



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento

**DESARROLLO DE UN MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO A TRAVÉS DEL  
MONITOREO DE CONDICIÓN, UTILIZANDO ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS, BAJO LA  
NORMA ISO 17359:2011 PARA LA CONSERVACIÓN DE EQUIPOS CRÍTICOS, EN LA  
INDUSTRIA AVÍCOLA**

**Ing. César Augusto Tejaxún Solloy**

Asesorado por la Mtra. Inga. Carola Berioska García García

Guatemala, abril de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DESARROLLO DE UN MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO A TRAVÉS DEL  
MONITOREO DE CONDICIÓN, UTILIZANDO ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS, BAJO LA  
NORMA ISO 17359:2011 PARA LA CONSERVACIÓN DE EQUIPOS CRÍTICOS, EN LA  
INDUSTRIA AVÍCOLA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y LA ESCUELA DE ESTUDIOS DE  
POSTGRADOS  
POR

**ING. CÉSAR AUGUSTO TEJAXÚN SOLLOY**

ASESORADO POR LA MTRA. INGA. CAROLA BERIOSKA GARCÍA GARCÍA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**MAESTRO EN ARTES EN INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO**

GUATEMALA, ABRIL DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Mtro. Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
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
SECRETARIA	Mtra. Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**JURADO EVALUADOR QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE DEFENSA**

DECANO	Mtro. Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez
EXAMINADORA	Mtra. Inga. Sandra Ninett Ramírez Flores
SECRETARIA	Mtra. Inga. Lesbia Magalí Herrera López

En mi calidad como 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 Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación de la Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento titulado: **"DESARROLLO DE UN MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO A TRAVÉS DEL MONITOREO DE CONDICIÓN, UTILIZANDO ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS, BAJO LA NORMA ISO 17359:2011 PARA LA CONSERVACIÓN DE EQUIPOS CRÍTICOS, EN LA INDUSTRIA AVÍCOLA"** presentado por el Ingeniero Mecánico Industrial César Augusto Tejaxún Solloy quien se identifica con Carné 8816179, procedo a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

*"Id y Enseñad a Todos"*

Maestro. Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, abril de 2019.

Cc archivo/LZ.LA.

Ref.APT-2019-003

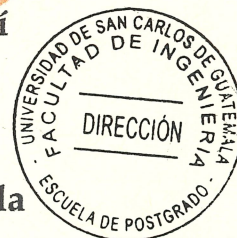
En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado "DESARROLLO DE UN MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO A TRAVÉS DEL MONITOREO DE CONDICIÓN, UTILIZANDO ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS, BAJO LA NORMA ISO 17359:2011 PARA LA CONSERVACIÓN DE EQUIPOS CRÍTICOS, EN LA INDUSTRIA AVÍCOLA" presentado por el Ingeniero Mecánico Industrial César Augusto Tejaxún Solloy quien se identifica con Carné 8816179, correspondiente al programa de Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*

  
Maestro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí  
Director

Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, abril de 2019.

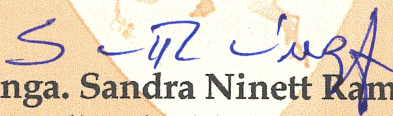
Cc archivo/L.Z.L.A.

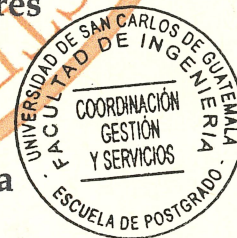
Ref.APT-2019-003

Como Coordinadora de la Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado "DESARROLLO DE UN MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO A TRAVÉS DEL MONITOREO DE CONDICIÓN, UTILIZANDO ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS, BAJO LA NORMA ISO 17359:2011 PARA LA CONSERVACIÓN DE EQUIPOS CRÍTICOS, EN LA INDUSTRIA AVÍCOLA" presentado por el Ingeniero Mecánico Industrial César Augusto Tejaxún Solloy quien se identifica con Carné 8816179.

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*

  
Maestra. Inga. Sandra Ninett Ramirez Flores  
Coordinador(a) de Maestría  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, abril de 2019.

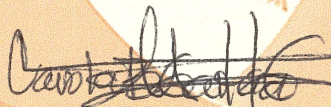
Cc archivo/L.Z.L.A.

Ref.APT-2019-003

En mi calidad como Asesor del Ingeniero Mecánico Industrial César Augusto Tejaxún Solloy quien se identifica con carné No. 8816179 procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado "DESARROLLO DE UN MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO A TRAVÉS DEL MONITOREO DE CONDICIÓN, UTILIZANDO ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS, BAJO LA NORMA ISO 17359:2011 PARA LA CONSERVACIÓN DE EQUIPOS CRÍTICOS, EN LA INDUSTRIA AVÍCOLA" quien se encuentra en el programa de Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*



**Maestra. Inga. Carola Berioska García García**  
**Asesor(a)**  
**Maestra en Metrología**

Carola Berioska García G.  
Ingeniera Industrial  
Colegiada 6045

Guatemala, abril de 2019.

Cc archivo/L.Z.L.A.





## **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:

**DESARROLLO DE UN MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO A TRAVÉS DEL MONITOREO DE CONDICIÓN, UTILIZANDO ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS, BAJO LA NORMA ISO 17359:2011 PARA LA CONSERVACIÓN DE EQUIPOS CRÍTICOS, EN LA INDUSTRIA AVÍCOLA**

Tema aprobado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, con fecha 31 de enero de 2018.

**Ing. Cesar Augusto Tejaxún Solloy**



## **ACTO QUE DEDICO A:**

**Al Todopoderoso**

Por permitirme lograr cada uno de mis objetivos.

**Mi familia**

Por ser un ejemplo de lucha constante.

**Evelyn**

Mi esposa, por acompañarme en el camino del conocimiento.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Al pueblo de Guatemala</b>	Por bríndame el privilegio de una formación universitaria.
<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por cobijarme y mostrarme tesoros más valiosos que el conocimiento.
<b>Faculta de Ingeniería</b>	Por brindarme los conocimientos y herramientas que me definen como profesional.
<b>Carola B. García García</b>	Por su asesoría y apoyo incondicional en la realización de este trabajo de graduación.



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
TABLAS .....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN.....	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PREGUNTAS ORIENTADORAS.....	XV
OBJETIVOS.....	XIX
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO .....	XXI
INTRODUCCIÓN .....	XXV
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. La industria avícola en Guatemala .....	1
1.2. Evolución del Mantenimiento .....	2
1.3. Clasificación del mantenimiento .....	4
1.3.1. Mantenimiento predictivo ( <i>PdM</i> ) .....	6
1.3.2. Mantenimiento basado en condición.....	7
1.4. Tecnologías END para monitoreo de condición.....	9
1.4.1. Análisis de vibraciones .....	10
1.4.2. Termografía .....	16
1.5. Norma ISO 17359. Monitoreo de condición y diagnóstico de fallas – lineamientos generales .....	24
2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN DEL MODELO DE GESTIÓN DE MONITOREO DE CONDICIÓN UTILIZANDO ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS BAJO LA NORMA 17359:2011.....	25

2.1.	Fases de la investigación .....	25
2.1.1.	Fase 1. Revisión y actualización de equipos .....	27
2.1.2.	Fase 2. Confiabilidad y criticidad de equipos.....	27
2.1.3.	Fase 3. Selección del mantenimiento adecuado .....	35
2.1.4.	Fase 4. Selección de las técnicas de medición .....	37
2.1.5.	Fase 5. Recolección de datos y análisis.....	39
2.1.6.	Fase 6. Determinación de los planes de acción .....	42
2.1.7.	Fase 7. Revisión y mejora continua.....	44
2.2.	Instrumentos y equipos de recopilación de la información .....	44
3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	47
3.1.	Presentación de resultados de análisis de termografía .....	47
3.1.1.	Análisis estadístico de termografía .....	51
3.2.	Presentación de resultados de análisis de vibraciones .....	53
3.2.1.	Análisis estadístico de vibraciones .....	54
3.3.	Propuesta del Modelo de gestión de Monitoreo de Condición bajo la Norma ISO 17359:2011.....	58
3.3.1.	Descripción del Modelo de Gestión .....	58
3.3.2.	Plan estratégico de termografía.....	65
3.3.3.	Plan estratégico de análisis de vibraciones .....	66
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	67
4.1.	Discusión de resultados de termografía .....	67
4.2.	Discusión de resultados de análisis de vibraciones .....	68
4.3.	Discusión sobre la importancia del Modelo de Gestión de Mantenimiento basado en el Monitoreo de Condición. ....	70
	CONCLUSIONES.....	73
	RECOMENDACIONES .....	75



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
APÉNDICES .....	81
ANEXOS.....	83



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Clasificación de generaciones del mantenimiento.....	3
2.	Categorías del mantenimiento.....	5
3.	Curva P-F.....	8
4.	Representación de una onda sinusoidal de vibraciones.....	11
5.	Vibración aleatoria.....	12
6.	Onda de un golpeteo intermitente .....	12
7.	Representación de la transformada de Fourier .....	13
8.	Niveles de vibración referencial de alarma.....	15
9.	Criterio de severidad para vibraciones mecánicas .....	16
10.	El rango IR dentro del espectro electromagnético.....	19
11.	Imagen de una trampa de vapor en buen estado .....	22
12.	Termograma de una trampa de vapor en buen estado .....	22
13.	Clasificación de prioridad de reparación eléctrica para termografía .....	24
14.	Modelo para implementación de monitoreo de condición.....	26
15.	Selección de equipos por criticidad .....	29
16.	Análisis de modos de fallo, efectos y criticidad .....	31
17.	Matriz de decisiones.....	33
18.	Matriz para selección de parámetros <i>CBM</i> .....	36
19.	Tabla de técnicas de monitoreo de condición y equipos de Planta Especialidades.....	37
20.	Criterio de evaluación de severidad de vibraciones .....	38
21.	Criterios de severidad utilizados en termografía .....	39
22.	Ejemplo de inspección de motores de compresores .....	40

23.	Reporte de ruta de análisis de vibraciones .....	41
24.	Anomalía con severidad crítica en un motor de compresor .....	43
25.	Cuadro de características de cámara termográfica Flir E60 empleada para análisis de termografía de equipos críticos .....	45
26.	Cuadro de características de analizador DSP Logger Expert para análisis de vibraciones de equipos críticos .....	46
27.	Termogramas de un motor de 300 Hp de compresor de refrigeración.....	47
28.	Reporte de termografía de equipos críticos .....	50
29.	Condición termográfica de motores de compresores de refrigeración. ....	52
30.	Resultados de análisis de vibraciones mecánicas en motores eléctricos críticos de Planta Especialidades.....	54
31.	Gráfico de vibraciones del grupo de motores de compresores de refrigeración.....	56
32.	Diagrama de flujo modelo <i>CBM Frisa</i> .....	63
33.	Instrumento de recopilación de información termográfica .....	81
34.	Instrumento de recopilación de vibraciones mecánicas .....	83
35.	Espectros mostrando la evolución de la vibración después del balanceo dinámico del rotor de la turbina .....	84

## TABLAS

I.	Disposición de datos para análisis Boxplot .....	51
II.	Datos para análisis Boxplot de vibraciones .....	55
III.	Cuadro comparativo del estado general de motores críticos según norma ISO 10813-3.....	57
IV.	Plan estratégico de termografía .....	65
V.	Plan estratégico de análisis de vibraciones.....	66
VI.	Plan de acción correctiva para motores de turbinas de congelado .....	69



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
$\alpha$	Alfa
$\epsilon$	Epsilon
$\mu\text{m}$	Micrómetro
$W\alpha$	Radiación absorbida
$W\epsilon$	Radiación emitida
<b>P</b>	Ro
<b><math>\tau</math></b>	Tau





## GLOSARIO

<b>AMFEC</b>	Análisis de modos de fallas, efectos y criticidad.
<b>CBM</b>	<i>Condition-Based Maintenance.</i>
<b>END</b>	Ensayos no destructivos.
<b>Espectro</b>	Representación de una señal compleja en el dominio del tiempo, por medio de curvas sinusoidales con valores de frecuencia y amplitud específicos.
<b>ISO</b>	<i>International Organization for Standardization.</i>
<b>kW</b>	Abreviatura para la unidad de potencia kilowatt.
<b>NPR</b>	Número de ponderación del riesgo.
<b>PdM</b>	<i>Predictive maintenance.</i>
<b>RCM</b>	<i>Reliability centered maintenance.</i>
<b>RMS</b>	<i>Root mean square</i>
<b>Termograma</b>	Imagen visible de la radiación infrarroja emitida por un cuerpo.

**TIR**

Termografía infrarroja.

**Vibración**

Es la variación en el tiempo de una magnitud que describe el movimiento o la posición de un sistema mecánico alrededor de un punto de equilibrio de forma alternativa.

## RESUMEN

En Guatemala, la estrategia de mantenimiento industrial predominante es la correctiva y aunque existan esfuerzos para avanzar, el mantenimiento de clase mundial aún se avizora lejano. El siguiente nivel de mantenimiento que muchas empresas han alcanzado o intentan alcanzar es el preventivo, y es en esta estrategia en la que probablemente exista más estancamiento; contar entonces con un programa preventivo es un reto constante, sin embargo, éste no debería el único objetivo, se debe visualizar un nivel de gestión integral.

Aunque el mantenimiento predictivo se aplica en muchas empresas, en algunas con poca o ninguna planificación, solamente en muy pocas, existe como tal, incluido en su modelo de gestión.

El objetivo de este estudio es desarrollar un modelo de mantenimiento basado en monitoreo de condición bajo normas internacionales, que permita llegar a un nivel de clase mundial y que pueda ser aplicable a nivel nacional.

La línea de investigación está dentro de la normalización del mantenimiento, debido al uso de normas ISO, tanto para el diseño del modelo, como para la comparación de resultados de las variables, obteniendo como resultado un modelo de gestión de mantenimiento basado en monitoreo de condición bajo la norma ISO 17359.

Esta investigación es descriptiva de nivel transversal, porque desarrolla paso a paso el modelo sugerido por la norma ISO, y transversal porque utilizó datos históricos de monitoreo realizados en equipos críticos de la planta, los

cuales no respondían a ninguna estrategia de gestión de mantenimiento, propiciando que información relevante pasara desapercibida, perdiéndose así el objetivo del *CBM*.

Se utilizaron la termografía y análisis de vibraciones para desarrollar el modelo de monitoreo de condición, *CBM*, obteniendo resultados que son una valiosa herramienta para la toma de decisiones estratégicas de mantenimiento, debido a que presentan información sobre el momento oportuno en que deben efectuarse las intervenciones de mantenimiento.

Las conclusiones del estudio son la importancia del modelo basado en normas internacionales, del mantenimiento predictivo y la capacitación en *RCM* del personal responsable de las operaciones predictivas de mantenimiento.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PREGUNTAS ORIENTADORAS**

Debido a las condiciones en que opera la planta de especialidades, que son condiciones propias de una planta de valor agregado en la industria avícola, en las cuales el agua es usada como medio de limpieza continua, el hielo como medio de enfriamiento, el uso de cuartos fríos y cuartos de congelado para la conservación de los productos; el contacto con agua de los equipos, principalmente los motores; es inevitable. Adicionalmente, el alto nivel de ruido y vibraciones en muchas máquinas hace que el ambiente de operación de las mismas sea inusualmente adverso; por ejemplo, en el área de molinos.

Aunque existen inspecciones y rutinas de mantenimiento preventivo, la falla de equipos críticos en la planta de especialidades, provocan a menudo que las líneas de producción se detengan. Por lo tanto, se pierde eficiencia productiva, que incrementa el tiempo muerto de máquinas y consecuentemente se incurre en atrasos en la entrega de producto terminado.

Los paros de producción debidos a fallas mecánicas se traducen en el incumplimiento de metas. La velocidad de producción de la planta se mide en kilogramos/hora, que dependiendo del producto, pueden provocar que se dejen de producir hasta 1180 Kilogramos/hora, estos productos varían entre formados, empanizados y marinados para el consumo final.

En las máquinas es de suma importancia minimizar cualquier paro por fallas, siendo las de equipos críticos, especialmente aquellos con motores que

sobrepasan los 15 kW; pero específicamente los asociados a equipos hidráulicos, de compresores de refrigeración, ventiladores de túneles de congelado y molinos de pasta de pollo, los que juegan un papel preponderante en la eficiencia de la planta y será ese grupo el que delimitará el alcance del presente estudio.

Las condiciones adversas de las operaciones de producción, obligan a buscar nuevas estrategias para el mantenimiento de los equipos, que permitan reducir tanto las paradas de producción como tiempos de paro de maquinaria y equipos, siendo la implementación de un programa de gestión de mantenimiento a través del monitoreo de condición basado en la norma ISO 17359, lo que garantizaría las reducciones.

### **Formulación de pregunta central**

¿Cómo la gestión de mantenimiento a través del monitoreo de condición, aplicando ensayos no destructivos como la termografía y análisis de vibraciones, en una planta de especialidades avícola, bajo la norma internacional ISO 17359, ayudaría a la conservación de la maquinaria y equipo?

### **Preguntas de investigación**

1. ¿Cuál es beneficio de monitorear con termografía la temperatura de los diferentes componentes de la instalación de un motor eléctrico?
2. ¿Es el análisis de vibraciones una técnica que debe usarse para monitorear la condición de un motor eléctrico?

3. ¿Qué tipo de entrenamiento se debe tener para la aplicación de las técnicas de monitoreo de condición, basado en termografía y análisis de vibraciones?





# **OBJETIVOS**

## **Objetivo general**

Desarrollar un modelo de gestión de mantenimiento, a través del monitoreo de condición utilizando ensayos no destructivos, bajo la norma ISO 17359:2011 para la conservación de equipos críticos, en la industria avícola.

