



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO  
PREDICTIVO EN UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE UN COMPRESOR DE  
AMONÍACO TIPO TORNILLO, BASADO EN LA NORMA ISO 17359**

**Emilsed Johanna Ruano Espinoza**

Asesorado por la MSc. Inga. Sandra Ninett Ramírez Flores

Guatemala, septiembre de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO  
PREDICTIVO EN UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE UN COMPRESOR DE  
AMONIACO TIPO TORNILLO, BASADO EN LA NORMA ISO 17359**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**EMILSED JOHANNA RUANO ESPINOZA**

ASESORADO POR LA MSC. INGA. SANDRA NINETT RAMÍREZ FLORES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA MECÁNICA**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Roberto Guzmán Ortiz
EXAMINADOR	Ing. Julio César Campos Paiz
EXAMINADOR	Ing. José Francisco Arrivillaga Ramazzini
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO  
PREDICTIVO EN UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE UN COMPRESOR DE  
AMONIACO TIPO TORNILLO, BASADO EN LA NORMA ISO 17359**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 29 de mayo de 2019.



**Emilsed Johanna Ruano Espinoza**

Guatemala, 06 de junio de 2019.

Director  
Julio César Campos Paiz  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Su despacho.

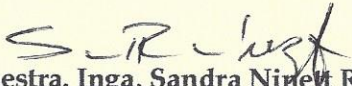
Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del estudiante **Emilsed Johanna Ruano Espinoza** carné número **200117369**, quien optó la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la **Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento**.

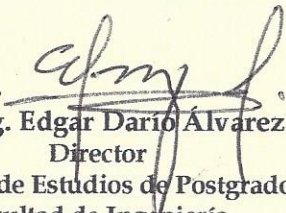
Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Sin otro particular, atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*

  
Maestra. Inga. Sandra Nineth Ramirez F.  
Asesor(a)

  
Maestra. Inga. Sandra Nineth Ramirez F.  
Coordinadora de Área de Gestión y Servicios

  
Maestro Ing. Edgar Dario Alvarez Coti  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería



No. de Asesoramiento registrado en EEP 5

Asesoramiento aprobado según el Acta No. 01 - 2018 inciso 2.6 de sesión celebrada en fecha 10 de agosto del año 2018 por el Consejo Académico, ACUERDA: Autorizar que los asesores de programas de Maestrías en Artes puedan asesorar hasta un máximo de 6 estudiantes, contando con el aval del asesor, coordinador y director de Escuela, notificando la autorización a estudiantes, asesores y coordinadores. Después de dos años de aprobado el protocolo se dará de baja la relación estudiante asesor.

Cc archivo/LZ.LA.

RESOLUCIÓN DE JUNTA DIRECTIVA: Proceso de Graduación aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011.

Ref.E.I.M.179.2019

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación de la Coordinadora del Área de Gestión y Servicios de la Escuela de Estudios de Postgrado, modalidad Pregrado-Postgrado de la Maestría de Ingeniería en Mantenimiento, del trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE UN COMPRESOR DE AMONÍACO TIPO TORNILLO, BASADO EN LA NORMA ISO 17359** de la estudiante **Emilsed Johanna Ruano Espinoza**, CUI **2362197070601** y Registro Académico No. **200117369** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

*"Id y Enseñad a Todos"*

  
Ing. Julio César Campos Paiz  
Director  
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, junio 2019  
/aej

Universidad de San Carlos  
de Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 325 .2019

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE UN COMPRESOR DE AMONIACO TIPO TORNILLO, BASADO EN LA NORMA ISO 17359**, presentado por la estudiante universitaria: **Emilsed Johanna Ruano Espinoza**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

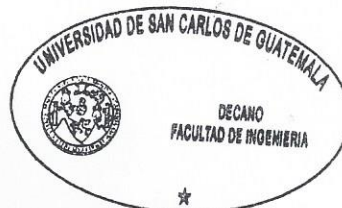
IMPRÍMASE:

Inga. Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, septiembre de 2019

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por las oportunidades que me presentas en la vida, y esta es una de ellas, me permitiste cumplir esta meta proveyéndome fortaleza, sabiduría y sobre todo perseverancia.
- Mis padres** Por su ejemplo, gracias por su apoyo incondicional, la confianza puesta en mí, son una de las mayores bendiciones que Dios me ha regalado, este triunfo es tan mío como suyo.
- Mi esposo** Por amarme y creer en mí, tus consejos, paciencia y comprensión me ayudaron a seguir adelante, gracias por estar conmigo en todo momento.
- Mis hijos** Por ser los que me inspiran a ser mejor cada día, porque sé que se educa con el ejemplo y espero llegar a ser uno bueno. Mi amor por ustedes es incondicional.
- María Luisa Alvarez abuelita** Por estar siempre para mí de forma incondicional, con mucho cariño te digo que ocupas un lugar muy especial en mi corazón, gracias por tus consejos y tu apoyo. Que Dios te bendiga.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Universidad de San  
Carlos de Guatemala**

*Alma mater* que inculcó en mi identidad, solidaridad, equidad, compromiso y credibilidad, agradezco el haberme acogido y formado como profesional orgullosamente sancarlista.

**Mis familiares**

Por el gran cariño y apoyo que me han brindado, a los cercanos por estar siempre a mi lado y a los lejanos porque sin importar la distancia siempre están al pendiente de mí.

**Mis amigos**

Por brindarme su amistad, su apoyo, su cariño y por hacer de mi vida un recorrido muy agradable. Gracias a todos y cada uno de ustedes.

**Mis compañeros**

Por acompañarme en el transcurso de la carrera, tuve muchos y entre todos ellos encontré unos muy buenos, realmente fue un gusto conocerlos y trabajar con ustedes.

**Msc. Ing.  
Sandra Ramírez**

Por su apoyo, por darnos ánimos e incentivar me a culminar esta etapa.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XIII
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. ANTECEDENTES .....	5
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	7
3.1. Descripción del problema .....	7
3.2. Delimitación del problema .....	8
3.3. Formulación del problema .....	9
3.3.1. Pregunta central .....	9
3.3.2. Preguntas auxiliares .....	9
3.4. Viabilidad.....	9
3.5. Consecuencias.....	10
4. JUSTIFICACIÓN .....	11
5. OBJETIVOS .....	13
5.1. Objetivo general .....	13
5.2. Objetivos específicos.....	13
6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIONES.....	15

7.	MARCO TEÓRICO .....	17
7.1.	Prácticas de mantenimiento .....	17
7.2.	Mantenimiento correctivo .....	19
7.3.	Mantenimiento preventivo .....	20
7.4.	Mantenimiento predictivo .....	21
7.4.1.	Termografía infrarroja.....	25
7.4.1.1.	Calor.....	26
7.4.1.2.	Temperatura.....	27
7.4.1.3.	Transmisión de calor .....	27
7.4.1.3.1.	Conducción .....	27
7.4.1.3.2.	Convección .....	28
7.4.1.3.3.	Radiación .....	28
7.4.1.3.4.	El espectro electromagnético.....	30
7.4.1.4.	Principio de funcionamiento de la cámara .....	32
7.4.2.	Análisis de aceite .....	36
7.4.3.	Vibraciones mecánicas.....	38
7.5.	Norma ISO 17359- Monitoreo de condición y diagnóstico de máquinas.....	43
7.6.	Compresor de amoniaco tipo tornillo.....	45
7.6.1.	Funcionamiento.....	45
7.6.2.	El proceso .....	45
7.6.3.	Partes del paquete de compresor: .....	46
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	51
9.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	53
9.1.	Fases de la investigación .....	55

9.1.1.	Fase 1: revisión documental.....	55
9.1.2.	Fase 2: estudio del funcionamiento del compresor de amoniaco tipo tornillo en el sistema de refrigeración. ....	56
9.1.3.	Fase 3: estudio y selección de protocolo de acuerdo con la Norma ISO 17359 .....	56
9.1.4.	Fase 4: preparación y presentación del informe final .....	57
9.2.	Población y muestra .....	57
9.3.	Herramientas metodológicas .....	57
9.4.	Resultados esperados .....	58
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	59
11.	CRONOGRAMA.....	61
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO .....	63
12.1.	Recurso humano .....	63
12.2.	Recurso material .....	63
12.3.	Utilización de los recursos .....	63
13.	BIBLIOGRAFÍA .....	67
14.	APÉNDICES.....	71



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Esquema de solución .....	16
2.	Espectro electromagnético .....	31
3.	Válvula termostática en buen estado (uso: mantenimiento predictivo).....	34
4.	Procesado FFT de una onda vibratoria compleja.....	38
5.	Rangos de severidad para máquinas rotativas .....	43
6.	Compresor de amoníaco tipo tornillo (sus partes) .....	48
7.	Cronograma de ejecución .....	61

### TABLAS

I.	Métodos convencionales de END .....	23
II.	Relación entre modos de falla y unidades de amplitud .....	40
III.	Fallas típicas en maquinaria rotatoria.....	42
IV.	Variables e indicadores .....	54
V.	Recurso humano .....	64
VI.	Recurso material .....	65
VII.	Resumen financiero .....	65



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolos</b>	<b>Significado</b>
<b>°C</b>	Grados centígrados.
<b>°F</b>	Grados Fahrenheit.
<b>Hz</b>	Hertz.
<b>Psi</b>	Libras/pulgada <sup>2</sup> .
<b>IPS</b>	Medida de vibración en velocidad, equivalente a pulgadas/segundo.
<b>Mil</b>	Milésimas de pulgada.
<b>Ppm</b>	Partículas por millón.
<b>G</b>	Unidad de medida de vibración en aceleración, equivalente a 32.2 pies/s <sup>2</sup> o 9.8 m/s <sup>2</sup> .





## GLOSARIO

<b>API</b>	Siglas de American Petroleum Institute.
<b>ASME</b>	Society of Mechanical Engineers, más conocida como ASME, es una asociación.
<b>BPFI</b>	Frecuencia de paso de bola en falla de pista interna.
<b>BPFO</b>	Frecuencia de paso de bola en falla de pista externa.
<b>BSF</b>	Frecuencia de giro de falla en bola.
<b>CFIA</b>	Medición axial del lado del acople del rotor hembra del compresor.
<b>CFIH</b>	Medición horizontal del lado del acople del rotor hembra del compresor.
<b>CFIV</b>	Medición vertical del lado del acople del rotor hembra del compresor.
<b>CFOH</b>	Medición vertical del lado libre del rotor hembra del compresor.
<b>CFOH</b>	Medición vertical del lado libre del rotor hembra del compresor.

<b>CFOV</b>	Medición vertical del lado libre del rotor hembra del compresor.
<b>CMIA</b>	Medición axial del lado del acople del rotor macho del compresor.
<b>CMIH</b>	Medición horizontal del lado del acople del rotor macho del compresor.
<b>CMIV</b>	Medición vertical del lado del acople del rotor macho del compresor.
<b>CMOH</b>	Medición axial del lado libre del rotor macho del compresor.
<b>CMOH</b>	Medición horizontal del lado libre del rotor macho del compresor.
<b>CMOV</b>	Medición vertical del lado libre del rotor macho del compresor.
<b>END</b>	De las siglas en español: Ensayos No Destructivos.
<b><i>Enveloping</i></b>	Se refiere a un tipo de filtro utilizado en las vibraciones para datos en alta frecuencia. También llamado envolvente.
<b>FFT</b>	De las siglas en inglés: Transformada Rápida de Fourier.

<b>FL</b>	Frecuencia de línea.
<b>FTF</b>	Frecuencia de falla de canastilla.
<b>GMF</b>	Frecuencia de engranaje.
<b>GMFJS</b>	Frecuencia de engranaje del <i>jackshaft</i> .
<b><i>Inboard</i></b>	Palabra en inglés que se utiliza para identificar al lado donde está acoplado el equipo.
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization.
<b>MIA</b>	Medición axial del lado del acople del motor.
<b>MIH</b>	Medición horizontal del lado del acople del motor.
<b>MIV</b>	Medición vertical del lado del acople del motor.
<b>MOA</b>	Medición axial del lado libre del motor.
<b>MOH</b>	Medición horizontal del lado libre del motor.
<b>MOV</b>	Medición vertical del lado libre del motor.
<b><i>Outboard</i></b>	Palabra en inglés que se utiliza para identificar al lado libre del equipo, es decir donde no está acoplado.
<b>RP</b>	Frecuencia de paso de rotores.



## RESUMEN

La investigación se realiza con el propósito de mejorar las condiciones bajo las cuales se está trabajando actualmente el servicio de mantenimientos predictivos en la empresa donde se realiza el estudio, con el objetivo principal de proponer una gestión de mantenimiento predictivo en un sistema de refrigeración de un compresor de amoníaco tipo tornillo, basado en la Norma ISO 17359, para aumentar la confiabilidad y disponibilidad del equipo.

La investigación se realizó bajo un enfoque mixto y diseño no experimental, ya que no se llevó a cabo ninguna prueba de laboratorio y se realizó a través de métodos cuantitativos y cualitativos. El tipo de estudio es de tipo descriptivo a nivel transversal, debido a que consiste en evaluar las características del objeto en estudio, así como los fenómenos que ocurren durante la obtención de los datos. Se evalúan datos históricos y se discuten los resultados obtenidos.

La variable de estudio es la optimización de la gestión de mantenimiento en un compresor de amoníaco tipo tornillo, tomando como muestra un compresor FRICK RWF 134, con la finalidad de definir frecuencias, datos de temperatura, tipo de aceite y componentes. Así mismo se toma como indicadores los propuestos en la Norma ISO 17359, con el apoyo también de normas más específicas sugeridas en la norma en mención, que se detallan en el desarrollo de la investigación.

Este es el proyecto de investigación, específicamente su fase de prefactibilidad, formada por los siguientes capítulos: en el capítulo 1, el marco

teórico, se realizará un estudio del mantenimiento a través de la historia, la importancia del mantenimiento predictivo, las prácticas conocidas de ensayos no destructivos, con enfoque en los utilizados en este trabajo de investigación, características más importantes del compresor en estudio y los aspectos a tomar en cuenta para lograr una gestión de mantenimiento adecuada de la Norma ISO 17359.

