 14,601  
Total de caracteres: 83,641  
Fecha de entrega: 28-dic.-2023 08:39p. m. (UTC-0500)  
Identificador de la entrega... 2265396349



FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECÁNICO

**“ANÁLISIS VIBRACIONAL DEL MOTOR TRIFÁSICO DE 150 HP PARA MEJORAR LA CONFIABILIDAD DEL EQUIPO DE COMPRESOR DE FRÍO, HAYDUK”**

AUTORES:

- ✓ Bach. QUISPE VIGO, FRANK DIEGO
- ✓ Bach. HURTADO PULIDO, FRANZ MAHATMA

ASPSOR:

- ✓ MSc. Ing. RUSBER ALBERTO RISCO OJEDA

NUEVO CHIMBOTE - PERÚ  
2023

# ANÁLISIS VIBRACIONAL DEL MOTOR TRIFÁSICO

## INFORME DE ORIGINALIDAD

23%

INDICE DE SIMILITUD

23%

FUENTES DE INTERNET

0%

PUBLICACIONES

9%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="https://aprenderly.com">aprenderly.com</a>	Fuente de Internet	5%
2	<a href="https://pt.scribd.com">pt.scribd.com</a>	Fuente de Internet	3%
3	<a href="https://es.slideshare.net">es.slideshare.net</a>	Fuente de Internet	2%
4	<a href="https://repositorio.usm.cl">repositorio.usm.cl</a>	Fuente de Internet	2%
5	<a href="https://www.scribd.com">www.scribd.com</a>	Fuente de Internet	1%
6	<a href="https://repositorio.uss.edu.pe">repositorio.uss.edu.pe</a>	Fuente de Internet	1%
7	<a href="https://repositorio.enamm.edu.pe">repositorio.enamm.edu.pe</a>	Fuente de Internet	1%
8	<a href="https://vsip.info">vsip.info</a>	Fuente de Internet	1%
9	<a href="https://biblioteca.usac.edu.gt">biblioteca.usac.edu.gt</a>		1

Fuente de Internet

%

---

## CONSTANCIA DE AUTORIZACIÓN DE TOMA DE DATOS PARA TESIS

Yo **Adrián Gomez** con cargo de **Ingeniero de Confiabilidad** en la empresa Hayduk Corporación, en representación de la empresa mencionada constode que **Frank Diego Quispe Vigo**, realizó prácticas profesionales en la empresa Hayduk Coishco desde Julio del 2021 hasta junio del 2022, y durante este periodo estuvo encargado de apoyar en el monitoreo de vibraciones de los equipos en planta Hayduk Coishco.

De tal forma manifiesto y expreso mi consentimiento y autorización para que los datos obtenidos del monitoreo de vibraciones puedan ser empleados para la elaboración de su informe final de tesis llamado “**ANÁLISIS VIBRACIONAL DEL MOTOR TRIFÁSICO DE 150 HP PARA MEJORAR LA CONFIABILIDAD DEL EQUIPO DE COMPRESOR DE FRIO, HAYDUK**”; de los tesistas Frank Diego Quispe Vigo y Franz Hurtado Pulido. En señal de conformidad se firma esta presente constancia.

Lima, 31 de agosto del 2023

*Adrian G.*



Adrian Gomez C. | Ing. de Confiabilidad CHI - CHD  
Cel: 959077273; Teléfono fijo: 211-2999  
Av. Manuel Olguín 501, Of. 701, Santiago de Surco, Lima

## **DEDICATORIA**

Le dedico este resultado a toda mi familia que me han enseñado a ser la persona que soy hoy en día, mis principios, valores y perseverancia en todo lo que me he propuesto tanto en mi vida cotidiana, educativa y laboral.

Dedicarle quiero dedicarle este trabajo a mi esposa e hijo porque son mi apoyo emocional que hizo que no desistiera de mis objetivos que me he trazado y seguiré trazándome en cada etapa de familiar.

Franz Hurtado Pulido

La presente tesis la dedico a mis padres y toda mi familia que han sabido educarme con buenos sentimientos, hábitos y valores lo cual me ha permitido seguir adelante y cumplir con mis objetivos.

También dedico esta tesis a mi pareja y mi pequeña hija Alice, quienes han sido mi principal motivación para seguir adelante y seguir superándome como profesional.

Frank Quispe Vigo

## AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por haberme permitido vivir hasta este día, haberme guiado a lo largo de toda mi vida, por ser mi apoyo y mi camino, y haberme dado la fortaleza para seguir adelante en los momentos de debilidad.

Agradezco a Dios por bendecirme con unos padres que siempre me han brindado su apoyo incondicional, lo que me ha permitido cumplir con mis objetivos personales y académicos.

Agradecer a todos mis docentes que han sido parte de mi formación académica, por transmitirme todos sus conocimientos necesarios para poder estar aquí hoy.

Agradecer a mi asesor de Tesis, por su dedicación y paciencia, sin sus conocimientos y correcciones precisas no hubiera podido llegar a esta instancia tan anhelada.

Y finalmente agradecer a mi centro de estudios, que gracias a sus exigencias me han permitido formarme como profesional y al mismo tiempo obtener mi título profesional.

Frank Quispe Vigo

A dios que por darme las oportunidades, bendición, paciencia y sabiduría para discernir lo bueno y lo malo, para lograr todos mis objetivos trazados.

A mi asesor MSc. Ing. Rusber Alberto Risco Ojeda sin usted y sus virtudes, constancia en este trabajo no lo hubiésemos logrado tan fácil, formando parte importante de esta tesis con sus aportes profesionales que lo caracterizan.

A mis padres, esposa e hijo que con su apoyo incondicional no hubiese hecho posible el proceso y finalización de la presente tesis de investigación.

Por ultimo y no menos importante a mi universidad nacional del santa que me exigido tanto, pero al mismo tiempo me ha permitido obtener el tan ansiado título. Franz Hurtado Pulido

## ÍNDICE

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTO.....	3
RESUMEN .....	5
PALABRAS CLAVES .....	5
ABSTRACT.....	6
KEYWORDS.....	6
<b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>7</b>
1.1. Descripción .....	7
1.2. Formulación del Problema.....	8
1.3. Formulación de Hipótesis .....	8
1.4. Justificación .....	8
1.4.1. Justificación Teórica.....	8
1.4.2. Justificación práctica.....	8
1.4.3. Justificación económica .....	8
1.5. Objetivos de la Investigación.....	9
1.5.1. Objetivo General.....	9
1.5.2. Objetivos Específicos.....	9
1.6. Importancia de la Investigación .....	10
<b>II. MARCO TEORICO .....</b>	<b>11</b>
2.1. Antecedentes .....	11
2.2. Metodología.....	12
2.2.1. Método de la investigación.....	12
2.2.2. Procedimiento de la Investigación .....	12
2.2.3. Diseño de la Investigación.....	12
2.2.4. Identificación de Variables.....	12
2.3. Marco Conceptual .....	14
2.3.1. El Análisis Vibracional .....	14
2.3.2. Unidades de vibración.....	14
2.3.3. Parámetros para medir Vibraciones .....	16
2.3.4. Adquisición de datos .....	16
2.3.5. Transductores de vibración .....	17

2.3.6. Selección de transductores .....	18
2.3.7. Localización de los transductores .....	18
2.3.8. Rango de frecuencia .....	19
2.3.9. Procesamiento de datos .....	19
2.3.10. Frecuencias fantasmas .....	20
2.3.11. Ventanas espectrales .....	21
2.3.12. Rango dinámico.....	21
2.3.13. Promediado .....	21
2.3.14. Diagnóstico de Fallas .....	22
2.3.15. Análisis Espectral .....	22
2.3.16. Defectos a la velocidad de Operación.....	22
2.3.17. Desbalance de masa.....	23
2.3.18. Desalineamiento .....	24
2.3.19. Flexión del eje .....	24
2.3.20. Desgaste de Cojinete.....	24
2.3.21. Frecuencia de falla de Rodamientos .....	25
2.3.22. Técnicas de Análisis .....	25
2.3.23. Confiabilidad.....	26
2.3.24. Disponibilidad de equipos.....	28
2.3.25. Definición de MTRR .....	29
2.3.26. Definición de MTBF.....	30
2.3.27. Fiabilidad .....	31
2.3.28. Relación entre MTBF con el MTTR.....	31
2.3.29. Análisis de defecto de cojinete .....	32
2.3.30. Motores Eléctricos .....	34
2.3.31. Transformada Rápida de Fourier.....	36
2.3.32. Cálculo para el tiempo de adquisición de data .....	37
2.3.33. Calcular el número de muestras de mi equipo .....	38
2.3.34. Voltaje inducido en un conductor.....	39
2.3.35. Potencia y par de un motor eléctrico .....	40
2.3.36. Tipos de Fallas por Vibraciones en motores eléctricos asíncronos .....	41
<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>49</b>

3.1 . Materiales y Equipos .....	49
3.1.1 Colector de Datos Adash A4900 Vibrio .....	49
3.2. Tipo de Investigación y Desarrollo de la investigación .....	51
3.3. Realización del monitoreo vibracional .....	51
3.3.1. Descarga data para monitoreo vibracional .....	51
3.3.2. Monitoreo vibracional.....	52
3.3.3. Análisis y elaboración de reportes.....	52
3.4. Procedimiento para llevar a cabo el Monitoreo Vibracional.....	54
<b>IV. RESULTADO Y DISCUSIONES .....</b>	<b>55</b>
4.1 . Ruta de los Motores Eléctricos Asíncronos de 150 HP .....	55
4.2. Cálculo de la Resolución, Muestra y el Tiempo de Adquisición.....	56
4.2.1 Cálculo de Resolución .....	56
4.2.2 Cálculo de las Muestras del equipo Colector.....	57
4.2.3 Cálculo del Tiempo de Adquisición.....	58
4.5 Disponibilidad de los Motores Eléctricos.....	78
<b>V. DISCUSIÓN.....</b>	<b>78</b>
<b>VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>81</b>
6.1. CONCLUSIONES .....	81
6.2. RECOMENDACIONES .....	82
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>83</b>
<b>VIII. ANEXOS .....</b>	<b>84</b>
8.1. Ficha Técnica y Certificado de Calibración del Equipo.....	84
8.2. Anexo Norma ISO 10816-3.....	85
8.3. Valores Estándar de Envolvente de aceleración en Pulgadas Pk-Pk.....	86
8.4. Gráfico de diseño de investigación.....	87

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Variables de investigación.....	10
Tabla 2: Unidades Básicas de la Vibración,,.....	13
Tabla 3: Selección de la ventana en FFT .....	20
Tabla 4: Identificación y corrección de fallas en maquinaria rotativa.....	22
Tabla 5: Tabla de frecuencias y formas de espectro... ..	30
Tabla 6: Especificaciones Técnicas del equipo de vibraciones.....	48
Tabla 7: Matriz de Consistencia .....	53
Tabla 8: Valores de Globales de Vibración del motor eléctrico N°03.....	60
Tabla 9: Valores de Globales de Vibración del motor eléctrico N°04.....	63
Tabla 10: Valores de Globales de Vibración del motor eléctrico N° 05.....	66
Tabla 11: Valores de Globales de Vibración del motor eléctrico N° 06.....	70
Tabla 12: Equipos Monitoreados en planta Hayduk.....	73
Tabla 13: Tiempo en horas de mantenimiento al motor eléctrico .....	75
Tabla 14: Descripción de la implementación del mantenimiento predictivo .....	75
Tabla 15: Cálculo del desempeño del compresor N° 05.....	76

## RESUMEN

La presente tesis tuvo como principal objetivo aplicar el mantenimiento basado en la condición (CBM), que consiste en una estrategia de mantenimiento que se caracteriza por centrarse en la disponibilidad, fiabilidad y costo de mantenimiento de los activos; para el desarrollo de la presente tesis nos centramos en la zona de sala de máquinas de la Planta Pesquera Hayduk, ubicado en Coishco – Santa – Ancash; que está delimitada por 07 motores asíncronos trifásicos de 150 HP, de los cuales 04 se encontraron operativos, y que fueron empleados para desarrollar la presente tesis y 03 se encontraron inoperativos. Nuestro equipo colector de vibraciones a emplear fue el Adash Vibrio 4900 M, que nos permitió recolectar, almacenar y posteriormente transferir la data a la computadora para poder analizarlo por medio de su forma de onda y espectro, obteniendo valores de velocidad en mm/s y aceleración G's. Nuestros estándares que definieron los límites permisibles de vibración están establecidos en la Norma ISO 10816-3. Finalmente empleando la técnica del análisis de vibraciones y el correcto diagnóstico de los motores asíncronos trifásicos, se pudo optimizar la confiabilidad asegurando la disponibilidad de los motores eléctricos asíncronos trifásicos de 150 HP de un 93.75% a un 98.9%.

### PALABRAS CLAVES

Mantenimiento basado en la condición, mantenimiento predictivo, análisis vibracional, confiabilidad.

## **ABSTRACT**

The main objective of this thesis was to apply condition-based maintenance (CBM), which consists of a maintenance strategy that is characterized by focusing on the availability, reliability and maintenance cost of assets; For the development of this thesis we focus on the engine room area of the Hayduk Fishing Plant, located in Coishco – Santa – Ancash; which is delimited by 07 three-phase asynchronous motors of 150 HP, of which 04 were found operational, and which were used to develop this thesis and 03 were found inoperative. Our vibration collecting equipment to be used was the Adash Vibrio 4900 M, which allowed us to collect, store and later transfer the data to the computer to be able to analyze it through its waveform and spectrum, obtaining speed values in mm/s and acceleration. G's. Our standards that defined the permissible limits of vibration are established in ISO 10816-3. Finally, using the vibration analysis technique and the correct diagnosis of the three-phase asynchronous motors, it was possible to optimize the reliability, ensuring the availability of the 150 HP three-phase asynchronous electric motors from 93.75% to 98.9%.

## **KEYWORDS**

Condition based maintenance, predictive maintenance, vibration analysis, reliability.

## **I. INTRODUCCIÓN**

### 1.1. Descripción

El Perú es uno de los mayores exportadores de Harina de Pescado y productores de conservas en el mundo. Por tal motivo las plantas pesqueras no pueden permitir un fallo de un equipo o maquinaria durante su temporada de proceso de harina de pescado, conservas y congelados, porque le generaría grandes pérdidas. Ante esto las plantas industriales han empezado a implementar el tipo de mantenimiento basado en la condición, que consiste en aplicar técnicas como el análisis vibracional, termografía y ultrasonido, que permiten identificar futuras fallas en los equipos industriales y por consecuencia la empresa pueda dar mantenimiento o reemplazar dichos equipos o componentes antes de que fallen.

En la actualidad se están realizando técnicas de mantenimiento proactivo, en la presente investigación emplearemos la técnica del análisis vibracional para el mejoramiento de la fiabilidad global de los equipos, que nos permitirá reducir las pérdidas de materia prima por paradas no planificadas, reduciendo así el índice de gastos en repuestos.

Por lo tanto, la empresa Pesquera Hayduk implementó el área de confiabilidad, área que tiene como principal función maximizar el rendimiento de los activos, además de definir y estudiar los modos de fallo y calcular la probabilidad de vida de los activos; y se encargó de implementar una ruta de monitoreo de vibraciones a los equipos más críticos dentro de la planta Hayduk.

## 1.2. Formulación del Problema

¿De qué manera el análisis vibracional de los 4 motores trifásicos de 150 HP mejorará la confiabilidad de los compresores de frío?

## 1.3. Formulación de Hipótesis

De qué manera mejoro la confiabilidad de los motores eléctricos asíncronos trifásicos de 150 HP de los compresores de frío, dejándolo en estado óptimo (condición A), según norma ISO 10816-3.

## 1.4. Delimitación

4 motores eléctricos operativos de 150 HP de los compresores de frío

## 1.5. Justificación

### 1.5.1. Justificación Teórica

Esta investigación se realizó con el propósito de conocer la metodología del análisis vibracional, como instrumento para la supervisión y diagnóstico de fallas mecánicas de los equipos, cuyo propósito es reducir los problemas de los equipos, gastos en reparaciones imprevistas y paradas de planta.

### 1.5.2. Justificación práctica

Esta investigación busca demostrar que el análisis vibracional es una buena práctica que nos permite optimizar el desempeño de nuestros equipos, y con el apoyo de la tecnología moderna como son los equipos colectores de datos nos permite tener una lectura de vibraciones de varios equipos en tiempo real de nuestra planta.

### 1.5.3. Justificación económica

Al tener un plan de mantenimiento basado en el análisis vibracional de los equipos de planta, se va a generar una reducción en las horas hombre dedicadas a las tareas de mantenimiento y la optimización en los costos de operación, aumentando la eficiencia de los equipos y evitando paradas imprevistas en la producción.

## 1.6. Objetivos de la Investigación

### 1.6.1. Objetivo General

Recolectar, analizar y diagnosticar los datos vibracionales de los Motores Trifásicos de 150 HP para mejorar la confiabilidad de los equipos de compresor de frío, Hayduk.

### 1.6.2. Objetivos Específicos

- a) Evaluar y Analizar los espectros y parámetros de vibración, de velocidad y aceleración del motor eléctrico de 150 HP en el software DSS Adash y determinar si los valores globales obtenidos se encuentran dentro de los límites permisibles según la Norma ISO 10816-3.
- b) Diagnosticar las posibles fallas que se pueda presentar en los motores trifásicos de 150 hp.
- c) Realizar un análisis del impacto económico que tendrá el análisis vibracional realizado en planta Hayduk y calcular la disponibilidad de los equipos.
- d) Optimizar la confiabilidad asegurando la disponibilidad de los motores eléctricos de 150 HP mediante la recolección de datos de vibraciones y la lectura de

espectros con el colector de datos Adash 4900 Vibrio M.

#### 1.7. Importancia de la Investigación

Este proyecto nos hace notar de la relevancia del análisis vibracional en los equipos, como técnica de mantenimiento basado en la condición; además nos da a entender que toda máquina o equipo industrial a la larga tiende a presentar fallas, y el análisis vibracional llega como una buena práctica para determinar las causas de la falla y las consecuencias que esto puede ocasionar.

El análisis vibracional tiene una gran importancia ya que esto nos permite detectar fallo de rodamientos, engranajes, lubricación, desbalanceo, desalineación, etc., mediante los espectros proporcionados por los equipos analizadores de vibraciones, ya que nos permiten interpretar el problema en la máquina y así tomar acciones proactivas para el mejoramiento del equipo.

De tal forma, con la implementación del análisis vibracional nosotros podremos determinar los problemas incluso mucho antes de que sucedan la falla o afecte a otros componentes de los equipos. La aplicación del análisis vibracional, monitoreo de condiciones o también llamado mantenimiento predictivo ha logrado grandes avances y beneficios para las empresas que lo ejercen, aumentando la vida útil de los equipos y maquinarias.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes

Barboza, A. (2013), realizó la investigación: “sistema de detección de fallas para una bomba centrífuga”, el objetivo general es realizar un sistema de diagnósticos de fallas para una bomba centrífuga, que se le instaló a un motor eléctrico monofásico. El sistema de diagnóstico de fallas se basó en el análisis vibracional. La presente tesis consiste en el estudio del funcionamiento de las bombas centrifugas, se eligió método de detección de fallas mediante el análisis vibracional que permitió conocer el estado en el que se encuentra la máquina y en que componente está ocurriendo la falla.

Zapana, B. (2017), en su tesis titulada “Proyecto de un procedimiento de diagnóstico de fallas por análisis vibracional en bombas y ventiladores”, tuvo como objetivo establecer un procedimiento de diagnóstico de fallas usando el análisis vibraciones en el dominio discreto de la frecuencia, además de un procedimiento de equilibrio basado en los coeficientes de influencia. En la presente tesis se basa en la aplicación del diagnóstico de análisis de falla utilizando el análisis de vibración, se realizó dos tipos de estudio, uno basado en el campo de análisis de vibraciones y el otro en el procedimiento de equilibrio, basado en el estado y evaluación de los equipos siendo la más importante y versátil el análisis de vibraciones mecánicas aplicadas en el dominio de la frecuencia.