## **Específicos**

1. Desarrollar un programa de monitoreo de temperaturas de los elementos críticos de la instalación de un motor eléctrico utilizando la termografía.
2. Determinar los lineamientos de un programa de monitoreo de vibraciones de las partes críticas del sistema de montaje de un motor eléctrico.
3. Utilizar las técnicas de RCM para determinar los equipos que deben ser sometidos a monitoreo de condición y cómo deben ser monitoreados empleando las técnicas de termografía y de análisis de vibraciones.



## **RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO**

### **Diseño de la investigación**

Es una investigación no experimental, que consistió en diseñar una propuesta de gestión de mantenimiento a través del monitoreo de condición para la planta de especialidades, utilizando como base la norma ISO 17359 y apoyándose en otras tales como: ISO TC 108 para termografía e ISO 10816-3, para análisis de vibraciones.

### **Tipo de investigación**

La investigación es de tipo descriptivo de nivel transversal, porque desarrolló paso a paso el modelo sugerido por la norma ISO 17359, y transversal, porque se utilizaron datos históricos de los monitoreos realizados en los equipos críticos de la planta.

### **Alcance**

Los análisis de monitoreo de condición fueron realizados a equipos con motores mayores a 15 kW de la planta Especialidades.

### **Plan de muestreo**

El análisis transversal implica la realización de un análisis de datos históricos, a partir de esta premisa, se analizaron grupos de datos de termografía y vibraciones realizadas en el último año a equipos críticos, para

extraer de ellos información que se utilizaría posteriormente para sentar las bases de programa de monitoreo de condición.

La metodología para realizar este trabajo comprende de varias fases, siendo las principales las siguientes:

### **Primera fase**

Capacitación en *RCM*, termografía y análisis de vibraciones. Durante esta fase se obtuvieron capacitaciones que brindaron una base teórica sólida sobre las técnicas escogidas para la implementación del *CBM*, así como capacitación sobre *RCM*, que es una de las herramientas básicas del modelo de la norma ISO que se utilizó como guía.

### **Segunda fase**

Desarrollo del modelo descrito en la norma ISO 17359:2011, para la implementación del mantenimiento basado en condición. Este modelo consta de 7 pasos, en los que la comprensión del *RCM* y de las técnicas predictivas seleccionadas, son de mucha importancia para su correcta aplicación.

### **Tercera fase**

Realización de mediciones de termografía y vibraciones. Se utilizó un método híbrido para la recolección de datos de la condición de los equipos, debido a que no se contaba con todo el equipo necesario para las técnicas propuestas. La termografía fue realizada con equipo propio y personal del departamento de mantenimiento y los análisis de vibraciones fueron sub contratados.

## **Cuarta fase**

Se interpretaron los resultados obtenidos del conjunto de análisis realizados con cada una de las técnicas predictivas propuestas, a partir de estos resultados se definieron frecuencias para el monitoreo y poder definir el modelo de gestión de monitoreo de condición con un plan estratégico para su ejecución.



## INTRODUCCIÓN

La planta de Especialidades de Frigoríficos de Guatemala, S. A., es parte de la industria avícola de Guatemala. Está situada en el área urbana de Villa Nueva y elabora productos que se clasifican en formados, marinados y frituras. Es una planta de productos alimenticios, en la que se deben cumplir con las normas y regulaciones que se exigen en la elaboración de productos para consumo humano.

El departamento de mantenimiento de la planta está situado en un nivel de madurez bastante alto, con un programa de mantenimiento preventivo muy sólido e inspecciones de tipo predictivo en varios de los equipos críticos, aunque sin un sistema de gestión definido.

El presente estudio es una innovación en la gestión del mantenimiento, al implementar de manera formal y sistematizada un programa de monitoreo de condición (*CBM*) utilizando la norma ISO 17359:2011, que se constituye en la base del programa de mantenimiento predictivo. Se tomó como grupo de estudio, a los equipos críticos con motores mayores a 15 kW para demostrar que las fallas de estos equipos críticos, pueden detectarse en sus inicios y predecir el momento de ocurrencia, lo que brindó información valiosa para la intervención oportuna de mantenimiento.

Aun cuando se cuenta con un mantenimiento preventivo sólido, se siguen presentando fallas en los equipos con motores eléctricos mayores de 15 kW de manera regular; entre los que sobresalen los de molinos de pasta de pollo, los equipos hidráulicos que potencian las líneas de producción, los equipos de

refrigeración, los motores de ventiladores y cajas reductoras de túneles de congelado. Las fallas se deben a la falta de un programa formal de mantenimiento predictivo que monitoree parámetros, tales como temperatura, nivel de vibraciones o el estado del lubricante para detectar el punto en que comienzan a presentarse los primeros síntomas de fallas.

Uno de los beneficios que se pretenden lograr, es llevar la gestión del mantenimiento actual de la empresa a un mantenimiento de clase mundial; este objetivo requiere de una inversión inicial onerosa, que es inherente a un programa de monitoreo de condición.

En el capítulo 1, se hará una breve reseña sobre mantenimiento predictivo, monitoreo de condición, tipos de ensayos no destructivos (END) utilizados y la metodología que se propone en la norma ISO 17359:2011, para la implementación de un modelo de gestión de mantenimiento utilizando monitoreo de condición.

En el capítulo 2, se presenta el desarrollo de la investigación sobre la metodología que se utilizó para la implementación del monitoreo de condición basado en la norma ISO 17359:2011. Se definieron las frecuencias de análisis, los responsables de la recolección de datos y cuáles serían recolectados por el departamento de mantenimiento y cuáles serían recolectados por un tercero.

En el capítulo 3, se presentaron y analizaron los resultados que se obtuvieron utilizando la termografía y análisis de vibraciones, en los cuales se aprecia cómo a partir del análisis estadístico de un pequeño grupo de equipos, se pueden llegar a obtener herramientas de toma de decisiones estratégicas relacionadas al mantenimiento de grandes grupos de equipo. También se



presentó el modelo desarrollado a partir de la metodología de la norma ISO 17359:2011 y los planes estratégicos de termografía y análisis de vibraciones.

Por último, en el capítulo 4, se discuten los resultados de los análisis realizados al grupo de motores críticos y su relevancia en la gestión del mantenimiento, así como la importancia y validez de un modelo de monitoreo de condición, basado en una norma internacional.



# **1. MARCO TEÓRICO**

## **1.1. La industria avícola en Guatemala**

La industria avícola en el país consta mayormente de dos empresas ampliamente reconocidas que abarcan la mayor parte del mercado; sin embargo, existen numerosos productores de menor tamaño que surten mercados regionales a los cuales los primeros no pueden llegar.

Con el paso del tiempo, esta industria se ha visto en la necesidad de modernizarse, expandiendo sus operaciones de manera vertical y horizontal, creciendo de manera integral; esto ha traído consigo la inevitable automatización inherente a una industria de esa magnitud. La cantidad de equipos se ha multiplicado para cubrir sus innumerables procesos, de la misma manera que sus necesidades de mantenimiento.

Sus operaciones son continuas, casi sin paradas programadas, salvo aquellas que son inevitables, como los asuetos y feriados. Esto exige una gestión de mantenimiento integral que combine eficazmente las estrategias disponibles para enfrentar la complejidad de una industria alimenticia de esta magnitud.

La mezcla de equipos nuevos y antiguos exige que se haga uso de la estrategia correcta de mantenimiento, por lo que ofrece un amplio campo para la investigación sobre diversos temas de mantenimiento, tal es el caso del monitoreo de condición, basado en una norma ISO, tema del presente estudio.

## 1.2. Evolución del Mantenimiento

El mantenimiento ha acompañado a la industria desde sus inicios, ha estado en todas sus etapas evolutivas y se ha transformado; pasando de ser un rubro de “gastos o pérdidas”, a ser considerado en la actualidad, como una parte importante de la cadena de suministro. Ha sido definido de diversas formas, en las que básicamente se le concibe como la actividad que devuelve a un equipo su condición de funcionalidad, hasta las definiciones más estructuradas dadas por la (*International Organization for Standardization*), ISO.

Delimitar cronológicamente cada etapa por las que el mantenimiento ha pasado durante su evolución, resulta una tarea sumamente difícil y probablemente de muy poca utilidad, por lo que es más práctico referirse a su evolución como generaciones, (Acevedo, 2012).

Profundizando en el tema de delimitación cronológica del mantenimiento, es muy probable que se encuentre información con fechas o rangos de fechas y muy probablemente no exista un consenso sobre el tema, por lo que tomando en cuenta la afirmación de Acevedo (2012) en su tesis, sobre la implementación de mantenimiento predictivo en facilidades de producción de petróleo, se reproduce la siguiente tabla de clasificación de generaciones del mantenimiento.

Figura 1. Clasificación de generaciones del mantenimiento

Aspectos de mantenimiento	Comportamiento 1era generación (I Guerra Mundial - 1950)	Comportamiento 2da generación (1950 - 1970)	Comportamiento 3era generación (1970 - 2000)	Comportamiento 4ta generación (2000 - presente)
<b>Expectativas del mantenimiento</b>	Repare equipos cuando estén rotos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Equipos con mayor disponibilidad</li> <li>- mayor duración de los Equipos</li> <li>- Bajos costos de mantenimiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Equipos con mayor disponibilidad y confiabilidad.</li> <li>- Incremento en la seguridad</li> <li>- Sin daño al ambiente</li> <li>- Mejor calidad de producto</li> <li>- Mayor duración de los equipos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Equipos con mayor disponibilidad y confiabilidad</li> <li>- Incremento en la seguridad</li> <li>- Sin daño al ambiente</li> <li>- Mejor calidad de producto</li> <li>- Mayor duración de los equipos</li> <li>- <b>Mayor Costo – Efectividad</b></li> <li>- Manejo del Riesgo (legislación, procedimientos, entrenamientos, equipos para minimizar el riesgo, etc)</li> </ul>
<b>Visión sobre la falla del equipo</b>	Todos los equipos se desgastan	Todos los equipos cumplen con la "curva de la bañera"	Existen 6 patrones de falla	Fallas desde el punto de vista del error humano, error del sistema, error de diseño y error de selección (Confiabilidad Operacional)
<b>Técnicas de mantenimiento</b>	Todas las habilidades de reparación	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mantenimientos mayores planeados y programados</li> <li>- Sistemas de planificación y control de los trabajos (PERT, Gantt, etc.)</li> <li>- Computadores grandes y lentos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Mantenimiento predictivo</b></li> <li>- Diseño basado en confiabilidad y mantenibilidad</li> <li>- Estudio de riesgos</li> <li>- Análisis de modos de falla y sus efectos (FMEA, FMECA)</li> <li>- Pequeños y rápidos computadores</li> <li>- Sistemas expertos</li> <li>- Trabajo en equipo y apoderamiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Monitoreo por condición</li> <li>- Diseño basado en confiabilidad y mantenibilidad</li> <li>- Estudio de riesgos</li> <li>- Análisis de modos de falla y sus efectos (FMEA, FMECA)</li> <li>- Pequeños y rápidos computadores</li> <li>- Trabajo en equipo y apoderamiento</li> <li>- Uso de técnicas especializadas (RCA, RCM, TPM, PMO, Modelamiento de confiabilidad, optimización de repuestos etc.)</li> <li>- ERP – módulos de mantenimiento</li> <li>- "Outsourcing"</li> <li>- Internet</li> </ul>

Fuente: Acevedo (2012).

De la clasificación generacional del mantenimiento de la figura 1, se puede observar que el mantenimiento predictivo empezó a aplicarse en la tercera generación y durante la misma hubo un fuerte enfoque en el mantenimiento centrado en la confiabilidad, aplicando los conceptos que originalmente fueron desarrollados para la industria de la aviación, (Moubray, 1991).

Fueron estas técnicas desarrolladas para el *RCM*, las que proporcionaron un impulso importante al desarrollo del *CBM* y por consiguiente, al mantenimiento predictivo; dichas técnicas fueron el desarrollo de los análisis de criticidad de equipos y los análisis de modos de fallas y efectos.

El monitoreo de condición (*CBM*) comienza a desarrollarse con más fuerza a inicios de los años 2000, debido al rápido crecimiento de las tecnologías de comunicación y la electrónica. Los equipos empiezan a ser considerados como activos, que se deben cuidar y mantener en buen estado y la responsabilidad no recae exclusivamente en mantenimiento, sino que es compartida, no solo deben mantenerse operando confiablemente sino que también deben hacerlo de forma limpia, segura y dentro de los parámetros de diseño, (Acevedo, 2012).

Las actuales técnicas de *CBM* son variadas y su evolución ha dependido del rápido avance de la tecnología, esto es evidente al ver como los distintos dispositivos de monitoreo de condición vienen disminuyendo en tamaño, por ejemplo, las cámaras termográficas y los analizadores de vibraciones, que incluso ahora se pueden obtener en versiones de bolsillo.

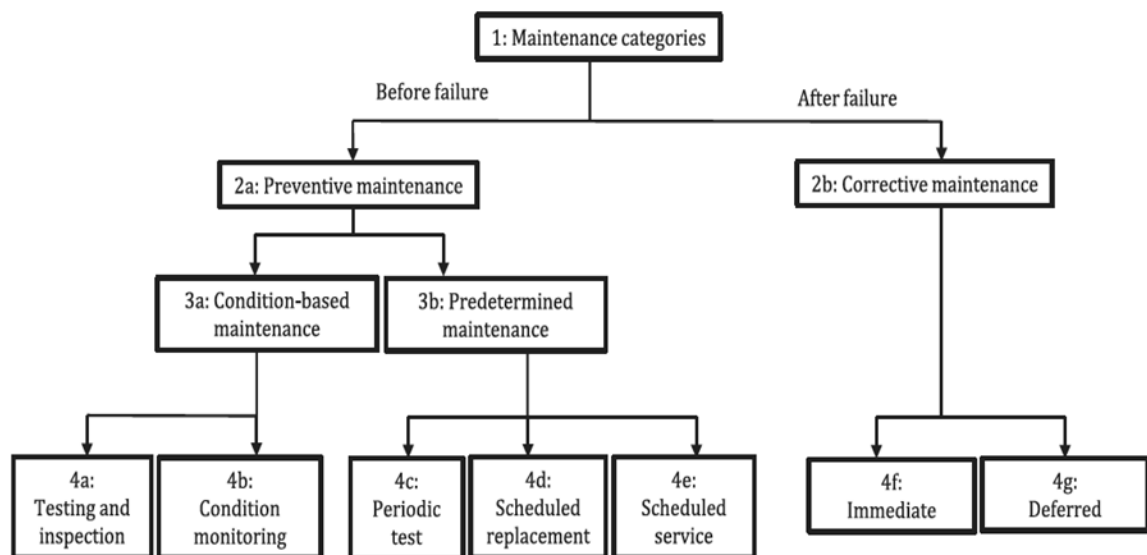
### **1.3. Clasificación del mantenimiento**

Según García (2012), la clasificación del mantenimiento ha sido un tema ampliamente discutido por décadas y aun así no se han logrado unificar criterios que enumeren todos los tipos. No ha sido posible alcanzar una única clasificación, cuál fórmula matemática, pueda explicar cuáles son las etapas por la que debe ir pasando a medida que llega a un punto de madurez, tal, que pueda considerarse mantenimiento de clase mundial. Es más, cada vez se hacen más sub divisiones dependiendo de cuál sea el campo de aplicación, de la formación de quien formula la clasificación o de quien la aplica en la industria

Pero sin duda, tipos de mantenimiento, tales como: mantenimiento predictivo (*PdM*), mantenimiento basado en condición (*CBM*) o mantenimiento centrado en confiabilidad (*RCM*) son tipos de mantenimientos situados en la parte más alta de cualquier tipo de clasificación que se haga de él.

El presente estudio no se adentrará en la conceptualización del mantenimiento o en discutir cuál es su clasificación más acertada; su objetivo está en definir los lineamientos que se deben seguir para implementar un modelo de mantenimiento predictivo basado en monitoreo de condición. Sin embargo, se incluye una categorización publicada por *ISO* que simplifica bastante los tipos de mantenimiento.

Figura 2. **Categorías del mantenimiento**



Fuente: norma ISO 14224 (2016).

De acuerdo a la figura 2 y teniendo en cuenta el nivel de globalización de la industria actual, que cada vez está exigiendo estandarizar no solo calidad, sino todos los procesos; el mantenimiento también debe ser gestionado con el

mismo enfoque, se debe garantizar que sea un proceso repetitivo que entregue los mismos resultados cada vez que se ejecute. Una manera de lograr uniformidad en los procesos es el uso de normas ISO; que en este caso se aplicarán para la estandarización del mantenimiento predictivo, a través del uso de monitoreo de condición, (*International Organization for Standardization, 2016*).

### **1.3.1. Mantenimiento predictivo (PdM)**

Según Garrido (2003), una división clásica comúnmente incluye mantenimiento correctivo, mantenimiento preventivo y mantenimiento predictivo como elementos principales. De allí en adelante que se han hecho subdivisiones de cada uno y se ha profundizado en ellos de acuerdo a las necesidades de cada campo de aplicación.

El mantenimiento predictivo es un conjunto de técnicas instrumentadas de medida y análisis de variables para caracterizar en términos de fallos potenciales la condición operativa de los equipos productivos, (*International Organization for Standardization, 2009*).

Conforme a esta norma, la misión principal del mantenimiento predictivo es optimizar la fiabilidad y disponibilidad de equipos al mínimo costo.

La definición de ISO 2041 deja bastante claro cuál es el alcance del mantenimiento predictivo; que es más que reparar equipos cuyas fallas fueron detectadas con alguna técnica predictiva.