En el capítulo 2 se hará la presentación de resultados de la investigación, y en el capítulo 3 se realizará la discusión de los mismos.

# 1. INTRODUCCIÓN

El servicio de mantenimiento predictivo a un compresor de amoniaco tipo tornillo consta de: análisis de vibraciones mecánicas, análisis de aceite y análisis termográfico. Lo que se busca es sistematizar los procedimientos, tomando en cuenta las consideraciones específicas de cada técnica, enmarcadas en la Norma ISO 17359, la cual contempla condiciones generales para el monitoreo de condición, debido a que para la aplicación de dichas técnicas se necesita planificación, organización y control de los servicios de mantenimiento, lo cual se logra por medio de una gestión de mantenimiento adecuada.

El problema que afecta actualmente al departamento es que no se cuenta con un protocolo que contenga los lineamientos estandarizados, que permitan al técnico conocer los pasos a seguir al momento de ejecutar las distintas técnicas de mantenimiento predictivo. Una de las características más importantes es la repetitividad en las tomas de datos, ya que esto afecta directamente las tendencias y por ende la confiabilidad de los equipos. Así mismo, la falta de formatos establecidos y procedimientos de transferencia de información generan complicaciones en la realización del análisis, por eso es importante establecer el diagnóstico y la elaboración del informe final. Debido a que es una empresa que presta servicios lo anteriormente descrito causa también incumplimientos con los clientes.

El compresor tipo tornillo es el corazón del proceso de congelado, refrigeración y almacenamiento, principalmente de alimentos, lo que hace de suma importancia contar con la gestión adecuada de mantenimiento predictivo,



de tal manera que el servicio cumpla con el objetivo de realizar un diagnóstico de falla adecuado y así lograr la satisfacción del cliente. Hoy en día la demanda por excelencia en los productos y la competitividad en el mercado generan la necesidad del uso de técnicas de mantenimiento que ofrezcan al cliente mayor disponibilidad y confiabilidad del equipo. Utilizando análisis de vibraciones mecánicas, análisis de aceite y análisis termográfico, se logra un servicio completo de diagnóstico de falla, sin que se requiera un paro en producción.

Teniendo un protocolo de mantenimiento se espera agilizar y facilitar el flujo de los procesos involucrados en el servicio de mantenimiento predictivo, garantizar la repetitividad y con ello la confiabilidad de los equipos de los clientes, teniendo en cuenta los parámetros de medición y sistemas de alarma, junto con la mejora en los tiempos de entrega de reportes.

Con el presente trabajo de investigación se verán beneficiados los técnicos, ya que tendrán mejor conocimiento de los pasos a seguir, lo cual implica mejor aprovechamiento del tiempo en la ejecución del servicio y por ende ahorro de recursos para la empresa. Se verá beneficiado el analista, ya que tendrá la información disponible con inmediatez y a su vez el cliente tendrá información del estado de sus equipos en menos tiempo y con mayor confiabilidad.

La gestión de mantenimiento predictivo en un sistema de refrigeración de un compresor de amoníaco tipo tornillo es una propuesta para mejorar los procesos que conlleva el servicio y se compone de cuatro fases.

En la primera fase se realizará toda la investigación documental relacionada con el problema en estudio. En la segunda fase se efectuará la observación directa y entrevistas a personal involucrado. En la tercera fase se

realizará un análisis comparativo de los resultados tomando en cuenta los parámetros de la Norma ISO 17359. Por último, en la cuarta fase se realizará la propuesta idónea de la gestión de mantenimiento predictivo para el compresor de amoniaco tipo tornillo.

La investigación está contemplada en los siguientes capítulos: en el capítulo 1, el marco teórico, se realizará un estudio del mantenimiento a través de la historia, la importancia del mantenimiento predictivo, las prácticas conocidas de ensayos no destructivos, con enfoque en los utilizados en este trabajo de investigación, características más importantes del compresor en estudio y los aspectos a tomar en cuenta para lograr una gestión de mantenimiento adecuada de la Norma ISO 17359.

En el capítulo 2 se hará la presentación de resultados de la investigación, y en el capítulo 3 se realizará la discusión de los mismos.



## 2. ANTECEDENTES

Sánchez (2009) enfatiza el aumento en la demanda de servicios de mantenimiento predictivos para los compresores en la industria alimenticia, los comúnmente utilizados son análisis de vibración, termográfico y de aceite. Este trabajo se enfoca en esos tres debido a que permiten la inspección de los equipos sin necesidad de parar la producción. Se puede decir que hay dos razones básicas para un servicio predictivo: análisis de equipo nuevo y monitoreo de las condiciones de la máquina.

Tranter (2016) afirma que, con base en la Norma ISO 17359, se puede estandarizar los lineamientos para la ejecución del mantenimiento predictivo utilizando las técnicas mencionadas. Lograr una gestión con procedimientos claros y precisos garantiza la repetitividad, es decir que se obtengan datos bajo las mismas condiciones cada vez que se realiza una inspección y de esta manera contar con datos confiables y establecer tendencias.

Se selecciona el análisis de aceite como una de las técnicas del mantenimiento del compresor, porque contribuye a reducir daños prematuros, supone reducción de costos, así como la frecuencia de cambio de aceite, también es importante la selección de un buen lubricante que garantice el ciclo de vida útil más prolongado para el equipo Tranter (2009). Se debe establecer la correcta recopilación de datos y es posible determinar qué información es necesaria para tener la capacidad de establecer tendencias que ayuden a determinar de mejor manera las condiciones en las que está operando el lubricante.

Pereira (2011) en *Aplicación de la termografía en el mantenimiento predictivo* indica que el análisis termográfico es una herramienta muy útil en el monitoreo de condición debido a que detecta anomalías que a simple vista no se pueden observar, prácticamente algunos componentes mecánicos y eléctricos suelen calentarse antes de estropearse, por lo que se pueden tomar medidas preventivas y correctivas antes que se presente una falla catastrófica. Se pueden tomar ciertos indicadores para determinar severidad de las fallas.

Así mismo, Tranter (2016) indica que el análisis de vibraciones brinda una poderosa oportunidad para conocer la condición de una máquina sin necesidad de realizar un paro en la producción, pero solo si se entiende y se puede usar de manera correcta. Se requiere de personal especializado y muestra algunas pautas a tomar en cuenta para determinar severidad en fallas de rodamientos.

La información anterior servirá para elaborar la propuesta de gestión de mantenimiento predictivo en un sistema de refrigeración de un compresor de amoníaco tipo tornillo, la cual incluya las técnicas de análisis termográfico, análisis de aceite y análisis de vibraciones. La Norma ISO 17359 contiene un protocolo de monitoreo de condición general que será útil para realizar el presente estudio.

### **3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El problema es que no se cuenta con un protocolo de mantenimiento predictivo que contenga los lineamientos estandarizados, que permitan al técnico conocer los pasos a seguir al momento de ejecutar las distintas técnicas de mantenimiento predictivo. Una de las características más importantes es la repetitividad en las tomas de datos, ya que esto afecta directamente las tendencias y por ende la confiabilidad de los equipos. Así mismo, la falta de formatos establecidos y procedimientos de transferencia de información generan complicaciones en la realización del análisis, por eso es importante establecer el diagnóstico y la elaboración del informe final que a su vez causa incumplimientos con los clientes.

#### **3.1. Descripción del problema**

La empresa en la que se elabora el estudio ofrece servicios personalizados de ingeniería y refrigeración industrial, entre ellos se encuentran el servicio de mantenimiento predictivo a compresores de amoníaco tipo tornillo, el cual consiste en análisis termográfico, análisis de vibraciones mecánicas y análisis de aceite. Para la realización de las inspecciones los equipos deben estar previamente calibrados y alineados, cuando no cuentan con dicha condición también se incluye el servicio de calibración y alineación dentro del paquete de mantenimiento predictivo.

El compresor de amoníaco tipo tornillo es utilizado principalmente en sistemas de refrigeración industrial que incluyen el proceso de congelado, refrigeración y almacenamiento frío, por lo que los principales clientes

pertenecen a la industria de proceso de alimentos. Hoy en día la demanda por excelencia en los productos y la competitividad en el mercado genera la necesidad del uso de técnicas de mantenimiento que ofrezcan al cliente mayor disponibilidad y confiabilidad del equipo.

Todo lo anterior hace evidente la necesidad de contar con la gestión adecuada de mantenimiento predictivo, de tal manera que el servicio cumpla con su objetivo: lograr un servicio completo de diagnóstico de falla y monitoreo de condición, sin que se requiera un paro en producción.

Cuando no se tienen lineamientos estandarizados se evidencian varios problemas como desorganización, falta de conocimientos de técnicas y procedimientos a seguir para la buena práctica del mantenimiento La Norma ISO 17359 brinda procedimientos generales a tomar en cuenta cuando se va a realizar el monitoreo de un equipo.

### **3.2. Delimitación del problema**

El estudio se llevará a cabo en una empresa de refrigeración industrial y servicios de ingeniería, la cual ofrece mantenimiento predictivo a compresores de amoníaco tipo tornillo. La recolección de datos y análisis se realizará específicamente en el departamento de análisis predictivo, el cual se encuentra en Guatemala.

La investigación se enfoca particularmente en un compresor de amoníaco tipo tornillo, para efectos de referencia se utilizará un compresor de prueba Frick RWF 134, la duración será de 24 semanas del año 2019.

### **3.3. Formulación del problema**

#### **3.3.1. Pregunta central**

¿Qué gestión de mantenimiento predictivo debe implementarse en un sistema de refrigeración de un compresor de amoníaco tipo tornillo, basado en la Norma ISO 17359?

#### **3.3.2. Preguntas auxiliares**

- ¿Qué factores afectan el funcionamiento del compresor de amoníaco tipo tornillo en el sistema de refrigeración?
- ¿Cuál es el protocolo adecuado del mantenimiento predictivo de un compresor?
- ¿Qué beneficios se pueden obtener al proponer una gestión de mantenimiento predictivo en un sistema de refrigeración de un compresor de amoníaco tipo tornillo, aplicando la Norma ISO 17359?

### **3.4. Viabilidad**

La investigación se considera viable, ya que se cuenta con los historiales de comportamiento de compresores de amoníaco tipo tornillo, así como con los recursos financieros, recurso humano, equipos y materiales necesarios para la realización del presente estudio. Los costos que se generen serán cubiertos por la empresa y por la investigadora.



### **3.5. Consecuencias**

Las consecuencias positivas de la investigación incluyen presentar una propuesta de gestión de mantenimiento predictivo a un compresor de amoníaco tipo tornillo, se espera agilizar y facilitar el flujo de los procesos involucrados en el servicio, garantizar la repetitividad y con ello la confiabilidad de los equipos de los clientes, teniendo en cuenta los parámetros de medición y sistemas de alarma, así como la mejora en los tiempos de entrega de reportes, basados en la Norma ISO 17359.

Con la gestión los técnicos tendrán mejor conocimiento de los pasos a seguir, lo cual implica mejor aprovechamiento del tiempo en la ejecución del servicio y por ende ahorro de recursos para la empresa. El analista tendrá la información disponible con inmediatez.

## 4. JUSTIFICACIÓN

Una de las líneas de investigación de la maestría de mantenimiento es la utilización de normas que rigen los procesos que involucra la conservación de maquinaria y equipo, es por ello que la propuesta de gestión de mantenimiento predictivo de un compresor de amoniaco tipo tornillo se basa en los lineamientos establecidos en la Norma ISO 17359, así mismo está relacionada con los conocimientos adquiridos en los cursos Seminario Predictivo, Análisis de Falla y Administración del Mantenimiento, impartidos en la Maestría en Ingeniería del Mantenimiento.

La importancia de la presente investigación se debe a que el compresor tipo tornillo es el corazón del proceso de congelado, refrigeración y almacenamiento, principalmente de alimentos, lo que hace vital contar con la gestión adecuada de mantenimiento predictivo, de tal manera que el servicio cumpla con el objetivo de realizar un diagnóstico de falla adecuado y así lograr la satisfacción del cliente.

La demanda de productos y la competitividad en el mercado generan la necesidad del uso de técnicas de mantenimiento que ofrezcan al cliente mayor disponibilidad y confiabilidad del equipo. Utilizando análisis de vibraciones mecánicas, análisis de aceite y análisis termográfico, y siguiendo los lineamientos de la norma, se logra un servicio completo de diagnóstico de falla, sin que se requiera un paro en producción.

La motivación e interés del investigador es que la implementación de la gestión propuesta mejore las condiciones de trabajo de los técnicos y del

analista, para de esta manera generar mayor satisfacción a los clientes. También es importante que el modelo sea implementado y así poder alcanzar los objetivos propuestos.

Teniendo una gestión de mantenimiento se espera agilizar y facilitar el flujo de los procesos involucrados en el servicio de mantenimiento predictivo, así como garantizar la repetitividad y con ello la confiabilidad de los equipos de los clientes, teniendo en cuenta los parámetros de medición y sistemas de alarma, junto con la mejora en los tiempos de entrega de reportes.

Con la gestión que se está proponiendo se verán beneficiados los técnicos, ya que tendrán mejor conocimiento de los pasos a seguir, lo cual implica mejor aprovechamiento del tiempo en la ejecución del servicio y por ende ahorro de recursos que se traduce en beneficio económico para la empresa. Y se verá beneficiado el analista, ya que tendrá la información disponible con inmediatez y a su vez el cliente tendrá información del estado de sus equipos en menos tiempo y con mayor confiabilidad.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. Objetivo general**

Proponer una gestión de mantenimiento predictivo en un sistema de refrigeración de un compresor de amoníaco tipo tornillo, con base en la Norma ISO 17359, para aumentar la confiabilidad y disponibilidad del equipo.