Mejía, J. (2009), en su tesis “Análisis de vibraciones en motores eléctricos asíncronos trifásicos” tuvo como objetivo analizar las vibraciones que ocurren en un motor eléctrico asíncrono trifásico, estableciendo un procedimiento de diagnóstico del

estado de sus componentes. Este trabajo presenta las frecuencias características de cada componente de la máquina asíncrona, las causas que originan las vibraciones, así también como los instrumentos que podemos utilizar para poder hacer las mediciones de las vibraciones y cómo implementar el análisis de vibraciones en el mantenimiento predictivo.

## 2.2. Metodología

### 2.2.1. Método de la investigación

#### Método de Análisis Cuantitativo-Experimental

### 2.2.2. Procedimiento de la Investigación

El procedimiento de la investigación se basa en el análisis vibracional mediante el colector de datos Adash Vibrio 4900M, que nos permitirá detectar y diagnosticar posibles fallas mecánicas en los componentes de las máquinas mediante el software DDS Adash.

### 2.2.3. Diseño de la Investigación

Diseño Experimental Cuantitativa y Cualitativa.

### 2.2.4. Identificación de Variables

#### 2.2.4.1. Variable Dependiente:

- ✓ Análisis Vibracional del Motor Trifásico de 150 HP.

#### 2.2.4.2. Variable Independiente:

- ✓ Para mejorar la confiabilidad del equipo de compresor de frío.

**Tabla 1.***Variables de investigación*

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensión	Indicadores	Escala de Medición	
Variable Independiente	Análisis	El análisis vibracional se define como una de las principales técnicas para supervisar y diagnosticar fallas en las mecánicas. maquinarias.	Se determinará los valores por medio de ondas de tiempo en función de la frecuencia vs	Gráficos espectrales	Velocidad	pulg/seg ó mm/s
	Vibracional del Motor trifásico de 150 HP.	técnicas para supervisar y diagnosticar fallas en las mecánicas. maquinarias.	la amplitud, mediante el equipo Adash 4900 Vibrio M colector de dato, obteniendo valores de velocidad, aceleración y envolvente de aceleración.	Parámetros de vibración	Aceleración de Envolverte de aceleración	g (pulg/seg <sup>2</sup> ) gE (pulg/seg <sup>2</sup> )
Variable Dependiente	Mejorar la confiabilidad del equipo de compresor de frío.	La confiabilidad es la probabilidad de que un dispositivo o sistema funcione sin fallas, durante un período determinado, en unas condiciones de funcionamiento predeterminadas.	Se define como un proceso de mejora continua, a través de la recolección de datos, lo que indicará si se le deberá realizar un mantenimiento de acuerdo a lo que nos indique el software, mejorando la funcionalidad del equipo.	Análisis y diagnostico	Operatividad del equipo	Cuantitativa

Nota. Fuente Propia.

## 2.3. Marco Conceptual

### 2.3.1. El Análisis Vibracional

Es un procedimiento por el cuál medimos los valores de vibración de las máquinas industriales, y así poder determinar en qué condiciones de operación está el equipo y los componentes que lo conforman. Es un mantenimiento basado en la condición de operación del equipo, que está dentro del mantenimiento predictivo.

### 2.3.2. Unidades de vibración

Las unidades básicas para describir las fuerzas de vibración y su movimiento son:

**Tabla 2**

#### *Unidades Básicas de la Vibración*

Parámetros	Sistema Internacional	Sistema Imperial o inglés	
Amplitud de la Vibración	Desplazamiento	micrómetro Pico a Pico ( $\mu\text{mP-P}$ )	milésimas de pulgada Pico a Pico (mils P-P)
	Velocidad	milímetros/segundo Cero a Pico rms ( $\text{mm/s 0-P o rms}$ )	pulgadas por segundo Cero a Pico rms (ips 0-P o rms)
	Aceleración	metros/segundo al cuadrado Cero a Pico ( $\text{m/s}^2 \text{ 0-p}$ )	$\text{g}'\text{s pico o rms}$ ( $1\text{g} = 386.1 \text{ in/s}^2$ )
Masa	Kilogramos (kg)	libras masa (lb)	
Fuerza	Newtons (N)	libras fuerza (lbf)	
Frecuencia	ciclos por minutos (cpm), ciclos por segundo Hertz (cps o Hz)	ciclo por minuto (cpm) ciclos por segundo o Hertz (cps o Hz)	
Fase o Desplazamiento Angular	grados sexagesimales o radianes ( $^\circ$ o rad)	radianes por segundo (rad/s) grados sexagesimales o radianes ( $^\circ$ o rad)	
Velocidad de Rotación	revoluciones por minuto (rpm)	revoluciones por minuto (rpm)	

Nota. Vibraciones Básicas de máquinas. Ronald L. Eshleman. 2018.

La vibración tiene 4 características fundamentales que son:

- a) La Frecuencia: equivale al número de ciclos por la unidad de tiempo, que es expresado en ciclo por minuto (cpm), en ciclos por segundos o Hertz (cps o Hz).
- b) El periodo (T): es recíproco a la frecuencia y se expresa como  $T=1/f$ , se define como el tiempo requerido para completar un ciclo de vibración.
- c) La Amplitud: es el valor máximo de la vibración en una máquina.
- d) La Fase: es la diferencia angular medida en grados o radianes entre vibraciones de la misma frecuencia.

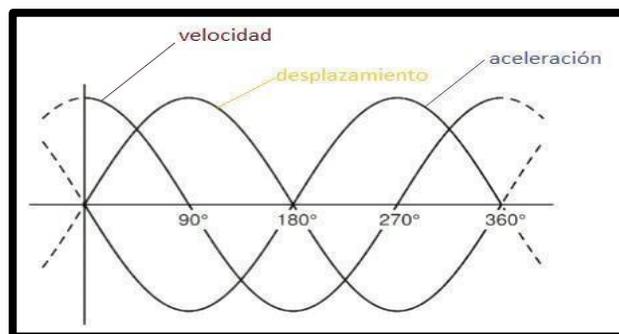
Ciertos movimientos vibratorios de máquinas son armónicos simples, como los generados por el desbalance, en donde se muestra una amplitud 1X dominante en el espectro; también tenemos los armónicos son múltiplos enteros, es decir a 1X, 2X, 3X 4X ...) de cualquier onda senoidal.

Las amplitudes de las vibraciones se expresan en, pico a pico (P-P), raíz cuadrática media (rms), y cero a pico (0-P), donde la amplitud P-P (pico a pico) se mide en forma de onda de pico positivo y negativo adyacente.

También existen las formas de ondas no armónicas, donde la amplitud positiva normalmente no es igual a la amplitud negativa.

**Figura 1**

*Relaciones entre amplitud, tiempo, periodo y frecuencia.*



Nota. Fuente Propia

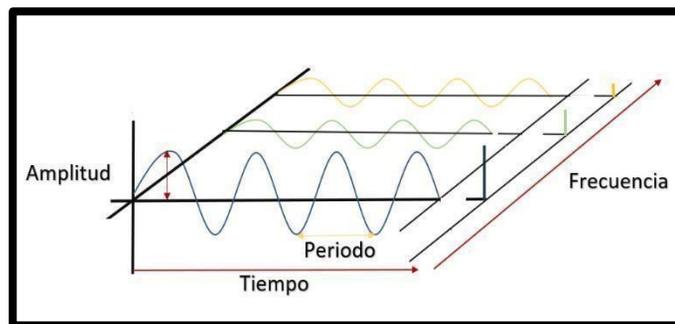
### 2.3.3. Parámetros para medir Vibraciones

Los valores para diagnosticar la vibración de una máquina son:

- a) **Desplazamiento:** usado para medir vibraciones a baja frecuencia(inferiores a 1200 cpm o 20 Hz).
- b) **Velocidad:** usado para medir la condición de la máquina en un rango de frecuencia (de 600 a 60 000 cpm o 10 a 1 000 Hz).
- c) **Aceleración:** usado para medir vibraciones a altas frecuencias, superiores a los 60 000 cpm (1000Hz).

**Figura 2**

*Relaciones entre a velocidad, desplazamiento y aceleración.*



Nota. Fuente Propia

### 2.3.4. Adquisición de datos

La recopilación adecuada de los datos de vibración es la clave del monitoreo efectivo de la máquina, la obtención de datos de buena calidad requiere de una planificación con los siguientes puntos: la máquina, naturaleza de los datos de vibración esperados, equipo de medición disponible y el propósito de la prueba. Antes de la recopilación de datos, el analista debe crear un plan técnico y económicamente factible basado en el propósito de los datos que se recopilarán (es decir monitoreo, diagnóstico, evaluación de aceptación).

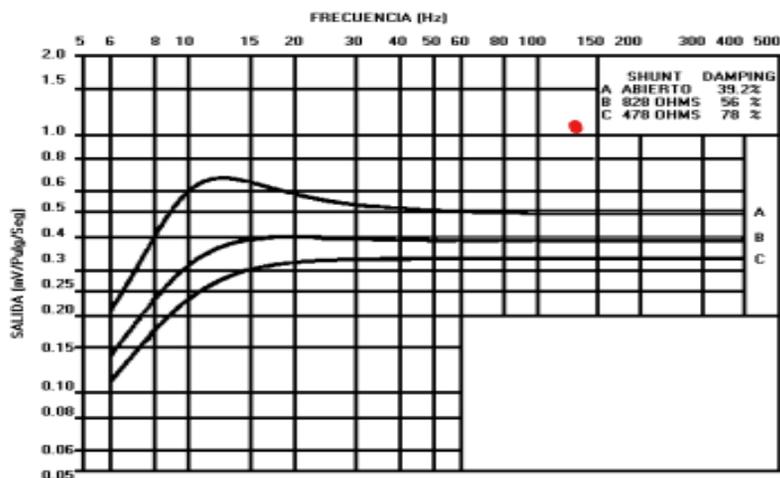
Dado a que los datos se digitalizan antes del almacenamiento, el tiempo de recopilación y el tamaño de la muestra deben tenerse en cuenta para mostrar la información adecuada para el análisis y la evaluación.

### 2.3.5. Transductores de vibración

La información de vibración es adquirida por los transductores colocados en posiciones óptimas en un sistema mecánico. Los transductores convierten las oscilaciones mecánicas en señales eléctricas que se sintonizan y procesan con una amplia gama de dispositivos.

**Figura 3**

*frecuencia de respuesta de algunos transductores de velocidad*



Nota. Vibraciones Básicas de máquinas. Ronald L. Eshleman

La selección del transductor se basa en la sensibilidad, el tamaño, la medida seleccionada, la respuesta a la frecuencia, el diseño y la velocidad de la máquina, a cuál determinara la calidad del instrumento a un estímulo (voltaje o vibración) a una frecuencia dada.

### 2.3.6. Selección de transductores

Para la selección de transductores son: la respuesta de frecuencia, proporción de señal y ruido, sensibilidad y magnitud en la cual va a ser medida. El rango de frecuencia del transductor debe estar de acuerdo con la frecuencia generada por sus componentes de la máquina, caso contrario se deberá tomar otra opción de transductor y la señal convertirla a sus propias unidades de medida.

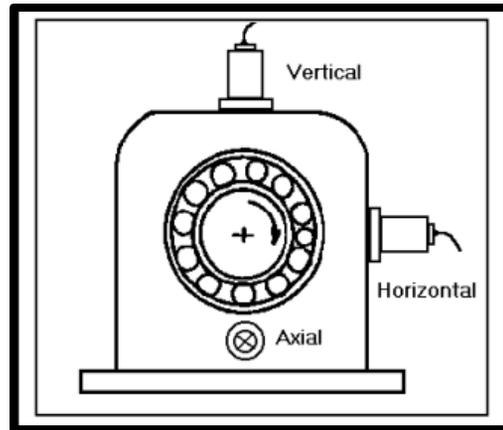
El rango de respuesta es muy importante para que el usuario no mida las vibraciones en un rango de frecuencias para el cual el colector no responde apropiadamente.

### 2.3.7. Localización de los transductores

La clave para obtener lecturas de vibración precisas es colocar los transductores en puntos estratégicos donde reaccionan al estado de la maquina o lo más cerca posible de los cojinetes.

Los sensores se deben montar lo más cerca posible del rodamiento, se debe determinar la posición más importante para capturar la información óptima, desde eje hasta el punto de registro, evitar la transmisión, placas delgadas, guardas y empaquetaduras.

**Figura 4**  
*Puntos óptimos de medición*



Nota. Fuente Propia

#### 2.3.8. Rango de frecuencia

Los espectros se pueden adquirir como parte de la función de visualización de muchos colectores de datos, el rango de frecuencia debe reflejar apropiadamente la muestra con la selección adecuada del transductor.

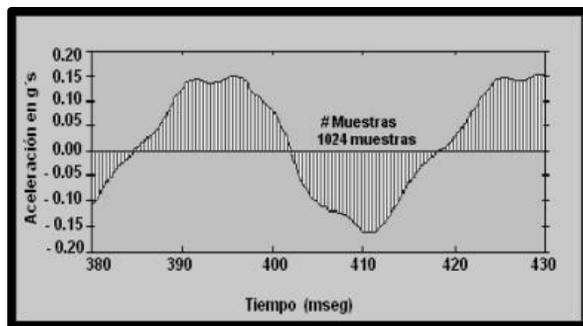
Si no se dispone de una adecuada resolución dentro del rango de frecuencia, se requerirán múltiples bandas de frecuencia con la resolución adecuada para cubrir el rango total deseado para el análisis.

La óptima configuración proporciona la suficiente claridad para analizar la frecuencia a la velocidad de operación y sus bandas adyacentes, así como el rango de alta frecuencia para los rodamientos y engranajes.

#### 2.3.9. Procesamiento de datos

La señal de entrada proveniente de un transductor se digitaliza antes del procesamiento de la FFT, los datos del número almacenados en el bufer del analizador dependen del número de líneas seleccionadas.

La computadora almacena estos datos como componentes igualmente espaciados de amplitud(X) y tiempo(Y).

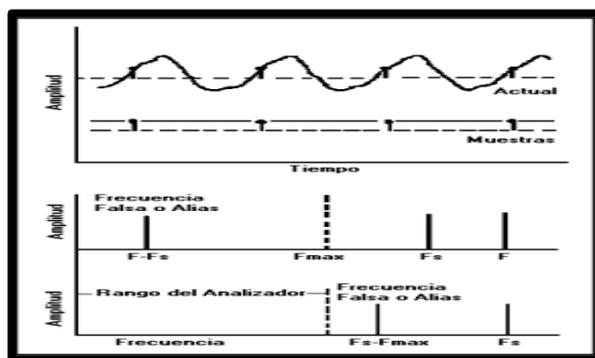
**Figura 5***Muestreo de FFT*

Nota. fuente Vibraciones Básicas de máquinas. Ronald L. Eshleman

### 2.3.10. Frecuencias fantasmas

La frecuencia fantasma o de alias se obtiene en el espectro cuando la frecuencia de muestreo es inferior a la frecuencia máxima presente en los datos, por lo tanto, se debe tener cuidado de los algoritmos de FFT que no tengan filtros anti-alias.

El criterio de Nyquist establece que la tasa de muestreo del analizador debe ser mayor que el doble de la frecuencia más alta presente en la señal.

**Figura 6***Frecuencia de alias(fantasma)*

Nota. Fuente Vibraciones Básicas de máquinas. Ronald L. Eshleman

### 2.3.11. Ventanas espectrales

El algoritmo FFT cambia los datos de forma de onda digitalizados almacenados en el buffer al espectro asumiendo que los datos iniciales y finales son similares. Por esta razón, el algoritmo FFT requiere que los datos comiencen y terminen con amplitud cero.

$$\text{Resolución} = 2x \text{ Ancho de banda} = 2 \times \text{rango de frecuencias} \times (\text{factor ventana})$$

**Tabla 3**

*Selección de la ventana en FFT*

Ventana	Propósito	Incertidumbre de amplitud	factor de ventana
<b>Uniforme</b>	Pruebas de impacto	56.50%	1
<b>Hanning</b>	Análisis de falla y monitoreo de vibraciones	18.80%	1.5
<b>Flat Top</b>	Evaluación de Condición	1%	3.8

Nota. Fuente Vibraciones Básicas de máquinas. Ronald L. Eshleman. 2018

### 2.3.12. Rango dinámico

El rango dinámico se refiere a la capacidad del analizador para mostrar los componentes de amplitud muy baja cuando hay componentes de amplitud muy alto en el espectro.

Este rango dinámico existe en todos los colectores de datos modernos, sin embargo, se debe ajustar adecuadamente o emplear un auto rango.

### 2.3.13. Promediado

Se emplea para mejorar los datos en la forma de onda y espectro, para emplear el promediado de rms, el ruido en el espectro se promedia estadísticamente pero no se elimina.

El promediado síncrono en el tiempo, elimina el ruido y la vibración no relacionada con la frecuencia del gatillo(disparador) de adquisiciones.

#### 2.3.14. Diagnóstico de Fallas

Para nosotros poder diagnosticar fallas usamos generalmente las frecuencias de vibración la que nos permite identificar las fallas en una máquina. El diagnóstico de fallas lo encontramos en los espectros, sin embargo, también podemos emplear la forma de onda y el análisis de fase para un análisis más profundo.

#### 2.3.15. Análisis Espectral

Para poder analizar los espectros se recomienda seguir los siguientes pasos:

- i. Identificar la velocidad de operación del equipo.
- ii. Identificar la frecuencia dominante en el espectro que sean múltiplos de la velocidad de operación, ósea el 1X.
- iii. Identificar múltiplos a 1X que no sean armónicos con la velocidad de giro del equipo, que nos podría ayudar a identificar posibles fallas de rodamientos.
- iv. Encontrar las frecuencias que no dependan a la velocidad de giro del equipo analizado, como la frecuencia natural de un equipo y su frecuencia de línea.
- v. Identificar en el espectro bandas laterales.

#### 2.3.16. Defectos a la velocidad de Operación

Estos ocurren a las frecuencias predominantes de la velocidad de operación, que es identificado en el espectro como 1X.

**Tabla 4***Identificación y corrección de fallas en maquinaria rotativa*

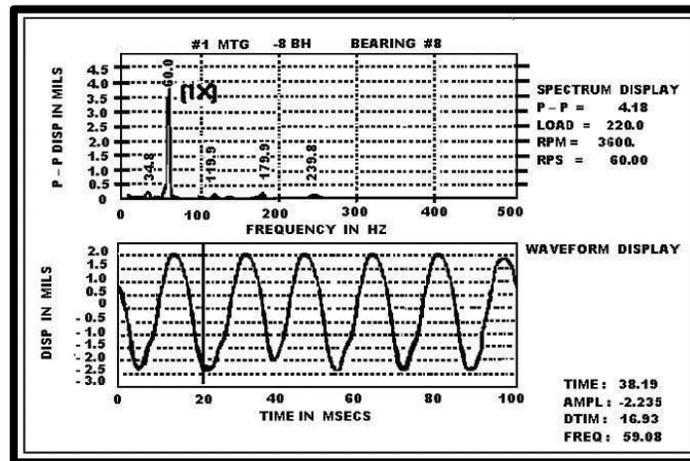
Ítem	Falla	Frecuencia	Espectro, Forma de Onda	Corrección
1	Velocidades Críticas	1X,2X,3X, etc.	Vibración amplificada debido a la cercanía de la velocidad de operación a algunas frecuencias naturales	Reubicar frecuencias naturales
2	Desbalance de masa	1X	Sobresale el 1X con valores menores de 2X,3X	Balancear en campo o taller
3	Desalineamiento	1X,2X, ocasionalmente 3X	Sobresale el 2X con amplitudes iguales o mayores a 1X,3X, vibración axial a 1X	Alinear para condiciones en caliente o en frío.
4	Flexión del eje	1X	Disminución de la amplitud de vibración alrededor de la velocidad crítica en el diagrama de Bode	Calentar o puntar para enderezar el rotor
5	Resonancia	1X,2X,3X, etc.	Alta sensibilidad al balanceo, alta amplitud de vibración a órdenes de la velocidad de operación.	Cambiar la frecuencia natural estructural
6	Flojedad	1X y gran cantidad de órdenes 1/2 X puede aparecer	Componente a 1X alta y amplitudes de múltiplos con menor nivel, pico a 1/2 X de elevada amplitud, baja vibración axial	Colocar lanas y apretar tornillos para rigidizar
7	Excentricidad	1X	Componente a 1X alta.	Maquinar para dejar concéntrica

Nota. Fuente. Vibraciones Básicas de máquinas. Ronald L. Eshleman.2018

### 2.3.17. Desbalance de masa

El desbalance se manifiesta en el espectro a 1X, eso quiere decir que a la velocidad de giro del motor y domina en el espectro, dándonos una vibración horizontal mucho mayor que la medida vertical.