Recordando que, la mayoría de equipos industriales no fallan intempestivamente y dejan de trabajar. Los equipos comienzan a fallar



paulatinamente en un periodo de semanas o meses, dando señales de ello a medida que van fallando. Resulta fácil entonces comprender que ninguna otra estrategia brinda mayor margen de tiempo para la planeación de intervenciones de mantenimiento y por ello, se debe considerar al *CBM* como la fuente número uno de mantenimiento planificado.

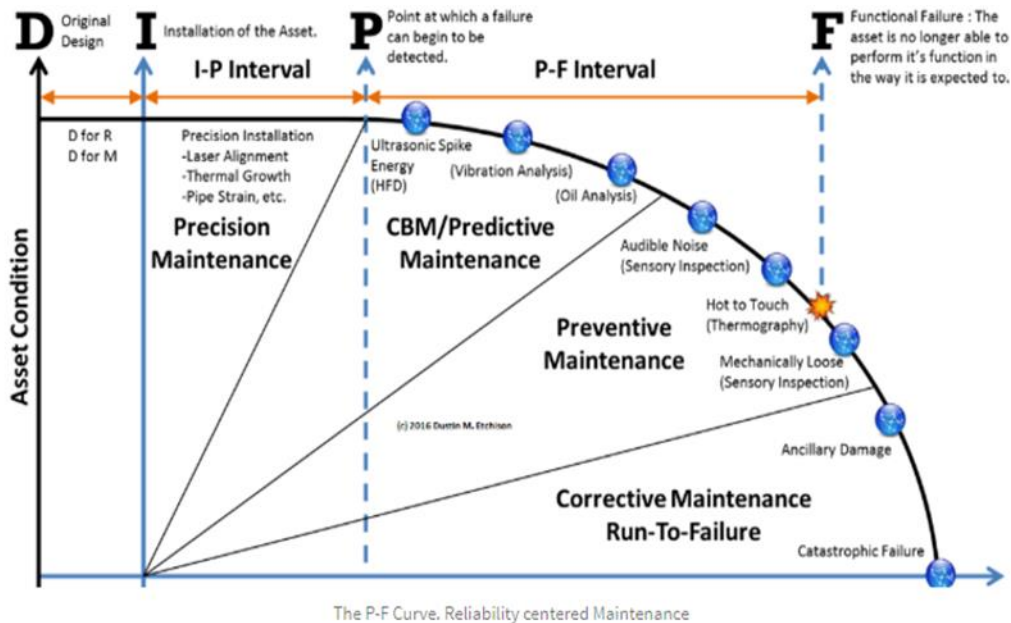
### **1.3.2. Mantenimiento basado en condición**

Para *International Organization for Standardization (2016)*, el mantenimiento preventivo se sub divide en dos partes; mantenimiento basado en condición y mantenimiento predeterminado. Este estudio se enfocará en el primer tipo mencionado, específicamente en el monitoreo de condición.

Es fácil en este punto confundir las definiciones de mantenimiento predictivo y mantenimiento basado en condición, debido a que usualmente son usadas indistintamente.

La figura 3 muestra claramente el dominio del monitoreo de condición y porqué se usa indistintamente con el mantenimiento predictivo.

Figura 3. Curva P-F



Fuente: <https://www.linkedin.com/pulse/when-renewable-energy-ipps-decide-set-up-own-om-teams-v-s-ramesh-rao>; consultado: septiembre 2017.

De acuerdo a Prajapati, Bechtel, & Ganesan (2012, p.120), “De hecho, el concepto de mantenimiento basado en condición, *CBM*, fue introducido a principios de 1940, por la compañía Rio Grande Railway Company e inicialmente fue llamado mantenimiento predictivo”. Para conceptualizarlo mejor es necesario analizar cómo ha sido definido otros autores.

De acuerdo a Bengtsson (2004), mantenimiento predictivo es el mantenimiento basado en el desempeño y/o monitoreo de parámetros y las sub siguientes acciones. Para Kothamasu, Huang, & William (2006), mantenimiento predictivo es la estrategia de toma de decisiones en donde la decisión de efectuar un mantenimiento, se realiza como resultado de la observación de las condiciones de un sistema o sus componentes.

Los estándares británicos lo definen como la política de mantenimiento que responde a un deterioro significativo de una máquina detectado por el monitoreo de condición, (Shin & Jun, 2015).

Una definición aún más completa la proporciona Butcher (2000), es un grupo de acciones de mantenimiento, basada en una evaluación en tiempo real o muy cercana, de la condición de un equipo, la cual es obtenida por el uso de dispositivos de monitoreo permanentes o portátiles, con los que se monitorean equipos críticos.

Para nuestro caso, las definiciones de la norma ISO 2041:2009, Jong-Ho Shin y Hong-Bae Jun, resultan muy útiles para formarnos una idea bastante certera del mantenimiento basado en condición. Para Shin & Jun (2015); monitoreo de condición es una política de mantenimiento que ejecuta acciones de conservación antes que suceda una falla, al evaluar la condición de un equipo, que incluya condiciones ambientales y prediga el riesgo de falla en tiempo real, basándose en la recolección de datos.

#### **1.4. Tecnologías END para monitoreo de condición**

La curva P-F de la figura 3, sugiere los ensayos no destructivos que se pueden utilizar para detectar las fallas incipientes de los equipos; sin embargo, pueden no ser las mismas en cada caso, cada proceso posee singularidades que exigirán equipos específicos para el monitoreo de su condición. De manera informativa se puede mencionar la inspección visual, el ultrasonido, el análisis de vibraciones, la termografía IR, el análisis de lubricantes, las pruebas eléctricas estáticas, entre otras. Las 2 técnicas de ensayos no destructivos a aplicar en este caso se describen a continuación:

## **1.4.1. Análisis de vibraciones**

### **1.4.1.1. Vibración simple**

De acuerdo a AMAQ-S.A. (2005), es una vibración cuya representación en el dominio del tiempo son las ondas sinusoidales y son la representación de las señales más puras de vibración.

De una señal de vibración u onda sinusoidal se tiene: la amplitud  $X$ , el período  $P$  y la frecuencia  $F$ ; la frecuencia es el recíproco del período y es usualmente medida en Hz (ciclos/s).

En el contexto de vibraciones, la amplitud es la cantidad de movimiento que puede tener un cuerpo a partir de un punto de equilibrio o neutral, se mide regularmente en valores pico-pico para desplazamiento y valores cero-pico y RMS para velocidad y aceleración.

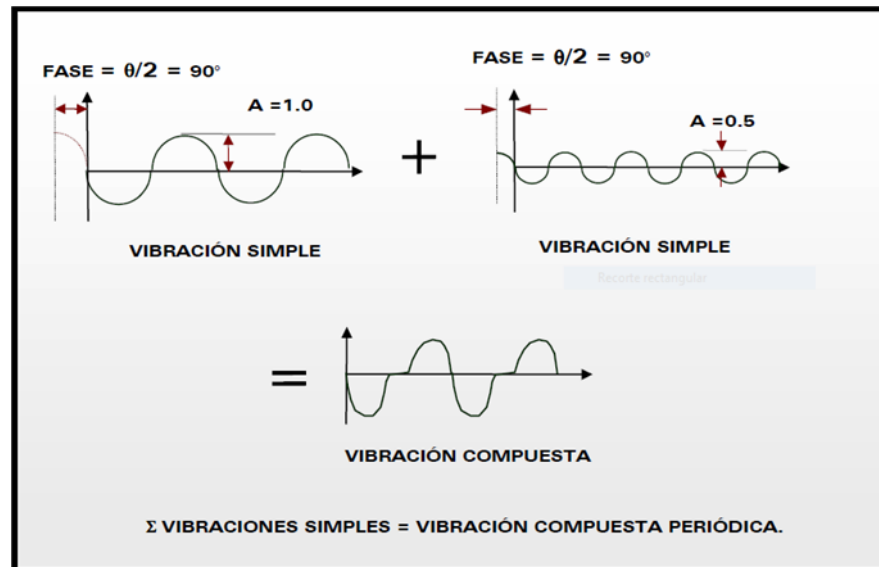
Otro elemento importante en vibraciones es la fase, que realmente es la separación en tiempo entre dos señales y se miden en grados.

### **1.4.1.2. Vibración compuesta**

En el campo de las máquinas, es la resultante de todas las señales sinusoidales de todos los componentes que se encuentran en las máquinas.

Gráficamente se representa en la siguiente ilustración:

Figura 4. **Representación de una onda sinusoidal de vibraciones**



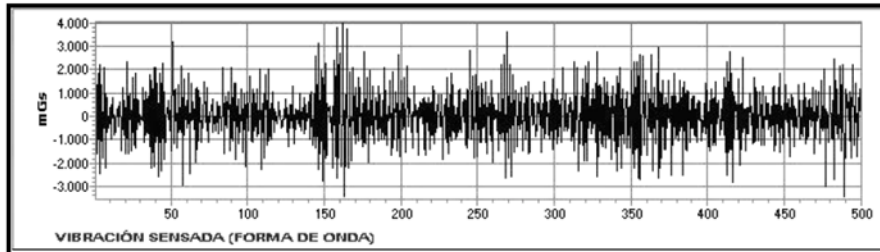
Fuente: A-MAQ S.A. (2017).

### 1.4.1.3. Vibración aleatoria

También existen variaciones que no cumplen patrones especiales o que se repiten constantemente o que simplemente no se puede determinar donde comienzan y donde terminan, estas son vibraciones aleatorias y ejemplos de ellas las constituyen las turbulencias en equipos de bombeo, cavitación, problemas asociados a lubricación y contacto directo de metal con metal. El golpeteo está generalmente asociado al contacto de mecanismos de transmisión como los engranajes.

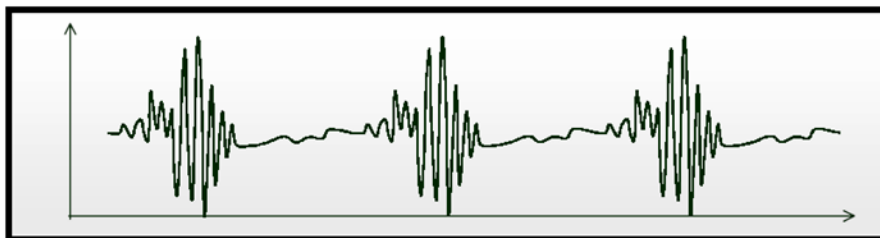
Con las ilustraciones siguientes se puede apreciar cuanto se ha complicado la representación de las vibraciones de un equipo.

Figura 5. **Vibración aleatoria**



Fuente: A-MAQ S.A. (2017)

Figura 6. **Onda de un golpeo intermitente**



Fuente: A-MAQ S.A. (2017).

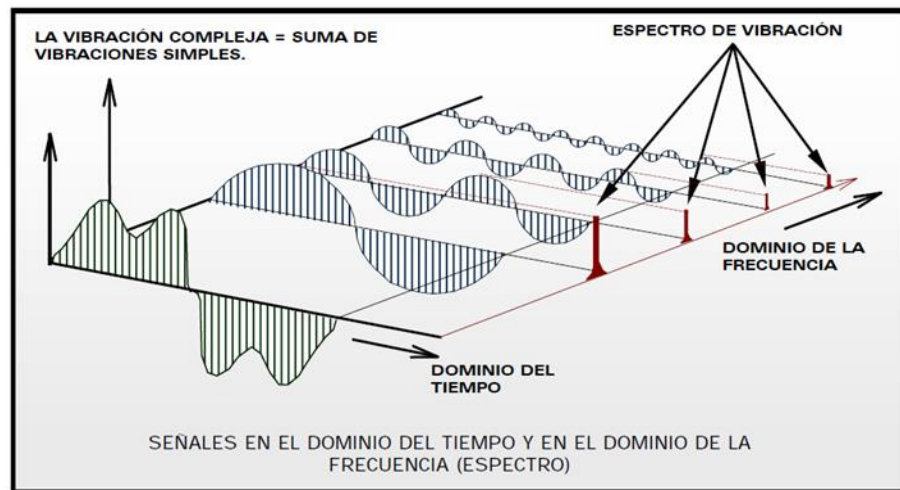
#### 1.4.1.4. **Transformada de Fourier**

Se han contemplado hasta ahora las señales de vibraciones en el dominio del tiempo; pero estas señales están cargadas de mucha información en forma muy compleja y característica de cada equipo en particular, por lo que a simple vista, resulta imposible distinguir un comportamiento en particular.

Para solucionar este problema, Jean Baptiste Fourier (1768-1830), matemático francés, encontró la forma de representar una señal compleja en el dominio del tiempo por medio de curvas sinusoidales con valores de frecuencia y amplitud específicos; esta nueva forma de representación es conocida como Espectro, y es lo que un analizador de vibraciones que trabaja con la

transformada rápida de Fourier realiza, capturar una señal compleja de una máquina, la descompone en todas sus señales sinusoidales simples y las muestra en un nuevo eje, en este caso el eje X de la frecuencia, (AMAQ-S.A., 2005).

Figura 7. **Representación de la transformada de Fourier**



Fuente: A-MAQ S.A. (2017).

#### 1.4.1.5. Frecuencia natural y resonancia

Son una fuente de incremento abrupto de las vibraciones y cuando la resonancia aparece, deben identificarse inmediatamente el agente o agentes externos que la producen y deben aislarse estructuralmente o cambiar la velocidad de la máquina.

#### 1.4.1.6. Análisis espectral

Es la interpretación del espectro obtenido con un analizador de vibraciones y el éxito del mismo depende de la correcta interpretación que se le

dé a la información respecto de las condiciones en que se encuentren los equipos.

#### **1.4.1.7. Desplazamiento, velocidad y aceleración de vibración**

Son las tres formas de medir la amplitud de las vibraciones y en combinación muestran la severidad real de las vibraciones.

Cada una presenta ventajas sobre las restantes, por lo tanto, es recomendable para el analista medirlas todas para obtener una mejor apreciación de la condición de un equipo.

#### **1.4.1.8. Sistema de análisis de vibraciones**

Un sistema típico de análisis de vibraciones está compuesto por:

- Un recolector de señales (transductor)
- Un analizador de señales
- Un *software* para análisis
- Una computadora para ejecutar el análisis, almacenamiento y creación de tendencias.

Menciona Acevedo (2012, p.49). “Para obtener mediciones óptimas y lo más uniforme posible, es necesario estandarizar puntos de medición. En general, las medidas deben ser tomadas siempre, en los mismos puntos siguiendo la dirección de los tres ejes del plano cartesiano, en relación con la máquina principal”.



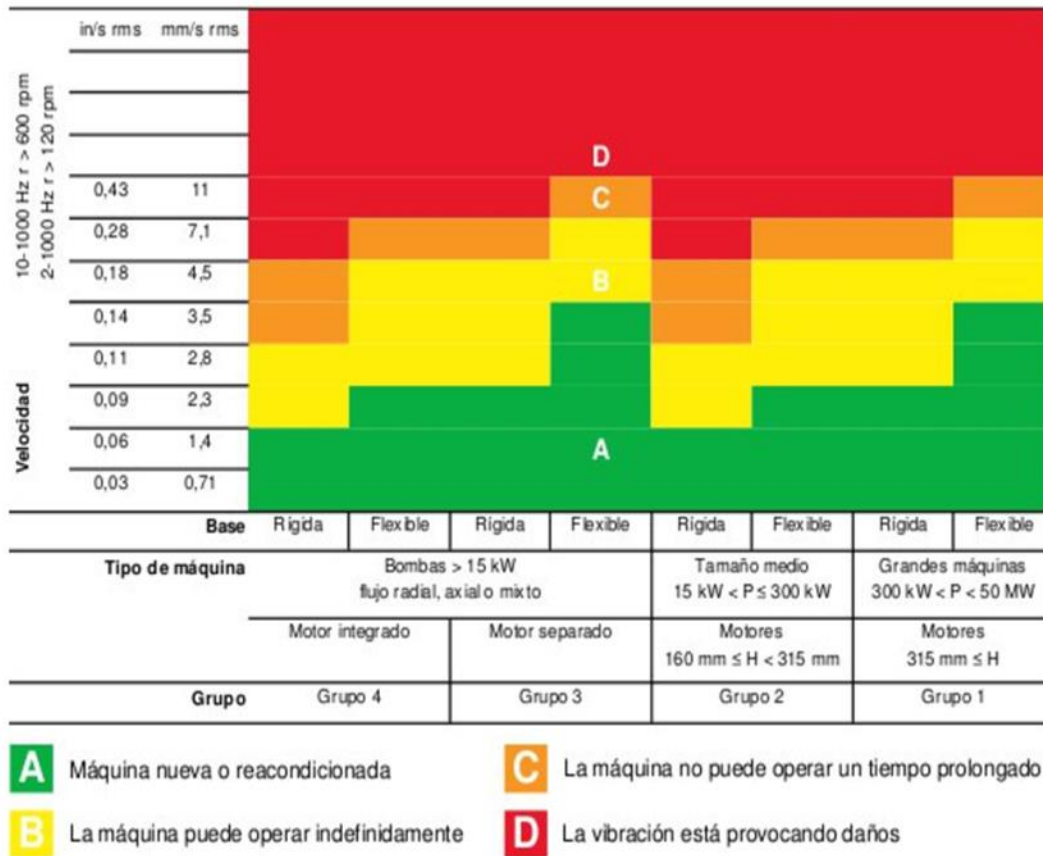
Entonces, un análisis de vibraciones debe ser realizado por alguien con entrenamiento y experiencia, que domine la teoría y el uso del equipo necesario.