### **5.2. Objetivos específicos**

1. Determinar los factores que afectan el funcionamiento del compresor de amoníaco tipo tornillo en el sistema de refrigeración.
2. Analizar cuál es el protocolo del mantenimiento predictivo adecuado para un compresor, con base en la Norma ISO 17359.
3. Determinar los beneficios que se pueden obtener al proponer una gestión de mantenimiento predictivo en un sistema de refrigeración de un compresor de amoníaco tipo tornillo, aplicando la Norma ISO 17359.



## **6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIONES**

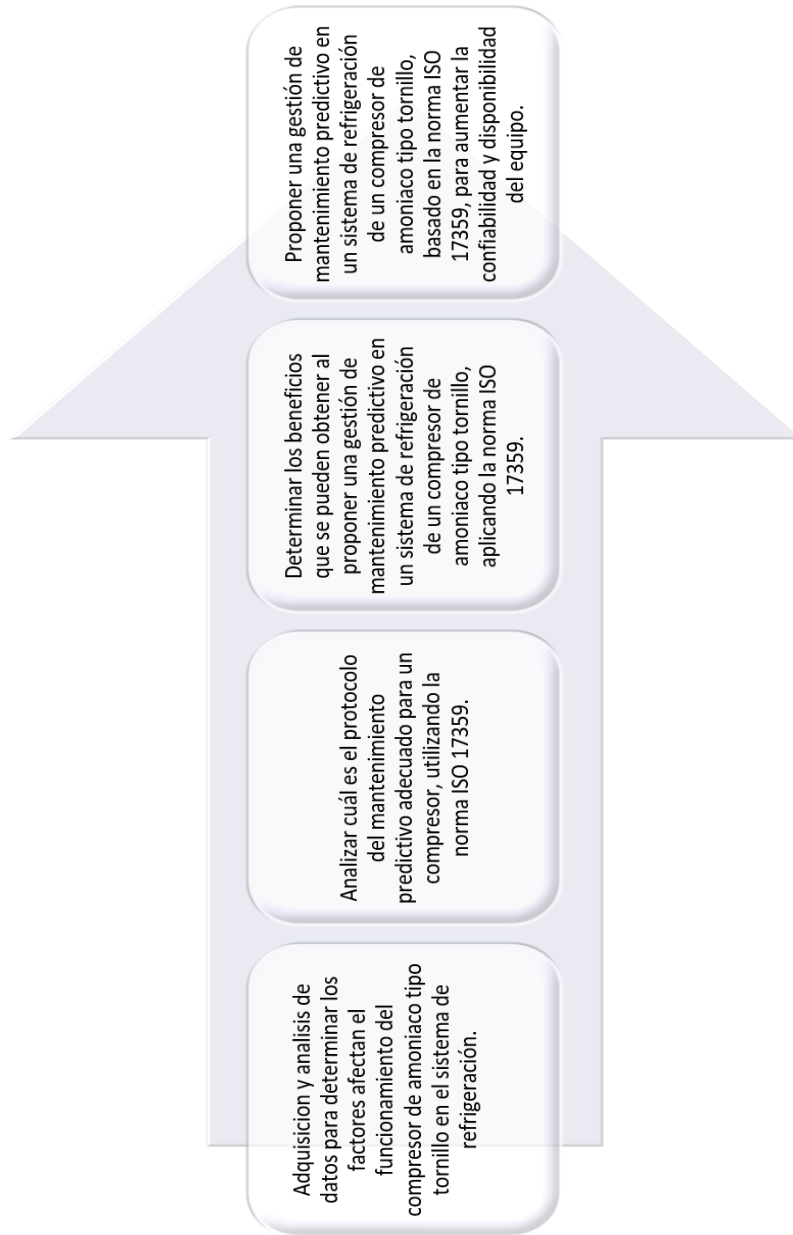
El presente trabajo busca cubrir la necesidad de una propuesta de gestión del mantenimiento predictivo de un compresor de amoniaco tipo tornillo, que incluye análisis de vibraciones, análisis termográfico y análisis de aceite.

Dentro de esta investigación se necesita determinar los factores que afectan el funcionamiento del compresor de amoniaco tipo tornillo en el sistema de refrigeración y, posterior a ello, se trabajará con base en la Norma ISO 17359, la cual establece reglas generales para monitoreo de condición y hace referencia a otras normas y documentos internacionales que pueden ser de utilidad para el proceso.

Se requiere de un protocolo que cubra como mínimo los requerimientos para la toma de datos de la inspección de los equipos de cada cliente, de manera que el detalle de cada acción realizada quede registrado y sea de fácil acceso, con el fin de mantener un control y dar seguimiento a las fallas encontradas.

Para cubrir las necesidades de este problema es necesario cumplir con los objetivos definidos en la investigación, la cual se pretende desarrollar mediante el siguiente esquema:

Figura 1. **Esquema de solución**



Fuente: elaboración propia.

## **7. MARCO TEÓRICO**

En este capítulo se realizará un estudio del mantenimiento a través de la historia, la importancia del mantenimiento predictivo en el monitoreo de condición de los equipos, las prácticas conocidas de ensayos no destructivos, con un enfoque en las utilizadas en esta investigación, características más importantes del compresor en estudio y los aspectos a tomar en cuenta para lograr una gestión de mantenimiento adecuada bajo la Norma ISO 17359.

### **7.1. Prácticas de mantenimiento**

En muchas de las industrias, y por muchos años, la filosofía ha sido mantener la planta funcionando. Poco se pensaba en mejorar la confiabilidad de los equipos en la predicción de fallas, debido a que los costos del departamento de mantenimiento han sido considerados como una gran fuga de dinero, y se hacen únicamente para mantener el negocio a flote.

Sin embargo, Tranter (2004), en iLearnVibration 3,0, asegura que la filosofía ha cambiado, las empresas reconocen la necesidad de invertir tiempo y dinero en cambiar las prácticas de mantenimiento e invertir en la mejora de la confiabilidad de los equipos. Con el enfoque mencionado se han logrado grandes ahorros en costos directos e indirectos de mantenimientos y paros no programados.

El mantenimiento se considera una parte activa de las operaciones de la empresa, teniendo una vital importancia dentro de esta al igual que otras áreas, como: producción, recursos humanos, control de calidad, ventas,



mercadotécnica, finanzas, entre otros, ya que sin un mantenimiento adecuado se ve reducido el crecimiento del negocio, reflejado en todas las áreas, tomando en cuenta que todas las áreas forman parte de un todo y de una u otra manera están relacionadas entre sí.

Teniendo en cuenta lo que Galván Romero (2012) expresa en su tesis, si se examina con atención el comportamiento del departamento de producción, se llega a la conclusión que muchos de los problemas se generan por mala administración y conflictos entre áreas. Las variables que afectan el desempeño de la empresa se mencionan a continuación:

- Los costos de producción
- La calidad del producto y el ritmo de trabajo
- La confiabilidad de la empresa
- La eficiencia en el proceso productivo

Galván Romero (2012) también menciona que estas variables están relacionadas directamente con las actividades de operaciones, por tanto, teniendo en cuenta que el mantenimiento a los equipos es de suma importancia en el desarrollo del proceso productivo, se concluye que dentro de los objetivos principales del mantenimiento están:

- Maximización de la vida útil de los activos
- Disminuir los costos de mantenimiento
- Optimizar la disponibilidad del equipo productivo y recursos humanos

Es importante resaltar que la gestión de mantenimiento consiste en una sistematización donde se lleva a cabo una programación de tareas, las cuales llevan una secuencia lógica con el objetivo de lograr confiabilidad y

disponibilidad de los equipos a cargo. Para ello la Norma ISO 17359 cuenta con un protocolo de monitoreo de condición, el cual sirve como guía para sistematizar el mantenimiento.

Para tener una buena propuesta de gestión de mantenimiento predictivo primero es importante conocer los distintos tipos de mantenimiento que se han desarrollado a través de la historia, sus ventajas y desventajas, así como profundizar en las técnicas involucradas en el mantenimiento predictivo de un compresor de amoníaco tipo tornillo. A continuación, una breve descripción de cada uno de ellos:

## **7.2. Mantenimiento correctivo**

Este tipo de mantenimiento es el más antiguo y utilizado. Se trata simplemente de corregir una incidencia después que se ha producido, es decir, arreglar lo que se ha roto. La principal ventaja es que no se pierde tiempo en la planificación de la intervención al equipo, porque simplemente no se sabe cuándo va a ocurrir. Sin embargo, la falta de planificación se convierte en su mayor desventaja, es decir que, al no poder predecir, sus consecuencias pueden ser graves, en función del momento en el que se produzca el fallo. (Nieto Vilardell, 2013).

Cuando la criticidad del equipo es muy baja no amerita el uso de un mantenimiento predictivo, ya que no se justifica el costo de este, es allí donde entra en juego el mantenimiento correctivo. Por ejemplo, en máquinas con criticidad baja y fácil reparación o sustitución.

La combinación con la técnica de mantenimiento predictivo da lugar al mantenimiento correctivo programado, el cual consiste en hacer correcciones

que se han detectado en el análisis predictivo, siendo esto aplicable a los equipos de alta criticidad.

### **7.3. Mantenimiento preventivo**

Este consiste en una serie de intervenciones programadas que se le realizan a los equipos con el objetivo de prevenir paros no programados en la producción, cuando se conoce el desgaste aproximado de una máquina, se pueden prevenir las averías, sustituyendo los elementos que sufren una mayor degradación, antes de llegar al final de su vida útil. Por ejemplo, si se cambia el aceite de una máquina antes de que se deteriore, se protegerán mejor los elementos móviles y otras piezas.

La principal ventaja del mantenimiento preventivo es que puede ser planificada la intervención con anticipación, con esto se preparan los recursos necesarios como el personal y los materiales a utilizar, además de adaptar los plazos de fabricación, evitando así incumplir tiempos de entrega al cliente causados por algún imprevisto causado por averías. Uno de los inconvenientes del presente sistema es principalmente el económico, puesto que sustituir una pieza productiva y que todavía puede seguir trabajando resulta en algunos casos inviable.

Para poder realizar las intervenciones de prevención a los equipos se debe establecer una periodicidad, la cual se puede establecer tomando en cuenta la información contenida en el manual del fabricante y, de no contar con el mismo, se establecen períodos según el tiempo de funcionamiento, los ciclos de trabajo, entre otros. (Nieto Vilardell, 2013).

#### **7.4. Mantenimiento predictivo**

Este tipo de mantenimiento es el de mayor interés en este estudio, por lo tanto aquí es donde se extenderá más en las descripciones, detalles y las técnicas aplicadas a los compresores de amoníaco tipo tornillo. El mantenimiento predictivo consiste en efectuar una serie de mediciones y ensayos con equipos especializados en máquinas o elementos que son susceptibles al deterioro, esto con la finalidad de anticiparse a una falla catastrófica. La predicción se puede realizar midiendo algunos parámetros que varían antes de producirse el fallo. Por ejemplo, midiendo la calidad del aceite, el aumento de vibraciones de un elemento rodante, aumentos de temperatura, entre otros. La mayoría de estas mediciones se realizan con el equipo en marcha y sin interrumpir la producción.

Evidentemente, el sistema tiene innumerables ventajas al adelantarse a la avería sin desperdiciar recursos, además, las herramientas para realizar estos diagnósticos son cada vez más accesibles, de modo que es posible ir implantando dicho sistema cada vez en más ambientes. (Nieto Vilardell, 2013)

Su mayor inconveniente es que no puede aplicarse en cualquier situación, y las herramientas resultan caras para pequeños talleres, sin embargo, en la actualidad existen empresas que ofrecen servicios de análisis e inspecciones predictivas, así que pueden subcontratarse para realizar una auditoría periódica, como la empresa en donde se realizará el presente estudio.

Dentro de este tipo de mantenimiento entran en consideración los ensayos no destructivos (END), algunos de ellos utilizados en la industria en los procesos productivos, en este caso dichas pruebas proporcionan información acerca del objeto ensayado sin que experimente ningún deterioro, tanto durante

como al finalizar el ensayo. A diferencia de los ensayos destructivos en los que solo es posible analizar una muestra de un lote, con los END se puede ensayar la totalidad de la producción, con lo que aumenta la seguridad, la calidad y la fiabilidad del producto o máquina analizada. (Millán Gómez, 2012).

Dentro de los ensayos no destructivos están las pruebas para monitorear la condición de los componentes que conforman una máquina o equipo, para determinar las condiciones en las que se encuentran y así poder generar una tendencia de desgaste e intervenir el equipo para su sustitución antes de que este falle. Con la finalidad de obtener datos confiables al realizar los ensayos, en el caso del mantenimiento predictivo, es necesario que el equipo esté trabajando a su máxima capacidad y que las condiciones de operación sean las mismas cada vez que se practique el ensayo.

Según Millán Gómez (2012) los ensayos no destructivos tienen una diversidad de aplicaciones, por ejemplo:

- Asegurar la integridad y fiabilidad del producto o equipo.
- Prevenir accidentes y salvar vidas humanas.
- Garantizar la satisfacción del cliente y mantener la reputación del fabricante.
- Ayudar en el diseño del producto.
- Controlar el desarrollo de la producción.
- Disminuir los costos de fabricación.
- Mantener uniformidad en la calidad del servicio o producto.
- Garantizar la disponibilidad operacional.

Todo esto obliga a realizar un proceso de interpretación de los resultados obtenidos a partir de las indicaciones suministradas, es decir que el experto

debe tener la información necesaria para obtener los resultados deseados, que para cada uno de los métodos está en relación con:

- Los principios físicos y la instrumentación del método
- El material ensayado
- El proceso de fabricación
- Datos de fabricación del equipo (de ser posible el manual)
- Datos de operación
- Especificaciones técnicas
- Historial de servicios (ideal)

Consecuentemente, la aplicación de un método de ensayo a un problema nuevo exige una puesta a punto previa, en la que el experto llegue a establecer claramente la relación existente entre las indicaciones y la causa que los produce, así como su significado tecnológico.