**Figura 7**  
*Desbalance de masa de un motor*



Nota. Fuente. Vibraciones Básicas de máquinas. Ronald L. Eshleman

### 2.3.18. Desalineamiento

El desalineamiento suele ocasionar un comportamiento no lineal entre las máquinas acopladas, originado por mal acoplamiento entre ejes o falta de la rigidez del pedestal y de la cimentación. La amplitud de la componente de segunda orden(2X), muchas veces excede al de primer orden.

### 2.3.19. Flexión del eje

Cuando un rotor está flexionado ocasiona una sobrecarga en los cojinetes, la cual lo puede inducir a una falla de rodamientos si no es encontrado a tiempo. Cuando un eje está flexionado el centro de masa puede moverse lejos del centro geométrico lo cual generaría un desbalance.

### 2.3.20. Desgaste de Cojinete

En ocasiones generan una vibración a 1X, que mediante el análisis de fases se observa una fase estable e inestable. Los problemas más comunes en cojinetes se producen por lubricación inadecuada o contaminada y también por

desalineamiento.

### 2.3.21. Frecuencia de falla de Rodamientos

Los rodamientos o cojinetes generan frecuencias únicas a su geometría y velocidad de operación. Tenemos 04 frecuencias básicas que pueden generar falla en rodamientos:

- A. Frecuencia de paso de bolas en la pista exterior (BPFO): provocado por los rodillos o bolas al pasar sobre la pista con defectos.
- B. Frecuencia de paso de bolas en la pista interna (BPFI): producida por las bolas o rodillos al pasar sobre la pista con defectos
- C. Defecto en bolas o rodillos (BSF): originada por defectos en las bolas o rodillos.
- D. Frecuencia fundamental del tren (FTF): causada por defectos en la jaula o canastillas.

### 2.3.22. Técnicas de Análisis

Para un buen análisis de cojinetes o rodamientos se recomienda los siguientes pasos:

- a. Reconocer el equipo a monitorear
- b. Conocer la velocidad de giro del componente.
- c. Obtener los códigos de rodamiento para detectar las posibles fallas.
- d. Realizar una buena toma de datos en los respectivos puntos (horizontal, vertical y axial)
- e. Identificar las frecuencias en los espectros
- f. Identificación de bandas laterales
- g. Evaluación de la forma, energía y amplitud del espectro y forma de onda.

### 2.3.23. Confiabilidad

#### ✓ Concepto de confiabilidad

La confiabilidad es uno de los parámetros clave utilizados para administrar las operaciones de mantenimiento, el otro parámetro es la mantenibilidad, ambos parámetros definen la disponibilidad de un dispositivo, planta o sistema.

Es la capacidad del equipo para funcionar sin fallar durante un cierto periodo de tiempo, esta capacidad está ligada a su estado de conservación, condiciones de uso, diseño, calidad de sus componentes, etc. Se puede calcular usando una variedad de métodos y algoritmos, estos requieren de la existencia de un registro adecuado y una confiable base de información histórica.

#### ✓ Confiabilidad de un motor eléctrico

Conocer las claves de confiabilidad de los motores eléctricos te permiten ahorrar en la inversión, además el conocer las áreas más importantes que afectan la confiabilidad agrega un valor al uso de los motores eléctricos.

#### ✓ Calidad

El control de calidad de un motor se inicia desde su fabricación, mientras que el diseño y construcción de un motor eléctrico debe funcionar bien en el uso diario. Conseguir un motor eléctrico con pruebas de vibraciones eléctricas, termografía y más es una de las claves más importantes para asegurar su fiabilidad. El control de calidad continua

cuando se almacenan los motores, ya que deben mantenerse a temperatura ambiente controlada y probarse con frecuencia.

✓ Tendencias

Facilitan y posibilitan el diagnóstico de problemas, son estándares que se pueden aplicar para dar recomendaciones, es importante y necesario comprar equipos no solo cuando se tengan problemas, la recolección y el registro de información va a ayudar en diagnosticar a tiempo una posible falla, se debe de considerar la seguridad eléctrica al recopilar datos y se pueden utilizar diferentes técnicas que permiten que los datos sean más precisos y consistentes.

✓ Solución de problemas

Extender la vida de un motor eléctrico es la una de las claves para aumentar su confiabilidad, para extender el tiempo de vida es necesario mirar los problemas alrededor del motor, usar datos de tendencias y estándares para identificar las causas de los conflictos desde la raíz y darle la atención al problema, no basta con tan solo conocer el problema, sino darle solución para de esta manera poder garantizar el funcionamiento del motor eléctrico

✓ Rodamiento

Se sabe que entre el 50 y 70 % de las reparaciones de los motores eléctricos están relacionados con los cojinetes que estos usan, lo que significa que las prácticas adecuadas de instalación, lubricación y mantenimiento de los cojinetes pueden aumentar la confiabilidad de los motores.

Las principales causas de daño de estos rodamientos son la erosión eléctrica, el daño por vibración, la lubricación insuficiente, excesiva o incorrecta. Estos factores pueden ocurrir juntos o individualmente y ser la causa la causa o el efecto de la falla.

Es importante utilizar rodamientos adecuados a las características requeridas por la aplicación, siempre que los rodamientos cumplan con los requisitos funcionales, se evitan los defectos en mención.

Una causa más de los daños de los rodamientos son las pruebas de motor posteriores a la reparación sin carga en los rodamientos, lo que resulta en la adherencia entre los elementos rodantes y las partes del camino de rodadura por deslizamiento de los componentes.

Los rodamientos también pueden dañarse cuando se transportan motores que no están debidamente acoplados a los ejes, el movimiento provoca vibraciones que deslizan elementos rodantes en su línea de contacto y provocan corrosión por vibración, los rodamientos cilíndricos son los más sensibles a este evento.

#### 2.3.24. Disponibilidad de equipos

Es la capacidad de un activo o componente para ser operativamente capaz de realizar una función requerida bajo las condiciones específicas durante un tiempo o periodo de tiempo es específico, asumiendo que se obtienen los recursos externos necesarios.

$$D = \frac{\text{tiempo calendario} - \text{pérdidas de producción}}{\text{tiempo calendario}} \dots\dots\dots(1)$$

En algunas empresas reemplazan el tiempo calendario por el tiempo disponible.

$$D = \frac{Pd - Pp}{Td} \dots\dots\dots(2)$$

Tc=tiempo calendario Td= tiempo disponible Pp= Paradas programadas

Y si tomamos en cuenta solo las paradas por fallas de mantenimiento podemos usar la siguiente expresión:

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100\% \dots\dots\dots(3)$$

Donde: MTBF: tiempo medio entre fallas  
MTTR: tiempo medio para reparar

### 2.3.25. Definición de MTRR

Las siglas proceden de tiempo medio de reparación, también es conocido como tiempo medio de mantenimiento correctivo, y representa el tiempo medio necesario para reparar una avería y hacer que un equipo vuelva a funcionar normalmente, es un indicador de facilidad de mantenimiento.

Un tiempo medio de reparación elevado puede indicar que la sustitución de un determinado activo es más barato o preferible que la reparación, esto también puede indicar ineficacias, saber cómo reducir el MTTR es esencial para evitar o minimizar la inactividad y los perjuicios.

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo total de mantenimiento}}{\text{Número de reparaciones}} \dots\dots\dots(4)$$

### 2.3.26. Definición de MTBF

Las siglas proceden el tiempo medio entre averías, representa el promedio del tiempo que transcurre entre dos averías en un mismo equipo cuanto más elevado sea el MTBF más fiable es el funcionamiento de la máquina.

Se calcula del MTBF se hace con base en la diferencia entre el tiempo total disponible y el tiempo perdido, dividiendo por el número de paradas.

$$MTBF = \frac{\textit{Tiempo Total Disponible} - \textit{Tiempo de Inactividad}}{\textit{Número de Paradas}} \dots \dots \dots (5)$$

### 2.3.27. Fiabilidad

Se conoce a la fiabilidad como la probabilidad que un sistema produzca los resultados esperados, que no es similar a disponibilidad; por lo general, cuanto mayor sea la fiabilidad, mayor será la disponibilidad. Y para eso empleamos el MTBF, que es un buen indicador de la fiabilidad de un activo durante su ciclo de vida, una de las fórmulas para calcular la fiabilidad es la siguiente:

$$Fiabilidad = \frac{Horas\ disponibles}{Número\ de\ Fallos} \dots\dots\dots(6)$$

Mejorar la fiabilidad depende mucho de evitar fallas y detectar cualquier tipo de anomalías, conocido como mantenimiento centrado en la fiabilidad y esto requiere la recopilación de datos y conocer los tipos de fallas presentes.

### 2.3.28. Relación entre MTBF con el MTTR

Mientras que el MTBF mide la fiabilidad, el MTTR es un fuerte indicador de la eficacia de la reparación. Ambos nos permiten obtener una previsión de cuánto tiempo está indisponible de un determinado sistema. El análisis del MTBF y del MTTR en un conjunto que permite también hacer previsiones sobre la producción que se reduce o para completamente durante las averías.

Podemos también hacer previsiones acerca de los costes de mantenimiento y de las reparaciones a lo largo del año.

Con base en todos estos indicadores, el gestor de operaciones técnicas puede entender cuáles son los equipos menos fiables, que necesitan más mantenimiento o incluso sustitución. El objetivo debe ser implementar políticas de mantenimiento preventivas y por lo tanto reducir el número de averías.

Reducir el MTTR pasa, por un lado, por el mantenimiento preventivo, para que el número de averías sea menor, esto reducirá el tiempo de reparación, cuanto más rápido respondan a una avería, más rápido se solucionara.

### 2.3.29. Análisis de defecto de cojinete

**Tabla 5**

*Tabla de frecuencias y formas de espectro*

Falla de Rodamientos

Defecto o Condición	Frecuencia	Forma de Onda y Espectro	Comentario
Defecto en la pista externa	BPFO y múltiplos	Múltiplos de BPFO	Descascarillado superficial, se incrementa después de un año
Defecto en la pista interna	BPFI y múltiplos	Las armónicas disminuyen en amplitud	Descascarillado superficial.
Defecto en la pista interna	BPFI y múltiplos	Las armónicas disminuyen en amplitud y están moduladas por la velocidad de operación	El rodamiento falló en 14 días
Defecto en la bola	BSF o FTF y múltiplos	Frecuencias naturales moduladas por FFT	Las bolas excitan el rodamiento a las frecuencias naturales
Excesiva tolerancia interna	Frecuencias Naturales	Múltiplos de RPS modulan las frecuencias naturales.	El rodamiento no mostró defectos/mostró desgaste excesivo

Fuente. Fuente Vibraciones Básicas de máquinas. Ronald L. Eshleman.2018.

### 2.3.30. Motores Eléctricos

#### ✓ Concepto

Son maquinas que convierten la energía eléctrica en energía rotacional, de los cuales existen 3 tipos de motores:

- Asíncrono o de inducción
- Síncrono
- Corriente continua

Las cuales presentan la propiedad de ser reversibles

funcionandocomo generadores de energía eléctrica.

El rendimiento de las maquinas eléctricas es muy alto, pero presenta pérdidas cuando se recalientan, este suceso es muy importante ya que el aislamiento se deteriora con la temperatura, y con esto se reduce la vida útil de la máquina.

Según NEMA (2018), las clases de servicio de una maquina

- S1: servicio continuo (trabaja bajo carga constante, temperatura de régimen permanente)
- S2: servicio temporal (trabaja en un tiempo breve, no alcanza una temperatura estable)
- S3, S4 y S5: Servicio intermitente (serie continua de ciclos iguales de carga constante, serie de lapso de reposo sin alcanzar una temperatura constante)
- S6, S7 y S8: Servicios interrumpidos (similar a lo anterior, pero sin periodos de reposo)

✓ Principio de funcionamiento

Según la ley de Faraday, el campo magnético variable en el tiempo produce una fuerza electromotriz, la cual es el voltaje que proviene de conductores que se mueven en un campo magnético o de un conductor entre un campo magnético cambiante.

Esta ley se rige en el funcionamiento de un motor de inducción, en el estator del motor de inducción, se suministra una corriente trifásica senoidal, la cual produce un campo magnético giratorio de velocidad de rotación la cual viene dada por:

$$n_{sinc} = \frac{120 \times f_e}{p} \dots\dots\dots(7)$$

Donde:

$n_{SINC}$  : velocidad de rotación del campo magnético

$f_e$  : frecuencia del sistema en Hz

p: número de pares de polos de la máquina

el campo magnético giratorio del estator va a inducir una corriente en el rotor la cual se encuentra en corto circuito a través de anillos en el caso del rotor jaula de ardilla o en una conexión especial en el caso del rotor devanado.

✓ Motores Asíncronos Eléctricos

O motores de inducción, que son de corriente alterna, las cuales transforman la energía mecánica en eléctrica y trabajan a una frecuencia de línea de 60 Hz.

Los problemas mecánicos que normalmente afectan a las máquinas rotativas también generan problemas en los motores eléctricos, tales como:

- a. Desbalance de masa, flojedad, resonancia, desalineamiento, excentricidad, defectos de cojinetes y distorsión, a menudo las fallas mecánicas inducen a fallas eléctricas y elevada vibración.
- b. Alteración en el entrehierro, insuficiente capacidad de permanencia en el centro magnético, flexibilidad del estator, barras rotas o flojas del rotor y laminaciones en corto.

✓ Clasificación de motores asíncronos trifásicos

- Motor asíncrono con rotor tipo jaula de ardilla

Este motor eléctrico requiere menos mantenimiento, comparado con el motor de rotor bobinado. Las varillas se colocan en las ranuras del rotor aluminio fundido u otro material conductor unido a los extremos por anillos de cortocircuito.

Las barras que forman la bobina del rotor inclinado en relación con el eje del rotor para reducir el ruido.

**Figura 8**

*Devanado tipo jaula de ardilla*



Nota. Fuente. Vibraciones Básicas de máquinas. Ronald L. Eslemban

- Motor asíncrono con rotor devanado

Es posible realizar conexiones en los motores rotativos bobinados especialmente para la bobina del rotor, ya que consta con un grupo de devanados. Tres fases son idénticas a las del estator. Conecte los anillos en el mismo y el eje está en contacto con un cepillo de grafito, para generar conexión externa. Y debido a la conexión exterior, este tipo de máquina requiere de mantenimiento constante y es más costoso comparado con el de rotor

tipo jaula de ardilla.

**Figura 9**

*Rotor devanado o de anillos*



Nota. Fuente. Vibraciones Básicas de máquinas. Ronald L. Eshleman

### 2.3.31. Transformada Rápida de Fourier

La transformada Rápida de Fourier es la transformación de la forma de ondate tiempo mediante un proceso algorítmico numérico a forma de espectro, la cuales recolectado por medio de un sensor, en nuestro caso empleamos un acelerómetro.

El analista debe tener las siguientes consideraciones para configurar su equipo:

1. Saber la frecuencia máxima ( $F_{max}$ ) del equipo a emplear.
2. Reconocer el número de líneas que tiene el equipo a emplear.
3. Reconocer el tipo de ventana que está relacionado conel análisis del equipo a emplear.

### 2.3.32. Cálculo para el tiempo de adquisición de data

Consiste en calcular el tiempo que emplearemos en tomar datos de nuestro equipo a monitorear. Para ello emplearemos la siguiente fórmula:

$$\text{Tiempo de Adquisición} = \frac{\text{Número de Líneas (N)}}{F_{\max}} \dots\dots\dots (8)$$

Donde:

N: Número de Líneas

Fmax: Frecuencia máxima del equipo Resolución:

Capacidad para resolver y mostrar frecuencias muy cercanas entre sí, por ello los equipos colectores de datos utilizan ventanas, la cual nos ayuda eliminar las frecuencias fantasmas, debido a que el proceso FFT degrada la resolución por difusión de la energía de la vibración a los bins adyacentes, disminuye la capacidad de resolver frecuencias muy próximas entre sí, la más común es la ventana Hanning, la cual tiene un factor de ventana de 1.5.

Entonces para calcular la resolución de mi equipo será igual a 2 veces la Fmax multiplicado por el factor de ventana y dividido entre el número de líneas, quedando de la siguiente manera:

$$\text{Resolución (Hz)} = \frac{2 \times F_{\max}(\text{Hz})}{N} \times Wf \dots\dots\dots (9)$$

Donde

WF: será el factor de ventana

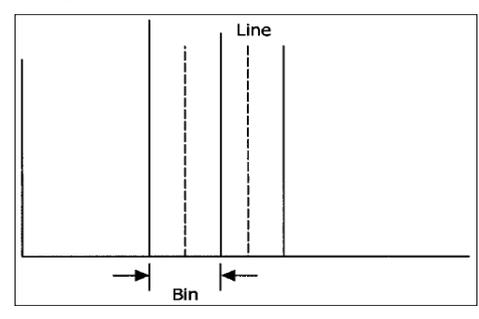
N: Número de líneas

Fmax: Frecuencia máxima

A mayor sea la resolución del equipo a emplear, mayor será el tiempo que se tome recolectar la data.

**Figura 10**

*Tiempo de adquisición*



Nota. Fuente propia

2.3.33. Calcular el número de muestras de mi equipo

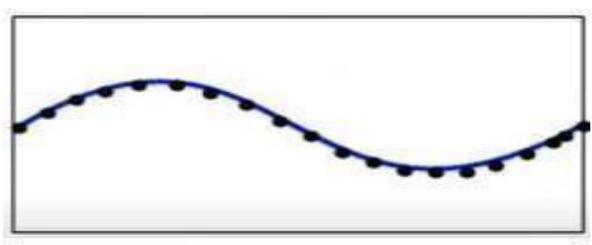
Para poder determinar la proporción de muestreo de la forma de onda y su resolución en tiempo, la proporción para la grabación del tiempo, para la mayor parte de analizadores es 2.56 la frecuencia más alta del espectro obteniendo la cantidad de muestras por segundo, por consiguiente, lo expresamos así:

$$N \text{ muestras} = N * 2.56 \dots \dots \dots (10)$$

Dónde: N: número de líneas

**Figura 11**

*Número de líneas*



Nota. Fuente propia

### 2.3.34. Voltaje inducido en un conductor

En un ciertos motores y generadores, los conductores o bobinas se desplazan respecto al flujo constante.

Este movimiento rotativo produce un cambio en el eslabonamiento de flujo de las bobinas, por lo cual un voltaje inducido según la ley de Faraday de la siguiente manera:

$$E = B \cdot L \cdot V \dots\dots\dots (11)$$

Donde:

E= voltaje inducido en volts

B= densidad de flujo en tesla

L= longitud activa de los conductores en el campo magnético

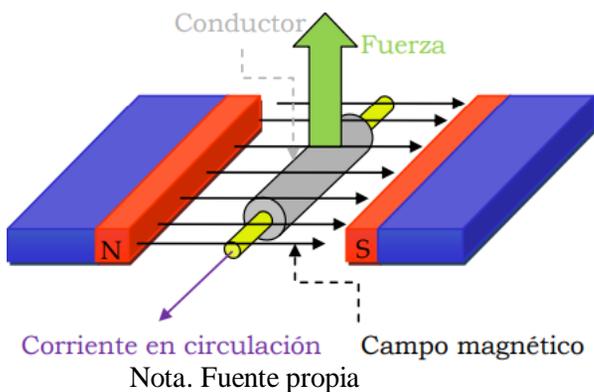
V= velocidad relativa del conductor m/s

Los motores eléctricos funcionan según el principio de que un conductor dentro de un campo magnético ejerce una fuerza cuando lo atraviesa una corriente según la figura 11.

La magnitud de la fuerza varia directamente con la intensidad del campo magnético y la magnitud de la corriente que circula por el conductor con la expresión:

Figura 12:

*Fuerza magnética en un conductor debido a la circulación de corriente y campo magnético*



$$F = I \cdot B \cdot L \dots\dots\dots(12)$$

Donde:

F= fuerza en Newtons

I=corriente de circulación

B= Flujo Magnético

L= longitud del conductor en metros

### 2.3.35. Potencia y par de un motor eléctrico

La potencia mecánica de los motores se expresa en HP o Kw, estas medidas cuantifican la cantidad de trabajo que un motor eléctrico es capaz de realizar en un periodo específico de tiempo.