Figura 8. **Niveles de vibración referencial de alarma**

<b>NIVEL DE EMERGENCIA</b>	Valor referencial de vibración peligrosa, indica que el equipo dinámico se encuentra operando en forma Inaceptable, podría ocasionar daños tanto al equipo como al personal operativo, por lo cual es recomendable ponerlo fuera de operación y proceder con la corrección de las fallas diagnosticadas.
<b>NIVEL DE PRECAUCIÓN</b>	Valor referencial de operación continúa no recomendada, que indica que el equipo dinámico se encuentra con limitaciones en su operación, por lo cual debe ser considerado dentro de los planes del próximo Mantenimiento Preventivo.
<b>NIVEL DE OBSERVACIÓN</b>	Valor referencial de operación continúa sin restricciones, que indica que el equipo dinámico se encuentra en condición de funcionamiento aceptable bajo observación programada.
<b>NIVEL NORMAL</b>	Valor referencial de operación puesta en marcha, que indica que el equipo dinámico se encuentra en condiciones normales de operación y no necesita intervención.

Fuente: norma ISO 10816-3 (2003).

Figura 9. Criterio de severidad para vibraciones mecánicas



Fuente: norma ISO 10816-3 (2003).

### 1.4.2. Termografía

Soriano & Royo (2016), se refieren a la termografía infrarroja (IRT) como una técnica de ensayo no destructivo (END), sin contacto que obtiene información térmica de un cuerpo, a través de la captación de radiación infrarroja que emite, mediante un dispositivo de adquisición de imágenes térmicas a distancia.

Existen tres características que hacen de la termografía infrarroja una técnica fundamental END:

#### **1.4.2.1. Remota**

Al realizarse de forma remota, brinda dos ventajas sumamente importantes; en primer lugar, brinda seguridad al termógrafo, y en segundo lugar, no es intrusiva ni afecta al objeto que se analiza, es sin contacto.

#### **1.4.2.2. Bidimensional**

El significado de ésta característica es que se pueden hacer comparaciones directas entre distintos puntos situados en un mismo plano, es decir se pueden medir diferenciales de temperaturas entre dos o más puntos situados en una misma imagen.

#### **1.4.2.3. Instantánea**

La termografía detecta la radiación infrarroja que emiten los cuerpos y lo hace en el momento en que la radiación es emitida, sin retardos por nivelaciones de temperatura o procesamiento posterior.

El campo de aplicaciones de la termografía infrarroja es bastante amplio y se pueden mencionar las siguientes:

- Monitoreo de procesos
- Investigación y desarrollo
- Medicina y veterinaria
- Control de calidad

- Ensayos no destructivos

El monitoreo de procesos será el área en que la termografía tendrá relevancia para el presente estudio.

Para el *Infrared Training Center* (2017), la termografía requiere de una persona entrenada en las siguientes áreas aspectos:

#### **1.4.2.4. Manejo y uso de la cámara**

El termógrafo debe conocer su equipo y las funciones que tiene a su alcance para analizar correctamente la información que le llegue, hacer uso correcto y obtener del equipo el mejor rendimiento posible.

#### **1.4.2.5. Ciencia térmica**

Se trata del conocimiento básico y entendimiento de las dos primeras leyes de la termodinámica; de las cuales, la primera se refiere a la conservación de la energía, y la segunda, al sentido de flujo de calor.

En resumen, es necesario comprender la relación entre temperatura y calor para aplicar correctamente este conocimiento para la interpretación de imágenes térmicas.

#### **1.4.2.6. Radiación**

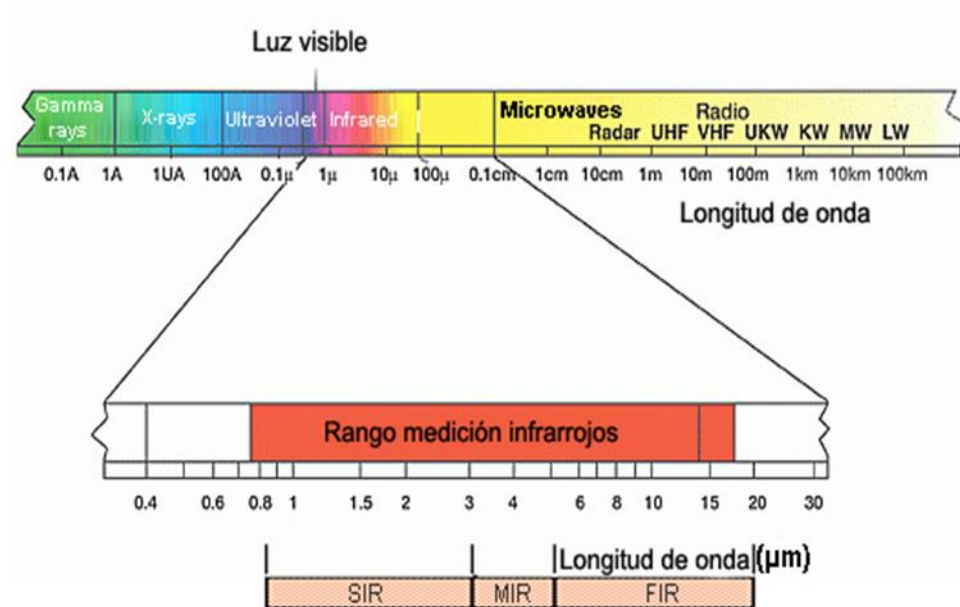
Probablemente esta es una de las áreas más importantes para un termógrafo, debido a que la comprensión que debe tener sobre la transmisión

de calor, la radiación infrarroja y como estas se relacionan a los objetos que serán analizados por termografía infrarroja.

El termógrafo debe ser capaz de diferenciar muy bien las tres formas de transmisión de calor importantes para la termografía son: conducción, convección y radiación.

La radiación térmica es aquella con la capacidad de transmitir calor por emisión y absorción. La radiación infrarroja se puede dar en el espectro electromagnético, en longitudes de onda que van desde 0.8-1.7  $\mu\text{m}$  para el infrarrojo cercano, de 1.0-2.5  $\mu\text{m}$  para el infrarrojo de onda corta, de 2.0-5.0  $\mu\text{m}$  para el infrarrojo de onda media, y de 8-14  $\mu\text{m}$  para el infrarrojo de onda larga.

Figura 10. **El rango IR dentro del espectro electromagnético**



Fuente: <http://www.academiatesto.com.ar/cms/radiacion-infrarroja-en-el-espectro-de-ondas-2>; consultado: Septiembre 2017.

Hay cuatro variables involucradas en la radiación térmica:

- Emisividad,  $\epsilon$
- Absortividad,  $\alpha$
- Reflectividad,  $\rho$
- Transmisividad,  $\tau$

Las variables se relacionan con la radiación incidente y saliente de los cuerpos. La primera es toda la radiación que llega a un cuerpo desde su entorno, y la segunda es la radiación que deja la superficie de un cuerpo, independientemente de su fuente original.

Los conceptos anteriores se describen en las siguientes fórmulas:

$$W \text{ incidente} = W\alpha + W\rho + W\tau \quad (1)$$

$$W \text{ saliente} = W\epsilon + W\rho + W\tau \quad (2)$$

Si se toma en cuenta que la energía que un cuerpo es capaz de absorber es igual a la energía que es capaz de emitir, entonces

$$W\alpha = W\epsilon \quad (3)$$

Se debe tomar en cuenta que los únicos materiales que son transparentes al infrarrojo, es decir, que dejan pasar la radiación a través de ellos, son el germanio y los plásticos delgados (polietilenos); y que los equipos generalmente no están contruidos de estos materiales, esto conduce a la ecuación número 5:

$$W\tau = 0 \quad (4)$$

La radiación importante y que debe ser captada en un termograma es la radiación saliente y como ésta tiene dos componentes  $W_{\text{SALIENTE}} = W_{\epsilon} + W_{\rho}$ , el termógrafo debe realizar cálculos que le permitan determinar únicamente el valor de la radiación emitida, que será la que finalmente lo llevará a un valor específico de temperatura.

#### **1.4.2.7. Aplicaciones**

Según *Infrared Training Center* (2017). El monitoreo de procesos engloba las aplicaciones de la termografía en el ámbito de mantenimiento predictivo y de estas se pueden incluir algunas de las más comúnmente usadas:

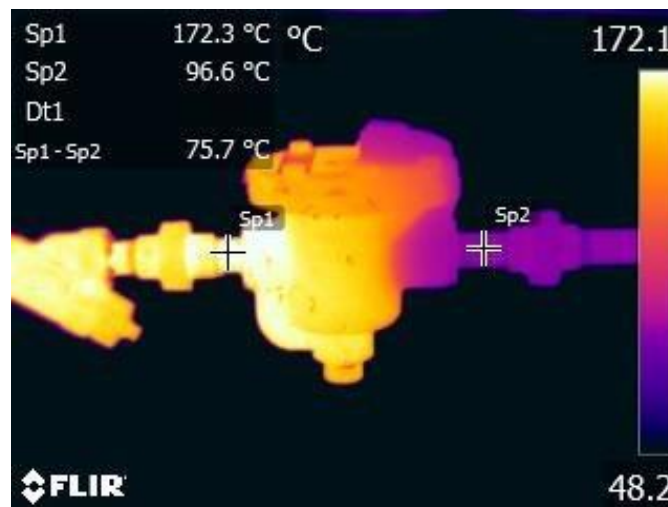
- Monitoreo de equipos eléctricos
- Monitoreo de edificios
- Monitoreo de calderas y hornos
- Mecanismos sujetos a fricción
- Monitoreo de tanques
- Monitoreo de flujo de fluidos

Figura 11. **Imagen de una trampa de vapor en buen estado**



Fuente: elaboración propia, imagen de una trampa de condensado en planta Especialidades.

Figura 12. **Termograma de una trampa de vapor en buen estado**



Fuente: elaboración propia, imagen IR del estado de una trampa de vapor en planta Especialidades.

Las figuras 11 y 12 ejemplifican una aplicación típica en la industria y corresponden a una imagen digital y a un termograma tomados en la planta de especialidades, en el termograma se muestra un diferencial de



temperatura correspondiente a la transformación de vapor a líquido, a través de una trampa de condensados.

#### **1.4.2.8. Técnicas de análisis**

El termógrafo deber ser capaz de decidir que técnica de análisis usar para la interpretación de los termogramas, pudiendo elegir entre un análisis cualitativo (comparativo) y un análisis cuantitativo (valores puntuales de temperatura).

#### **1.4.2.9. Rutinas de inspección e informes**

Se trata de la elaboración de rutinas de inspección o rutinas predictivas con las cuales se sistematiza la recolección de datos de la condición que se monitorea y requiere de un nivel de pericia alto del termógrafo, así como de la participación de expertos en cada una de las áreas en donde se realicen las inspecciones. Además trata todo lo relativo a la presentación ordenada, simple y completa de la información recolectada para ser interpretada por los responsables directos que no necesariamente podrán tener formación en termografía, que deben ser capaces de entender sin dificultad un informe de termografía redactado profesionalmente. La figura 13 muestra la clasificación de severidad y la prioridad de reparación de equipos eléctricos.

Figura 13. **Clasificación de prioridad de reparación eléctrica para termografía**

Criterio de Severidad	
$\Delta T$	Clasificación
> 40°C	Reparar de Inmediato
20°C - 40°C	Reparar tan pronto sea posible
10°C - 20°C	Reparar cuando el tiempo lo permita
< 10°C	Normal

Fuente: ISO TC 108 apartado 11.3.

### 1.5. Norma ISO 17359. Monitoreo de condición y diagnóstico de fallas – lineamientos generales

Originalmente fue publicada en 2003, su última actualización es del 2011 y es la que permanece vigente. Establece una metodología para la implementación de un programa de monitoreo de condición, *CBM*, basándose en 7 etapas. Hace uso del mantenimiento centrado en confiabilidad, *RCM*, para la determinación inicial de equipos que serán sometidos al *CBM* y es un modelo genérico que puede usarse para implementar un programa de mantenimiento predictivo, *PdM*.

*International Organization for Standardization* (2003) propone un modelo que consta de las siguientes fases:

- Revisión y actualización de equipos
- Revisión de confiabilidad y criticidad
- Selección de tareas de mantenimiento
- Selección de métodos de medición
- Recolección y análisis de datos
- Determinación de planes de acción
- Revisión

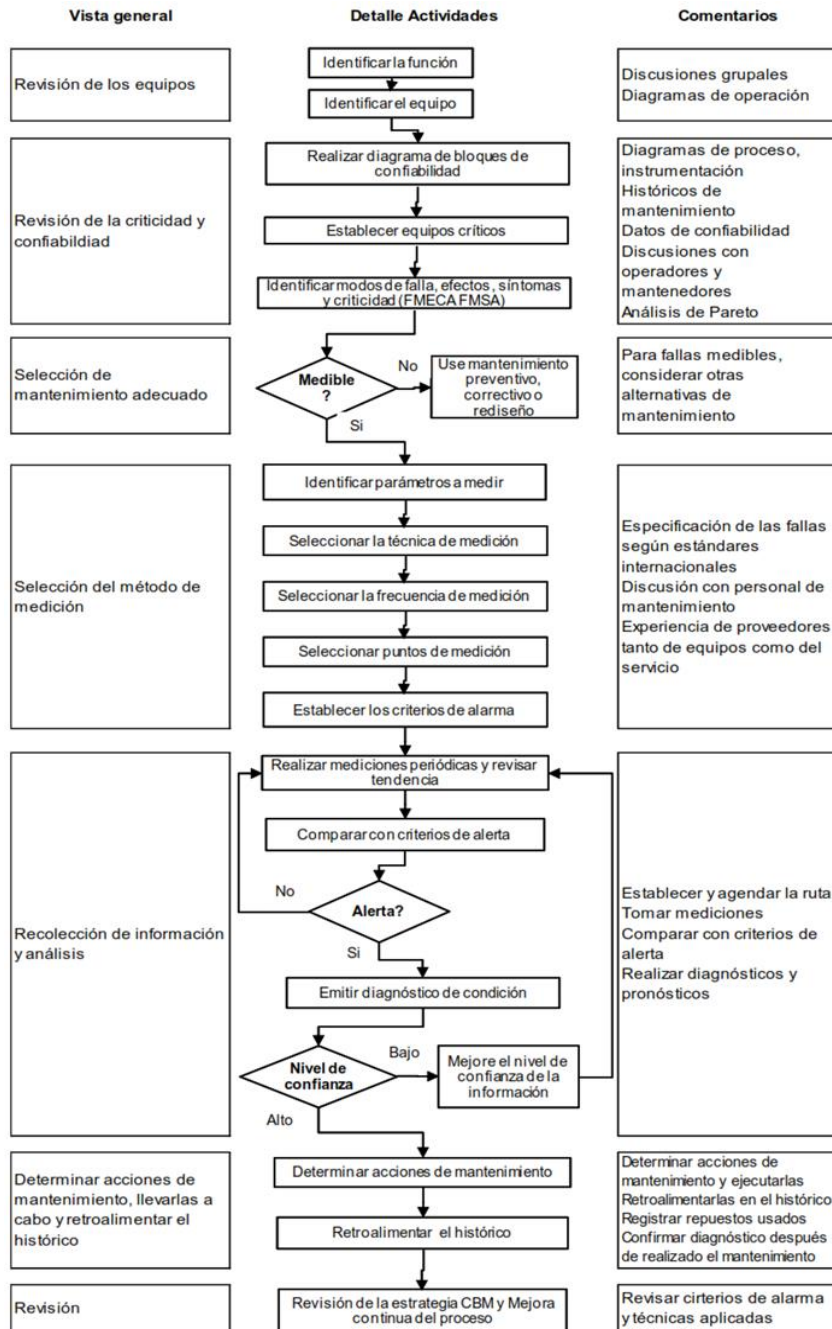
## **2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN DEL MODELO DE GESTIÓN DE MONITOREO DE CONDICIÓN UTILIZANDO ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS BAJO LA NORMA 17359:2011**

Como se mencionara anteriormente, muchas empresas ya hacen uso del *CBM* con ninguna o poca planificación, teniendo como consecuencia, que mucha información relevante al estado de los equipos se pierda, o pasa desapercibida y con ello también se pierde el objetivo del monitoreo de condición, que es básicamente, intervenir en el momento preciso sin tener que llegar a la ocurrencia de la falla funcional; esto justifica el diseño de una gestión normalizada que es lo que se describe en este capítulo.

### **2.1. Fases de la investigación**

La norma ISO 17359 propone un modelo típico para la implementación de un programa de monitoreo de condición. En este modelo se observa que las dos primeras fases se refieren al uso de las técnicas *RCM* para la evaluación de los equipos que se incluirían en el programa de monitoreo; parte de este análisis ya existía en la empresa, por lo que se hizo una revisión para filtrar los equipos de acuerdo al alcance propuesto, que es la inclusión de todos aquellos equipos críticos con motores mayores a 15 kW. La razón de esta delimitación es sencilla: en la fase inicial de un programa predictivo de mantenimiento (*PdM*) basado en monitoreo de condición (*CBM*), se requerirá de una alta inversión y producirá muchas actividades de mantenimiento correctivo, razón por la que el alcance es reducido, con la finalidad de implementar el programa en un tiempo razonable, no mayor a nueve meses.

Figura 14. Modelo para implementación de monitoreo de condición.



Fuente: norma ISO 17359 (2011).

Las fases fueron desarrolladas siguiendo el modelo de la Norma ISO 17359, y proporcionaron la base para implementar el mantenimiento, basado en monitoreo de condición.

### **2.1.1. Fase 1. Revisión y actualización de equipos**

La planta ya contaba con una matriz de equipos actualizada, a la que se agregaron todos aquellos que ingresaban como parte de proyectos nuevos. Estos proyectos se dan en el transcurso del año y son parte del crecimiento por desarrollo de productos nuevos, reemplazo de equipos o actualización de tecnología. Los equipos están identificados, codificados e ingresados al sistema ERP de la empresa.