Los métodos más convencionales se muestran a continuación:

Tabla I. **Métodos convencionales de END**

<b>MÉTODO</b>	<b>FENOMENO FÍSICO</b>
Inspección VOSO	Luz visible
Líquidos penetrantes (PT)	Capilaridad
Partículas magnéticas	Campo magnético
Corrientes inducidas	Corriente eléctrica
Radiografía industrial	Ondas electromagnéticas
Ultrasonidos	Ondas elásticas

Continuación de la tabla I.

Emisión acústica	Ondas elásticas
Termografía infrarroja	Ondas electromagnéticas
Vibraciones mecánicas	Oscilación
Análisis de aceite	Partículas en suspensión

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 1 se observan los métodos que permiten la inspección del 100 % de una pieza, producción o equipo, y la obtención de datos que contribuyen a mantener un nivel de calidad uniforme en la producción, asegurar la calidad funcional y colaboran en la prevención de accidentes. (Millán Gómez, 2012).

Buena parte de las técnicas mencionadas han sido aplicadas mayormente en los procesos productivos, por lo que Millán Gómez (2012), en su libro *Metrología y ensayos*, se enfoca principalmente en dicho tema, sin embargo, para garantizar dicho proceso ha surgido la necesidad de aplicarlos también en el mantenimiento de los equipos.

El éxito de la aplicación de un ensayo no destructivo en una inspección está sujeto, fundamentalmente, al cumplimiento de los siguientes requisitos: que el ensayo permita desarrollar correctamente las etapas básicas de la inspección, y que, teniendo en cuenta los factores económicos, el ensayo sea programado bajo el criterio de rendimiento y beneficio económico máximos. (González Fernández, 2005).

Para realizar la correcta selección de la técnica a utilizar se debe conocer cada una de ellas, sin embargo, en el presente estudio no se profundiza en todas las técnicas de END, se enfoca en las técnicas utilizadas en los servicios de inspección predictiva y en el control de las condiciones en un sistema de refrigeración a base de amoníaco, específicamente en el compresor tipo tornillo.

#### **7.4.1. Termografía infrarroja**

Uno de los parámetros más importantes a medir es la temperatura debido a que, si se observa algún cambio en dicha variable, esto indica anomalía, como prueba de ello se puede tomar como ejemplo la temperatura corporal del ser humano, al observar una variación mínima automáticamente la persona se siente mal y es sinónimo de alarma. En la industria también hay muchos procesos en los que la temperatura es importante y tener control sobre ella implica mayor calidad, seguridad y ahorro de dinero.

En el manual del curso de termografía de Termogram Consultores, S.A. (2013) se dice que la termografía significa "escritura con calor", a la imagen producida se le llama termograma o imagen IR y se conoce como la ciencia de adquisición y análisis de la información térmica obtenida mediante las cámaras termográficas, estos dispositivos permiten medir la temperatura a partir de la radiación infrarroja sin generar imagen IR, pero no se considera termografía.

Para poder realizar termografía el técnico debe contar con los conocimientos y habilidades necesarias para la realización de la inspección, sin embargo, por ser una tecnología que cuenta con diversos campos de aplicación, el termógrafo debe conocer la máquina para poder analizar y comprender las consecuencias de lo que ve. Dentro de las aplicaciones se



pueden mencionar: el monitoreo de procesos, investigación y desarrollo, medicina y veterinaria, control de calidad y mantenimiento.

De las ventajas más destacadas y por lo que se prefiere esta técnica es que no requiere de contacto físico con el elemento a ensayar, utilizando la transmisión de calor por radiación como variable relacionada con la temperatura, cabe mencionar que esta no requiere de un tiempo de estabilización de temperaturas, a diferencia de los termómetros convencionales.

Los conceptos que se debe tener claros son calor, temperatura y transferencia de calor. A menudo se confunden los conceptos de calor y temperatura, se cree que son lo mismo. A continuación se presenta una breve descripción de ellos.

#### **7.4.1.1. Calor**

Se dice que el calor de un objeto está relacionado con la energía cinética de sus moléculas, es decir que es la energía en tránsito, y solo ocurre cuando hay diferencia de temperatura entre un objeto, ya sea con el ambiente o con otros objetos a su alrededor, y la dirección es siempre de mayor a menor.

El calor se genera por transformación a partir de otra forma de energía. Por ejemplo, de un proceso de combustión o por movimiento o fricción. En este proceso se genera calor, muchos procesos industriales suponen la conversión de energía, que eventualmente producirá calor como producto final.

El calor y la energía se miden en: Julios (J), vatios-segundo (Ws), kilovatios-hora (kWh) y Newton-metro (Nm).

### **7.4.1.2. Temperatura**

La temperatura es la medición de la energía térmica de un objeto, la cual está relacionada con la energía cinética de sus moléculas, y ayuda a definir en qué condiciones se encuentra un objeto relacionándolo con otro. Así mismo indica la facilidad que un cuerpo tendrá para ceder energía térmica a otro, lo que no está relacionado con cuánta energía contiene.

Múltiples procesos fisicoquímicos dependen de la temperatura, por ejemplo el cambio de estado, conductividad de materiales, presión de algunos fluidos, entre otros. Esta es una medida escalar que se puede medir en grados centígrados (°C), Fahrenheit(F) o kelvin (K).

### **7.4.1.3. Transmisión de calor**

Se conoce como transferencia de calor al proceso de propagación de la energía térmica, la cual se da cuando existe un diferencial de temperatura en un objeto o bien cuando dos objetos con distinta temperatura entran en contacto. Una vez se empieza a dar la transferencia de calor no se puede detener y será constante hasta que lleguen a una estabilidad térmica, es decir que igualan las temperaturas. (Valenzuela, 2018).

#### **7.4.1.3.1. Conducción**

Este tipo de transferencia de calor se da por contacto directo, puede ser entre dos objetos o diferentes partes del mismo cuerpo. Esto sucede cuando las partículas con mayor temperatura ceden su energía a las que tienen menos. (Young & Freedman, 2009).

La capacidad de un material para conducir calor se llama conductividad térmica, y lo contrario, es decir la capacidad de oponerse al paso de calor, se conoce como resistividad térmica.

#### **7.4.1.3.2. Convección**

Es el transporte de calor por medio del movimiento de fluidos, como por ejemplo al calentar el agua en una olla, el agua que está en la superficie desciende y la caliente sube, este proceso incluye también el intercambio de calor con la superficie sólida. Como ejemplos se puede mencionar los sistemas de refrigeración y calefacción, una caldera y el flujo de sangre en el cuerpo. Se llama convección forzada cuando el fluido es impulsado por un ventilador o bomba; y si el flujo se debe a diferencias de densidad causadas por expansión térmica, como el ascenso de aire caliente, el proceso se llama convección natural o convección libre. (Young & Freedman, 2009).

#### **7.4.1.3.3. Radiación**

La radiación es la transferencia de calor por ondas electromagnéticas como la luz visible, el infrarrojo y la radiación ultravioleta. Cuando se habla de radiación es posible mencionar la radiación solar, o la que se siente al estar cerca de una fogata o llama. Esta energía de calor sensible llega a través de la radiación. Se daría lugar a esta transferencia de calor, aunque solo hubiera vacío entre nosotros y la fuente de calor. (Young & Freedman, 2009).

Todo cuerpo, aun a temperaturas ordinarias, emite energía en forma de radiación electromagnética. A temperaturas ordinarias, por ejemplo 20°C, casi toda la energía se transporta en ondas de infrarrojo con longitudes de onda mucho mayores que las de la luz visible. Al aumentar la temperatura, las

longitudes de onda se desplazan hacia valores mucho menores. A 800 °C un cuerpo emite suficiente radiación visible para convertirse en objeto luminoso “al rojo vivo”, aunque aun a esta temperatura la mayoría de la energía se transporta en ondas de infrarrojo. A 3000°C, la temperatura de un filamento de bombilla incandescente, la radiación contiene suficiente luz visible para que el cuerpo se vea “al rojo blanco”. (Young & Freedman, 2009).

Un cuerpo que es buen absorbedor debe ser buen emisor. Los cuerpos negros son los que se encuentran en equilibrio térmico, por lo tanto su emisividad es 1, según lo anterior los cuerpos negros son considerados radiadores ideales, por lo que también son ideales para absorber.

La tasa de radiación de energía de una superficie es proporcional a su área superficial  $A$ , y aumenta rápidamente con la temperatura, según la cuarta potencia de la temperatura absoluta (Kelvin). La tasa también depende de la naturaleza de la superficie; esta dependencia se describe con una cantidad e llamada emisividad: un número adimensional entre 0 y 1 que representa la relación entre la tasa de radiación de una superficie dada y la de un área igual de una superficie radiante ideal a la misma temperatura. La emisividad también depende un poco de la temperatura. Así, la corriente de calor  $H \delta Q > dt$  debida a radiación de un área superficial  $A$  con emisividad  $e$  a la temperatura absoluta  $T$  se puede expresar como:  $H = Ae\sigma T^4$  corriente de calor de radiación. (Young & Freedman, 2009).

Por otro lado,  $\sigma$  es la constante física fundamental llamada constante de Stefan-Boltzmann. Esta relación se llama ley de Stefan-Boltzmann en honor de sus descubridores de finales del siglo XIX. El mejor valor numérico actual de  $\sigma$  es  $5.670400(40) \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ , para verificar la consistencia de unidades de la

ecuación. La emisividad  $e$  suele ser mayor para superficies oscuras que claras. (Young & Freedman, 2009).

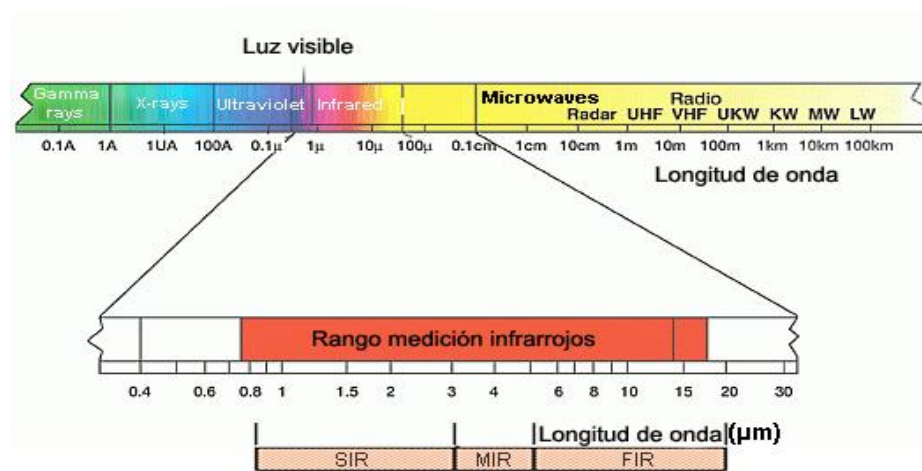
#### **7.4.1.3.4. El espectro electromagnético**

Las bandas de longitudes de onda no se definen de forma brusca, cambian gradualmente y se superponen unas con otras. Las definiciones están basadas en el uso que se les da más que en sus características físicas, por lo tanto, la luz visible es lo que los ojos son capaces de percibir. Existen variaciones entre individuos y diferentes especies de animales. (Termogram Consultores, 2013).

La luz visible para el ser humano se encuentra en el rango de longitud de onda de 380 – 780 nm, que comprende desde el color púrpura hasta el rojo, por lo que no es capaz de percibir la radiación del resto del espectro electromagnético, no obstante, sí puede sentir los efectos de la misma, como por ejemplo los rayos UV, y puede quemar la piel del ser humano. La radiación infrarroja se detecta en forma de calor en la piel.

Por otro lado, una cámara termográfica restringe su percepción al rango de longitud de onda de la radiación infrarroja. La cámara normalmente "ve" dentro del rango de 8-20  $\mu\text{m}$  y reproduce la información que registra como una falsa imagen de color para hacerla visible al ojo humano. (Testo Argentina, 2018).

Figura 2. Espectro electromagnético



Fuente: Academiatesto. *Espectro electromagnético*. Recuperado de <http://www.academiatesto.com.ar/cms/radiacion-infrarroja-en-el-espectro-de-ondas-2>.

El esquema de la figura anterior pretende dar una idea de cómo están situadas las diferentes longitudes de onda, resaltando el rango de medición infrarrojo. Para la tecnología de medición del infrarrojo el campo se subdivide en tres:

- SIR (*short infrared* [infrarrojo corto] 780 nm - 3  $\mu$ m)
- MIR (*middle infrared* [infrarrojo medio] 3 - 5  $\mu$ m)
- FIR (*far infrared* [infrarrojo lejano] 5  $\mu$ m –1 mm)

En relación con la tecnología de medición por infrarrojos, el rango más significativo es el de 5-20  $\mu$ m (FIR). (Testo Argentina, 2018).

#### **7.4.1.4. Principio de funcionamiento de la cámara**

La cámara termográfica es un equipo que tiene como función medir la emisión natural de radiación infrarroja de un objeto. También permite generar un termograma o imagen termográfica y realizar un procesamiento digital de las señales recibidas, lo cual permite medir temperaturas después de tomada la imagen.

Según Peña Rodríguez & Neita Duarte (2011) las principales características que se deben tener en cuenta a la hora de elegir una cámara termográfica para aplicaciones de mantenimiento predictivo son: la sensibilidad térmica, la precisión y el campo de visión instantáneo.