Dos importantes factores que determinan la potencia mecánica en los motores son: el par y la velocidad de rotación.

El par es una medida de la fuerza que tiende a producir la rotación, la cual se mide en Libras-pie o Newton -metro. La velocidad del motor se establece comúnmente en RPM. Se da por la siguiente expresión:

$$Potencia = Velocidad \times Par \dots\dots\dots (13)$$

A una menor velocidad existe par para entregar la misma potencia, entonces los motores de baja velocidad necesitan componentes más grandes que los de alta velocidad para igual potencia nominal.

Figura 13

*Diferencias constructivas debido a la velocidad de operación del motor eléctrico*



Nota. Fuente: HARPER Enríquez. El ABC del control electrónico de las máquinas eléctricas. México: Limusa, 2003. p. 144

### 2.3.36. Tipos de Fallas por Vibraciones en motores eléctricos asíncronos

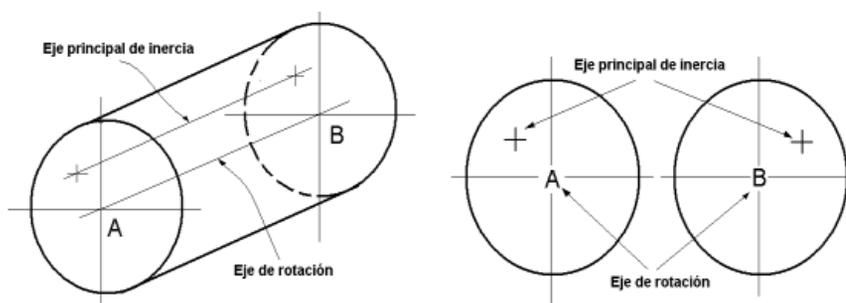
Al analizar la vibración de los motores eléctricos trifásicos se debe tener en cuenta que debido a las tolerancias de las partes de la máquina siempre se presenta vibración. Las razones del aumento de la fuerza de la oscilación de los componentes defectuosos, que se describen a continuación

- ✓ Vibraciones producidas por desbalances

El desequilibrio de rotor en un motor eléctrico es una de las fuentes más comunes de la vibración, el desequilibrio está siempre presente y se puede clasificar según su origen

- **Desbalance estático:** El desequilibrio estático se define como el eje de inercia longitudinal del rotor que se mueve paralelo al eje de rotación. Cuando los extremos del rotor se colocan sobre dos partes giratorias se mueven hasta que la parte más pesada está en la parte inferior. Este es un desequilibrio estático porque nos es necesario girar el rotor para equilibrarlo.

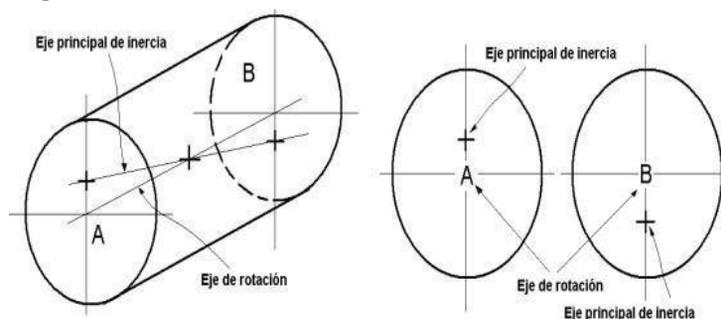
Figura 14

*Desbalance estático*

Nota. Fuente: propia

- **Desbalance par:** Se define como la inercia longitudinal principal del rotor que intercepta al eje de rotación en el centro de masa del propio rotor.

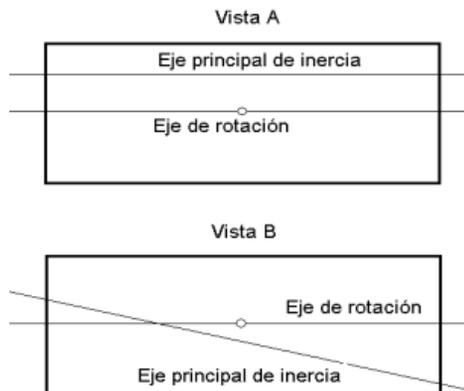
Figura 15

*Desbalance par*

Nota. Fuente: Propia

- **Desbalance dinámico:** Se define como el principal eje longitudinal de inercia de rotor, que no lo cruza o es paralelo a él.

Figura 16

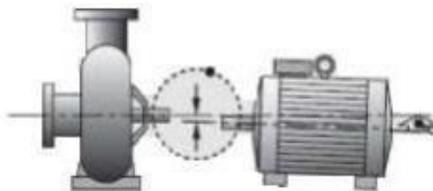
*Desbalance dinámico*

Nota. Fuente: Propia

✓ Vibración debida a la falta de alineamiento

Porque los motores eléctricos convierten energía eléctrica en energía mecánica, estos suelen estar conectados a otras máquinas que tienen una función específica, como bomba de agua, lavadora, etc. La principal fuente de vibración es la desalineación, que ocurre cuando el eje del motor eléctrico no está alineado con el eje de la máquina conectada, aunque también suelen ocurrir entre cojinetes o engranajes. Esta conexión se realiza mediante elementos rígidos o flexibles.

Figura 17

*Desalineación de máquinas*

Nota. Fuente: Propia

Consecuencias de la falta de alineación:

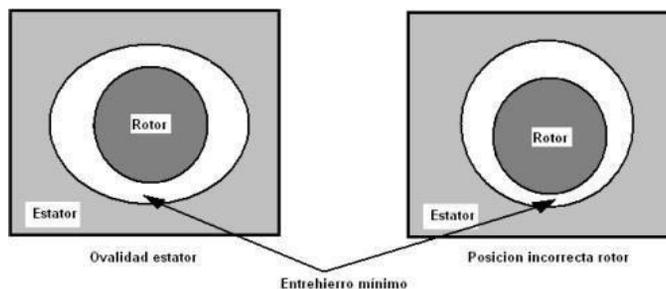
- Mayor consumo de energía
- Fallos en rodamientos
- Rotura de ejes
- Problemas en acoplamientos
- Incremento en la temperatura de carcasa
- Daños o aflojamiento en tornillos de sujeción
- Incremento en la vibración axial y radial de la máquina

✓ Vibración debida a falta de excentricidad

El espacio entre el rotor y el estator es muy pequeño unos pocos milímetros. Por lo tanto, el rotor debe estar lo más alineado posible, así como la redondez del eje y la excentricidad de su posición relativa durante la rotación, en el caso de cumplir con lo anterior, este entrehierro puede provocar deformaciones.

**A) Excentricidad estática:** Surge de la deformación del entrehierro, que ocurre solo en una posición fija en el espacio. Esta excentricidad puede ser causada por la ovalidad de la carcasa del estator, posición incorrecta del rotor debido a un mal apoyo en los cojinetes, deformación de la carcasa, tolerancia excesiva, etc.

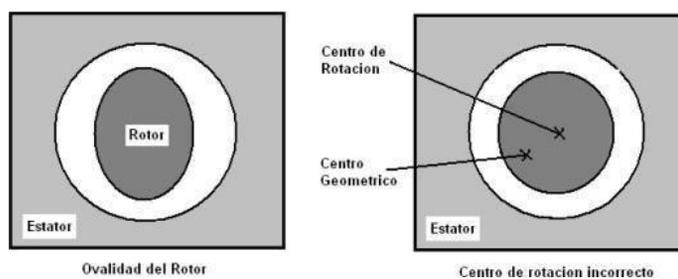
Figura 18

*Formas de excentricidad estática*

Nota. Fuente: Propia

**B) Excentricidad dinámica:** la deformación no permanece fija en el espacio de entrehierro mínimo, sino que gira con el rotor. Las relaciones de excentricidad de este tipo son similares a las relaciones de excentricidad estáticas, desgaste del cojinete, flexión del eje.

Figura 19

*Excentricidad dinámica*

Nota. Fuente: Propia

✓ Vibración debida a rodante defectuosos

Todas la maquinas rotativas usan rodamientos para soportar los extremos de los ejes y dado que todas las vibraciones se transmiten directamente a los rodamientos y están en constante fricción, es extremadamente importante determinar su condición a través del análisis de vibraciones. Los cojinetes se pueden clasificar en dos grupos:

A) Cojinetes de rodamiento:

- Lubricación sencilla y sin mantenimiento
- Menor espacio axial
- Capacidad de absorber cargas axiales y radiales
- Pueden trabajar a temperaturas mayores a la fricción

B) Cojinetes de casquillos:

- Son mejores a altas velocidades
- Menor peso
- Instalación sencilla
- Menos ruidosos
- Mayor tolerancia a los choques

La vida útil de los cojinetes depende de las condiciones de uso y la resistencia del material del que están hechos. La vibración siempre está presente debido a la baja tolerancia y fricción de sus componentes. La mayor parte de fallas en los cojinetes de rodillos debe a las siguientes causas.

- Sobrecarga en el cojinete

- Lubricación insuficiente o excesiva
- Contaminación externa
- Instalación incorrecta
- Defectos de fabrica
- Exposición a vibraciones cuando el cojinete está en reposo
- Circulación de corriente eléctrica a través de un cojinete

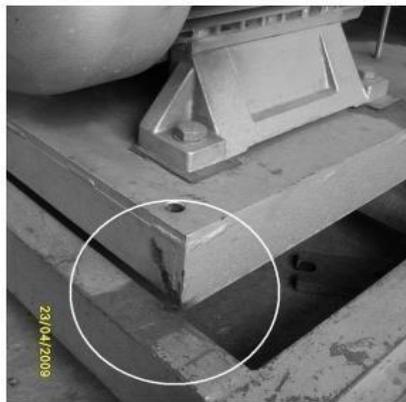
✓ Vibración debida a partes flojas

El aflojamiento mecánico se debe al deterioro del estado de montaje de los elementos mecánicos que excedieron las tolerancias o simplemente se aflojaron por el movimiento del motor. Se pueden formarespacios en la parte inferior de las máquinas y en los cojinetes, lo que afecta la alineación del eje.

Las holguras pueden causar señales de vibración, que describe el aflojamiento de las piezas, es provocada por las fuerzas de excitación provocadas por problemas como el desequilibrio o la desalineación.

Figura 20

*Holgura en la base de maquinas*



Nota. Fuente: Propia

✓ Vibración debida a roturas de barras en el rotor

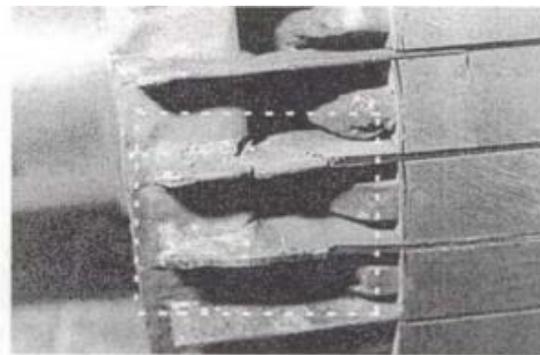
La rotura en las barras ocurre principalmente en la soldadura entre la barra y los anillos de cortocircuito porque allí se concentran los esfuerzos mecánicos, aunque están diseñados para soportar el arranque y la parada del motor, la falla se debe a la fatiga del material.

Además, el motor de perforación puede sufrir transitorios térmicos debido al movimiento diferencial dentro del paquete de imanes del rotor, lo que provoca deformaciones y grietas en los anillos.

Cuando una barra o neumático empieza a rajarse, el proceso es regenerativo, la parte defectuosa se calienta hasta romperse. Esta discontinuidad provoca la formación de arcos, lo que hace que las varillas adyacentes lleven más corriente y, por lo tanto, aumenten la temperatura y la tensión mecánica, creando nuevas grietas

Figura 21

*Rotura de barra de rotor*



Nota. Fuente: Propia

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 MATERIALES/EQUIPOS

##### 3.1.1. Colector de Datos Adash A4900 Vibrio

Será el equipo que emplearemos para realizar la toma, colección y el análisis de las vibraciones de las máquinas, este equipo nos brindará valores de velocidad en (mm/s), aceleración(g) y envolvente, que nos permitirá ver la condición de la máquina durante su operación y el estado de sus rodamientos sin detener la máquina.

Figura 22

*Equipo Analizador de Vibraciones*



Nota. Analizador de Vibraciones Adash 4900 Vibrio y su sensor de vibraciones. Fuente: Propia

Es un instrumento que nos permite realizar todas las mediciones básicas del diagnóstico de vibraciones, como la condición de los rodamientos, la identificación de fallas mecánicas y además nos ayuda a identificar la velocidad de giro de las máquinas y congelar el movimiento mediante el establecimiento de su frecuencia de

destellos, con la luz estroboscópica.

Cuenta con memoria de almacenamiento de datos, la que nos facilita realizarmediciones fuera de ruta y dentro de ruta. Además, tiene un software en donde nosotros podemos descargar nuestra data y realizar el análisis correspondiente.

**Tabla 6**

Especificaciones Técnicas del equipo de vibraciones

Item	Característica	Descripción
1	Entradas:	1x ICP acelerómetro
2	Sensor:	Acelerómetro AC150 (genuine CTC AC- 150); Sensibilidad 100 mV/g +/- 15% respuesta en frecuencia +/- 3dB in 1-1000 Hz
3	Rango de entrada	sensor 60 g PEAK con estándar 100 mV/g (e.g. 600g PEAK for 10 mV/g sensor, la sensibilidad es editable en el equipo)
4	Mediciones:	Velocidad RMS 10- 1000 Hz (mm/s- ips); Velocidad PEAK 10 - 1000 Hz (mm/s, ips) Aceleración RMS 500 - 16 000 Hz (g); Aceleración PEAK 500 - 16 000 Hz(g) Tiempo de velocidad 1 -1000 Hz (mm/s, ips) 2048 muestras Velocidad del espectro 1 -1000 Hz (mm/s, ips) 800 líneas
5	Otras funciones:	LED estroboscopio (0.17 - 300 Hz, 10 - 18 000 RPM) LED lámpara; Temperatura de no Contacto; Estetoscopio de vibración
6	Memoria:	4 MB for data; 900 medición de 800 línea o 2048 muestras de señal de tiempo
7	Almacenamiento de datos:	Fuera de ruta (off-route) Ruta con DDS Vibrio Software para Windows(incluido)
8	Interfaz:	USB 2.0 compatible
9	Software:	DD Vibrio software for windows (incluido)
10	Pantalla:	colores gráficos OLED pantalla 128 x 128 pixeles, diagonal1.5" (38mm)
11	Salidas:	1x AC señal 8 $\Omega$ / 0.5 W para audifonos externos
12	Pilas:	2x AA 1.5 V pilas
13	Temp:	Operando - 5°C a 55°C
14	Protección	pi65
15	Dimensiones	150 x 60 x 35 mm
16	Peso	330 g incluyendo las pilas; 540 g incluyendo las pilas, cable, sensor e imán
17	Accesorios:	Sensor de vibración, coiled cable to connect vibration sensor, base magnética para sensor de vibración, audifono con 3.5 mm jack estándar, cable USB, punta de medición para presión manual en el sensor, funda para transportar CD con manual

Nota. Especificaciones Técnicas de Colector de Datos Adash 4900A. Fuente.  
<https://adash.com/documents/A4900/Adash-A4900-Vibrio-manual-esp.pdf>.2008

### 3.2 Tipo de Investigación y Desarrollo de la investigación.

El tipo de investigación es cuantitativa experimental, será aplicativo, se centra en el análisis y solución al problema mediante el análisis vibracional. Esta investigación conforma, conceptos teóricos y prácticos del análisis vibracional, el funcionamiento del equipo de vibraciones, el uso del software para el análisis y diagnóstico de fallas mecánicas e identificar el estado de los componentes (rodamientos) mediante un plan de mantenimiento predictivo, ya elaborado por el área de confiabilidad. Nuestra investigación se centrará en el monitoreo de vibraciones a los equipos ubicados dentro sala de máquinas de la planta Pesquera Hayduk - Coishco, con la finalidad de asegurar la confiabilidad y operatividad de las máquinas, a los cuales realizaremos un monitoreo vibracional, para evaluar la condición de operación. Para ello realizaremos la recopilación de la información técnica de los equipos a analizar, su codificación dentro de planta, potencia de trabajo, código de rodamientos; y seguiremos el plan de mantenimiento predictivo ya establecido en planta.

### 3.3 Realización del monitoreo vibracional

La realización del monitoreo vibracional se llevó a cabo realizando las siguientes técnicas:

#### 3.3.1. Descarga data para monitoreo vibracional:

Para poder dar inicio al monitoreo o ruteo vibracional de los equipos a analizar, lo primero que debemos realizar es descargar la data de los equipos que vamos a analizar, para ello nosotros ya debemos contar con nuestra data creada en el software de la computadora, con su correcto nombre del equipo y los puntos que vamos a medir, y descargarlo a nuestro colector de datos.

### 3.3.2. Monitoreo vibracional

Una vez descargada la data, podemos iniciar nuestro monitoreo vibracional, usando nuestros correcto EPPs, según la zona que vamos a analizar.

Durante el monitoreo vibracional es recomendable tomar foto del equipo analizado, y si en caso se encuentre inconvenientes es necesario que se tome apunte de lo que se observa de la máquina, ruido, pata coja, mal estado de la máquina, etc.

Debemos de identificar los correctos puntos que vamos a medir (HorizontalVertical y Axial), y saber ubicar el sensor de forma adecuada en los equipos, para que el sensor pueda coleccionar y obtener los espectros de forma clara; y nos permita realizar un análisis correcto de la condición de los equipos. Se debe evitar golpear el sensor, así como pegarlo de manera rápida.

Se recomienda una vez colocado el sensor, esperar de 1 a 4 seg para recién poder realizar la toma de la vibración. El tiempo estimado por punto de medición es aproximado 1 min, y el tiempo total de monitoreo del equipo dependerá de los puntos de medición que se va a realizar.

### 3.3.3. Análisis y elaboración de reportes.

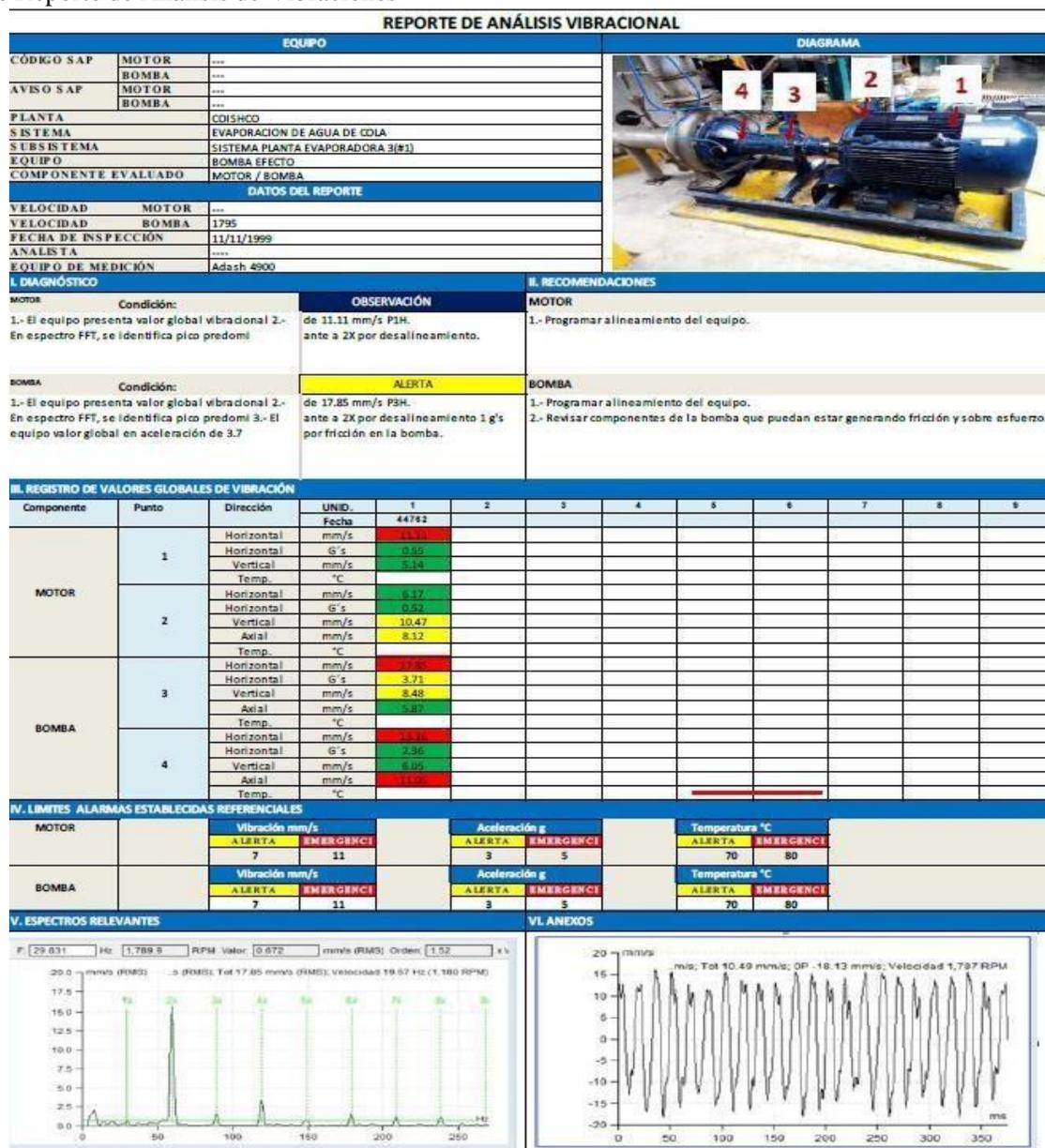
Terminado el monitoreo vibracional de los equipos, descargamos la data en nuestra computadora para proceder a realizar el análisis de la condición de la máquina. El análisis se debe realizar en los puntos medidos, y evaluar el nivel de vibración de la máquina según la Norma ISO 10816-3, de su velocidad y aceleración de los equipos analizados.