Se seleccionaron los equipos para el mantenimiento basado en condición, *CBM*, de acuerdo al alcance propuesto para esta investigación; siendo estos los equipos críticos con motores mayores a 15 kW, entre los que sobresalen los compresores de amoníaco, los ventiladores de túneles de congelado, la máquina de formados, los molinos de pasta. Asociados a estos equipos, se incluyeron las conexiones eléctricas de cada uno de ellos. En la siguiente fase se muestran más detalladamente estos equipos.

### **2.1.2. Fase 2. Confiabilidad y criticidad de equipos**

Los equipos están clasificados de acuerdo a su nivel de criticidad, esta clasificación fue desarrollada por el departamento de mantenimiento, pero la parte correspondiente de confiabilidad aún está en proceso. Para el desarrollo de este trabajo de investigación, se tomó como base la matriz de criticidades para la elección de los equipos y se desarrolló un análisis de modos de falla y efectos de causa (AMFEC) para cada uno de ellos con la finalidad de identificar

que parámetros deberían monitorearse para la implementación del monitoreo de condición o mantenimiento predictivo.

- Matriz de criticidades planta especialidades.
- Desarrollo de AMFEC por categoría de equipos

Figura 15. Selección de equipos por criticidad

**MATRIZ DE CRITICIDADES**  
EQUIPOS CON MOTORES MAYORES A 15 KW

Ubicación Técnica	Código de Activo	Descripción del Activo	Motor (HP)	Incidencia sobre la Producción			Grado de Mantenibilidad			Existe equipo de back up o es el equipo redundante?		Criticidad de Mantenimiento	Suma de Criticidad
				Inmediato	<= 12 hrs.	> 12 hrs.	Alto	Medio	Bajo	SI	NO		
				150	75	0	100	50	0	0	50		
PLANTA ESPECIALIDADES	FOR0000001	Formadora Alco	100	1				1			1	A	250.0
PLANTA ESPECIALIDADES	COM0000007	Compresor de alta Frick RWF 177E	500	1					1		1	A	200.0
PLANTA ESPECIALIDADES	COM0000028	Compresor de baja Frick RWB II 177B	150	1					1	1		A	150.0
PLANTA ESPECIALIDADES	EQU0000002	Equipo hidráulico principal L1	75	1					1	1		A	150.0
PLANTA ESPECIALIDADES	TUR0000004	Motor turbina # 1 túnel Frigoscandia 2	20	1			1				1	A	200.0
PLANTA ESPECIALIDADES	TUR0000005	Motor turbina # 2 túnel Frigoscandia 2	20	1			1				1	A	200.0
PLANTA ESPECIALIDADES	TUR0000001	Motor turbina # 1 túnel Supertrak	30	1			1				1	A	200.0
PLANTA ESPECIALIDADES	TUR0000002	Motor turbina # 2 túnel Supertrak	30	1			1				1	A	201.0
PLANTA ESPECIALIDADES	TUR0000003	Motor turbina # 3 túnel Supertrak	30	1			1				1	A	201.0
PLANTA ESPECIALIDADES	MOL0000006	Motor eléctrico molino Urschell	60	1				1			1	A	200.0
PLANTA ESPECIALIDADES	BOM0000012	Motor eléctrico bomba de recirculación chiller Morris	20	1			1				1	A	201.0
PLANTA ESPECIALIDADES	TUR0000006	Motor turbina # 1 túnel Frigoscandia 2	20	1			1				1	A	201.0
PLANTA ESPECIALIDADES	TUR0000007	Motor turbina # 2 túnel Frigoscandia 2	20	1			1				1	A	200.0
PLANTA ESPECIALIDADES	COM0000010	Compresor Frick RFX 68 Blast Freezer	125	1				1			1	A	201.0

Fuente: elaboración propia. Extracto de matriz de criticidades de Planta Especialidades.





Figura 16. Análisis de modos de fallo, efectos y criticidad

RCM / ANÁLISIS DE MODOS DE FALLAS, EFECTOS Y CRITICIDAD		Centro: PLANTA MODELO Planta: PLANTA ESPECIALIDADES Instalación / Activo: Turbina de túnel Frigoscandia 1 Nivel de criticidad: A		Subsistema: Código: Nivel de criticidad:		No. Proyecto RCM: RCMPE001 Elaborado por: César Tejaxún Revisado por: Autorizado por:		Fecha elaboración: 1/09/2018 Versión: 1 HOJA: 1 de 2							
Activo: Turbina de congelado		Código:		BREVE DESCRIPCIÓN DE LA FUNCIÓN / PROCESO DONDE INTERVIENE EL ACTIVO EN EL CONTEXTO OPERATIVO: Recirculación de aire frío en túnel de congelado para congelamiento de producto terminado Turbina acoplada directamente a un motor trifásico de 20kW											
FUNCIÓN / PROCESO	PARAMETRO	FALLOS FUNCIONALES	MODOS DE FALLO			EFECTOS DE FALLO	CONSECUENCIAS DE FALLO					VALORACIÓN DE RIESGO			
			CLASIFICACIÓN A	CLASIFICACIÓN B	CLASIFICACIÓN C		FALLO OCULTO	SEGURIDAD Y MEDIO AMBIENTE	PRODUCCIÓN	MANTENIMIENTO	CALIDAD	GRAVEDAD	FRECUENCIA DE FALLOS	DETECTABILIDAD	N.P.R.
RECIRCULACION DE AIRE FRIO	RECIRCULACIÓN DE AIRE	LA TURBINA NO GIRA	FALLO MOTOR	EL MOTOR FUNCIONA SÓLO CON DOS FASES	FALLO ENBOBINADO DEL MOTOR	SALTA PROTECCIÓN TÉRMICA POR AUMENTO DE CONSUMO	NO	NO	SI	SI	NO	6	5	2	60
					FALLO CONEXIONES EN EL MOTOR	SALTA PROTECCIÓN TÉRMICA POR AUMENTO DE CONSUMO	NO	NO	SI	SI	NO	6	5	2	60
					FALLO DE ALIMENTACIÓN	SALTA PROTECCIÓN TÉRMICA POR AUMENTO DE CONSUMO	NO	NO	SI	SI	NO	6	5	2	60
				FALLO VENTILACIÓN	REJILLA DE LA TAPA DE MOTOR SATURADA	CALENTAMIENTO DEL MOTOR Y SE QUEMA EL DEVANADO	SI	NO	SI	SI	NO	5	3	1	15
					ROTURA DEL VENTILADOR	CALENTAMIENTO DEL MOTOR Y SE QUEMA EL DEVANADO	SI	NO	SI	SI	NO	5	2	2	20
				RODAMIENTOS DAÑADOS	ENTRADA DE AGUA O SUCIEDAD	RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	SI	NO	SI	SI	NO	5	5	5	125
					FALLO DE ENGRASE	RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	SI	NO	SI	SI	NO	5	4	5	100
					DESALINEACIÓN CONJUNTO	RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	SI	NO	SI	SI	NO	5	5	5	125
					MAL MONTAJE	RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	SI	NO	SI	SI	NO	5	5	5	125
				DESBALANCE	VIBRACIONES	SI	NO	SI	SI	NO	5	5	5	125	
			FALLO TURBINA	DESBALANCE	VIBRACIONES	SI	NO	SI	SI	NO	5	5	4	100	
				ROTURA CHAVETEROS	PARO DE LA TURBINA	NO		SI	SI	NO	8	3	1	24	
				FALLO FIJACIÓN	PRISIONEROS FLOJOS	VIBRACION Y PARO DE LA TURBINA	SI	NO	SI	SI	NO	8	3	4	96
			FALLO DE SUMINISTRO ELÉCTRICO	CONTACTOR DAÑADO	CONEXIONES FLOJAS	CALENTAMIENTO DE CONEXIONES	SI	NO	SI	SI	NO	5	6	5	150
					BOBINA DAÑADA	PARO DE LA TURBINA	SI	NO	SI	SI	NO	8	6	5	240
					SOBRECARGA DE LINEAS	SALTA PROTECCIÓN TÉRMICA POR AUMENTO DE CONSUMO	SI	NO	SI	SI	NO	5	6	2	60
				BREAKER PRINCIPAL DAÑADO	CONEXIONES FLOJAS	CALENTAMIENTO DE CONEXIONES	SI	NO	SI	SI	NO	5	2	5	50
					SOBRECARGA DE LINEAS	SALTA PROTECCIÓN TÉRMICA POR AUMENTO DE CONSUMO	SI	NO	SI	SI	NO	5	2	2	20
				PROTECCION TERMICA DAÑADA	SOBRECARGA DE LINEAS	SALTA PROTECCIÓN TÉRMICA POR AUMENTO DE CONSUMO	SI	NO	SI	SI	NO	5	2	2	20
			CABLES CONDUCTORES DEFECTUOSOS	SOBRECARGA DE LINEAS	CALENTAMIENTO Y SALTA PROTECCION TÉRMICA POR AUMENTO DE CONSUMO	SI	NO	SI	SI	NO	5	5	2	50	

Fuente: elaboración propia. Modelo AMFEC para una turbina de túnel de congelado.



Figura 17. Matriz de decisiones

RCM / MATRIZ DE DECISIONES		Centro: PLANTA MODELO Planta: PLANTA ESPECIALIDADES Instalación / Activo: Turbina de túnel Nivel de criticidad: A			Subsistema: Caldera Código: Nivel de criticidad:			No. Proyecto RCM: RCMPE001 Elaborado por: César Tejaxún Revisado por: Autorizado por:		Fecha elaboración: 1/09/2018 Versión: 1 HOJA: 2/2				
Activo: Turbina de congelado		Código:			Criticidad Tercer Nivel:									
EFECTOS DE FALLO	N.P.R.	MODO DE FALLO			MANTENIMIENTO PREDICTIVO			MANTENIMIENTO PREVENTIVO POR INSPECCIÓN		MANTENIMIENTO PREVENTIVO POR ACTUACIÓN PLANIFICADA		REDISEÑO / MEJORA		
		CLASIFICACIÓN A	CLASIFICACIÓN B	CLASIFICACIÓN C	OPERACIÓN A REALIZAR	PUNTO DE APLICACIÓN	FRECUENCIA	INSPECCIÓN / DETECCIÓN		RECAMBIO / MATERIAL		DESCRIPCIÓN	REFERENCIA	
								OPERACIÓN	FRECUENCIA	OPERACIÓN (Incluir lubricación)	FRECUENCIA			
SALTA PROTECCIÓN TÉRMICA POR AUMENTO DE CONSUMO	60	FALLO MOTOR	EL MOTOR FUNCIONA SÓLO CON DOS FASES	FALLO ENBOBINADO DEL MOTOR	MEDICIÓN DE AISLAMIENTO DE VANADO		3M							
SALTA PROTECCIÓN TÉRMICA POR AUMENTO DE CONSUMO	60			FALLO CONEXIONES EN EL MOTOR	TERMOGRAFÍA		3M							
SALTA PROTECCIÓN TÉRMICA POR AUMENTO DE CONSUMO	60			FALLO DE ALIMENTACIÓN										
CALENTAMIENTO DEL MOTOR Y SE QUEMA EL DEVANADO	15		FALLO VENTILACIÓN	REJILLA DE LA TAPA DE MOTOR SATURADA					INSPECCIÓN MECANICA	1M				
CALENTAMIENTO DEL MOTOR Y SE QUEMA EL DEVANADO	20			ROTURA DEL VENTILADOR					INSPECCIÓN MECANICA	1M				
RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	125		RODAMIENTOS DAÑADOS	ENTRADA DE AGUA O SUCIEDAD	ANÁLISIS DE VIBRACIONES		3M							
RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	100			FALLO DE ENGRASE	ANÁLISIS DE VIBRACIONES		3M							
RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	125			DESALINEACIÓN CONJUNTO	ANÁLISIS DE VIBRACIONES		3M							
RUIDO, VIBRACIONES Y CALENTAMIENTO	125			MAL MONTAJE										
VIBRACIONES	125		DESBALANCE		ANÁLISIS DE VIBRACIONES		3M							
VIBRACIONES	100	DESBALANCE		ANÁLISIS DE VIBRACIONES		3M								
PARO DE LA TURBINA	24	FALLO TURBINA	ROTURA CHAVETEROS											
VIBRACION Y PARO DE LA TURBINA	96		FALLO FIJACIÓN	PRISIONEROS FLOJOS	ANÁLISIS DE VIBRACIONES		3M							
CALENTAMIENTO DE CONEXIONES	150	FALLO DE SUMINISTRO ELÉCTRICO	CONTACTOR DAÑADO	CONEXIONES FLOJAS	TERMOGRAFÍA									
PARO DE LA TURBINA	240			BOBINA DAÑADA				INSPECCIÓN ELECTRICA	1M					
SALTA PROTECCIÓN TÉRMICA POR AUMENTO DE CONSUMO	60			SOBRECARGA DE LINEAS				INSPECCIÓN ELECTRICA	1A					
CALENTAMIENTO DE CONEXIONES	50		BREAKER PRINCIPAL DAÑADO	CONEXIONES FLOJAS	TERMOGRAFÍA		3M							
SALTA PROTECCIÓN TÉRMICA POR AUMENTO DE CONSUMO	20			SOBRECARGA DE LINEAS	TERMOGRAFÍA		3M							
SALTA PROTECCIÓN TÉRMICA POR AUMENTO DE CONSUMO	20		PROTECCION TERMICA DAÑADA	SOBRECARGA DE LINEAS	TERMOGRAFÍA		3M							
CALENTAMIENTO Y SALTA PROTECCION TÉRMICA POR AUMENTO DE CONSUMO	50		CABLES CONDUCTORES DEFECTUOSOS	SOBRECARGA DE LINEAS	TERMOGRAFÍA		3M							

Fuente: elaboración propia. Selección de la técnica CBM.



### **2.1.3. Fase 3. Selección del mantenimiento adecuado**

Se eligió la técnica a utilizar para cada uno de los equipos, a través del uso de una matriz que contrasta los parámetros de control, con la categoría de equipos, tomando en cuenta también, que se había decidido utilizar termografía y análisis de vibraciones. De esta forma, se determinó si todos los equipos necesitaban de las dos o una de las técnicas para el monitoreo de sus parámetros. También es importante resaltar que el enfoque fue determinar parámetros para monitoreo de condición, dejando de lado en este caso las consideraciones de mantenimiento correctivo y preventivo.

En la fase anterior se desarrollaron los AMFEC para los equipos críticos y en ellos se observaron que muchas de las propuestas de mantenimiento eran de tipo correctivo o preventivo; sin embargo, dada la naturaleza de esta investigación, se soslayaron para dar paso al *CBM*.

Figura 18. Matriz para selección de parámetros *CBM*

Parámetros	Tipo de máquina							
	Motor eléctrico	Turbina de vapor	Turbina de viento	Turbina industrial	Bomba	Compresor	Generador eléctrico	Ventilador
Temperatura	•	•	•	•	•	•	•	•
Presión		•	•	•	•	•		•
Relación de presión			•	•		•		
Caudal de aire			•	•		•		•
Caudal de líquidos		•			•	•		
Corriente	•				•	•	•	•
Voltaje	•					•	•	•
Resistencia	•						•	
Potencia de entrada	•				•	•	•	•
Potencia de salida	•	•	•	•			•	
Ruido	•	•	•	•	•	•	•	•
Vibración	•	•	•	•	•	•	•	•
Presión de aceite		•	•	•	•	•	•	
Vibración	•	•	•	•	•	•	•	•
Consumo de aceite		•	•	•	•	•	•	
Degradación de aceite		•	•	•	•	•	•	
Torque	•	•		•		•	•	
Velocidad	•	•	•	•	•	•	•	•
Eficiencia (derivada)		•	•	•	•	•		•

Fuente: elaboración propia.

#### 2.1.4. Fase 4. Selección de las técnicas de medición

De la figura anterior se derivan las técnicas de medición o de monitoreo que se emplearon por cada categoría de equipos.

En el caso de un motor eléctrico; la temperatura es un parámetro que requiere del uso de medición de radiación infrarroja para determinar su valor.

Los elementos eléctricos del motor, tales como: la caja de conexiones, su arrancador, interruptor principal y conexiones en su tablero de mando también son importantes de monitorear y para esos componentes la técnica idónea es el uso de la termografía. El estado de los rodamientos, la alineación, el balance dinámico y la rigidez de su estructura son parámetros que entran en el alcance de un análisis de vibraciones.

A raíz de este análisis, se dedujo que para un motor eléctrico habremos de utilizar las dos técnicas propuestas.

La siguiente tabla resume las técnicas que se usaron para el monitoreo de condición.