- Sensibilidad térmica: este término se refiere al diferencial de temperatura que puede detectar la cámara, mientras mayor es la sensibilidad térmica, menor es la diferencia de temperatura. Para la aplicación que se va a ocupar no se necesita una sensibilidad muy alta, sin embargo, en aplicaciones médicas o veterinarias sí se requiere de mayor sensibilidad para obtener información útil.
- Precisión: es la medida de dispersión de las temperaturas medidas a un objeto con respecto a su verdadera temperatura. Algunas cámaras alcanzan precisiones de 2 °C o 2 %.
- Campo de visión instantáneo (IFOV): es una proyección angular de un único píxel del detector en la imagen del IR. El área que puede ver cada píxel depende de la distancia del objeto para un lente determinado. Para conseguir la medición de temperatura más precisa es conveniente conseguir tantos pixeles en el objetivo como sea posible para el detector

de la cámara. Con esto se conseguirá un mejor detalle en la imagen térmica. A medida que se aleja del objeto que desea medir, pierde la capacidad de obtener una temperatura con precisión. Cuanta más resolución tenga la cámara, aumenta la probabilidad de conseguir más píxeles en el objetivo a mayor distancia con resultados precisos. (FLIR Systems Inc., 2018).

Los factores que afecta la medición son:

- Emisividad
- Temperatura ambiente
- Distancia
- Humedad relativa
- Temperatura atmosférica
- Temperatura reflejada

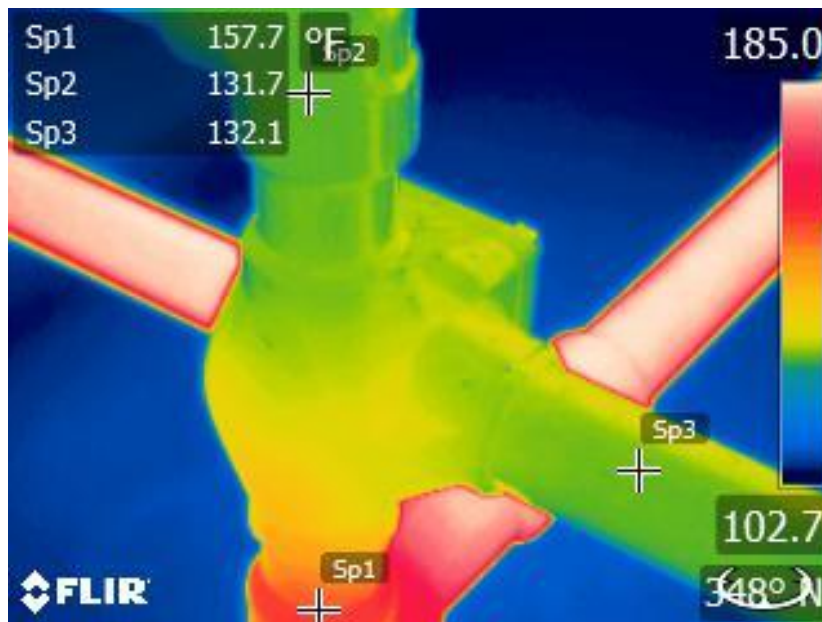
La termografía es aplicable a la detección del calentamiento en equipos y de cortocircuitos, la determinación de fugas caloríficas en aislamientos, la localización de circuitos de calefacción de agua caliente, la detección de humedades, la cuantificación de pérdidas energéticas, el análisis de funcionamiento de intercambiadores de calor, la medición de niveles en depósitos, el análisis de motores o el control de eficiencia de los sistemas de descongelación, paneles eléctricos, microprocesadores y compresores. (Roya Pastor & Cañada Soriano, 2016).

Puede ser aplicada mediante técnicas activas o pasivas. La primera de ellas requiere la aplicación de calor al objeto ensayado y monitorear la disipación del calor sobre la superficie que está influida por las condiciones subsuperficiales. La segunda, por lo contrario, no requiere de estimulación



externa para generar un flujo de calor en el objeto inspeccionado, es la más utilizada en los procesos de monitorización de condición, ya sea en procesos de fabricación o en monitoreo de condición de equipos. (Roya Pastor & Cañada Soriano, 2016).

Figura 3. **Válvula termostática en buen estado (uso: mantenimiento predictivo)**



Fuente: elaboración propia.

En el caso de la figura 3, la termografía se utilizó para verificar el correcto funcionamiento de la válvula termostática, cuyo funcionamiento principal es realizar una mezcla de aceite a diferente temperatura con el fin de entregar en su salida lubricante a temperatura previamente establecida.

Según Cañada Soriano & Royo Pastor (2016) las principales ventajas de la termografía infrarroja como método de inspección son:

- Mucha más rapidez en relación con otras técnicas.
- Es seguro ya que no requiere de contacto físico con el objeto a medir, principalmente en inspecciones de alto riesgo como las inspecciones en instalaciones eléctricas con elementos en carga.
- Es bidimensional, por lo que la imagen IR resultante permite hacer comparaciones de temperatura en distintos puntos dentro del termograma.
- El análisis termográfico es relativamente sencillo, a pesar de que es necesario tener capacitación.
- Su uso no es nocivo.
- Su aplicación es muy amplia.

Así mismo, Cañada Soriano & Royo Pastor (2016) mencionan algunas limitaciones a tomar en cuenta al aplicar esta técnica:

- Tiene limitaciones al medir espesores muy grandes, los resultados obtenidos pueden generar confusión y dar un resultado erróneo, en cuyo caso debe apoyarse con otras técnicas de ensayos no destructivos.
- Necesidad de una adecuada evaluación de las pérdidas térmicas por convección o radiación.
- En el caso de la termografía activa, si el objeto tiene dimensiones grandes, es complicado mantener uniformidad en la aplicación de calor.

- Dificultad en la medición de defectos que lleven asociadas variaciones térmicas.

#### **7.4.2. Análisis de aceite**

El análisis de aceite es una herramienta muy útil en el mantenimiento predictivo para monitorear y evaluar el estado de los fluidos y equipos, ya que permite realizar análisis de laboratorio rápidos y precisos sobre el lubricante utilizado en los equipos, para así poder detectar e incluso anticipar posibles fallas, y de esta manera se evita comprometer el desempeño de la maquinaria. Al incluir el análisis de aceite en su rutina de mantenimiento, la vida útil de los componentes se amplía, se evitan cambios de aceite innecesarios y mano de obra en mantenimientos no programados, y por último existe una reducción bastante considerable en los gastos de materiales a reponer.

Existen cuatro tipos de análisis de aceite:

- El análisis fisicoquímico consiste en evaluar las condiciones del lubricante.
- El análisis de contaminaciones, que identifica la presencia de sustancias que pueden contaminar el sistema. El aceite se puede contaminar debido al desgaste del equipo o las reacciones químicas del lubricante.
- Espectrometría: con este método es posible identificar los elementos químicos presentes en el lubricante, ya que el aceite pasa por un proceso de combustión y es desintegrado hasta el nivel atómico. Este análisis se indica para obtener información más precisa sobre los desgastes, los contaminantes e identificar los aditivos.

- Ferrografía: analiza las partículas encontradas en los lubricantes para identificar el grado y el motivo del desgaste de máquinas y equipos. (Hernández, 2018).

Pasos del análisis de aceite:

- Programa de análisis

Se necesita definir el equipo y los comportamientos a monitorizar, para cada compartimento hay un alcance de análisis predefinido que se adapta mejor a sus condiciones de funcionamiento.

- Implementación del programa

En esta etapa se detallan las herramientas necesarias para el programa de análisis de fluidos. Es uno de los pasos más importantes, siendo necesario utilizar las herramientas adecuadas para asegurar una buena recolección, ya que el paso más importante para implantar el programa de análisis de aceite es la recolección. Es necesario prestar atención a la utilización de las herramientas adecuadas en la obtención y registro de datos. Para garantizar la fiabilidad de la información una vez recolectada la muestra, se debe enviar al laboratorio lo antes posible. (Hernández, 2018).

- Consejos para una correcta recolección:
  - Mover la máquina y sus implementos para mezclar el aceite
  - Limpiar la ubicación de la recolección
  - Hacer la recolección de todos los compartimentos
  - Llenar la ficha

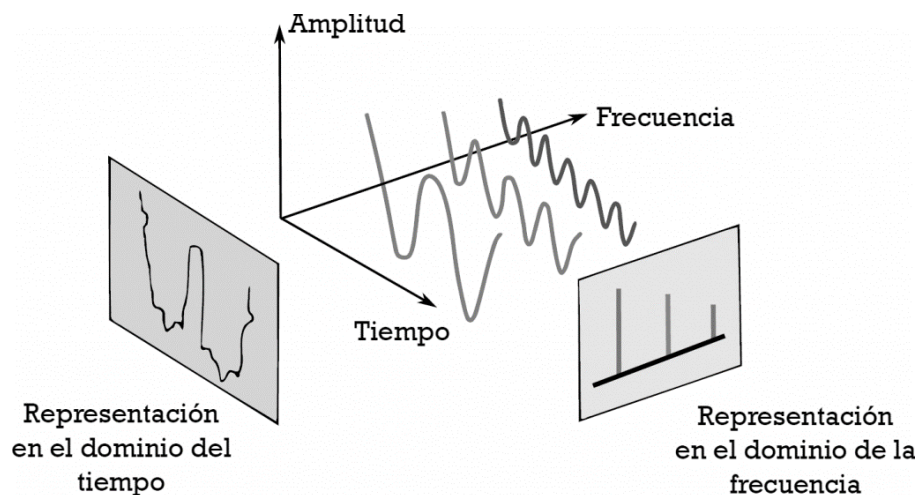
- Enviar al laboratorio

Seguido de esto se realiza la interpretación de resultados, con base en las condiciones de operación, el tipo y características de lubricante, llegando así a la determinación de la tendencia de desgaste que este presenta.

### 7.4.3. Vibraciones mecánicas

El análisis de vibraciones es una técnica que ha tenido un gran auge en las últimas décadas a pesar de conocerse sus beneficios desde principios del siglo XX. Esto se debe al gran desarrollo de la electrónica a partir de la década de 1970, lo cual permitió obtener de una forma relativamente más rápida y sencilla los espectros en el ámbito de la frecuencia por medio de la transformada rápida de Fourier (FFT).

Figura 4. **Procesado FFT de una onda vibratoria compleja**



Fuente: Esopo. *Onda vibratoria compleja*. Recuperado de <https://iie.fing.edu.uy/proyectos/esopo/caracteristicas-ondas/>.

La vibración es una de las técnicas líderes en el campo del mantenimiento predictivo, ha sido utilizada para ahorrar millones de dólares a la industria en general a lo largo de su tiempo de aplicación. (Termogram Consultores, 2013).

La vibración ha sido tradicionalmente relacionada con problemas que ocurren en la maquinaria rotativa como mal funcionamiento, ruido y fallas, sin embargo, la vibración debe ser vista como un resultado natural de una buena o mala condición de la máquina. En la actualidad estas respuestas son utilizadas para identificar y resolver problemas mecánicos y en algunos casos problemas eléctricos del proceso productivo. La vibración mecánica es dada por factores como: desgaste de la máquina, diseño y tolerancias de fabricación. (Termogram Consultores, 2013).

La magnitud de la vibración no solo depende de la fuerza excitadora que la origina, sino también de las propiedades y componentes del sistema mecánico, y ambos de la velocidad de rotación de la máquina. Un sistema mecánico se compone de:

- Masa: la resistencia a la aceleración de un cuerpo.
- Rigidez: medida de la resistencia ofrecida por un cuerpo elástico a la deformación (deflexión, contracción o compresión).
- Amortiguamiento: es el proceso de disipación de la energía generada por una fuerza aplicada sobre un cuerpo.

Tomando en cuenta lo anterior, es importante resaltar que la mayoría de los eventos vibratorios en las máquinas rotativas se repiten a iguales intervalos, esto quiere decir que son periódicos, formando entonces una onda muy parecida a la onda sinusoidal, de las cuales es posible extraer las características fundamentales de la vibración:

- **Amplitud:** es el desplazamiento máximo de la curva de vibración, hay distintas formas de medirlos en unidades de desplazamiento, velocidad o aceleración, y pueden ser expresadas en valores cuadrático medio, valor pico y valor pico a pico.
- **Frecuencia:** es el número de ciclos que ocurren en la unidad de tiempo, las unidades comunes son: Hz (ciclos por segundo), CPM (ciclos por minuto) y órdenes (múltiplos de la frecuencia fundamental de la máquina).
- **Ángulo de fase:** es el tiempo relativo entre fuerzas y señales de vibración o entre dos o más señales de vibración. Las unidades de fase se expresan en grados.

Según Termogram Consultores (2013) cada unidad de amplitud (velocidad, aceleración, desplazamiento) tiene una sensibilidad específica a los diferentes modos de fallas en las máquinas:

Tabla II. **Relación entre modos de falla y unidades de amplitud**

<b>Falla</b>	<b>Causa</b>	<b>unidad</b>
Estrés	Flexionando excesivamente un componente provocando su falla	Desplazamiento
Fatiga	Desgaste paulatino de un elemento a través del tiempo	Velocidad
Fuerza	Acciones de impacto sobre un elemento	Aceleración

Fuente: elaboración propia.

La adquisición adecuada de los datos de vibración es la clave para un monitoreo de maquinaria efectivo, un correcto diagnóstico de fallas, evaluación acertada de la condición y pruebas de aceptación fidedignas. La calidad de la adquisición de los datos requiere planeación y estudio de la máquina, la naturaleza de los datos de vibración esperados, instrumentación disponible y el propósito de la prueba.

Entre los equipos para adquirir los datos de vibración están: osciloscopios, analizadores FFT y colectores electrónicos de datos.

Según Termogram Consultores (2013) los osciloscopios muestran la forma de onda en el tiempo, pueden ser utilizados para obtener la fase y generar órbitas entre dos señales de la misma frecuencia. Los analizadores de datos FFT son utilizados para ver la señal en el dominio de la frecuencia y evaluar también la forma de onda. Son los que se utilizan con mayor frecuencia, ya que permiten realizar un análisis más detallado de las frecuencias de falla que puede presentar el equipo.

Las frecuencias medidas en la carcasa cerca de un rodamiento y en el eje de una máquina son utilizadas para realizar un diagnóstico de fallas en esta máquina. Estas frecuencias son causadas (excitadas) por fuerzas de vibración (excitaciones). En general, la frecuencia de la medida de vibraciones es la misma que la fuerza que causa la vibración. Estas fuerzas crecen debido al desgaste de las máquinas, calidad de la instalación y problemas de diseño.