El reporte de vibración debe tener la descripción correcta del equipo, una imagen fotográfica indicando los puntos de medición de la máquina, fecha de la

toma de vibración, código del equipo, condición de la máquina, registro de valores globales de vibración, observación y recomendaciones; y espectros relevantes de la máquina.

Figura 23

Ejemplo de Reporte de Análisis de Vibraciones



Nota. Se inserta la imagen del equipo analizado con sus respectivos valores de vibración y los espectros obtenidos, con sus conclusiones y recomendaciones. Fuente Propia.

### 3.4. Procedimiento para llevar a cabo el Monitoreo Vibracional

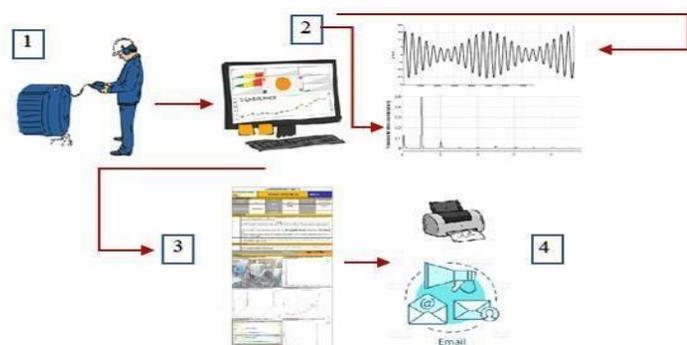
Para nosotros llevar a cabo el monitoreo vibracional de la planta, debemos de seguir un flujo de trabajo recomendado, En este apartado proporcionaremos un ejemplo de flujo de trabajo para análisis vibracional.

Verificar que el equipo cuente con la batería necesaria para poder realizar el monitoreo vibracional.

- a) Descargue la data al colector de datos por medio del cable USB para recolectar información de la condición de la máquina a evaluar.
- b) Dentro del equipo colector ubicar la ruta del equipo a analizar.
- c) Coloque el sensor, espere unos segundos y adquiera los datos del equipo según la ruta necesaria.
- d) Descargue la data del colector a la computadora por medio del cable USB.
- e) Evalúe la tendencia de la máquina y los valores de vibración obtenido.
- f) Realizar el análisis de los espectros obtenidos y realizar reportes.

Figura 24

#### *Procedimiento para el Monitoreo de Vibraciones*



*Nota. Procedimiento que se llevó a cabo para el monitoreo de vibraciones. Fuente propia*

## IV. RESULTADO Y DISCUSIONES

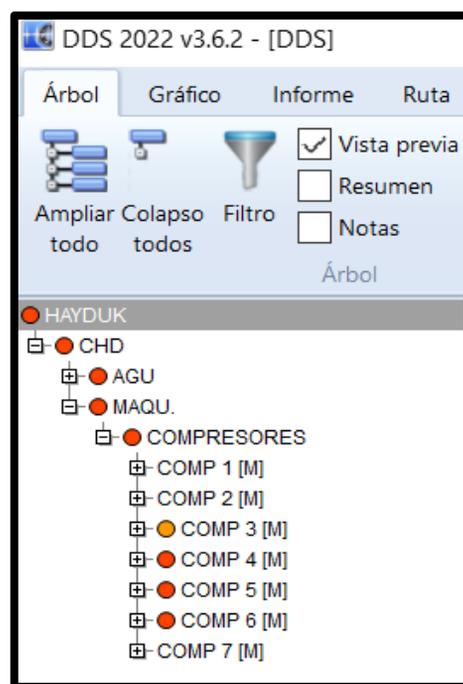
### 4.1. Ruta de los Motores Eléctricos Asíncronos de 150 HP

Para el análisis de vibraciones, nosotros realizamos el monitoreo a los motores trifásicos de 150 HP de los compresores de pistones, ubicados en la zona de frío dentro de la planta de Hayduk-Coishco, y trabajamos según las rutas establecidas del software:

HAYDUK>CHD>MAQU.>COMPRESORES

Figura 25

*Ruta de los Motores Eléctricos.*



Nota. La figura muestra la ruta de los motores eléctricos de compresores de pistones. Fuente Propia

El monitoreo vibracional se realizaba cada dos semana, para evaluar una tendenciadel estado de los equipos y su condición de operación, el monitoreo lo realizamos por durante los días 03 y 04 de enero del 2022; siguiendo la metodología del acápite 3.2.1; sobre el procedimiento del monitoreo vibracional.

## 4.2 Cálculo de la Resolución, Muestra y el Tiempo de Adquisición

### 4.2.1 Cálculo de Resolución

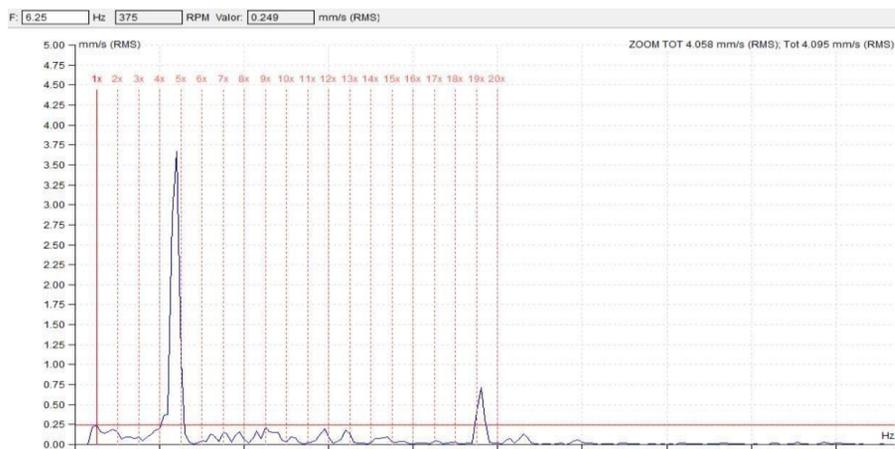
Calculemos la resolución de nuestro equipo, sabemos que nuestro equipo es de 800 líneas y una frecuencia máxima 1000 Hz, entonces, empleando la fórmula siguiente obtendremos la resolución de nuestro equipo.

$$\text{Si: } \text{Resolución} = \frac{F_{\max} (\text{Hz})}{\text{Número de Líneas}} :$$

$$\text{Resolución} = \frac{1000}{800} = \mathbf{1.25 \text{ Hz/Línea}}$$

Como podemos observar en el siguiente espectro, las amplitudes se muestrana un múltiplo de 1.25 Hz/línea, según el espectro a continuación es de 6.25 Hz, en caso la velocidad de la máquina no sea un múltiplo de 1.25, se mostrará la amplituden el espectro al múltiplo de frecuencia más cercana.

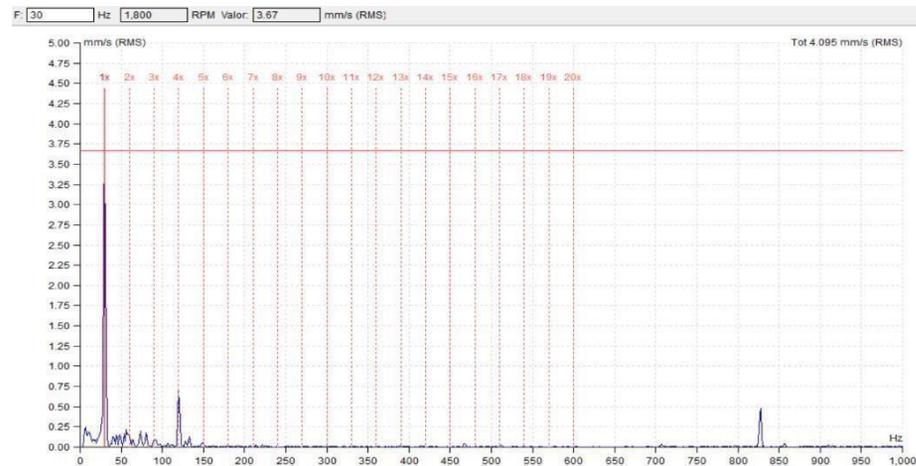
Figura 26  
Espectro de Motor Eléctrico



Nota. La figura muestra el espectro de un Motor Eléctrico y podemos observar que las amplitudes son múltiplo de 1.25 Hz. Fuente: propia

Para nuestro caso del motor eléctrico, su velocidad de giro es de 1800 rpm, lo cual se encuentra dentro del rango, y lo podremos apreciar en nuestro espectro para poder realizar nuestro respectivo análisis.

Figura 27  
Espectro del Motor



Nota. La figura muestra un espectro de un motor eléctrico que gira a una amplitud de 1800rpm (1X).Fuente: propia.

#### 4.2.2 Cálculo de las Muestras del equipo Colector

Continuando, ahora realizaremos el cálculo para determinar la proporción de muestro de la forma de onda y su resolución en el tiempo, usaremos la siguiente fórmula, a mayor muestras mayor resolución de nuestra forma de onda, entonces:

$$N \text{ muestras} = N * 2.56$$

dónde: N: número de líneas

Sabemos que el número de líneas de nuestro equipo es de 800, entonces:

$$N \text{ muestras} = 800 * 2.56$$

$$N \text{ muestras} = 2048$$

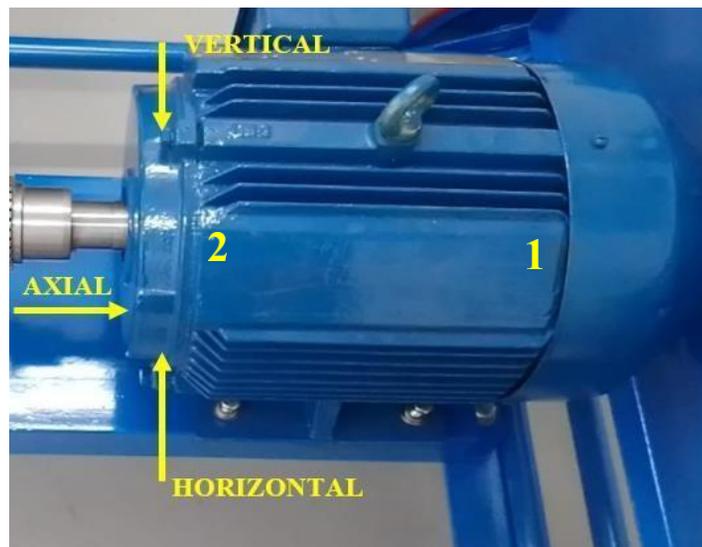
muestras

### 4.2.3 Cálculo del Tiempo de Adquisición

Ahora calcularemos el tiempo que nos tomará en medir un punto (H, V o A) con el colector de datos Adash, sabiendo que nuestro colector de datos es de 800 líneas, su frecuencia máxima  $F_{max}$  es 1000 Hz, y usa un factor de ventana llamada Hanning el cual equivale a 1.5, teniendo estos datos usemos la fórmula siguiente para obtener el tiempo de adquisición de datos:

Figura 28

*Posición de medición en horizontal, vertical y axial (con sensor) en el motor eléctrico.*



Nota. Referencia de Puntos de medición en motores eléctricos; en la imagen se puede observar dos puntos de medición (1 y 2). Fuente Propia.

$$\text{Tiempo de adquisición} = \frac{\text{Líneas } (N)}{\text{Fmax (Hz)}}$$

La configuración que nosotros manejamos para la toma de vibraciones en los puntos H, V y A son de la siguiente manera:

- **Para el punto Horizontal (H)**, consideramos los siguientes espectros Velocidad\_FFT, Aceleración\_FFT y Demod\_FTT (envolvente de aceleración).
- **Para los puntos Vertical (V), y Axial (A)**,

consideramos solamente Velocidad\_FFT y Aceleración\_FFT.

Nosotros consideramos solo Demod\_FTT en horizontal, porque es la zona donde el rodamiento tiene la mayor carga, lo que nos va a permitir tener un análisis adecuado del estado del rodamiento.

Considerando lo antes mencionado, ahora describiremos el tiempo de adquisición de datos para 01 equipo en sus puntos (H, V y A):

**Para el punto Horizontal**, consideraremos según lo antes mencionado:

- Velocidad\_FFT: (Fmax= 1000 Hz, N° de líneas = 800)

$$\text{Tiempo de adquisición} = \frac{\quad}{800} = \mathbf{0.8 \text{ seg}}$$

$$1000$$

- Aceleración\_FFT: (Fmax= 16 000 Hz, N° de líneas = 800)

$$\text{Tiempo de adquisición} = \frac{\quad}{800} = \mathbf{0.05 \text{ seg}}$$

$$1600$$

- Demod\_FTT: (Fmax= 800 Hz, N° de líneas = 800)

$$\text{Tiempo de adquisición} = \frac{800}{800} = \mathbf{1 \text{ seg}}$$

Ahora sumaremos los tiempos de adquisición 0.8 seg + 0.05 seg + 1 seg obteniendo un tiempo total de adquisición de: **1.85 seg.** en el punto 1H.

**Para el punto Vertical y Axial**, consideraremos según lo antes mencionado:

- Velocidad\_FFT: (Fmax= 1000 Hz, N° de líneas = 800)

$$\text{Tiempo de adquisición} = \frac{\quad}{800} = \mathbf{0.8 \text{ seg}}$$

$$1000$$

- Aceleración\_FFT: (Fmax= 16 000 Hz, N° de líneas = 800)

$$\text{Tiempo de adquisición} = \frac{\quad}{800} = \mathbf{0.05 \text{ seg}}$$

$$1600$$

Ahora sumaremos los tiempos de adquisición 0.8 seg + 0.05 seg obteniendo un tiempo total de adquisición de: **0.85 seg** para cada punto V y A.

El tiempo de adquisición final de datos para el punto 1 (H, V y A), será de 1.85 + 0.85 + 0.85 seg. = 3.55 segundos; ahora considerando los 2 puntos que tiene el motor hacen un total de 7.1 segundos, que sería el solamente el tiempo que toma en adquirir la data el colector de datos, si agregamos el tiempo que el analista le toma en cambiar las posiciones H, V y A y la pausa que debe realizar al colocar el sensor, se estima un tiempo de 3 min.

#### 4.3 Análisis de Vibraciones a los Motores Eléctricos Asíncronos de 150 HP

##### 4.3.1 Motor Eléctrico Asíncrono de 150 HP del Compresor N°3

Figura 29

*Motor eléctrico del Compresor de Pistones N° 3.*



Nota. Puntos de Medición del Motor Eléctrico. Fuente: propia.

**Tabla 8**

Valores de Globales de Vibración del motor eléctrico N° 03

<b>I. Registro de Valores de Globales de Vibración</b>						
Equipo	Punto	Posición	Unidad	1	2	3
			Fecha	Dic-21	Ene-22	Ene-22
MOTOR	1	Horizontal	mm/s	4.00	3.80	4.10
			G's	0.20	0.32	0.19
		Vertical	mm/s	2.56	2.30	2.41
		Axial	mm/s	2.09	2.54	2.70
	2	Temperatura	°C	42.00	40.00	42.00
		Horizontal	mm/s	2.87	2.98	3.10
			G's	0.31	0.30	0.27
		Vertical	mm/s	2.60	2.76	2.67
		Axial	mm/s	3.10	2.05	3.00
		Temperatura	°C	44.00	45.00	44.00
<b>II. Límites de Alarma Establecidas Según Norma ISO 1081 6-3 mm/seg - RMS</b>						
Condición Máquina Buena				<	2.3	
La Máquina puede operar Indefinidamente				2.3	4.5	
La Máquina no puede operar por largo Tiempo				4.5	7.1	
La Vibración Provoca Daños				7.1	>	

Nota. Tabla de Registro de Valores Globales de vibración. Fuente: Propia.2022

**Observaciones:**

- Se observó vibración dentro de los límites permisibles, condición de la máquina: puede operar Indefinidamente.

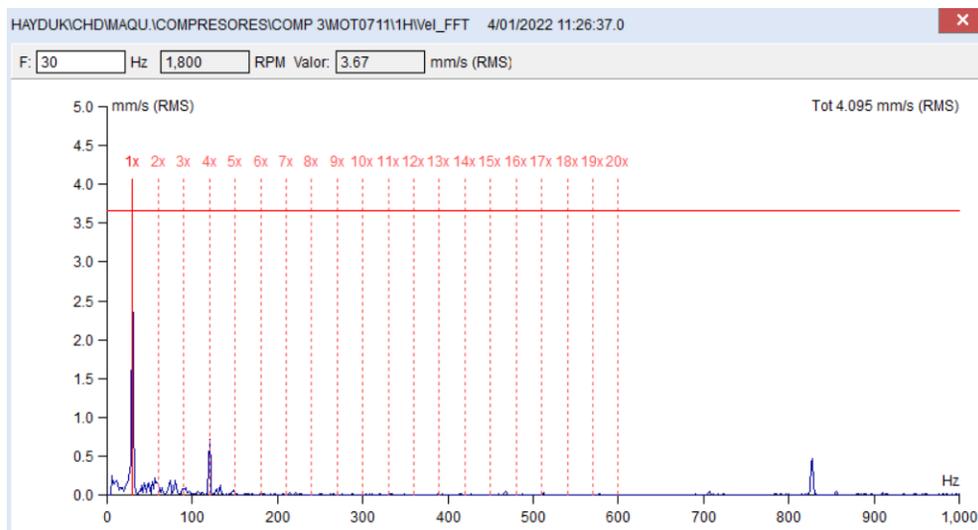
**Recomendaciones:**

- Se recomienda continuar con el monitoreo vibracional a fin de tener tendencia en el tiempo.