Figura 19. **Tabla de técnicas de monitoreo de condición y equipos de Planta Especialidades**

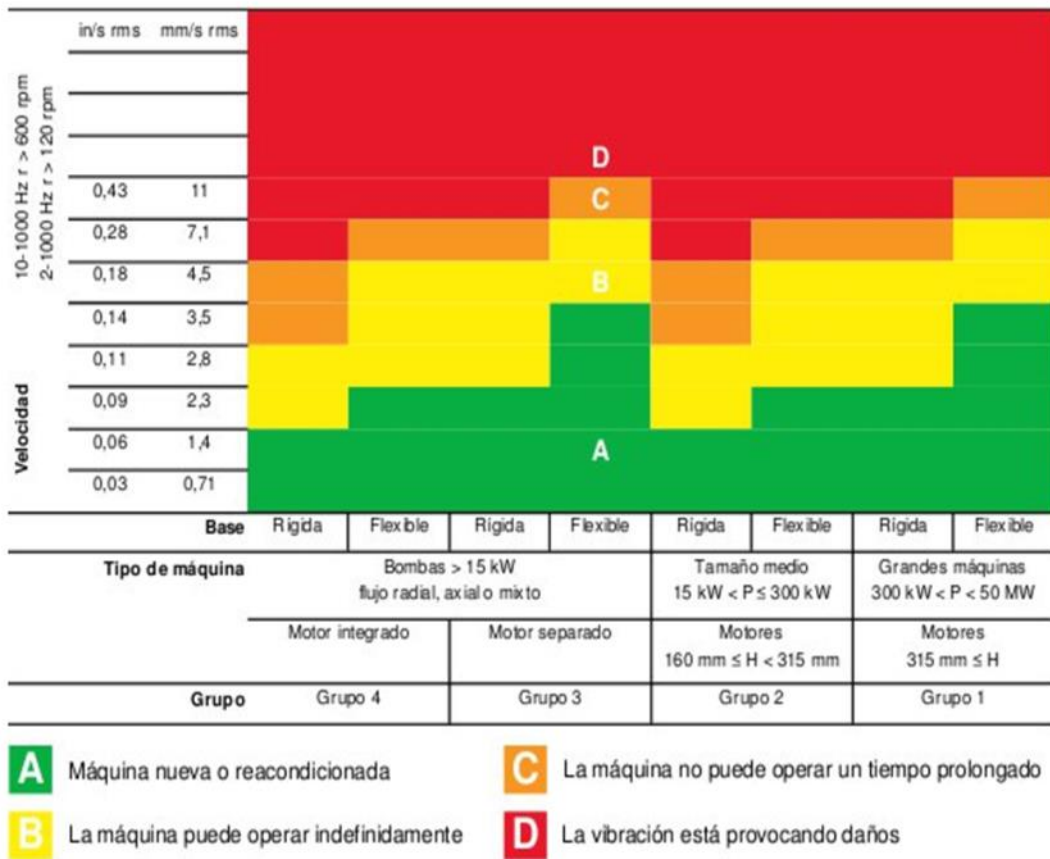
	Motores eléctricos	Bombas	Ventiladores	Compresores	Generadores	Transformadores	Motorreductores
Termografía	•		•	•		•	•
Análisis de vibraciones	•	•	•	•			•
Análisis de lubricantes				•	•		•

Fuente: elaboración propia.

Al realizar las mediciones se fueron obteniendo valores que fueron comparados contra los criterios de aceptación de cada una de las técnicas, siendo el resultado de esta comparación, el parámetro para emitir un diagnóstico de la condición del equipo en ese instante.

Los criterios de severidad están definidos por la norma correspondiente que se haya elegido.

Figura 20. Criterio de evaluación de severidad de vibraciones



Fuente: norma ISO 10816-3 (2003).



Figura 21. **Criterios de severidad utilizados en termografía**

<b>MOTORES ELECTRICOS</b>			
Norma de referencia: ISO TC 108 WD y NETA 1997001. Diferencial entre lineas			
ELEMENTOS ELECTRICOS	$\Delta T > \text{de } 40^{\circ}\text{C}$	$20^{\circ}\text{C} \leq \Delta T \leq 40^{\circ}\text{C}$	$5^{\circ}\text{C} \leq \Delta T \leq 20^{\circ}\text{C}$
	Reparar de inmediato	Reparar tan pronto sea posible	Reparar cuando el tiempo lo permita
			$\Delta T < 5^{\circ}\text{C}$ Normal
<b>MOTORES ELECTRICOS</b>			
Norma de referencia: ISO TC 108 WD y NETA 1997001. Diferencial entre lineas			
ELEMENTOS ELECTRICOS	$\Delta T > \text{de } 40^{\circ}\text{C}$	$20^{\circ}\text{C} \leq \Delta T \leq 40^{\circ}\text{C}$	$5^{\circ}\text{C} \leq \Delta T \leq 20^{\circ}\text{C}$
	Reparar de inmediato	Reparar tan pronto sea posible	Reparar cuando el tiempo lo permita
			$\Delta T < 5^{\circ}\text{C}$ Normal
<b>COJINETES DE MOTOR</b>			
Norma de referencia: Especificaciones técnicas de las grasas estándares y especiales SKF			
ELEMENTOS ELECTRICOS	$\Delta T > \text{de } 120^{\circ}\text{C}$	$100^{\circ}\text{C} \leq \Delta T \leq 120^{\circ}\text{C}$	$\Delta T < 100^{\circ}\text{C}$
	Reparar de inmediato	Reparar tan pronto sea posible	Normal

Fuente: elaboración propia, resumiendo criterios de severidad de termografía para motores eléctricos.

### 2.1.5. Fase 5. Recolección de datos y análisis

Esta es la fase en la que se ejecutaron las mediciones utilizando cada una de las técnicas propuestas. Esta recolección fue realizada en forma mixta, utilizando los servicios de empresas dedicadas al monitoreo de condición y personal de mantenimiento entrenado y certificado.

- Análisis de termografía. Realizados por personal entrenado y certificado del departamento de mantenimiento utilizado una cámara termográfica Flir E60.
- Análisis de vibraciones. Realizados por una empresa certificada en Análisis de vibraciones, quienes entregaron reportes por ruta y por equipo, utilizando un analizador de vibraciones DSP Logger Expert.

Los resultados de termografía y análisis de vibraciones se documentan en formatos propios de cada una de las técnicas; sin embargo no se consolidaba

toda la información para analizar tendencias o estado general de los equipos, lo que propiciaba que se desaprovechara esta valiosa fuente de información.

El resultado de esta fase es la consolidación de una base de datos para facilitar el análisis de los mismos y empezar a generar tendencias.

En la sección de apéndices se muestran los formatos originales de donde se tomó la información que se muestra resumida a continuación:

Figura 22. **Ejemplo de inspección de motores de compresores**

**INSPECCION DE COMPRESORES DE AMONIACO FRICK (MOTORES)**

	Frick 68	Frick 177B	Frick 222B 150Hp	Frick 270	Frick 100	Frick 85	Frick 39	
Código								
Ubicación	1er. Nivel Mantto.	Area compresores P. E	Area compresores P. E	2do. Nivel P. B.	2do. Nivel P. B.	2do. Nivel P. B.	2do. Nivel P. B.	
% de carga	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
Caja de conexiones, °C	50.8	58	41.5	38.5	> 150°C	40.2	41.5	
Interruptor principal, °C	59	55.6	no se pudo medir	50.9	no tiene			
Contactador, °C	59	48	no se pudo medir	51.8	66.4			
Motor, °C	51.6	66.9	50.2	47.4	65.4	48	52.7	
Cojinete de carga, °C	no se pudo medir	47.5	38.3	36.9	39.5	39.5	36	
Cojinete libre, °C	41	44.8	35.1	36.5	39	38.7	40	
Acople mecánico, °C	46	19.9	39.8	44.9	37	36	40	
Fecha de termograma	15/08/2018	20/08/2018	22/08/2018	16/08/2018	16/08/2018	16/08/2018	16/08/2018	

Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Reporte de ruta de análisis de vibraciones**

INFORME DE ANALISIS DE VIBRACIONES																														
<table border="1"> <tr> <td>Fecha</td> <td>5/01/2018</td> </tr> <tr> <td>Realizado por</td> <td>Industrias Einstein</td> </tr> <tr> <td>Area o proceso</td> <td>Motores eléctricos de equipos críticos</td> </tr> <tr> <td>Equipo utilizado</td> <td>Analizador DPS</td> </tr> </table>					Fecha	5/01/2018	Realizado por	Industrias Einstein	Area o proceso	Motores eléctricos de equipos críticos	Equipo utilizado	Analizador DPS	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Status</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>FS</td> <td>Fuera de servicio</td> </tr> <tr> <td>MA</td> <td>En mantenimiento</td> </tr> <tr> <td>OP</td> <td>En operación</td> </tr> <tr> <td>PC</td> <td>Prueba con carga</td> </tr> <tr> <td>AI</td> <td>Acceso inseguro</td> </tr> <tr> <td>PV</td> <td>Prueba en vacío</td> </tr> <tr> <td>N/D</td> <td>No disponible</td> </tr> </tbody> </table>		Status		FS	Fuera de servicio	MA	En mantenimiento	OP	En operación	PC	Prueba con carga	AI	Acceso inseguro	PV	Prueba en vacío	N/D	No disponible
					Fecha	5/01/2018																								
					Realizado por	Industrias Einstein																								
					Area o proceso	Motores eléctricos de equipos críticos																								
					Equipo utilizado	Analizador DPS																								
Status																														
FS	Fuera de servicio																													
MA	En mantenimiento																													
OP	En operación																													
PC	Prueba con carga																													
AI	Acceso inseguro																													
PV	Prueba en vacío																													
N/D	No disponible																													
<b>RECOLECCIÓN DE DATOS DE VIBRACIONES MECÁNICAS EN MOTORES ELÉCTRICOS</b>																														
Fecha de análisis	Status	Descripción del equipo	Grupo ISO 10816	Máximo valor global mm/seg. RMS	Condición según Norma ISO 10816																									
19/11/2017	OP/PC	Motor turbina # 1 túnel Frigoscandia 2	Grupo 2 base rígida	2.33	Operación normal																									
19/11/2017	OP/PC	Motor turbina # 2 túnel Frigoscandia 2	Grupo 2 base rígida	2.02	Máquina reacondicionada																									
19/11/2017	OP/PC	Motor turbina # 1 túnel Supertrak	Grupo 2 base rígida	8.935	No operar																									
19/11/2017	OP/PC	Motor turbina # 2 túnel Supertrak	Grupo 2 base rígida	8.2	No operar																									
19/11/2017	OP/PC	Motor turbina # 3 túnel Supertrak	Grupo 2 base rígida	11.6	No operar																									
19/11/2017	OP/PC	Motor eléctrico molino Urschell	Grupo 2 base rígida	3.05	Operación normal																									
19/11/2017	OP/PC	Motor eléctrico molino POSS 2500	Grupo 2 base rígida	17.24	No operar																									
19/11/2017	OP/PC	Motor eléctrico compresor Sabroe # 2, H. Fessmann	Grupo 2 base rígida	6.37	No operar																									
20/11/2017	OP/PC	Motor eléctrico bomba de recirculación chiller Morris	Grupo 2 base rígida	4.09	Operación normal																									
19/11/2017	OP/PC	Motor eléctrico equipo hidráulico Línea 1	Grupo 2 base rígida	0.622	Máquina reacondicionada																									
19/11/2017	OP/PC	Motor eléctrico equipo hidráulico Línea 2	Grupo 2 base rígida	3.2	Operación normal																									

Fuente: elaboración propia.

Los datos de temperatura y vibraciones deben recolectarse de forma correcta y confiable, también deben realizarse con la frecuencia correcta, lo que dará como resultado una programación del *CBM*. Es importante hacer notar que una base de datos históricos es más confiable entre más grande sea el período durante el cual se han recolectado, ya que esta será el instrumento que en el futuro se podrá utilizar para intentar predecir las fallas funcionales.

Estas frecuencias se verán más detenidamente en la propuesta de la gestión de *CBM*.

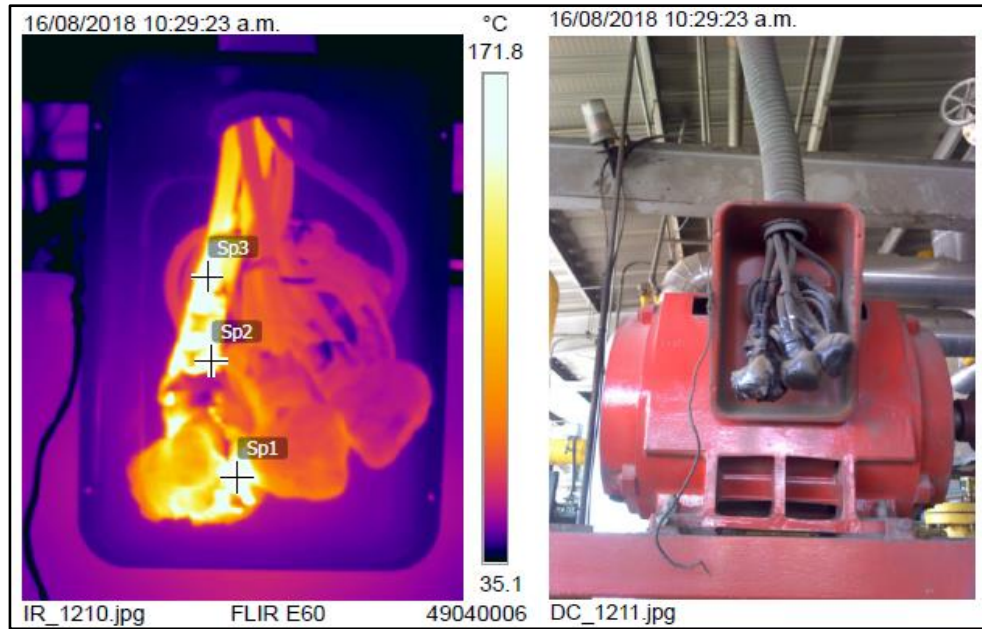
### **2.1.6. Fase 6. Determinación de los planes de acción**

Durante la fase de recolección de datos, se encontraron registros con datos de termografía y vibraciones que mostraban anomalías, o sea valores fuera del rango establecido por la norma correspondiente, que habían sido dejados sin ninguna acción de seguimiento o correctiva.

Para establecer un programa acorde a ISO 17359, cada anomalía o desviación de la norma de cada parámetro medido debe ser sujeto de una evaluación para determinar la acción correspondiente para llevar el valor al rango de severidad aceptado. Considerar el caso ilustrado en la tabla resumen de termografía; el motor del compresor Frick 100 mostraba un diferencial de temperatura mayor a 150°, una condición crítica de acuerdo al criterio de severidad definido y que requería parar el equipo y realizar la corrección de forma inmediata. En este caso, al ser una sola anomalía la reportada en el grupo de motores de compresores, el plan de acción consistió en coordinar con el departamento de producción, una parada en las siguientes dos horas y establecer contacto con un proveedor que realizase el cambio de conductores eléctricos el mismo día. El resultado de esta acción correctiva fue evitar un paro no planificado del equipo y un paro inesperado en el proceso productivo con costos impredecibles.

La siguiente figura ilustra la situación descrita.

Figura 24. **Anomalía con severidad crítica en un motor de compresor**



Fuente: elaboración propia.

En la situación de la figura 24, la cámara estaba ajustada en un rango de  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$ , debido a que no se esperaba ese valor tan alto de temperatura, la cual en ese momento sobrepasaba los  $250^{\circ}\text{C}$ .

En un análisis de termografía o de vibraciones de un grupo de motores, la situación podría variar significativamente, si bien con el tiempo, las anomalías tenderán a disminuir debido a la naturaleza del *CBM*. En su fase inicial, el *CBM* tiende a encontrar numerosas fallas potenciales que requerirán un enfoque correctivo más amplio, por lo que el plan de acciones correctivas deberá incluir todas y estas deberán ejecutarse antes de la siguiente fecha de monitoreo.

La organización tiene sus modelos de planes de acciones correctivas, por lo que el formato dependerá de quien realice el plan, lo importante en este caso es que el plan se diseñe y se ejecute sin falta, de lo contrario afectará la ejecución del *CBM*.

Implementar este seguimiento de cada anomalía detectada por el *CBM*, así como su documentación permite que se puedan graficar las tendencias de cada motor y en un futuro predecir estadísticamente su falla funcional, pero antes que nada planear la intervención de mantenimiento oportuna.

### **2.1.7. Fase 7. Revisión y mejora continua**

Esta es la fase final del modelo sugerido por la norma ISO 17359, pero no es menor en importancia o jerarquía, de hecho es la fase en la que se hará un alto para visualizar situaciones o complicaciones encontradas y planificar como anticiparlas con el objetivo de ir mejorando, con el tiempo, la aplicación del modelo de *CBM*.

## **2.2. Instrumentos y equipos de recopilación de la información**

- Equipo de termografía: se utilizó una cámara termográfica Flir E60, que es una cámara liviana, pero potente, que combina imágenes digitales con su respectiva imagen infrarroja, diseñada para aplicaciones de mantenimiento predictivo en instalaciones eléctrica y mecánicas.

Para el registro y procesamiento de la información, que en nuestro caso es el instrumento de recopilación, la cámara Flir E60 utiliza el software Flir Tools exclusivo de la marca.

Figura 25. **Cuadro de características de cámara termográfica Flir E60 empleada para análisis de termografía de equipos críticos**

<b>Características del detector y la lente</b>		
Resolución IR	320x240 (76.800 píxeles)	
Sensibilidad térmica / NETD	<0.05°C	
Campo de visión	25° x 19°	
Enfoque	Manual	
<b>Presentación de imagen</b>		
Pantalla	Táctil 3.5"	
Ajuste campo temperaturas	Automático / Manual	
<b>Modos presentación imagen</b>		
Imagen infrarroja	si	
Imagen visible	si	
Imagen Dinámica	si	
Multiespectral (MSX)	si	
Imagen en Imagen (PiP)	si	
<b>Medición</b>		
Rango de temperatura	-20°C a +120°C 0°C a +650°C	
Precisión	±2°C o ±2% para temperatura ambiente	
<b>Almacenamiento de datos</b>		
Imagen IR radiométrica	si	
Imagen visual	si	
Vídeo IR no radiométrico	si	
<b>Vídeo streaming</b>		
Vídeo IR radiométrico	si	
Vídeo IR no radiométrico	si	

Fuente: <https://www.flir.com.mx/browse/professional-tools/thermography-cameras/>, (2018).