La frecuencia de operación del equipo es la frecuencia de referencia para las técnicas de diagnóstico, ya que a esta frecuencia se pueden originar varios problemas, como por ejemplo: desbalance, desalineación y excentricidad. Los armónicos de las frecuencias son los múltiplos enteros de la misma.



Las frecuencias relacionadas con la frecuencia de operación del equipo y sus armónicas son llamadas frecuencias sincrónicas u órdenes. Las frecuencias que no son armónicas son llamadas no sincrónicas, y las frecuencias por debajo de la de operación del equipo son llamadas subsincrónicas. (Termogram Consultores, 2013). Con base en el aspecto FFT de vibraciones se pueden fácilmente identificar las frecuencias asociadas a fallas específicas de la máquina en estudio. La siguiente es una lista de fallas típicas en maquinaria rotatoria:

Tabla III. **Fallas típicas en maquinaria rotatoria**

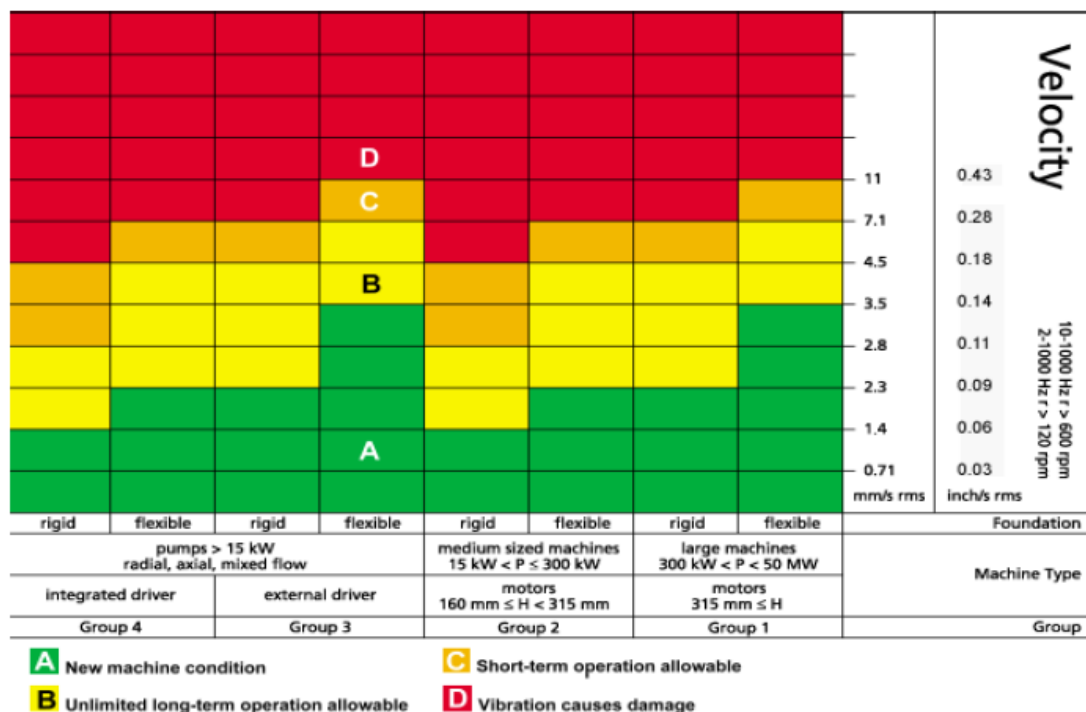
<b>Fuente</b>	<b>Frecuencia</b>
<b>Desbalance</b>	1x
<b>Desalienación</b>	1x, 2x
<b>Deflexión en el eje</b>	1x
<b>Soltura mecánica</b>	Armónicas impares de 1x
<b>Defectos en la carcasa o cimentación</b>	1x
<b>Rodamientos</b>	Frecuencias NO armónicas
<b>Mecanismos de impacto</b>	Frecuencias múltiples depende de la forma de onda
<b>Defectos de diseño</b>	
<b>Juntas universales</b>	2x
<b>Ejes asimétricos</b>	2x
<b>Engranajes (n dientes)</b>	Nx
<b>Remolinos de aceite</b>	0.43x a 0.47x
<b>Alabes o impulsores (p)</b>	Px
<b>Máquinas reciprocantes</b>	½ y múltiples armónicos de RP

Fuente: Mobious Institute.

El análisis de vibraciones debe ser capacitado y con experiencia para realizar el diagnóstico adecuado, ya que no solo depende de la frecuencia sino

de la amplitud de dirección y condiciones en las que se toman las vibraciones. Los niveles de severidad de acuerdo con el tipo de máquina y la amplitud que presenta se dan en la siguiente imagen.

Figura 5. Rangos de severidad para máquinas rotativas



Fuente: Norma ISO 10816-3. (2003). *Vibraciones mecánicas. Evaluación de la vibración de la máquina mediante mediciones en partes no rotativas.*

### 7.5. Norma ISO 17359 - Monitoreo de condición y diagnóstico de máquinas

La Norma ISO 17359:2011 brinda una guía para el monitoreo de condición y diagnóstico de máquinas usando parámetros como vibraciones, temperatura, tribología, contaminación, energía y velocidad, típicamente asociados al

desempeño, condición y criterio de calidad. La evaluación de las funciones de la máquina y condición pueden basarse en el desempeño, condición y calidad del producto. (ISO, 2018).

Esta norma presenta una revisión general de procedimientos recomendados para ser utilizados cuando se implemente un programa de monitoreo de condición. Sin embargo, este debe ser utilizado de la mano de otras normas específicas de las técnicas que serán aplicadas, en este caso en particular los de vibraciones, termografía y análisis de aceite.

De la Norma ISO (2018) se toman los siguientes puntos para establecer el protocolo adecuado:

- Auditoría de los equipos para identificar equipos y sus funciones.
- Auditoría de fiabilidad y criticidad donde se componga un diagrama de bloques sobre la fiabilidad, se establezca la criticidad de cada equipo y se identifiquen modos de fallo, sus efectos y criticidad.
- Selección de las tareas apropiadas de mantenimiento, estudiar si es viable o no aplicar la estrategia predictiva a cada equipo.
- Seleccionar la técnica, método y alarmas apropiados para cada activo.
- Recolección y análisis de datos.
- Determinar las acciones correctoras de mantenimiento y registro al historial.

- Revisión de criterios de alertas y alarmas de las técnicas predictivas disponibles.

## **7.6. Compresor de amoniaco tipo tornillo**

Este tipo de compresor es también llamado de desplazamiento positivo, por lo que el proceso de compresión es continuo y de esta manera el flujo de refrigerante es estable. Cuando se hace referencia a compresores de tornillo se habla de la marca FRICK, la cual ofrece en sus equipos bajo mantenimiento, bajo nivel de ruido y niveles de vibración. La única desventaja es que no es accesible para todos por su elevado costo y que cuenta con una mayor complejidad mecánica. (Johnson Controls, 2014).

### **7.6.1. Funcionamiento**

El compresor tipo tornillo consta de dos rotores que giran en paralelo, comúnmente tienen un diseño de rotor 4+6, para una operación más fuerte y eficiente, donde el macho es el de cuatro lóbulos y la hembra es de 6 lóbulos. El funcionamiento consiste en la reducción de volumen a medida que se desplaza, logrando con esto el incremento de la presión hasta llegar al valor establecido.

### **7.6.2. El proceso**

- **Succión:** es la etapa en la que ingresa el refrigerante en forma de gas, es muy importante que sea en estado gaseoso ya que es fluido compresible, de haber líquido el compresor puede sufrir daños catastróficos.

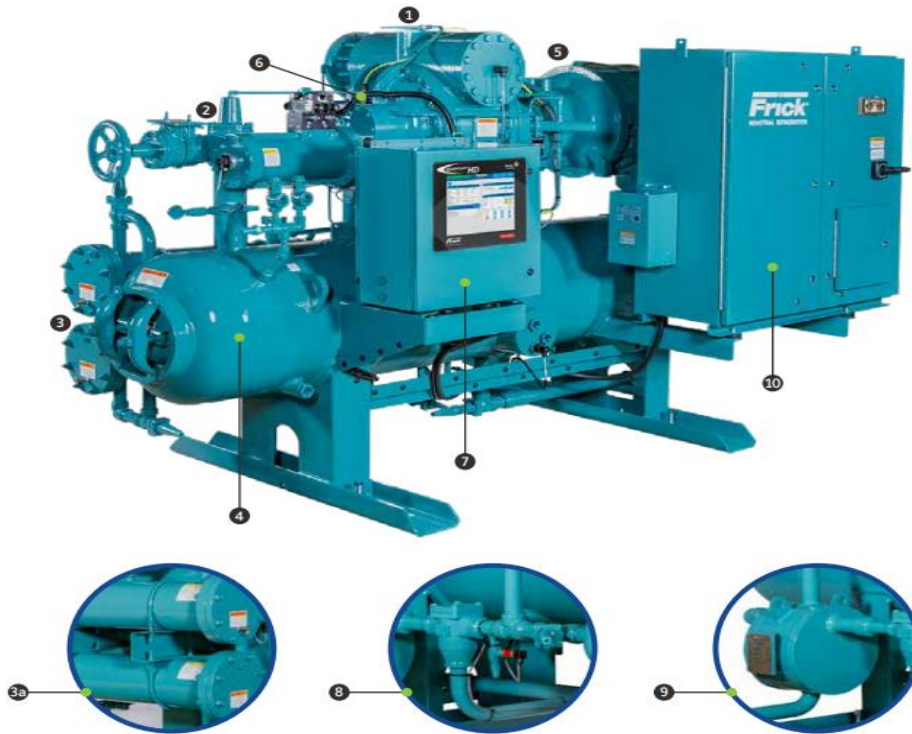
- **Compresión:** esta etapa es en la que se va disminuyendo el volumen del gas refrigerante a pasar a través de los rotores y la carcasa, aumentando así su presión y temperatura.
- **Descarga:** esta es la última etapa del proceso, en la cual, al verse comprimido el gas y alcanzada la presión deseada, se descarga en el separador de aceite para entonces continuar con el proceso de refrigeración.

### **7.6.3. Partes del paquete de compresor**

- **Rodamientos antifricción:** alta fiabilidad, potencia reducida y mantenimiento predictivo, permite una relación de reducción de 5: 1 (720 rpm mín.), control de relación de volumen variable y máxima eficiencia en todas las condiciones de la aplicación. Control de capacidad infinita: requisitos de carga perfectamente adaptados.
- **Válvula Cold-Start <sup>TM</sup>:** proporciona un arranque rápido en cualquier condición y presión de aceite sin la necesidad de una bomba.
- **SuperFilter <sup>TM</sup> II:** limpieza eficiente de aceite de hasta 5 micrones, vida útil más prolongada. 3<sup>a</sup>. Filtros de aceite dobles (opcional): aseguran la operación continua durante el servicio del filtro primario, incluidas las válvulas de aislamiento.
- **Súper coalescente:** reduce significativamente las presiones de condensación para una máxima eficiencia energética.

- Motores montados en bridas: no es necesario alinearlos. Motores Smart Series <sup>™</sup>: motores de bajo nivel de ruido, NEMA de alta eficiencia, con características de protección contra la corrosión, RTD estándar, para un funcionamiento eficiente, silencioso y confiable. VSD, motores clasificados y fabricados para una relación de reducción de 5: 1 (720 rpm mín.).
- Protección de vibración de PhD: el monitoreo de vibración de PhD ayuda a detener las interrupciones antes de que comiencen.
- Controlador Quantum HD: operación fácil de usar y sin preocupaciones.
- Empaquetado inteligente y sin fugas: los pasajes internos de aceite y la tubería doblada previamente dan como resultado accesorios y soldaduras con menos potencial de fugas.
- Enfriamiento externo del aceite: eliminadas las penalizaciones de potencia y potencia gracias a la última tecnología en diseño de placas, construidas de acuerdo con ASME, sección VIII, división I.
- Arrancadores montados (opción): montados en fábrica, protección superior contra sobrecargas del motor, menos espacio de montaje y costos de instalación reducidos.

Figura 6. **Compresor de amoníaco tipo tornillo (sus partes)**



Fuente: Johnson Controls. (2014). *Compresor de amoníaco tipo tornillo*.

A continuación se desglosa información relacionada con la operación y mantenimiento de una unidad compresora tipo tornillo, para familiarizar al lector con el objeto de la investigación, las prácticas aquí descritas se basan en lo recomendado por Johnson Control para unidades de Frick® RWF 134. (Johnson Controls, 2014).

Para garantizar la correcta instalación y aplicación de un compresor, primero que nada el equipo debe ser seleccionado y conectado correctamente a un sistema diseñado e instalado correctamente. Los planos de ingeniería, tuberías, diseños, entre otros, deben ser detallados de acuerdo con las mejores prácticas y normas, tales como los descritos en ASHRAE literatura.

Un compresor de refrigeración es una bomba de vapor. Se debe tener la certeza que no está siendo sometida a retorno de líquido refrigerante, por lo que los controles deben ser cuidadosamente seleccionados y deben funcionar en buenas condiciones de operación. Las tuberías deben tener todos los componentes del sistema y también deben ser seleccionadas, el proveedor ofrece asesoría para que no se pase por alto ningún detalle. (Johnson Controls, 2014).