### Espectros Relevantes:

Figura 30

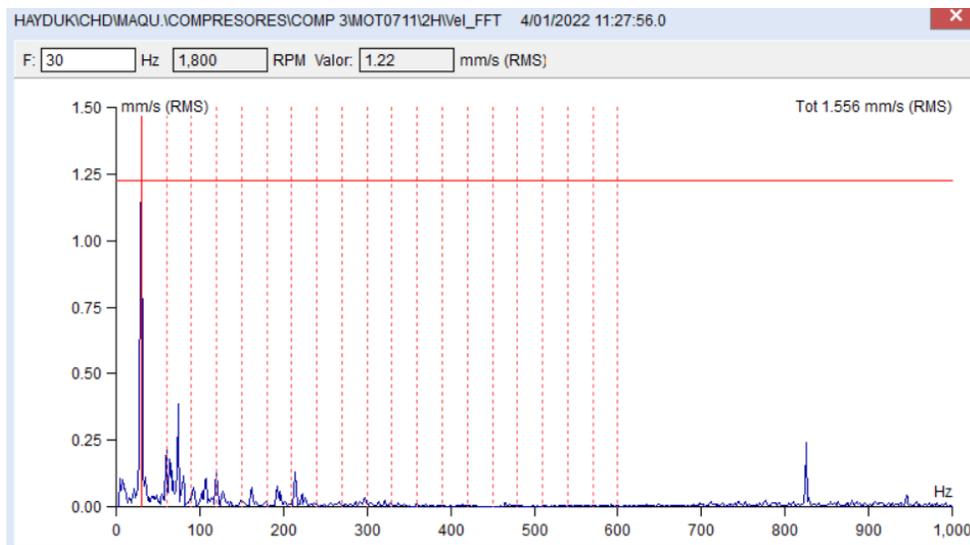
*Espectro del Motor eléctrico N° 03 en el punto 1H.*



Nota. La figura muestra el Espectro FFT, Pto 01H del motor eléctrico con una velocidad RMS de 4.095mm/s, dentro de los límites permisibles de vibración. Fuente: propia.

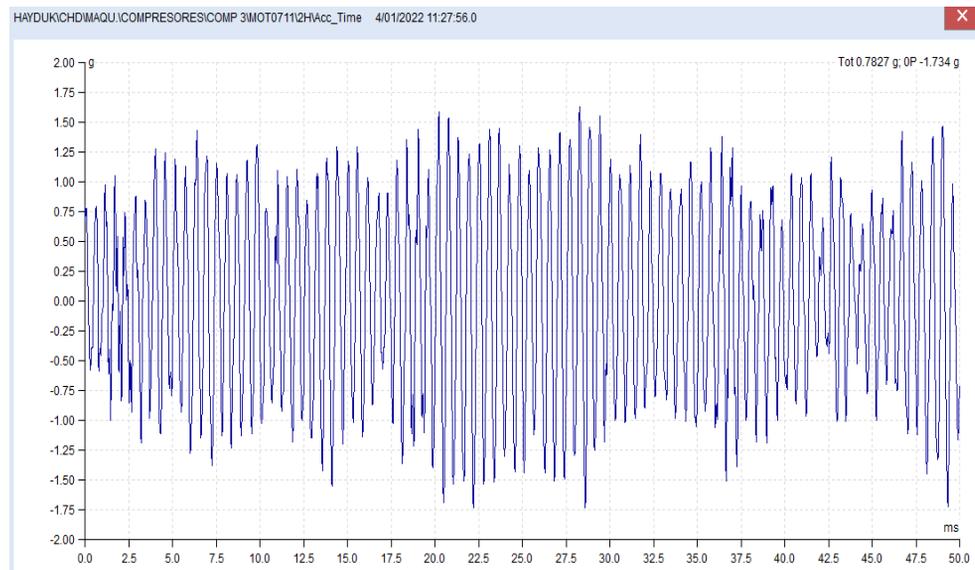
Figura 31

*Espectro del Motor eléctrico N° 03 en el punto 2H.*



Nota. La figura muestra el Espectro FFT, Pto 02H del motor eléctrico con una velocidad RMS de 1.55 mm/s, dentro de los límites permisibles de vibración. Fuente: propia.

Figura 32  
*Forma de Onda de Motor eléctrico en el punto 2H*



Nota. La figura muestra la forma de Onda, Pto 02H del motor eléctrico con un valor de aceleración de 0.78g. Fuente: propia.

#### 4.3.2 Motor Eléctrico Asíncrono de 150 HP del Compresor N°4

Figura 33  
*Motor eléctrico del Compresor de Pistones N° 04*



Nota. Puntos de Medición del Motor Eléctrico. Fuente: propia.

**Tabla 9**

Valores de Globales de Vibración del motor eléctrico N° 04

**I. Registro de Valores de Globales de Vibración**

Equipo	Punto	Posición	Unidad	1	2	3
			Fecha	Dic-21	Ene-22	Ene-22
MOTOR	1	Horizontal	mm/s	3.40	3.10	4.34
			G's	0.70	0.65	0.81
		Vertical	mm/s	2.30	2.10	2.42
		Axial	mm/s	3.10	3.50	3.86
	Temperatura		°C	49.00	46.00	47.00
	2	Horizontal	mm/s	3.50	3.80	4.00
			G's	0.70	0.56	0.68
		Vertical	mm/s	2.20	2.34	2.67
		Axial	mm/s	3.40	4.10	4.40
		Temperatura		°C	44.00	45.00

**II. Límites de Alarma Establecidas Según Norma ISO 10816-3 mm/seg - RMS**

Condición Máquina Buena	<	2.3
La Máquina puede operar Indefinidamente	2.3	4.5
La Máquina no puede operar por largo Tiempo	4.5	7.1
La Vibración Provoca Daños	7.1	>

Nota. Tabla de Registro de Valores Globales de vibración. Fuente: Propia.2022

**Observaciones**

- Se observó ligera elevada vibración de los límites permisibles aceptables, condición de la máquina: puede operar indefinidamente.

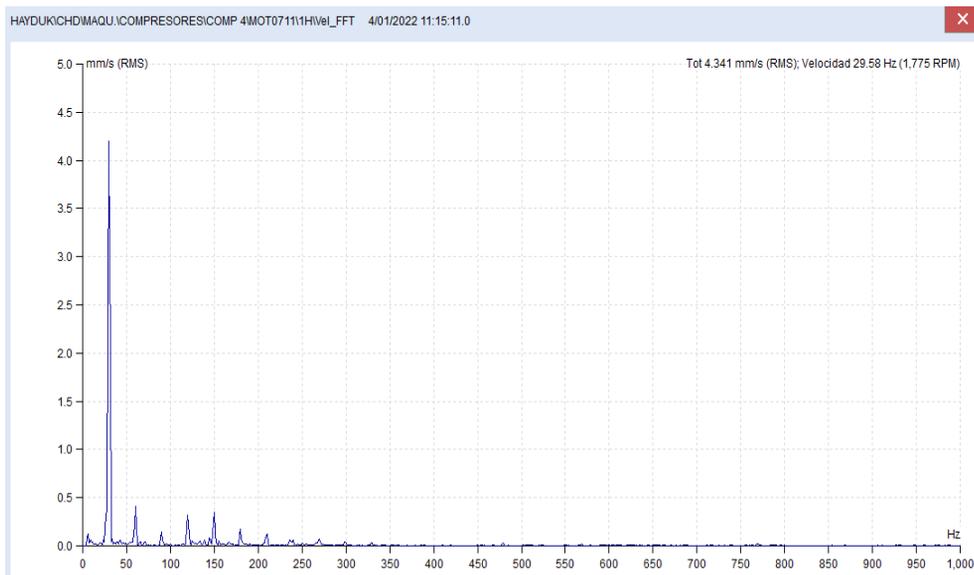
**Recomendaciones**

- Se recomienda realizar seguimiento al equipo para evaluar cambios significativos en los valores de Vibración.

## Espectros Relevantes:

### Figura 34

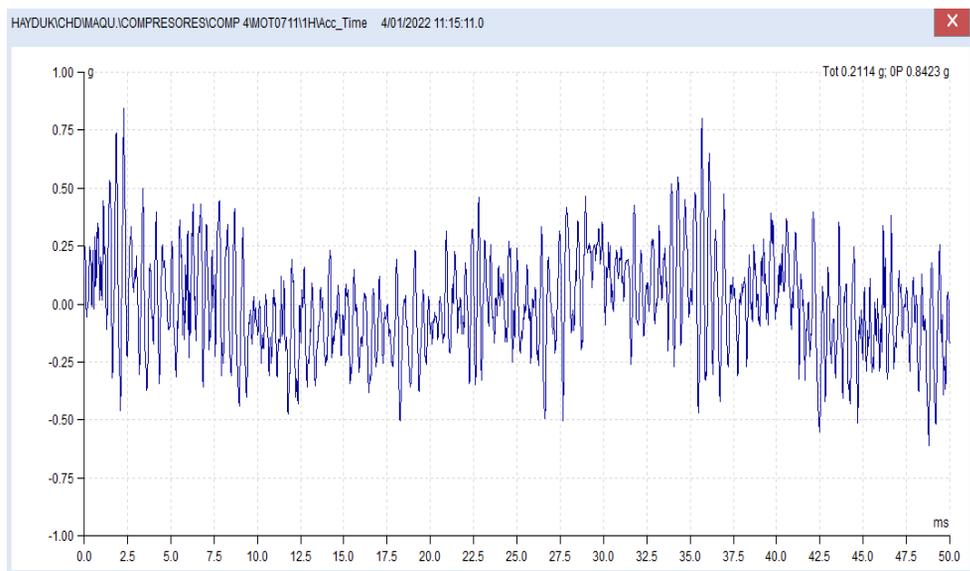
Espectro del Motor Eléctrico Asíncrono N°04.



Nota. La figura muestra el espectro FFT, Pto 1H del motor eléctrico, muestra una velocidad RMS de 4.34 mm/s, dentro de los límites permisibles de vibración. Fuente: propia.

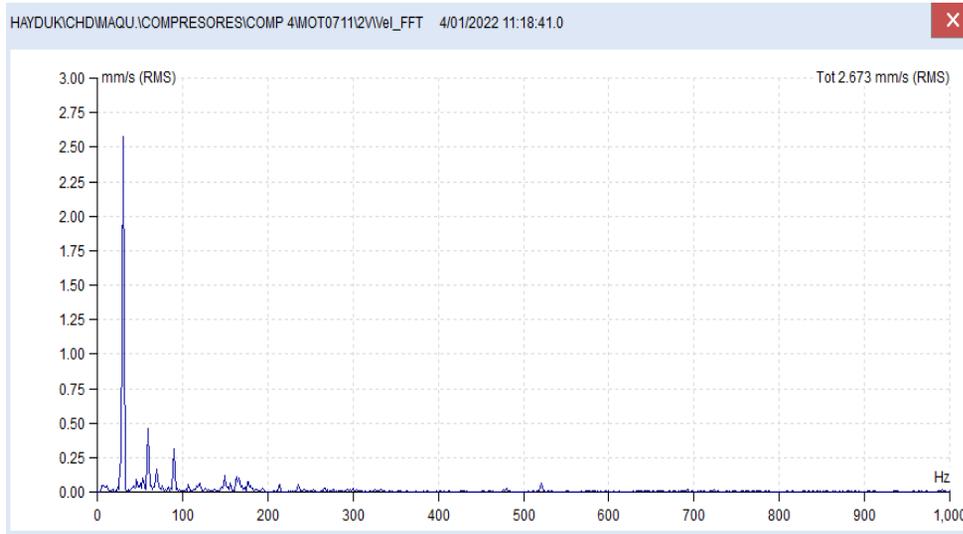
### Figura 35

Forma de Onda del Motor Eléctrico N° 04



Nota. La figura muestra la forma de onda, Pto 1H del motor eléctrico, muestra una aceleración a 0.21 g. Fuente: propia.

Figura 36  
Espectro del Motor Eléctrico N° 04, en el punto 2V



Nota. La figura muestra el espectro FFT, Pto 2V del motor eléctrico, muestra una velocidad RMS de 2.67 mm/s, dentro de los límites permisibles de vibración.

Fuente: propia.

#### 4.3.3 Motor Eléctrico Asíncrono de 150 HP del Compresor N° 05

Figura 37  
Motor eléctrico del compresor de pistones N° 05



Nota. La figura muestra el motor eléctrico N° 05 que se ha analizado mediante el análisis vibracional. Fuente: propia.

**Tabla 10**

Valores de Globales de Vibración del motor eléctrico N° 05

<b>I. Registro de Valores de Globales de Vibración</b>						
Equipo	Punto	Posición	Unidad	1	2	3
			Fecha	Dic-21	Ene-22	Ene-22
MOTOR		Horizontal	mm/s	6.70	7.50	14.31
			G's	0.80	1.30	1.14
	1	Vertical	mm/s	7.0	10.50	20.43
		Axial	mm/s	10.00	17.20	22.29
		Temperatura	°C	65.00	66.00	68.00
	2	Horizontal	mm/s	26.40	31.60	38.49
			G's	0.90	1.20	1.44
		Vertical	mm/s	18.20	21.10	23.82
		Axial	mm/s	14.20	20.40	23.01
		Temperatura	°C	60.00	70.00	75.00
<b>II. Límites de Alarma Establecidas Según Norma ISO 10816 -3 mm/s<sup>1</sup> g - RMS</b>						
Condición Máquina Buena					<	2.3
La Máquina puede operar Indefinidamente					2.3	4.5
La Máquina no puede operar por largo Tiempo					4.5	7.1
La Vibración Provoca Daños					7.1	>

Nota. Tabla de Registro de Valores Globales de vibración. Fuente: Propia.2022

### Observaciones:

- Se observó vibración fuera de los límites permisibles, condición de la máquina: la vibración está provocando daño y se observó elevada temperatura en el punto 1 y 2 del motor eléctrico.
- Los espectros muestran armónicos a las velocidades de giro del motor (1x, 2x y 3x) producto de holgura mecánica en la caja porta rodamientos del motor.
- Se observa en la forma de onda, desbalance del rotor.

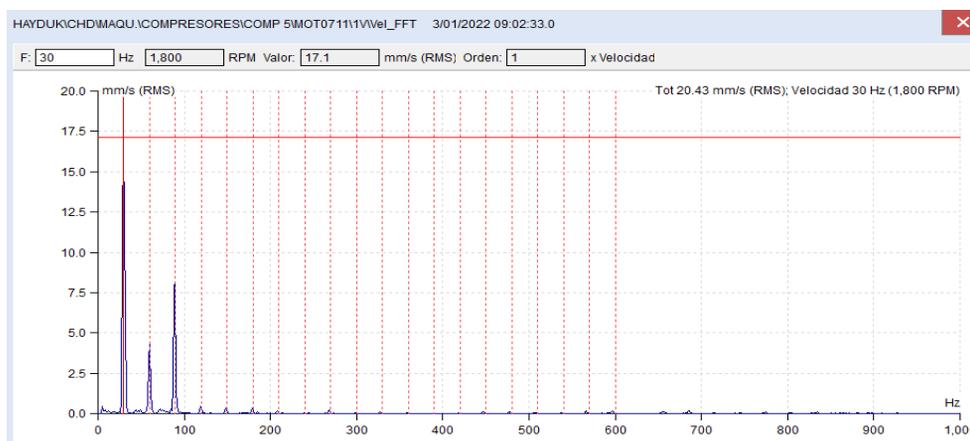
### Recomendaciones:

- Se recomienda realizar cambio de rodamientos.
- Se recomienda realizar balanceo dinámico del rotor.
- Se recomienda intervenir de forma inmediata el equipo.
- Post intervención se recomienda realizar monitoreo vibracional.

Espectros Relevantes:

Figura 38

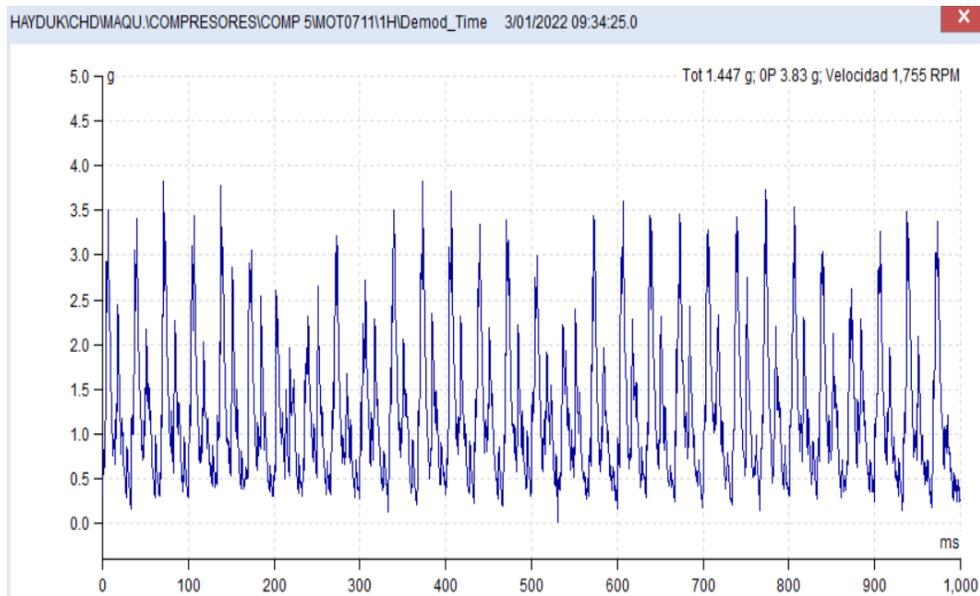
*Espectro del Motor Eléctrico N° 05, en el punto 1V*



Nota. La figura muestra el espectro FFT, Pto 1V del motor eléctrico, muestra una velocidad RMS de 20.43 mm/s, fuera de los límites permisibles de vibración, se muestra 1x dominante en el espectro y armónicos a la velocidad de giro del motor. Fuente: propia.

Figura 39

Forma de onda del motor Eléctrico N° 05, en el punto 1H

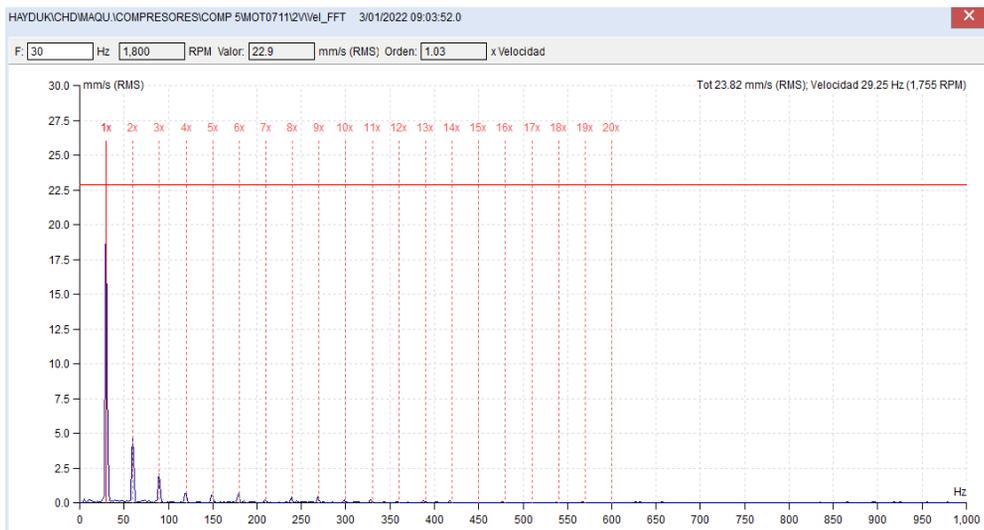


Nota. La figura muestra la forma de onda, Pto 1H del motor eléctrico, nos muestra impactos, producto de soldadura y del deterioro del rodamiento.

Fuente: propia.

Figura 40

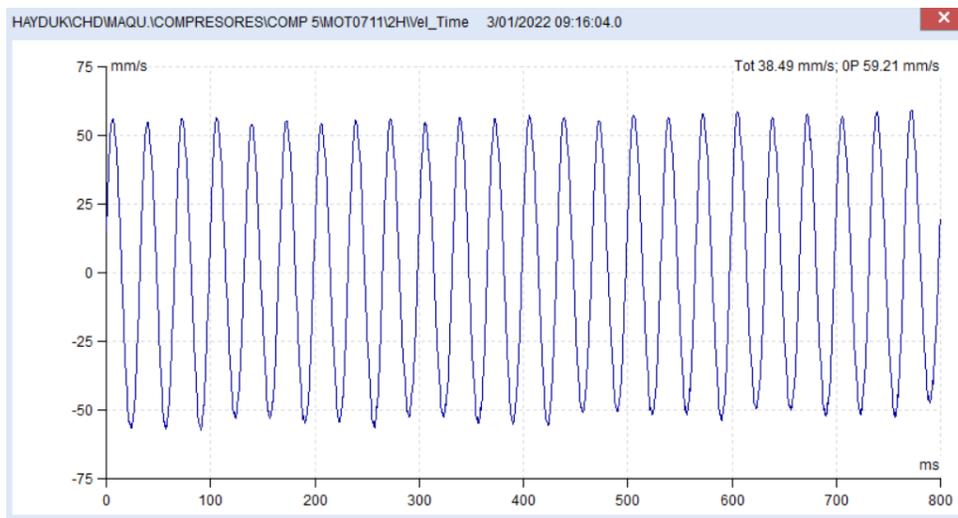
Espectro del Motor Eléctrico N° 05, en el punto 2V



Nota. La figura muestra el espectro FFT, Pto 2V del motor eléctrico, muestra una velocidad RMS de 23.82 mm/s, fuera de los límites permisibles de vibración, se muestra 1x dominante en el espectro y armónicos a la velocidad de giro del motor. Fuente: propia.