- Equipo para análisis de vibraciones: para los de análisis de vibraciones se utilizó un analizador Semapi DSP Logger Expert, que es un hardware multi-canal, analizador FFT para el mantenimiento predictivo y diagnóstico de máquinas rotativas. El instrumento para la recolección y procesamiento de datos será el software DSP Logger Expert, en el cual

se generarán los reportes individuales y reportes de ruta de medición de vibraciones de equipos críticos.

Figura 26. **Cuadro de características de analizador DSP Logger Expert para análisis de vibraciones de equipos críticos**

Resumen de características	
<p>Canales de entradas:6 (SEIS)</p> <p>Sensores AC / DC</p> <p>Sensores Acelerómetros 1 a 1000 mV</p> <p>Sensores velocímetros</p> <p>Entrada de tacómetro universal óptico</p> <p>Entrada de tacómetro magnético</p> <p>TTL/análogo programable hasta <math>\pm 25V</math></p> <p>RPM rango 1...99.999</p>	
<p>Precisión de medición: 1%</p> <p>Rango dinámico: 95 db</p> <p>Resolución Programable: 400, 800, 1600, 3200, 6400, 12800 y 25600 líneas</p> <p>Ventana de medición: Hanning, Flat top, Rectangular</p>	
<p>Respuesta en frecuencia 0,2 a 20Khz</p> <p>Corte de bajas frecuencias 0.18...100 Hz</p> <p>Promedios programable desde 1 a 4096</p> <p>Peak Hold, y Continuo</p> <p>Cursor fijo y de barrido, armónicos automática</p> <p>Modos de Trigger:Externo, óptico o Laser.</p> <p>Trigger Level: Fijo y automático</p> <p>Configuración de amplitud y pendiente</p> <p>Datos de medición en el Display Espectro de multicanales.</p> <p>Valor de fase, órbita, proceso, trend, espectro</p> <p>2 (dos) sensores tri-axiales, simultáneos.</p>	

Fuente: <http://www.dsplogger.com/analizador-y-balanceo>, (2018).



### 3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1. Presentación de resultados de análisis de termografía

Un reporte de termografía típico del motor eléctrico de un compresor de refrigeración por amoníaco comprende: los valores de temperatura de la carcasa, de los cojinetes del lado de carga y lado libre del motor, la caja de conexiones eléctricas y los componentes del panel eléctrico, que como mínimo debería incluir el interruptor principal, el contactor y su respectivo guarda motor.

Para cada uno de estos elementos, el valor de temperatura se obtiene de un termograma individual, de ahí que fácilmente se genera una gran cantidad de imágenes, y dependiendo de la cantidad de motores en observación, la cantidad de información gráfica se va tornando muy difícil de visualizar y administrar. Los siguientes termogramas son ilustrativos de lo descrito:

Figura 27. **Termogramas de un motor de 300 Hp de compresor de refrigeración**

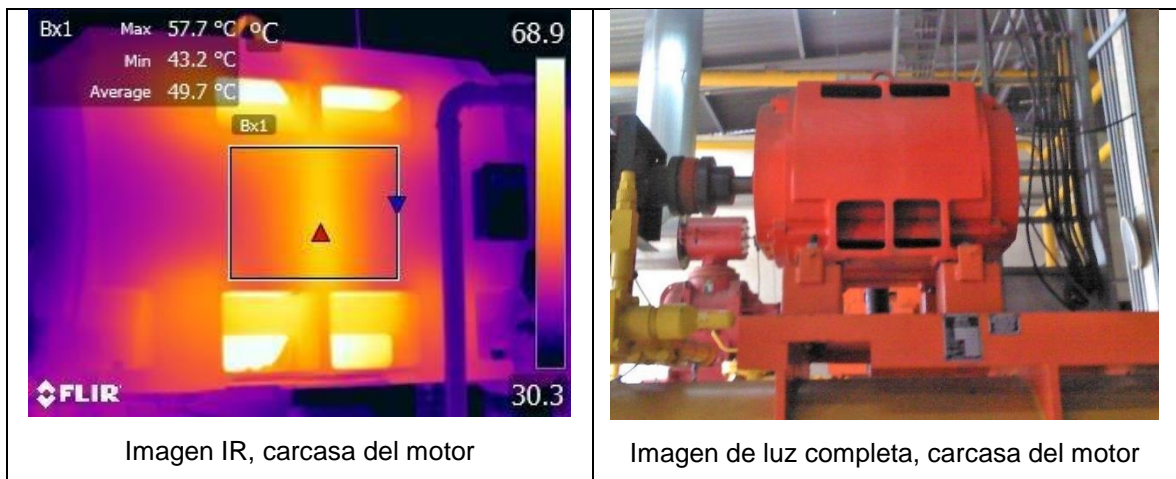




Imagen IR, cojinete lado libre



Imagen de luz completa, cojinete lado libre



Imagen IR, cojinete de carga



Imagen de luz completa, cojinete de carga



Imagen IR, interruptor principal

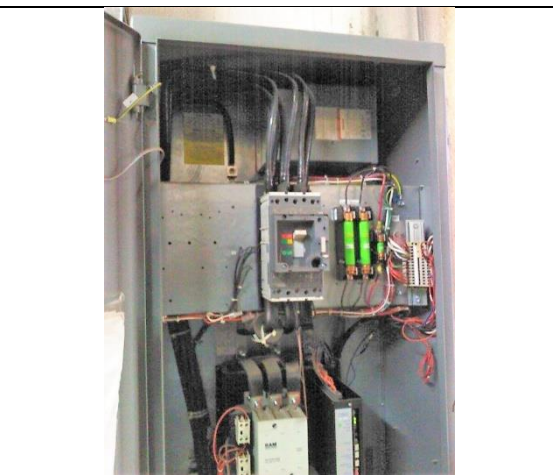


Imagen de luz completa, interruptor principal

Fuente: elaboración propia, termogramas de un motor eléctrico.

Teniendo en cuenta lo anterior se comprende la necesidad de resumir esta información de una manera simple que permita conocer de forma rápida el estado de los equipos y facilitar con ello la toma de decisiones al encontrar una anomalía térmica. Para los ingenieros o responsables del mantenimiento de los equipos, es posible que esta información resulte práctica y fácilmente comprensible; sin embargo, las gerencias no siempre están ocupadas por personas que tengan un conocimiento tan técnico, por lo que información debe ser suministrada en términos que sean fácilmente comprensibles y que cumplan su función de ser una herramienta para la toma de decisiones.

El siguiente cuadro muestra los resultados de una ruta de termografía realizadas a los motores de compresores de amoníaco seleccionados para el monitoreo de condición.

Figura 28. Reporte de termografía de equipos críticos

INFORME DE TERMOGRAFÍA								
Fecha de inspección: 18 al 22 de octubre			Frecuencia: Trimestral					
Realizado por: César Tejaxún			Próxima fecha de inspección			15/12/2018		
<b>CRITERIOS DE SEVERIDAD</b>								
<b>MOTORES ELECTRICOS</b>								
ELEMENTOS ELECTRICOS Norma de referencia: ISO TC 108 WD y NETA 1997001. Diferencial entre puntos similares o temperatura ambiente								
$\Delta T > \text{de } 40^{\circ}\text{C}$	$20^{\circ}\text{C} \leq \Delta T \leq 40^{\circ}\text{C}$		$5^{\circ}\text{C} \leq \Delta T \leq 20^{\circ}\text{C}$		$\Delta T < 5^{\circ}\text{C}$			
Reparar de inmediato	Reparar tan pronto sea posible		Reparar cuando el tiempo lo permita		Normal			
CARCASA DEL MOTOR Norma de referencia: ISO TC 108 WD y NETA 1997001. Comparativamente con motores similares en condición normal								
$\Delta T > \text{de } 40^{\circ}\text{C}$	$20^{\circ}\text{C} \leq \Delta T \leq 40^{\circ}\text{C}$		$5^{\circ}\text{C} \leq \Delta T \leq 20^{\circ}\text{C}$		$\Delta T < 5^{\circ}\text{C}$			
Reparar de inmediato	Reparar tan pronto sea posible		Reparar cuando el tiempo lo permita		Normal			
COJINETES DE MOTOR Norma de referencia: Especificaciones técnicas de las grasas estándares y especiales SKF								
$\Delta T > \text{de } 120^{\circ}\text{C}$	$100^{\circ}\text{C} \leq \Delta T \leq 120^{\circ}\text{C}$					$\Delta T < 100^{\circ}\text{C}$		
Reparar de inmediato	Reparar tan pronto sea posible					Normal		
<b>INSPECCION DE COMPRESORES DE AMONIACO FRICK (MOTORES)</b>								
	Frick RXF 68	Frick RWB 177B	Frick 222B 150Hp	Frick RWB 270	Frick RWB 100	Frick RXF 85	Frick RXF 39	
Potencia, HP	125	500	150	300	150	235	75	
Ubicación	1er. Nivel Manto.	Area compresores P. E	Area compresores P. E	2do. Nivel P. B.	2do. Nivel P. B.	2do. Nivel P. B.	2do. Nivel P. B.	
% de carga	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
Caja de conexiones, °C	36.5	44.3	36.1	39.4	46.7	43.5	49.8	
Interruptor principal, °C	40.5	51	No se pudo medir	53.9	64.2	49.2	48	
Contactor, °C	50.4	44	No se pudo medir	48.8	71	53	47.5	
Motor, °C	41.5	49.7	44.2	45.4	53.9	45.8	60.2	
Cojinete de carga, °C	58	41.3	32.2	35.3	37.2	41.3	70.7	
Cojinete libre, °C	31	36.2	31.6	36.1	36	40.2	66	
Acople mecánico, °C	42.5	45.3	37	33.3	32.2	40.8	58.6	
Fecha de termograma	18/10/2018	19/10/2018	19/10/2018	18/10/2018	18/10/2018	23/10/2018	23/10/2018	
	Compresor Sabroe #1	Compresor Sabroe # 2	Compresor Sabroe # 2 H.					
Potencia, HP	100	75	125					
Ubicación	2o. Nivel PB	2o. Nivel PB	Area compresores PF					
% de carga	100%	100%	100%					
Caja de conexiones, °C	41	37.4	41.5					
Interruptor principal, °C	40.7	34.2	40.7					
Contactor, °C	60.4	33.4	39.9					
Motor, °C	46.9	38.2	48.6					
Cojinete de carga, °C	no se puede medir	no se puede medir	no se puede medir					
Cojinete libre, °C	35.8	38.3	37					
Acople mecánico, °C	no tiene	no tiene	no tiene					
Fecha de termograma	23/10/2018	18/10/2018	23/10/2018					

Esta tabla muestra los valores máximos medidos en cada elemento y su condición ha sido asignada de acuerdo al criterio de severidad.

Fuente: elaboración propia, reporte de ruta de termografía de motores de compresores de refrigeración.

### 3.1.1. Análisis estadístico de termografía

El siguiente análisis estadístico está realizado sobre los resultados de la ruta de termografía, con el objetivo de mostrar la utilidad de la técnica de diagrama de cajas y bigotes o diagrama boxplot, como se denominará de aquí en adelante, para analizar grupos más grandes de motores; lo cual sería normal en una industria grande, como en este caso, la industria avícola.

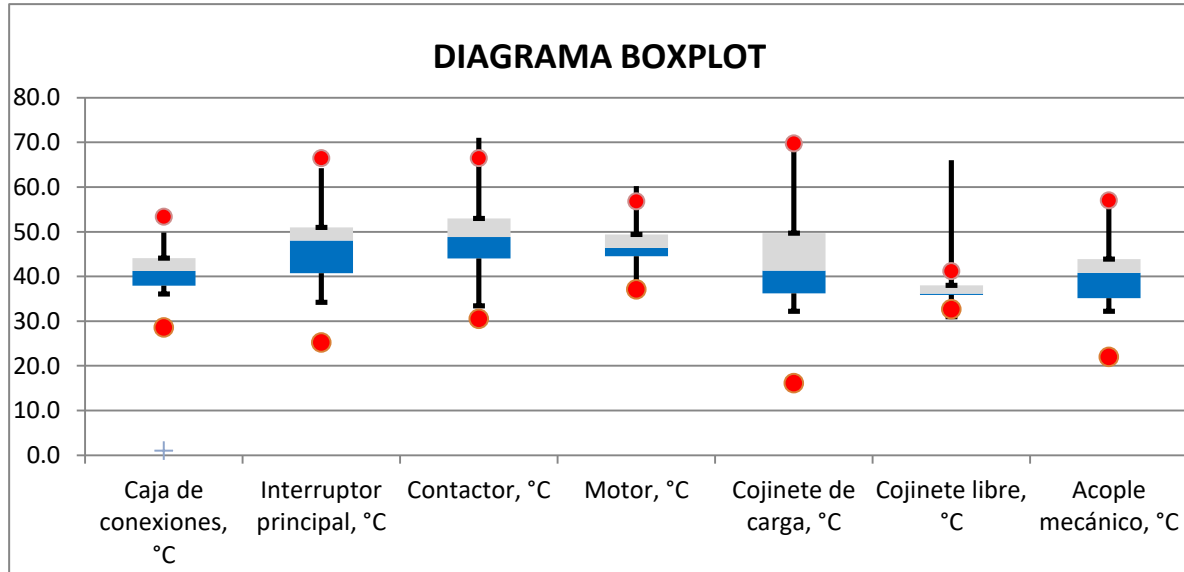
Tabla I. Disposición de datos para análisis Boxplot

	Caja de conexiones, °C	Interruptor principal, °C	Contactador, °C	Motor, °C	Cojinete de carga, °C	Cojinete libre, °C	Acople mecánico, °C
Mínimo	36.1	34.2	33.4	38.2	32.2	31.0	32.2
Q1	37.9	40.7	44.0	44.5	36.3	35.9	35.2
Mediana	41.3	48.0	48.8	46.4	41.3	36.2	40.8
Q3	44.1	51.0	53.0	49.4	49.7	38.0	43.9
Máximo	49.8	64.2	71.0	60.2	70.7	66.0	58.6
RIQ	6.2	10.3	9.0	4.9	13.4	2.1	8.8
Datos atípicos 1	28.6	25.3	30.5	37.1	16.2	32.7	22.0
Datos atípicos 2	53.4	66.5	66.5	56.8	69.8	41.2	57.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mínimo	36.1	34.2	33.4	38.2	32.2	31.0	32.2
Q1	1.8	6.5	10.6	6.3	4.1	4.8	3.0
Mediana	3.4	7.3	4.8	1.8	5.1	0.3	5.7
Q3	2.8	3.0	4.2	3.1	8.4	1.8	3.1
Máximo	5.7	13.2	18.0	10.8	21.1	28.0	14.7

Fuente: elaboración propia, preparación de datos para análisis gráfico.

Este análisis agrupa los valores de cada parámetro observado en el grupo de motores y lo muestra en conjunto en una sola caja, de esta forma se puede visualizar si los parámetros están en el mismo rango, utilizando los valores atípicos como límites para esa variable.

Figura 29. **Condición termográfica de motores de compresores de refrigeración**



Fuente: elaboración propia.

Estos datos representan los valores de temperatura de los componentes más importantes de los motores de refrigeración y la desviación de cualquiera de estos valores debe ser objeto de análisis, para determinar la acción correctiva que sea necesaria aplicar.

Esto permite hacer un análisis del grupo de motores en vez de realizarlo individualmente, por supuesto, con el tiempo, si se sigue estrictamente el programa de *CBM* se generarán tendencias individuales que ayudarán a definir el comportamiento individual de cada motor.

### **3.2. Presentación de resultados de análisis de vibraciones**

De acuerdo a Semapi (2018), los datos de vibraciones recolectados se presentan medidos en *RMS*, siglas en inglés de la raíz media cuadrática, también conocida en el ámbito de los análisis de vibraciones como la vibración efectiva de un equipo.

Para fines prácticos, este es el valor que finalmente interesa, debido a que esta magnitud es la que se contrasta contra los valores de la norma ISO 10816-3, que definen los límites permitidos de vibración para equipos rotativos, principalmente motores y bombas.

Al propietario, gerente o responsable de los equipos de una planta le interesará conocer el estado general o condición de un equipo más que los detalles técnicos que se consignan en un reporte de vibraciones mecánicas, debido a que su mayor interés será la disponibilidad de los mismos y no las fallas funcionales y menos las fallas incipientes.