## 8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE  
PREGUNTAS ORIENTADORAS

OBJETIVOS

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

### 1. MARCO TEÓRICO

#### 1.1. Prácticas de mantenimiento

1.1.1. Mantenimiento correctivo

1.1.2. Mantenimiento preventivo

1.1.3. Mantenimiento predictivo

1.1.3.1. Termografía infrarroja

1.1.3.1.1. Calor

1.1.3.1.2. Temperatura

1.1.3.1.3. Transmisión de calor

1.1.3.1.3.1. Conducción

1.1.3.1.3.2. Convección

1.1.3.1.3.3. Radiación

1.1.3.1.3.4. El espectro  
electromagnético

1.1.3.2. Principio de funcionamiento de la cámara

1.1.3.3. Análisis de aceite

1.1.3.4. Vibraciones mecánicas

1.2. Norma ISO 17359 - Monitoreo de condición y diagnóstico de máquinas

1.3. Compresor de amoníaco tipo tornillo

2. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXO

## **9. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

El presente estudio tiene un enfoque mixto y diseño no experimental. El enfoque de esta investigación se realiza a través de métodos cuantitativos debido a que se realizarán mediciones y evaluación de resultados, se maneja severidad con base en estos datos obtenidos. También es cualitativo porque se realiza observación directa, se analizarán aspectos relacionados con la calidad de las tomas y los procedimientos a la hora de realizar el servicio. Es de carácter no experimental porque no se realiza análisis de laboratorio para determinar la información. Se realizará en un tiempo de 6 meses, cubriendo todas las fases de la investigación. Es transversal debido a que se delimita en tiempo y existe una fecha de inicio y una de final de proyecto.

El tipo de estudio es descriptivo debido a que consiste en evaluar las características del objeto en estudio, así como los fenómenos que se dan durante la obtención de los datos. Se discuten los resultados obtenidos, luego se planteará una solución al problema con la propuesta de gestión del mantenimiento predictivo de un compresor de amoníaco tipo tornillo, con base en la Norma ISO 17359.

La presente investigación consiste en la realización de la revisión de la literatura disponible, haciendo énfasis en la Norma ISO 17359, así como las características propias del objeto de estudio y las técnicas de mantenimiento predictivo seleccionadas. Se desarrollará en fases, relacionadas con las preguntas de la investigación y objetivos específicos, con el objetivo de encontrar la resolución del problema planteado. Se inicia con la fase de revisión

documental que proporciona las bases para la elaboración de la investigación, incluyendo las fases metodológica, teórica y práctica.

La variable por estudiar es la optimización de la gestión de mantenimiento en un compresor de amoniaco tipo tornillo, tomando como muestra un compresor FRICK RWF 134, con la finalidad de definir frecuencias, datos de temperatura, tipo de aceite y componentes. Así mismo se toma como indicadores los propuestos en la norma ISO 17359.

Tabla IV. **Variables e indicadores**

OBJETIVOS	VARIABLE	TIPO DE VARIABLE	INDICADOR	PLAN DE TABULACIÓN
Determinar los factores que afectan el funcionamiento del compresor de amoniaco tipo tornillo en el sistema de refrigeración.	Factores que afectan el funcionamiento del compresor	Independiente/cualitativa ordinal	Revelar los factores que afectan el funcionamiento del compresor	Datos obtenidos por observación directa y entrevista.
Analizar cuál es el protocolo adecuado del mantenimiento predictivo de un compresor, utilizando la Norma ISO 17359	Protocolo por seguir en el mantenimiento predictivo. Norma ISO 17359	Dependiente/ Cualitativa ordinal	Evaluación de los factores que afectan al compresor y lineamientos a seguir.	

Continuación de la tabla IV.

<p>Evaluar los beneficios que se pueden obtener al proponer una gestión de mantenimiento predictivo en un sistema de refrigeración de un compresor de amoníaco tipo tornillo, aplicando la Norma ISO 17359.</p>	<p>Beneficios que se obtendrán en la gestión del mantenimiento predictivo.</p>		<p>Interpretación de los resultados obtenidos, del análisis y la propuesta de mejora.</p>	
---	--	--	---	--

Fuente: elaboración propia.

## 9.1. Fases de la investigación

Se seguirá la metodología del modelo con base en la Norma ISO 17359, adaptándose a las condiciones del compresor de amoníaco tipo tornillo, con el objetivo de cumplir con los objetivos del diseño de investigación.

### 9.1.1. Fase 1: revisión documental

Fase en la que se reunirá, clasificará y agrupará los datos necesarios para elaborar la presente investigación, una vez obtenida dicha información se tendrá que organizar, filtrar y tabular, con el fin de tener el marco teórico y los antecedentes necesarios para establecer una base sólida y bien fundamentada para proceder con la fase investigativa.

### **9.1.2. Fase 2: estudio del funcionamiento del compresor de amoníaco tipo tornillo en el sistema de refrigeración**

Para cumplir con el primer objetivo se realizará la recolección de datos históricos e información referente al compresor, como datos de los componentes que van involucrados en el paquete, datos de operación y todo lo que pueda afectar el funcionamiento de dicho compresor.

### **9.1.3. Fase 3: estudio y selección de protocolo de acuerdo con la Norma ISO 17359**

Se procederá a conocer, estudiar y analizar la norma para elaborar los procedimientos necesarios y estandarizar los lineamientos, con el objetivo de ser aplicados en la gestión de mantenimiento del compresor que se está evaluando.

Así mismo se toman en cuenta parámetros de comparación de las distintas variables involucradas en el análisis predictivo como temperaturas aceptables, frecuencias de fallas, contenidos de partículas en suspensión y características fisicoquímicas de los lubricantes, con base en los datos de los fabricantes.

Tomando en cuenta la información recabada y la recopilación de datos y del análisis realizado a los mismos, se tiene lo necesario para presentar la propuesta de gestión de mantenimiento predictivo al compresor de amoníaco tipo tornillo.

#### **9.1.4. Fase 4: preparación y presentación del informe final**

Esta etapa consiste en presentar la propuesta de la gestión de mantenimiento predictivo para un sistema de refrigeración de un compresor de amoníaco tipo tornillo, aplicando la Norma ISO 17359, para así mismo describir y analizar los beneficios que se pueden obtener al proponerla. Con esto se da como finalizado el objetivo principal de este estudio.

#### **9.2. Población y muestra**

Se toma como muestra de este estudio los datos obtenidos del compresor de amoníaco tipo tornillo Frick RWF 134, ubicado en una planta procesadora de alimentos, utilizando como documentos de recopilación de datos los que se presentan como ejemplo en anexos, cumpliendo con una de las condiciones en la Norma ISO 17359, el equipo se selecciona de acuerdo con su criticidad y confiabilidad, por lo cual no se utilizará fórmula, ya que se hará uso de un récord de datos ya establecido en la empresa sobre la condición del equipo.

#### **9.3. Herramientas metodológicas**

Para determinar los factores determinantes del funcionamiento del compresor se hará por medio de la selección de información utilizando el formato del apéndice 6. La recolección de la información se llevará a cabo utilizando los formatos de toma de datos, los cuales se encuentran en los apéndices 2, 3 y 4, y se tomará nota de las observaciones realizadas con la guía de cuestionario que se encuentra en el apéndice 5.



#### **9.4. Resultados esperados**

Con este trabajo de investigación se espera obtener una propuesta de gestión de mantenimiento predictivo para compresores de amoniaco tipo tornillo, que funcione para empresas que prestan servicios predictivos, y se espera que en un futuro cercano se pueda tomar como modelo para otro tipo de compresores de amoniaco.

A través del estudio de los factores que determinan la condición del compresor y los lineamientos que se deben tomar en cuenta en la gestión de mantenimiento, es posible poder brindar un diagnóstico de condición y se espera contar con el protocolo idóneo, para de esta manera beneficiar al personal técnico, mejorando las condiciones y tiempos de toma de datos, ayudando también a los clientes a mantener la confiabilidad en sus equipos.

Se pretende que la propuesta siga las disposiciones estipuladas en la Norma ISO 17359, para de esta manera tener una gestión que cumpla con estándares internacionales que garanticen la calidad del servicio prestado.

## 10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Las técnicas de análisis documental que se utilizarán en la presente investigación se ejecutarán a través de diferentes registros, documentos, cursos interactivos e información vía web, por medio de los cuales se hará una recopilación del material referente al mantenimiento del compresor analizado, de donde se obtendrán resúmenes y comentarios para su uso dentro de la investigación. Como primer paso, y luego de la recolección de los datos, se hará la correspondiente revisión de los mismos, y se seleccionará la información más importante que contendrá la presente investigación, en otras palabras, se hará la simplificación, el resumen y la selección de la información para hacerla manejable.

Así mismo se investigará la metodología de la Norma ISO 17359 para poder ponerla en práctica (ver apéndice 1), también se recopilará la información referente a las practicas actuales del mantenimiento sobre el compresor analizado (ver apéndice 2, 3 y 4). Todo lo anterior con el fin de entender de manera concreta el panorama o la situación en que se ha venido operando el equipo.

Otra parte importante de la investigación será la observación directa (ver anexo 5) que se realice en la ejecución de los servicios de mantenimiento predictivos realizados, lo cual proporcionará información valiosa acerca de la situación actual, pudiendo generar, a través de esta información, una visión más amplia para abordar de mejor manera el problema.

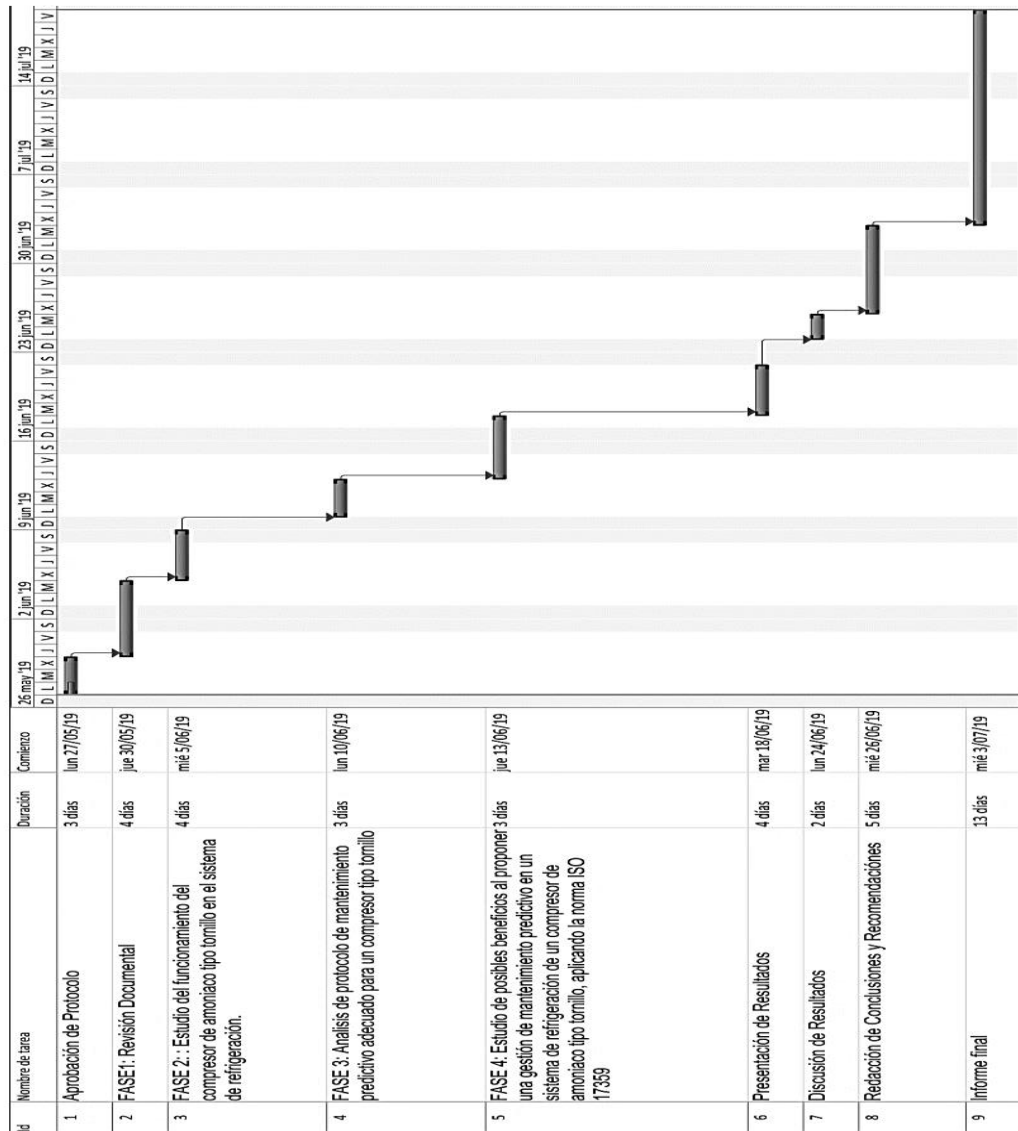
La información obtenida será transformada en gráficos y tablas que faciliten la comprensión y el análisis de la misma, esta información gráfica dará una perspectiva amplia que permitirá comprender tendencias, facilitará la explicación de aspectos que darán como resultado el estado del objeto de estudio, y se podrá conocer el tipo de fallas que son más comunes en dicho equipo.

Con la información presentada en gráficas se podrá dar paso al análisis de la información, esta permitirá conocer a profundidad puntos a evaluar y proponer mejoras en los procedimientos, así como algunas tendencias de desgaste, observar frecuencias de fallas del compresor y evaluar las condiciones del mantenimiento predictivo.

Se considera la participación de técnicos de servicios, gerente de servicios y analistas. Cabe la posibilidad de que intervenga algún cliente, con el propósito de validar la información y que contribuya a generar las mejoras.

# 11. CRONOGRAMA

Figura 7. Cronograma de ejecución



Fuente: elaboración propia.



## **12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO**

Para la realización de esta investigación se cuenta con la autorización de la gerencia de servicios corporativos, así mismo el investigador cubre los gastos adicionales necesarios para llevar a cabo el estudio.

### **12.1. Recurso humano**

La investigación se llevará a cabo tomando en cuenta al personal involucrado en el proceso: un analista de mantenimiento predictivo (investigador), quien dedicará un tercio de su tiempo contratado para hacer el estudio, además de los análisis, un técnico de servicios y el gerente de servicios (tabla IV).