Figura 41

*Forma de Onda del Motor Eléctrico N° 05, en el punto 2H*



Nota. La figura muestra la forma de onda, Pto 2H del motor eléctrico, nos muestra una forma de onda sinusoidal, lo que representa desbalance del rotor. Fuente: propia

#### 4.3.4 Motor Eléctrico Asíncrono de 150 HP del Compresor N° 06

Figura 42

*Motor eléctrico del compresor de pistones N° 06*



Nota. La figura muestra el motor eléctrico N° 06 que se ha analizado mediante el análisis vibracional. Fuente: propia.

**Tabla 11**

*Valores de Globales de Vibración del motor eléctrico N° 06*

**I. Registro de Valores de Globales de Vibración**

Equipo	Punto	Posición	Unidad	1	2	3
			Fecha	Dic-21	Ene-22	Ene-22
MOTOR	1	Horizontal	mm/s	2.60	2.70	3.24
			G's	0.60	0.63	0.65
		Vertical	mm/s	3.10	3.00	3.52
			mm/s	2.90	3.50	3.86
	Temperatura	°C		48.00	48.50	50.00
		Horizontal	mm/s	2.10	2.35	2.20
			G's	0.40	0.70	0.50
	2	Vertical	mm/s	2.10	2.20	2.67
			mm/s	1.89	1.95	2.10
	Temperatura		°C		52.00	

**II. Límites de Alarma Establecidas Según Norma ISO 108 16-3 mm/seg - RMS**

Condición Máquina Buena	<	2.3
La Máquina puede operar Indefinidamente	2.3	4.5
La Máquina no puede operar por largo Tiempo	4.5	7.1
La Vibración Provoca Daños	7.1	>

Nota. Tabla de Registro de Valores Globales de vibración. Fuente: Propia.2022

**Observaciones:**

- Se observó vibración dentro de los límites permisibles, condición de la máquina: puede operar Indefinidamente.

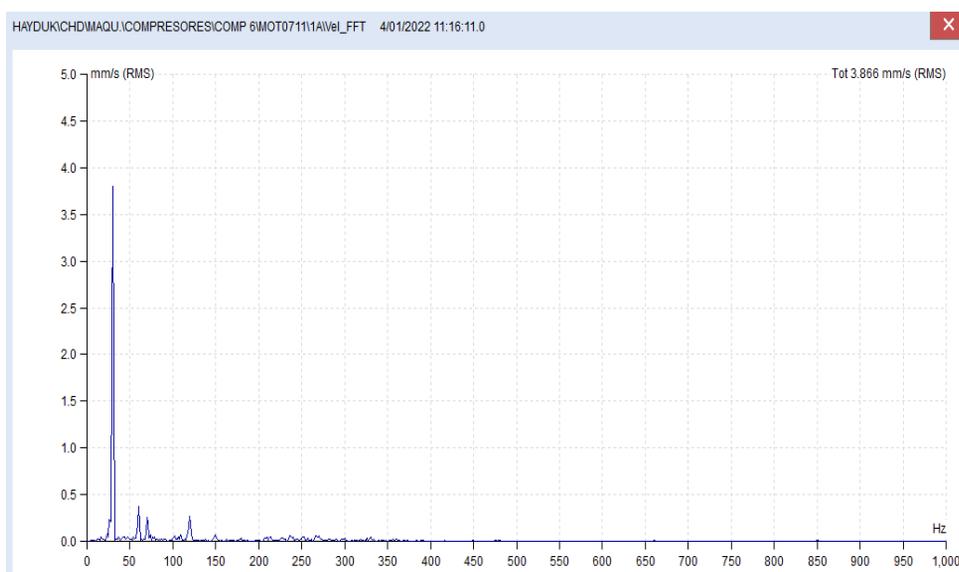
**Recomendaciones:**

- Se recomienda realizar monitoreo vibracional a fin de tener tendencia en el tiempo.

**Espectros Relevantes:**

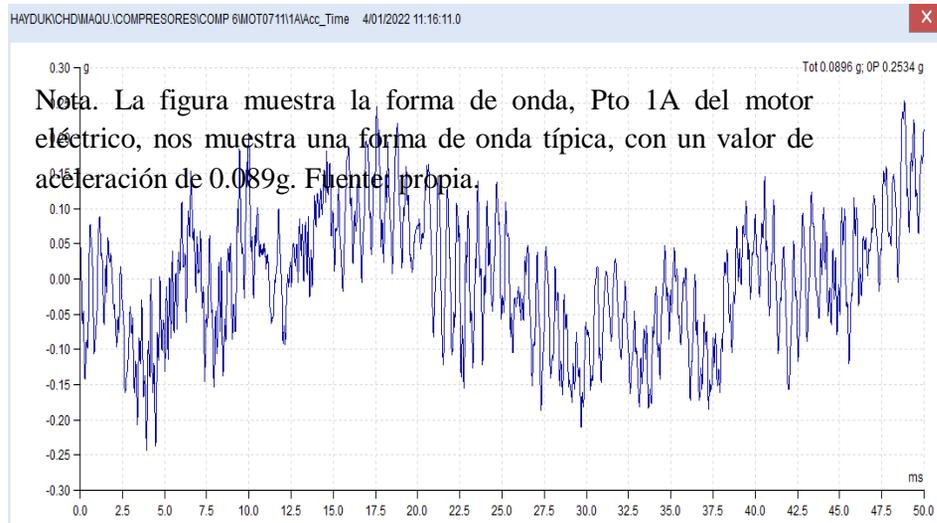
Figura 43

*Espectro del Motor Eléctrico N° 06, en el punto 01 axial.*



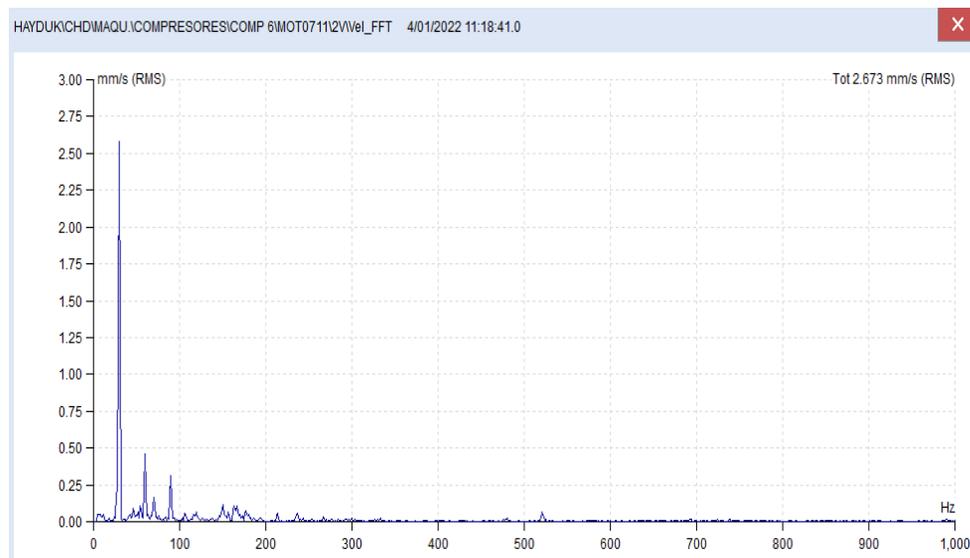
Nota. La figura muestra el espectro FFT, Pto 1A del motor eléctrico, muestra una velocidad RMS de 3.86 mm/s, dentro de los límites permisibles de vibración. Fuente: propia.

Figura 44  
 Forma de Onda del motor eléctrico N° 06, punto 1 Axial.



Nota. La figura muestra la forma de onda del motor eléctrico en el Pto 1A, con un valor de aceleración de 0.089g. Fuente Propia.

Figura 45  
 Espectro FFT del motor eléctrico N° 06 , en el punto 2V



Nota. La figura muestra el espectro FFT, Pto 2V del motor eléctrico, muestra una velocidad RMS de 2.67 mm/s, dentro de los límites permisibles de vibración. Fuente: propia.

Cada motor eléctrico asíncrono trifásico ubicado en la sala de máquinas transmite potencia por medio correas y poleas a los compresores de pistones quienes proporcionan una salida de aire a baja temperatura, la cual se encarga mantener el pescado frío desde que llega de la embarcación y también a las cámaras de frío ubicados dentro de la planta de congelados de Hayduk.

Según la ruta de vibraciones, dentro de la sala de máquinas hay 07 compresores depistones con su motor eléctrico respectivamente, de los cuales se pudo evaluar el estado de 04 motores eléctricos, identificando uno de ellos con falla, y los 03 restantes se encontraban inoperativas.

A continuación, se describe el estado de los equipos medidos en enero del 2022, y la condición en la que se encuentran.

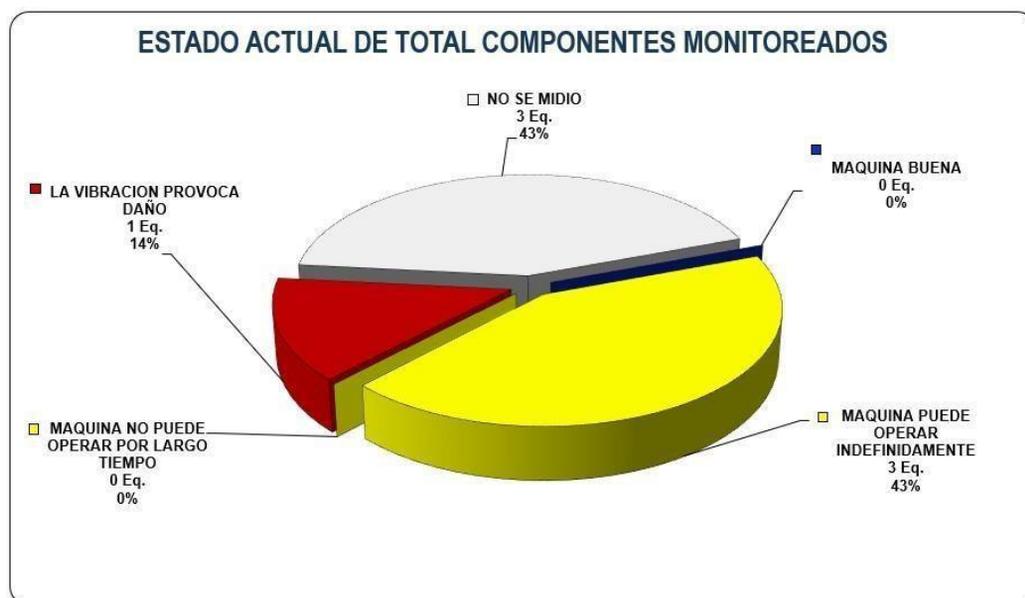
**Tabla 12**  
*Equipos Monitoreados en planta Hayduk*

Equipos Monitoreados – Enero del 2022	
MAQUINA BUENA	0 Eq.
MAQUINA PUEDE OPERAR INDEFINIDAMENTE	3 Eq.
MAQUINA NO PUEDE OPERAR POR LARGO TIEMPO	0 Eq.
LA VIBRACION PROVOCA DAÑO	1 Eq.
NO SE MIDIO	3 Eq.
TOTAL	7 Eq.
TOTAL, MEDIDOS	4 Eq.

Nota. Tabla de Equipos Monitoreados y su condición. Fuente: Propia.2022

Del gráfico anterior, se puede observar que 3 equipos pueden Operar indefinidamente representando el 43%, en 1 equipo la vibración está provocando daño representando el 14% y en 3 equipos no se midieron por estar fuera de operación equivalente al 43%.

Figura 46  
Estado de los componentes monitoreados.



Nota. La figura muestra el estado en el que se encuentran los motores eléctricos analizados. Fuente: propia.

#### 4.4 Análisis Económico del Uso del Análisis Vibracional

En el análisis económico que realizaremos a continuación, se supondrá que no se realizó el análisis vibracional a la máquina y que en plena producción se ha detectado la excesiva vibración, lo cual implica que el equipo deberá apagarse.

Si el caso anteriormente descrito sucediera, se tendría que, parar el compresor de pistones de la sala de máquinas, lo cual afectaría en la conservación del pescado y las cámaras de frío de la zona de congelados. Esto provocaría pérdidas de materia prima, quedependerá del tiempo que se tomen los técnicos en reparar el motor eléctrico malogrado.

Para darle mantenimiento correctivo a un motor eléctrico son necesario como mínimo 4 técnicos. El tiempo que va a ser necesario para el mantenimiento, dependerá del tipo de falla que ha ocurrido y el stock necesario de repuestos para el motor eléctrico.

**Tabla 13***Tiempo en horas de mantenimiento al motor eléctrico*

<u>Mantenimiento</u>	<u>Tiempo / costo por servicio</u>
Desmontaje y montaje Motor	6 horas / \$ 300
Cambio de rodamientos	5 horas / \$ 400
Balanceo Dinámico Rotor	4 horas / \$ 650
<u>Rectificado de tapas en el torno</u>	<u>4 horas / \$ 350</u>
Alineamiento	3 hora / \$ 350

Nota. Tiempo total de mantenimiento correctivo del motor eléctrico y su costo por servicio.

Fuente: Propia.2022

Con los datos mencionados en la tabla anterior, la suma de los costos por servicio (desmontaje y montaje del motor, cambio de rodamientos, balanceo dinámico del rotor, y rectificado de tapas en el torno) sumarían un total de gastos de \$ 2050 más las pérdidas por producción, estas pérdidas se evitaron al realizar el análisis de vibraciones a los motores eléctricos antes de su inicio de producción de la planta pesquera.

La inversión aproximada para la implementación del mantenimiento predictivo usando la técnica del análisis vibracional sería:

**Tabla 14***Descripción de la implementación del mantenimiento predictivo*

<u>Descripción</u>	<u>Costo</u>	<u>Tiempo</u>
Instrumento de medición	\$ 15,000	-
Capacitación y certificación personal	\$2,200	3 semanas
<u>Inversión Total</u>	<u>\$ 17,200</u>	

Nota. Inversión total del mantenimiento predictivo. Fuente: Propia.2022

#### 4.5 Disponibilidad de los Motores Eléctricos

La disponibilidad es una manera de cuantificar cuánto tiempo está nuestros equipos funcionando como se debe. Por lo tanto, a mayor disponibilidad, se podrá producir más; y mayor es el rendimiento de mis activos. Emplearemos la siguiente fórmula para

poder

determinar la disponibilidad:

$$Disponibilidad = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100\%$$

Mediante el análisis de vibraciones, pudimos diagnosticar un equipo con demasiada vibración, identificamos las fallas posibles, el mantenimiento correctivo correspondiente y las horas que involucrarían este mantenimiento; la cual si no se hubiera diagnosticado a tiempo hubiera supuesto un problema en la disponibilidad. Teniendo estos datos mencionados y utilizando la ecuación mencionada anteriormente, tenemos:

**Tabla 15**

*Cálculo del desempeño del compresor N° 05*

<b>CARACTERÍSTICA</b>		<b>MOTOR ELECTRICO DEL COMPRESOR DE PISTONES N° 05</b>	
PERIODO CONSIDERADO	90 días (2160 horas)		
TIEMPO DE OPERACIÓN	DE 75 días (1800 horas)	MTBF	75 días (1800 horas)
NUMERO DE FALLAS	DE 1		
HORAS PERDIDAS POR FALLA	120 horas	MTTR	120 horas

Nota. Cálculo de MTBF y MTT. Fuente: Propia.2022

- Disponibilidad =  $\frac{MTBF}{(MTBF+MTTR)} \times 100\% = \frac{1800}{(1800+120)} \times 100\% = 93.75\%$

- Disponibilidad sin Análisis Vibracional
  - N° de horas interrumpidas: 120 horas
  - N° de horas disponibles para producción: 1800 horas (3 meses)
  - **La disponibilidad hubiera sido: 93.75 %**
- Disponibilidad con Análisis Vibracional
  - N° de horas interrumpidas: 15 horas
  - N° de horas disponibles para producción: 1800 horas (3 meses)
  - **Disponibilidad: 98.9 %**

## V. DISCUSIÓN

- a) Con el desarrollo de la presente tesis pudimos evaluar y analizar los espectros y parámetros de vibración de los motores trifásicos de 150 hp con el software de vibraciones Adash y determinar que los valores de 03 motores eléctricos estuvieron dentro de los límites permisibles y 01 se encontraba fuera de los límites permisibles de operación, tomando acciones inmediata para su reparación, de esta forma se dio a conocer la importancia de implementar el mantenimiento basado en la condición, tal como la investigación de Barboza (2013), denominado “ sistema de detección de fallas para una bomba centrífuga”, cuya principal desarrollo de la tesis se basó en la detección de fallas mediante el análisis de vibraciones; y que de la misma forma el desarrollo de nuestra tesis se pudo encontrar fallas mediante el análisis de vibraciones y el estado en el que se encontraba nuestros equipos.
- b) Se diagnosticó a tiempo las posibles fallas que se podían presentar en los 04 motores eléctricos asíncronos trifásicos que teníamos operativos, con la técnica del análisis de vibraciones y se pudo diagnosticar la falla del motor

eléctrico asíncrono trifásico N°5 que se encontraba fuera de los límites permisibles según la norma ISO 10816 -3; y que mediante el análisis de la forma de onda y el espectro se encontró fallas como holgura rotacional y desbalance del rotor, tal como la tesis de Barboza, A. (2013), realizó su investigación en: “sistema de detección de fallas para una bomba centrífuga”, el objetivo general es realizar un sistema de diagnósticos de fallas para una bomba centrífuga, que se le instaló a un motor eléctrico monofásico. El sistema de diagnóstico de fallas se basó en el análisis vibracional. La presente tesis consiste en el estudio del funcionamiento de las bombas centrifugas, se eligió método de detección de fallas mediante el análisis vibracional que permitió conocer el estado en el que se encuentra la máquina y en que componente está ocurriendo la falla.

- c) Se realizó un análisis económico que tendría la implementación del análisis vibracional dentro de la planta Hayduk y se calculó la disponibilidad de los equipos; esta investigación tiene semejanza a la investigación de Zapana, M. (2017) en su tesis titulada: “ Proyecto de un procedimiento de diagnósticos de fallas por análisis vibracional en bombas y ventiladores” busca diagnosticar mediante el análisis de vibraciones las posibles fallas que se pueden presentar en las bombas y ventiladores mediante la recolección de data, lectura de espectros y diagnósticos de fallas; además de aplicar un análisis económico para comparar el gasto que generaría el no implementar el mantenimiento predictivo. Nuestra presente tesis determinó el costo total de la inversión para implementar el mantenimiento predictivo aplicando la técnica del análisis vibracional sería de \$ 17,200, la cual nos podría ayudar a monitorear los equipos más críticos de nuestra planta y prever

fallas a futuro; inversión que nos podría evitar paradas imprevistas durante la producción y evitar grandes pérdidas en la producción de la planta pesquera. Con el análisis de vibraciones pudimos detectar a tiempo la falla en uno de los motores asíncronos trifásicos que generó un costo de mantenimiento de \$ 2050, pero que no afectó a la producción debido a que se ejecutó antes del inicio de la temporada de producción. Con esto podemos comprender la importancia del análisis vibracional a los motores eléctricos de nuestra planta y que se justifica económicamente, debido a que las pérdidas en el mantenimiento correctivo son mayores a la inversión económica necesaria para implantar el mantenimiento predictivo.

- d) Se logró optimizar la confiabilidad de los motores eléctricos asegurando su disponibilidad mediante la recolección de datos de vibraciones y la lectura de espectros, de la misma manera que Mejía, L. (2009), en su tesis “Análisis de vibraciones en motores eléctricos asíncronos trifásicos” busca encontrar las frecuencias comunes de fallas presentes en los motores asíncronos trifásicos, estableciendo un procedimiento de diagnóstico del estado de sus componentes, asemejándose a los objetivos que se dirige la presente tesis de investigación cuyos resultados pudieron determinar a tiempo una falla mecánica en los motores asíncronos trifásicos y tomar las medidas correctivas adecuadas, generando una disponibilidad de operación de los motores eléctricos asíncronos en un 98.9%, para la temporada de producción de la planta pesquera y de esta forma asegurando la confiabilidad operacional de los equipos.

## VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. CONCLUSIONES

- a) Se evaluó y analizó los parámetros de vibración de los motores eléctricos como velocidad y aceleración con el software DDS Adash, encontrándose el motor eléctrico número 5 con vibración fuera de los límites permisibles, la cual representaba el 14% del total de equipos analizados.
- b) Se determinó según la Norma ISO 10816-3 que el motor eléctrico N° 05 del compresor de pistones se encontraba fuera de los límites permisibles de vibración, se diagnosticó mediante la lectura de los espectros que la falla del motor eléctrico N° 05 del compresor de pistones se debe a desbalance del motor eléctrico asíncrono de su centro de masa y holgura en la caja porta rodamiento del motor eléctrico asíncrono.
- c) Se realizó un análisis económico empleando la técnica del análisis de vibraciones, se pudo evitar un mantenimiento correctivo durante la temporada de producción con un costo de \$2050, además de las pérdidas que se hubiesen generaría por la para imprevista de la planta pesquera, y nos permitió asegurar la disponibilidad de los equipos.
- d) Se optimizó la confiabilidad asegurando la disponibilidad de los motores eléctricos asíncronos de 150 HP de un 93.75% a un 98.9%, mediante el análisis de vibraciones y la lectura de espectros.

## 6.2. RECOMENDACIONES

- ✓ La supervisión y diagnóstico de los motores eléctricos mediante el mantenimiento predictivo utilizando la técnica del análisis vibracional es muy importante para conocer el estado de operación de los equipos.
- ✓ La correcta evaluación y análisis efectuados durante el monitoreo vibracional de los motores eléctricos, nos permitió identificar falla del motor eléctrico del compresor de pistones N° 05 y usando la tabla de la Norma ISO 10816-3 pudimos observar que la vibración estaba fuera de los límites permisibles, lo que nos permitió atenderlo de forma inmediata y singenerarnos paros imprevistos durante el tiempo de producción.
- ✓ Es recomendable saber identificar en la tabla de la Norma ISO-10816-3, el tipo de máquina que estoy analizando, su grupo que pertenece, el tipo de estructura en la cual está asentado y saber distinguir su grado de severidad.
- ✓ La persona encargada de recolectar y analizar los datos de vibración debe estar altamente capacitada para poder brindar un buen diagnóstico.
- ✓ La implementación de un área de mantenimiento predictivo debe pasar por etapas de preparación inicial, implementación y considerar que esto tomará su tiempo de adecuación.
- ✓ El análisis vibracional en este proyecto se justifica económicamente, debido a que nos permitió evaluar el estado de nuestros equipos e identificó fallas la cual nos evitó una pérdida durante la producción.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- API 670, 1986, Vibration, Axial Position, and bearing Temperature Monitoring System, 2nded., American Petroleum Institute, Washington, D.C.
- API 678, 1981, Accelerometer-Based Vibration Monitoring System, API, Washington, D.C.
- Ministerio de Economía y Finanzas. (2022). Clasificador Presupuestario.
- Clasificador Económico de Gastos para el año Fiscal 2022.
- [https://www.mef.gob.pe/es/?option=com\\_content&language=esES&Itemid=100290&lang=es-ES&view=article&id=356](https://www.mef.gob.pe/es/?option=com_content&language=esES&Itemid=100290&lang=es-ES&view=article&id=356)
- Eshleman, R. (2002.) Vibraciones Básicas de Máquinas. Introducción Al Análisis Básico de Maquinarias.
- Mobius institute (2018) Manual en análisis de vibraciones. Categoría II
- Barboza, A. (2013) Sistema de detección de fallas para una bomba centrífuga
- Zapana, B. (2017) Proyecto de un procedimiento de diagnóstico de fallas por análisis vibracional en bombas y ventiladores
- Mejía, J. (2009) Análisis de vibraciones en motores eléctricos asíncronos trifásicos

## VIII. ANEXOS

### 8.1. Ficha Técnica y Certificado de Calibración del Equipo

 															
<b>CERTIFICADO DE CALIBRACION N° CE000008-2021</b>															
Fecha emisión: 25/11/2021 Página 1 de 2															
<p><b>1. SOLICITANTE:</b> PESQUERA HAYDUK S.A.</p> <p><b>2. DIRECCION:</b> Puerto Malabrigo Playa Norte S/N -Razuri-Ascope-La Libertad.</p> <p><b>3. INSTRUMENTO DE MEDICION:</b> Vibrómetro analizador, colector de datos.</p> <table border="0"> <tr> <td>• Marca</td> <td>: Adash</td> </tr> <tr> <td>• Modelo</td> <td>: Vibrio MS Kit</td> </tr> <tr> <td>• N° Serie</td> <td>: 626352</td> </tr> <tr> <td>• Tipo de indicación</td> <td>: En pantalla</td> </tr> <tr> <td>• Procedencia</td> <td>: Republica Checa.</td> </tr> <tr> <td>• Sensibilidad</td> <td>: 100.3mV/g</td> </tr> <tr> <td>• Versión firmware</td> <td>: 4.81 Mdet</td> </tr> </table> 		• Marca	: Adash	• Modelo	: Vibrio MS Kit	• N° Serie	: 626352	• Tipo de indicación	: En pantalla	• Procedencia	: Republica Checa.	• Sensibilidad	: 100.3mV/g	• Versión firmware	: 4.81 Mdet
• Marca	: Adash														
• Modelo	: Vibrio MS Kit														
• N° Serie	: 626352														
• Tipo de indicación	: En pantalla														
• Procedencia	: Republica Checa.														
• Sensibilidad	: 100.3mV/g														
• Versión firmware	: 4.81 Mdet														
<p><b>4. FECHA Y LUGAR DE LA CALIBRACIÓN</b> Calibrado el 25/11/2021 en las instalaciones de PREDIMAS SAC.</p> <p><b>5. METODO DE CALIBRACION</b> La calibración se realizó por comparación directa según el PC-EA-001; 'Procedimiento de calibración de equipos analizadores' de PREDIMAS SAC.</p> <p><b>6. TRAZABILIDAD</b> Se utilizó el siguiente equipo patrón:</p> <table border="0"> <tr> <td>Marca</td> <td>: Adash</td> </tr> <tr> <td>Nombre</td> <td>: Sensor Simulador.</td> </tr> <tr> <td>Modelo</td> <td>: A4802</td> </tr> <tr> <td>Serial</td> <td>: 630472</td> </tr> <tr> <td>Sensibilidad</td> <td>: 10000mv/g</td> </tr> </table>  <p>El patrón funciona como un sensor de vibración estándar ICP con una sensibilidad de 100mv/g. La unidad genera un voltaje sinusoidal a una frecuencia de 80Hz. Con niveles de amplitud precisas, que permite la comprobación de los analizadores, vibrómetros, sistemas de protección y monitoreo.</p>		Marca	: Adash	Nombre	: Sensor Simulador.	Modelo	: A4802	Serial	: 630472	Sensibilidad	: 10000mv/g				
Marca	: Adash														
Nombre	: Sensor Simulador.														
Modelo	: A4802														
Serial	: 630472														
Sensibilidad	: 10000mv/g														
<p>Av. Caudivilla Mz.T1 Lt.21 Urbanización Lucyana. Carabayillo - Lima Perú. Ruc 20547307055 Central 981538813 / 981463228. Telf.:+51(01)7193172 / 7193173. Fax +51(01)7188994 e-mail predimas@gmail.com / logistica@predimas.com / Web <a href="http://www.predimas.com">www.predimas.com</a></p>															



CERTIFICADO DE CALIBRACION N° CE000008-2021

Fecha emisión: 25/11/2021

Página 2 de 2

**7. CONDICIONES DE CALIBRACION**

Temperatura ambiental	Inicial	: 21.9°C	Final	: 22.0°C
Humedad relativa	Inicial	: 88.9% H.R.	Final	: 89% H.R.

**8. OBSERVACIONES**

- La periodicidad de la calibración está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición.
- Valores de error relativo menores al 0.099301295% que están dentro del rango promedio del  $\pm 2\%$ .
- Se recomienda la próxima calibración antes del 25 de noviembre del 2022

**9. RESULTADOS**

CANAL 1				
Frecuencia	Indicación del patrón		Indicación del instrumento Vibrio	Error relativo
	Sensibilidad	RMS mm/s	RMS mm/s	%
80Hz.	100.3 mV/g	9.97	9.98	0.099301295



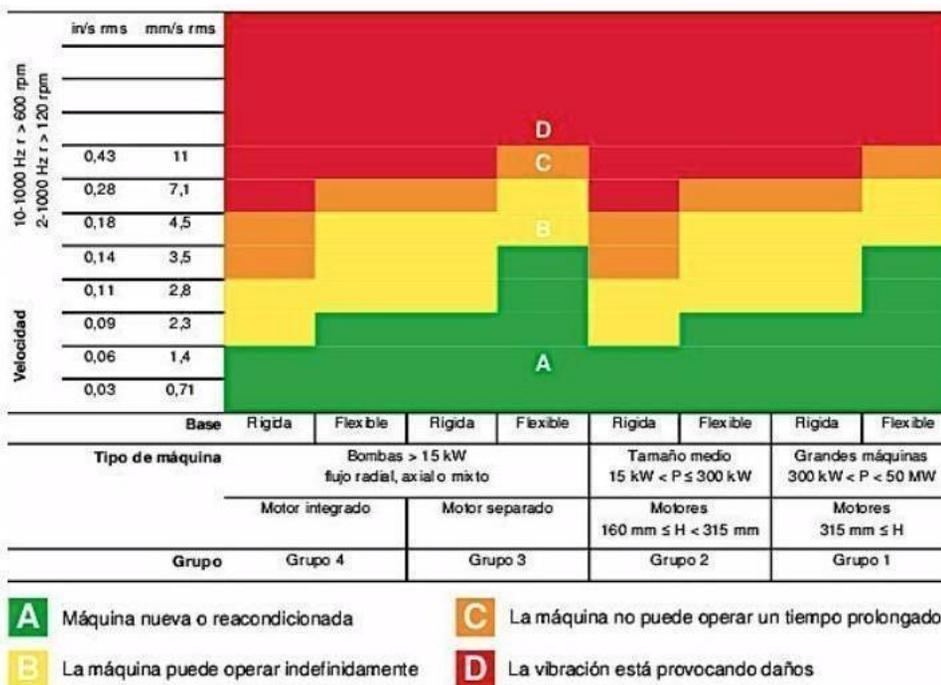
Ing. Ms. Miguel Pérez Castro  
CIP 81671

Miembro de la Sociedad Europea Ucraniana Para Ensayos No Destructivos N° 5291. USNDT.  
Analista de Vibraciones Nivel 2 - ID6520717 - Mobius Institute Australia

*Miguel Angel Perez Castro*  
**MIGUEL ANSEL PEREZ CASTRO**  
INGENIERO ELECTRICO  
Reg. CIP N° 81671

Av. Caudivilla Mz.T1 LT.21 Urbanización Lucyana. Carabaylo - Lima Perú.  
Ruc 20547307055  
Central 981538813 / 981463228. Telf.: +51(01)7193172 / 7193173. Fax +51(01)7188994  
e-mail predimas@gmail.com / logistica@predimas.com / Web: www.predimas.com

8.2. Anexo Norma ISO 10816-3



8.3. Valores Estándar de Envolvente de aceleración en Pulgadas Pk-Pk

Enveloping Severity	Speed		
	Speed < 500rpm	Speed between 500 & 1800rpm	Speed is either 1800 or 3600rpm
<b>g<sub>E</sub></b> peak to peak			
0.1	Good	Good	Good
0.5	Satisfactory		
0.75	Unsatisfactory	Satisfactory	Satisfactory
1			
2	Unacceptable (danger)	Unsatisfactory	Unacceptable (danger)
4		Unsatisfactory	
10		Unacceptable (danger)	

## 8.4. Gráfico de diseño de investigación

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPOTESIS	MARCO TEORICO	VARIABLE	METODOLOGÍA
<p><b>Problema general</b> ¿De qué manera el análisis vibracional de los 4 motores trifásicos de 150 HP mejorará la confiabilidad de los compresores de frío?</p>	<p><b>Objetivo general</b> Recolectar, analizar y diagnosticar los datos vibracionales de los Motores Trifásicos de 150 HP para mejorar la confiabilidad de los equipos de compresor de frío, Hayduk.</p>	<p><b>Hipótesis general:</b> Se mejoró la confiabilidad en un 98% los equipos de compresor de frío, mediante la recolección, análisis y diagnóstico de los datos vibracionales en los motores de 150 HP en la empresa hayduk</p>	<p><b>Análisis Vibracional</b> Es un procedimiento por el cual medimos los valores de vibración de las máquinas industriales, y así poder determinar en qué condiciones de operación está el equipo y los componentes que lo conforman. Es un mantenimiento basado en la condición de operación del equipo, que está dentro del mantenimiento predictivo.</p> <p><b>Confiabilidad</b></p>	<p><b>Variable dependiente</b> Análisis Vibracional del Motor trifásico de 150 HP.</p>	<p><b>Método de la investigación</b> Análisis Cuantitativo-Experimental</p> <p><b>Procedimiento de la Investigación</b> El procedimiento de la investigación se basa en el análisis vibracional mediante el colector de datos Adash Vibrio 4900M, que nos permitirá detectar y diagnosticar posibles fallas mecánicas en los componentes de las máquinas mediante el software DDS Adash.</p> <p><b>Diseño de la Investigación</b> Diseño Experimental Cuantitativa y Cualitativa.</p> <p><b>Población</b> La población está constituida por los equipos y maquinarias que conforman una planta industrial.</p> <p><b>Muestra</b> La muestra está constituida por los 4 motores asincrono trifasico de 150hp.</p> <p><b>Muestreo</b> El muestreo está constituido por el equipo de análisis vibracional Adash Vibrio 4900 M que nos permitirá detectar y diagnosticar fallas mecánicas</p>
<p><b>Problema específico:</b> a) ¿se encuentran los datos obtenidos se encuentran dentro de los límites permisibles según la Norma ISO 10816-3.? b) ¿Qué posibles fallas se presentan en los motores trifásicos de 150 hp? c) ¿De que manera se optimizo la confiabilidad asegurando la disponibilidad de los motores eléctricos de 150 HP mediante la recolección de datos de vibraciones y la lectura de espectros con el colector de datos Adash 4900 Vibrio M ? d) ¿El analisis economico del analisis tuvo un impacto positivo o negativo ?</p>	<p><b>Objetivos Específicos</b> a) Evaluar y Analizar los espectros y parámetros de vibración, de velocidad y aceleración del motor eléctrico de 150 HP en el software DSS Adash y determinar si los valores globales obtenidos se encuentran dentro de los límites permisibles según la Norma ISO 10816-3. b) Diagnosticar las posibles fallas que se pueda presentar en los motores trifásicos de 150 hp. c) Realizar un análisis del impacto económico que tendrá el análisis vibracional realizado en planta Hayduk y calcular la disponibilidad de los equipos. d) Optimizar la confiabilidad asegurando la disponibilidad de los motores eléctricos de 150 HP mediante la recolección de datos de vibraciones y la lectura de espectros con el colector de datos Adash 4900 Vibrio M.</p>	<p><b>Hipótesis específicos</b> a) Los datos de obtenidos analizados por el software DSS Adash estan dentro de los limites permisibles según la Norma ISO 10816-3 b) Se realizo el diagnostico de falla de desalineamiento de motor c) Se optimizo la confiabilidad en un 98% en los motores eléctricos de 150HP mediante la recolección de datos de vibraciones y lectura de espectros d) Mediante el analisis vibracional se evito costos de parada teniendo una disponibilidad de 97% de los equipos</p>	<p>La confiabilidad es uno de los parámetros clave utilizados para administrar las operaciones de mantenimiento, el otro parámetro es la manten sponibilidad de un dispositivo, planta o ma. Es la capacidad del equipo para funcionar sin fallar durante un cierto periodo de tiempo, esta capacidad está ligada a su estado de conservación, condiciones de uso, diseño, calidad de sus componentes, etc.</p>	<p><b>Variable independiente</b> Mejorar la confiabilidad del equipo de compresor de frío.</p>	<p>Diseño Experimental Cuantitativa y Cualitativa.</p> <p><b>Población</b> La población está constituida por los equipos y maquinarias que conforman una planta industrial.</p> <p><b>Muestra</b> La muestra está constituida por los 4 motores asincrono trifasico de 150hp.</p> <p><b>Muestreo</b> El muestreo está constituido por el equipo de análisis vibracional Adash Vibrio 4900 M que nos permitirá detectar y diagnosticar fallas mecánicas</p>

10	<a href="https://tesis.ucsm.edu.pe">tesis.ucsm.edu.pe</a> Fuente de Internet	1 %
11	<a href="https://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	< 1 %
12	<a href="https://renati.sunedu.gob.pe">renati.sunedu.gob.pe</a> Fuente de Internet	< 1 %
13	<a href="https://repositorio.utp.edu.co">repositorio.utp.edu.co</a> Fuente de Internet	< 1 %
14	<a href="https://zdocs.mx">zdocs.mx</a> Fuente de Internet	< 1 %
15	<a href="https://bsginstitute.com">bsginstitute.com</a> Fuente de Internet	< 1 %
16	<a href="https://repositorio.ucsg.edu.ec">repositorio.ucsg.edu.ec</a> Fuente de Internet	< 1 %
17	<a href="https://tangara.uis.edu.co">tangara.uis.edu.co</a> Fuente de Internet	< 1 %
18	Submitted to Universidad Tecnologica del Peru Trabajo del estudiante	< 1 %
19	<a href="https://repositorio.uasb.edu.bo:8080">repositorio.uasb.edu.bo:8080</a> Fuente de Internet	< 1 %
20	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	< 1 %

21	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	< 1 %
22	<a href="http://www.dliengineering.com">www.dliengineering.com</a> Fuente de Internet	< 1 %
23	Submitted to Escuela Politecnica Nacional Trabajo del estudiante	< 1 %
24	<a href="http://repositorio.usil.edu.pe">repositorio.usil.edu.pe</a> Fuente de Internet	< 1 %
25	Submitted to ipn Trabajo del estudiante	< 1 %
26	<a href="http://www.coursehero.com">www.coursehero.com</a> Fuente de Internet	< 1 %
27	<a href="http://1library.co">1library.co</a> Fuente de Internet	< 1 %
28	<a href="http://kaffec.com">kaffec.com</a> Fuente de Internet	< 1 %
29	<a href="http://polodelconocimiento.com">polodelconocimiento.com</a> Fuente de Internet	< 1 %
30	<a href="http://repositorio.unprg.edu.pe">repositorio.unprg.edu.pe</a> Fuente de Internet	< 1 %
31	<a href="http://upc.aws.openrepository.com">upc.aws.openrepository.com</a> Fuente de Internet	< 1 %
32	<a href="http://cybertesis.unmsm.edu.pe">cybertesis.unmsm.edu.pe</a>	

Fuente de Internet

< 1 %

33

[www.slideshare.net](http://www.slideshare.net)

Fuente de Internet

< 1 %

34

[www.tam.com.mx](http://www.tam.com.mx)

Fuente de Internet

< 1 %

35

[repositorio.ucv.edu.pe](http://repositorio.ucv.edu.pe)

Fuente de Internet

< 1 %

36

[repositorio.unap.edu.pe](http://repositorio.unap.edu.pe)

Fuente de Internet

< 1 %

37

[internationalbudget.org](http://internationalbudget.org)

Fuente de Internet

< 1 %

38

[repositorio.unj.edu.pe](http://repositorio.unj.edu.pe)

Fuente de Internet

< 1 %

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias < 15 words

Excluir bibliografía

Activo