### **12.2. Recurso material**

Se tomarán en cuenta los equipos especializados para la ejecución de los servicios: cámara termográfica, equipo de vibraciones y equipo para toma de muestras de aceite (proporcionado por el laboratorio). Para el análisis se utiliza computadora personal, insumos de oficina y servicios de Internet (tabla V).

### **12.3. Utilización de los recursos**

El recurso humano es indispensable, es el encargado de llevar a cabo la investigación y la ejecución de las propuestas que se van a generar. El analista será el encargado de la investigación, el técnico de ejecutar los servicios y desarrollar información para ser analizada y generar resultados para el estudio,

el gerente de mantenimiento es el encargado de aprobar las propuestas que se presenten y de autorizar cualquier proceso involucrado en la elaboración de la investigación relacionada con la gestión del mantenimiento.

En cuando al recurso material se tomó en cuenta el equipo de análisis predictivo para cada técnica que será aplicada en el presente estudio, para recolectar la información necesaria para el análisis.

El recurso financiero para la realización del presente estudio será mixto, pues una parte será cubierta por la empresa y la otra por la investigadora.

Tabla V. **Recurso humano**

<b>CANTIDAD UNIDADES</b>	<b>TIEMPO MESES</b>	<b>CONCEPTO</b>	<b>PRECIO/ UNIDAD</b>	<b>TOTAL PARCIAL</b>
1	3	Analista de mantenimiento predictivo a tiempo parcial	Q 2 750,00	Q 8 250,00
1	2	Técnico de servicios	Q 2 500,00	Q 5 000,00
1	1	Gerente de mantenimiento a tiempo parcial	Q 8 000,00	Q 8 000,00
SUBTOTAL				Q 21 250,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Recurso material**

<b>CANTIDAD UNIDADES</b>	<b>CONCEPTO</b>	<b>PRECIO/ UNIDAD</b>	<b>TOTAL PARCIAL</b>
1	Cámara termográfica	US\$ 9 495,00	<b>Q 71 212,5</b>
1	Equipo de vibraciones	US\$ 4500,00	<b>Q 33 750,00</b>
1	Computadora personal	US\$ 1000,00	<b>Q 7 500,00</b>
n/a	Insumos de oficina	Q 1 700,00	<b>Q 1 700,00</b>
1	6 meses de servicios de Internet	Q 299,00	<b>Q 1794,00</b>
<b>SUBTOTAL</b>			<b>Q 115 956,50</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Resumen financiero**

<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>COSTO</b>
Recurso humano	<b>Q 21 250,00</b>
Recurso material	<b>Q 115 956,50</b>
<b>Costo total</b>	<b>Q 137 206,50</b>

Fuente: elaboración propia.





### 13. BIBLIOGRAFÍA

1. Cañada Soriano, M.; Royo Pastor, R. (2016). *Termografía infrarroja nivel II*. Madrid, España: Fundación Confemetal.
2. Cárcel Carrasco, F. J. (2014). *La gestión del conocimiento en la ingeniería del mantenimiento industrial*. Valencia, Valencia, España: Omnia Publisher SL.
3. FLIR Systems AB. (2011). *Guía de termografía para el mantenimiento predictivo*. Madrid, España: FLIR Systems AB.
4. FLIR Systems, Inc. (2018). *17-1465\_ES: relación de tamaño de punto*.
5. Galván Romero, D. (2012). *Análisis de la implementación del mantenimiento productivo total (TPM) mediante el modelo de opciones reales*. Recuperado de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/5393/Tesis%20.pdf?sequence=1%3E>.
6. García Valdéz, R. R. (2008). *Evaluación óptima en el mantenimiento de un compresor tipo tornillo, en el sistema de refrigeración por amoníaco, en la industria alimenticia*. Guatemala, Guatemala.
7. González Fernández, F. (2005). *Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado*. Madrid, España: Fundación Confemetal.

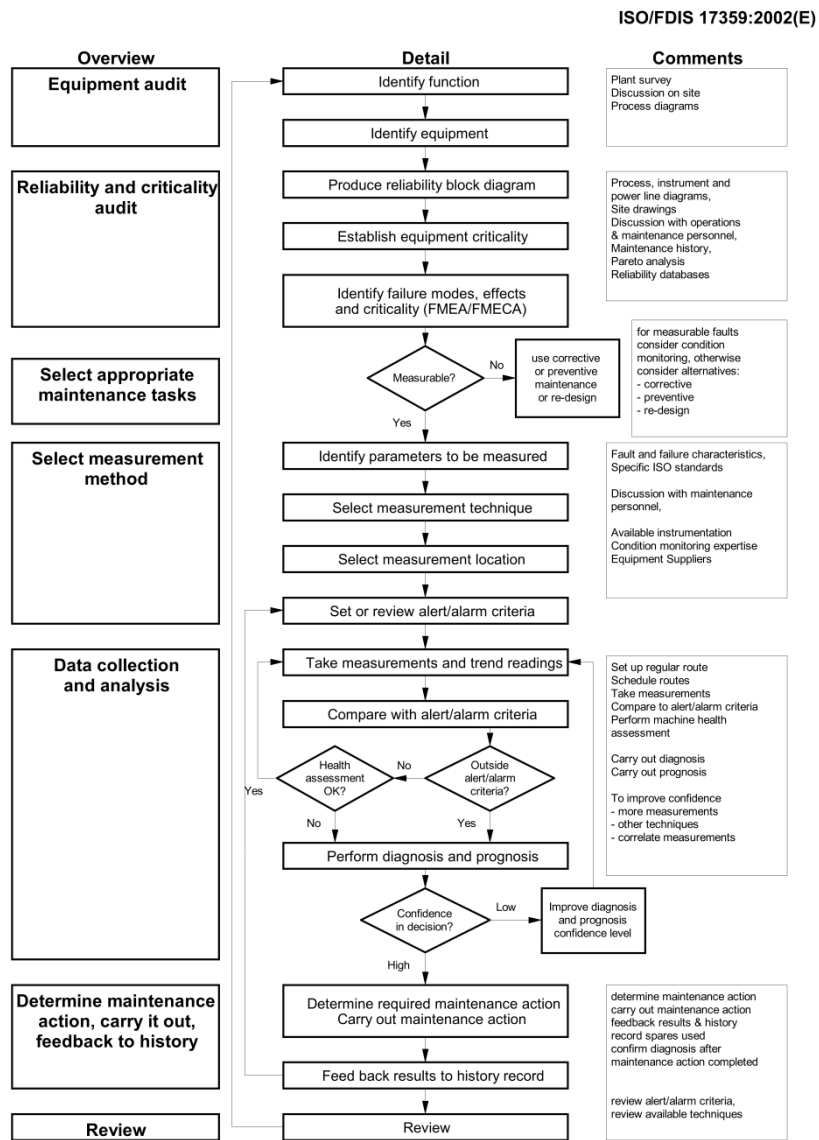
8. Hernández, P. (2018). *ALS Tribology*. Recuperado de. [https://alsglobal.blog/es/analisis-de-aceite-todo-usted-a-saber/?utm\\_content=91494998&utm\\_medium=social&utm\\_source=facebook&hss\\_channel=fbp-357362097716570&fbclid=IwAR3BFEAYwurdIVJmxwPM8E3gguE EP3xoLR4RCB5j3PCs\\_DG5BbXFdxslenk](https://alsglobal.blog/es/analisis-de-aceite-todo-usted-a-saber/?utm_content=91494998&utm_medium=social&utm_source=facebook&hss_channel=fbp-357362097716570&fbclid=IwAR3BFEAYwurdIVJmxwPM8E3gguE EP3xoLR4RCB5j3PCs_DG5BbXFdxslenk).
9. ISO, International Organization for Standardization. (2018). *ISO 17359*. Suiza.
10. Johnson Controls. (2014). *Manual de instalación, operación y mantenimiento*.
11. Millán Gómez, S. (2012). *Metrología y ensayos*. Primera Edición. C. Lara Carmona. Madrid, España: Ediciones Paraaninfo, S.A.
12. Nieto Vilardell, E. (2013). *Mantenimiento industrial práctico: aprender siguiendo el camino contrario*. Córdoba, España: Fidestec Ediciones.
13. Noria. (2015). *Anatomía de un reporte de análisis de lubricante*. Recuperado de <http://noria.mx/lublearn/anatomia-de-un-reporte-de-analisis-de-lubricante/>.
14. Peña Rodríguez, E. O.; Neita Duarte, L. Y. (2011). *Principios básicos de la termografía infrarroja y su utilización como técnica para mantenimiento predictivo*. Colombia: Floridablanca.

15. Pereira, U. T. (2011). *Aplicacion de la termografia en el mantenimiento predictivo*. Colombia: Scietia ETenchnica.
16. Sánchez Gómez, A. M. (2017). *Técnicas de mantenimiento predictivo. Metodología de aplicación en las organizaciones*. Bogotá, Colombia: Universidad Católica de Colombia.
17. Sánchez, C. M. (2009). *Club de mantenimiento*. C. M. Sánchez, Ed. Recuperado de <http://www.clubdemantenimiento.com.ar>.
18. Termogram Consultores, S. A. (2013). *Curso de análisis por vibraciones mecánicas de máquinas nivel 1 bajo la Norma ISO 18436*. San Joaquín, Heredia, Costa Rica.
19. Tranter, J. (2004). *iLearnVibration 3.0*. Melbourne, Victoria, Australia: Mobius Institute.
20. Tranter, J. (2009). *Mobius Institute*. Recuperado de <http://mobiusinstitute.com>.
21. Valenzuela Z. D. (s.f.). *Fisic education*. Recuperado de <https://www.fisic.ch/contenidos/termodin%C3%A1mica/trasferencia-del-calor/>.
22. Williams, J. (2005). *Engineering Tribology*. New York, Estados Unidos: Cambridge University Press.
23. Young, H.; Freedman, R. (2009). *Física universitaria*. México: Pearson Educación.






# 14. APÉNDICES

## Apéndice 1. Metodología de la norma ISO 17359




Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Registro de datos de análisis termográfico

Análisis Termográfico		01/04/2015 4:13:17 p. m.																			
Equipo a analizar		Equipo analizador	FLIR T-400																		
																					
		<table border="1"> <tr> <td>ε</td> <td>1.00</td> <td>Dist.</td> <td>0.0 m</td> </tr> <tr> <td>T<sub>Ref.</sub></td> <td>20.0 °C</td> <td>%H</td> <td>50.0 %</td> </tr> <tr> <td>T<sub>atm.</sub></td> <td>20.0 °C</td> <td>R</td> <td>%</td> </tr> </table>		ε	1.00	Dist.	0.0 m	T <sub>Ref.</sub>	20.0 °C	%H	50.0 %	T <sub>atm.</sub>	20.0 °C	R	%						
ε	1.00	Dist.	0.0 m																		
T <sub>Ref.</sub>	20.0 °C	%H	50.0 %																		
T <sub>atm.</sub>	20.0 °C	R	%																		
		<table border="1"> <tr> <td>SP 1</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>SP 2</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>L1 max</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>L1 min</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>L2 max</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>L2 min</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>DT 1</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>DT 2</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Area 1</td> <td>-</td> </tr> </table>		SP 1	-	SP 2	-	L1 max	-	L1 min	-	L2 max	-	L2 min	-	DT 1	-	DT 2	-	Area 1	-
SP 1	-																				
SP 2	-																				
L1 max	-																				
L1 min	-																				
L2 max	-																				
L2 min	-																				
DT 1	-																				
DT 2	-																				
Area 1	-																				
<b>Análisis.</b>		<b>Condición</b>																			

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Registro de datos de análisis de vibraciones mecánicas

Vibration Analysis. Compressor									
<b>Analista</b>	Emilsed Ruano 1308-1958AA				<b>Equipo de Vibraciones</b>	Pruftechnik Vibscanner 2			
<b>Condiciones de operación</b>									
<b>Run Horus:</b>	<b>Succión</b>	<b>Descarga</b>	<b>Aceite</b>	<b>Filtro</b>	<b>Separador</b>	<b>intermedio</b>	<b>MA:</b>	A	
<b>Presión: (PSI<sub>g</sub>)</b>							<b>SV:</b>	%	
<b>Temperatura:(°F)</b>							<b>SS:</b>		
<b>Gráfico de tendencia</b>									
<b>Análisis</b>						<b>Condición</b>		<b>NORMAL</b>	

Fuente: elaboración propia.



Apéndice 4. **Registro de datos de análisis de aceite**

<b>Análisis de aceite. Compresor No. 1</b>		
Aceite	Rango de viscosidad	cSt@40 <sup>o</sup> C
Fabricante	Grado ISO	
<b>Condición del lubricante</b>		
Hierro	Viscosidad	
% Agua	Grado ISO	
UIN	Estado	<b>NORMAL</b>
<b>Comentarios</b>		
<b>**Ficha de laboratorio**</b>		

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 5. **Formulario de observación en rutina de toma de datos**

Cuestionario guía:

1. ¿Conoce el técnico los factores determinantes del funcionamiento del compresor tipo tornillo?
2. ¿Cuál sería la rutina adecuada para la realización del mantenimiento predictivo a los compresores tipo tornillo?
3. ¿Conoce el técnico los parámetros y pasos a seguir para aplicar las técnicas de mantenimiento predictivo (termografía, vibraciones, muestreo de aceite)?
4. Con base en lo anterior, ¿cree necesaria la estandarización de los procesos involucrados en los servicios y por qué?
5. ¿Qué beneficios se pueden obtener con la propuesta de gestión de mantenimiento predictivo?

Fuente: elaboración propia.

<b>DATOS DE PLACA DE LA UNIDAD COMPRESORA</b>
<b>DATOS DE PLACA DEL MOTOR</b>
<b>DATOS DE PLACA DEL SISTEMA DE LUBRICACIÓN</b>
<b>DATOS DEL SISTEMA DE ARRANQUE</b>

Fuente: elaboración propia.