Figura 30. **Resultados de análisis de vibraciones mecánicas en motores eléctricos críticos de planta especialidades**

Fecha de análisis	Status	Descripción del equipo	Grupo ISO 10816	Rango RMS en mm/seg.	Máximo valor global mm/seg. RMS	Condición según Norma ISO 10816
19/11/2017	OP/PC	Motor turbina # 1 túnel Frigoscandia 2	Grupo 2 base rígida	0.71-4.5	2.33	Operación normal
19/11/2017	OP/PC	Motor turbina # 2 túnel Frigoscandia 2	Grupo 2 base rígida	0.71-4.5	2.02	Máquina reacondicionada
19/11/2017	OP/PC	Motor turbina # 1 túnel Supertrak	Grupo 2 base rígida	0.71-4.5	8.935	No operar
19/11/2017	OP/PC	Motor turbina # 2 túnel Supertrak	Grupo 2 base rígida	0.71-4.5	8.2	No operar
19/11/2017	OP/PC	Motor turbina # 3 túnel Supertrak	Grupo 2 base rígida	0.71-4.5	11.6	No operar
19/11/2017	OP/PC	Motor eléctrico molino Urschell	Grupo 2 base rígida	0.71-4.5	3.05	Operación normal
19/11/2017	OP/PC	Motor eléctrico molino POSS 2500	Grupo 2 base rígida	0.71-4.5	17.24	No operar
19/11/2017	OP/PC	Motor eléctrico compresor Sabroe # 2, H. Fessmann	Grupo 2 base rígida	0.71-4.5	6.37	No operar
19/11/2017	OP/PC	Motor eléctrico compresor Sabroe, H. York 1	Grupo 2 base rígida	0.71-4.5	7.2	No operar
19/11/2017	OP/PC	Motor eléctrico compresor Sabroe, H. York 2	Grupo 2 base rígida	0.71-4.5	7.6	No operar
13/09/2017	FS	Motor eléctrico compresor Ingersoll rand	Grupo 2 base rígida	0.71-4.5	5.9	No operar
13/09/2017	OP/PC	Motor eléctrico sistema hidráulico F. Alco	Grupo 2 base rígida	0.71-4.5	6.12	Operación restringida
20/11/2017	OP/PC	Motor eléctrico bomba de recirculación chiller Morris	Grupo 2 base rígida	0.71-4.5	4.09	Operación normal
19/11/2017	OP/PC	Motor eléctrico de ventilador de tiro inducido (C. biomasa)	Grupo 2 base rígida	0.71-4.5	1.951	Operación normal
19/11/2017	OP/PC	Motor eléctrico equipo hidráulico Línea 1	Grupo 2 base rígida	0.71-4.5	0.622	Máquina reacondicionada
19/11/2017	OP/PC	Motor eléctrico equipo hidráulico Línea 2	Grupo 2 base rígida	0.71-4.5	3.2	Operación normal

Fuente: elaboración propia.

La presentación en este formato de los datos podrá resultar muy práctica cuando la cantidad de equipos es limitada, como el caso ejemplificado en el cuadro anterior; sin embargo, es común que una industria pueda llegar a tener una cantidad mucho mayor de motores en sus operaciones, por lo que es recomendable utilizar un método más sencillo de presentar los resultados, que permita conocer visual y rápidamente los resultados generales y detectar con facilidad cualquier desviación de los valores de la norma ISO 10816-3.

### 3.2.1. Análisis estadístico de vibraciones

El análisis mediante un diagrama Boxplot resulta muy práctico y fácil de construir e interpretar.



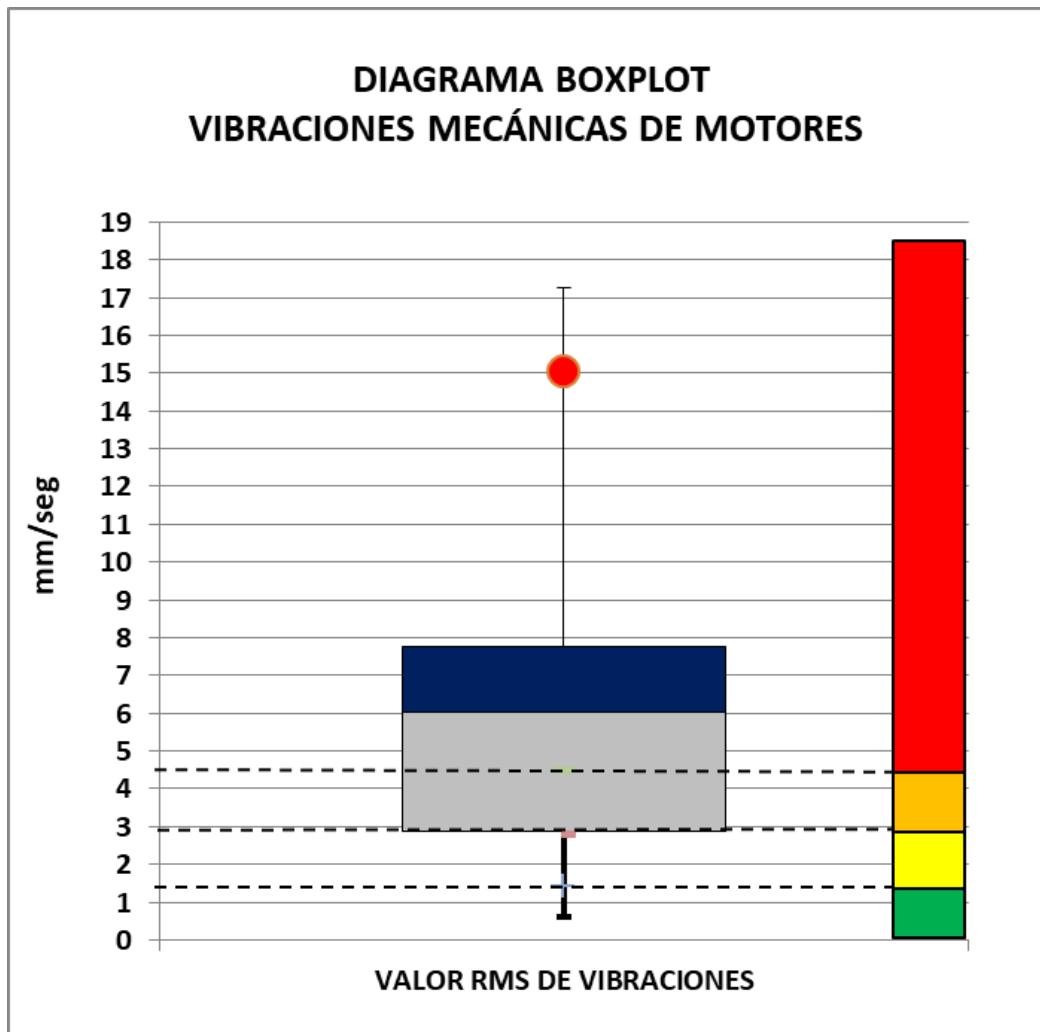
Proporciona de forma inmediata una imagen del estado general de los motores analizados, convirtiendo esta información en una herramienta para la toma de decisiones estratégicas del mantenimiento de los equipos críticos de la planta.

Tabla II. **Datos para análisis Boxplot de vibraciones**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>para gráfico</b>
Mínimo	0.622	0.622
Q1	2.87	2.248
Mediana	6.01	3.14
Q3	7.75	1.74
Máximo	17.24	9.49
RIQ	4.88	
Datos atípicos 2	15.07	

Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Gráfico de vibraciones del grupo de motores de compresores de refrigeración**



Fuente: elaboración propia.

Los resultados del gráfico anterior muestran el nivel de vibraciones en el que se encontró el grupo de motores críticos de este estudio; muestran a primera vista un número grande en condición crítica, lo cual hasta cierto punto era de esperarse, debido a que rutinas de análisis de vibraciones no se efectúan con una frecuencia definida y también concuerda con la teoría básica

del mantenimiento predictivo, en cuanto a que al inicio, el monitoreo de condición generaría una gran cantidad de mantenimientos correctivos.

Esto de acuerdo a Mobley (2002) contribuye, sumado al costo de tecnología y entrenamiento, a la alta inversión inicial para instalación de un sistema *PdM*, debido a que un programa *CBM*, debe ser visto como una adición a cualquier gestión previa de mantenimiento y no como un programa separado. Después de la etapa inicial de instalación, los costos disminuirán debido a la disminución de intervenciones preventivas y correctivas de mantenimiento.

Tabla III. **Cuadro comparativo del estado general de motores críticos según norma ISO 10813-3**

Condición según ISO 10816-3	Cantidad de motores
Equipo nuevo o reacondicionado	2
Operación normal	5
Operación restringida	1
No operar	8
	16

Fuente: elaboración propia.

El cuadro anterior es un resumen ejecutivo de una ruta de medición de vibraciones, que indica el estado general de un grupo de motores, es información breve, clara y muy útil como herramienta para tomar decisiones para elaborar un plan de acciones correctivas.

### **3.3. Propuesta del modelo de gestión de monitoreo de condición bajo la norma ISO 17359:2011.**

Este modelo consta de tres elementos principales, el primero es una descripción general de cada uno de los pasos que se ilustran en el diagrama general de flujo *CBM*, que ha sido desarrollado tomando como guía la norma ISO 17359:2011; el segundo elemento es el plan estratégico anual de termografía, y el tercero es el plan estratégico de análisis de vibraciones, se ha elegido un año para evaluar posibles ampliaciones en el presupuesto para incluir crecimientos en el programa, como adquisiciones de nuevos equipos o certificaciones al personal.

#### **3.3.1. Descripción del modelo de gestión**

##### **3.3.1.1. Elección del equipo**

- Cuando se dé de alta un equipo nuevo en la planta de producción, se debe realizar un análisis de criticidad para determinar su importancia relativa en el proceso productivo. Si el resultado de este análisis arroja que el equipo es crítico de categoría A, se procederá a realizar el AMFEC.
- El estudio de análisis de modos de falla, efectos y criticidad debe realizarse a todos aquellos equipos críticos en el proceso productivo de la planta para determinar qué tipos de parámetros se deben monitorear e incluirse en el *CBM*. Después de haber obtenido las variables a monitorear, se deberán establecer las frecuencias de toma de datos e incluir el equipo en el plan *CBM*.

### **3.3.1.2. Preparación del instrumento**

Se debe preparar el equipo de acuerdo a la variable a monitorear, si es temperatura, el equipo será el de termografía y si son vibraciones, el analizador de vibraciones.

Antes de iniciar la ruta, se deberá verificar que se cuentan con todos los instrumentos secundarios además del equipo principal y verificar que los equipos a monitorear estén en operación.

### **3.3.1.3. Toma de datos**

La recolección de datos se deberá realizar siguiendo la calendarización respectiva del programa de *CBM* correspondiente, termografía o análisis de vibraciones. Utilizar los instrumentos de recopilación correspondiente a cada técnica además de la información que se almacena en la cámara o analizador.

### **3.3.1.4. Análisis de datos**

Los datos recolectados en cada ruta de termografía o análisis de vibraciones deben descargarse a una computadora inmediatamente después de haber finalizado, deberán archivar en una carpeta identificada por fecha. Además del almacenamiento se deberán tomar las precauciones que se consideren pertinentes para proteger la información de cada ruta predictiva.

Se debe realizar un análisis por cada equipo monitoreado, utilizando el software correspondiente y cotejar los resultados contra la norma de referencia para determinar si existe alguna anomalía.

### **3.3.1.5. Hallazgo de una anomalía**

- Si se encuentra que un equipo está fuera de los valores permitidos por la norma de referencia se deberá notificar al jefe y gerente de mantenimiento simultáneamente.
- El jefe o gerente de mantenimiento, deberá analizar el tipo de anomalía y con base al grado de severidad deberá programar la acción correctiva que se requiera.

Si la anomalía es corregida inmediatamente o en los días subsiguientes, se deberá volver a realizar la medición de la variable en el equipo reportado para verificar la efectividad de dicha acción correctiva. Si la acción correctiva no se puede realizar en forma inmediata, se procederá a la elaboración del reporte.

### **3.3.1.6. Elaboración del reporte**

Se debe realizar un reporte por cada equipo monitoreado, incluyendo en él toda la información hasta el detalle que sea necesario, para entender la naturaleza y origen de la anomalía; estos reportes serán extensos, debido a la cantidad de termogramas o espectros de vibraciones que se generarán por cada equipo monitoreado, sin embargo se deberán realizar y archivarse de forma segura.

Paralelamente a los reportes de cada equipo se deberá realizar un reporte ejecutivo en el que se deberá resumir la información de estado o condición actual de todos los equipos monitoreados, utilizando la herramienta de semáforo, en la que los niveles de severidad se asocian a un color específico.

Este reporte es el que finalmente se debe presentar a la dirección de mantenimiento.

#### **3.3.1.7. Archivo de datos *CBM***

El archivo de datos es un paso muy importante, por lo tanto, se debe realizar de forma centralizada que garantice el acceso a cualquier dato de manera fácil, rápida y de forma que garantice la integridad de toda la información. Esta base de datos debe tener la capacidad de proporcionar información histórica de la condición de cada equipo, para la generación de tendencias gráficas en función del tiempo, de ahí la importancia de que sea una base de datos centralizada.

#### **3.3.1.8. Generación de tendencias o estados de condición**

Cada equipo debe tener asociado una gráfica de tendencia por cada variable monitoreada, con el objetivo de conocer su condición o estado en cualquier momento para poder llegar a tener la capacidad de predecir una falla funcional. Esta gráfica se irá construyendo a medida que avance el monitoreo de condición y eventualmente cumplirá con su objetivo de proporcionar la información predictiva al analista de *CBM*.

#### **3.3.1.9. Presentación de resultados**

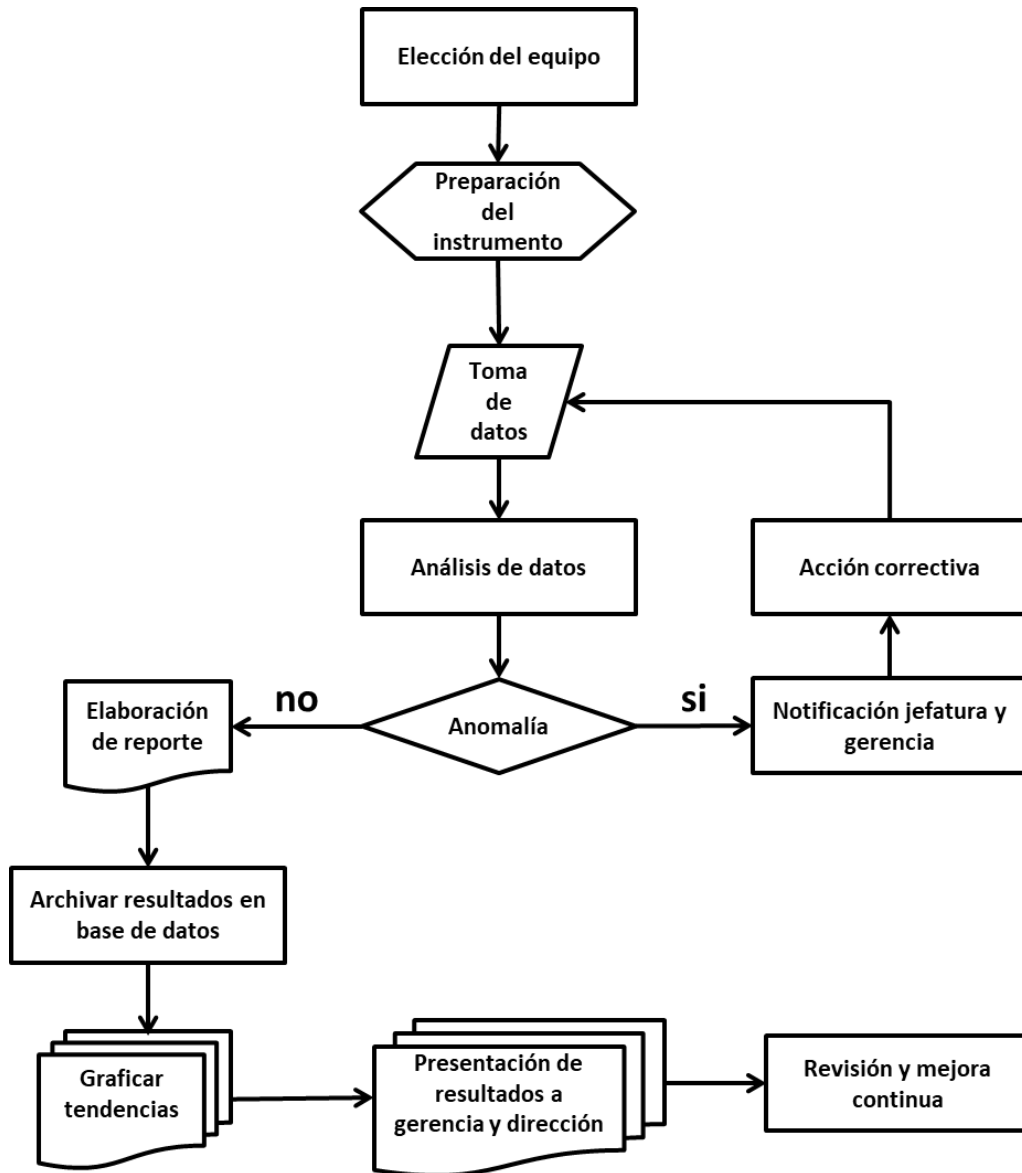
La presentación de resultados debe ser clara, corta y efectiva, deben ser informes ejecutivos que muestren la condición o estado actual de cada equipo en relación a cada variable medida, sin embargo deben estar a la mano, los reportes individuales de cada equipo y las gráficas de tendencias como soporte de la información que se presente.

### **3.3.1.10. Revisión y mejora continua**

Esta es una revisión del modelo y deberá realizarse cada 6 meses, con el fin de evaluar la efectividad del *CBM* y reforzar o corregir las posibles debilidades que pueda tener. El proceso de *CBM*, como cualquier otro proceso es susceptible de mejora, los instrumentos para evaluar el programa pueden ser auditorías internas o *benchmarking* de industrias similares.



Figura 32. Diagrama de flujo modelo *CBM* Frisa



Fuente: elaboración propia.



### 3.3.2. Plan estratégico de termografía

Tabla IV. Plan estratégico de termografía

#### PLAN ESTRATEGICO DE MONITOREO DE CONDICIÓN 2019 TERMOGRAFÍA

Motores eléctricos		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Equipo padre	Equipo hijo												
Compresor Frick RXF 68	Motor eléctrico 125 H.P.			x			x			x			x
Compresor Frick RWB 177B	Motor eléctrico 500 H.P.			x			x			x			x
Compresor Frick 222B	Motor eléctrico 150 H.P.			x			x			x			x
Compresor Frick RWB 270	Motor eléctrico 300 H.P.			x			x			x			x
Compresor Frick RWB 100	Motor eléctrico 150 H.P.			x			x			x			x
Compresor Frick RXF 85	Motor eléctrico 235 H.P.			x			x			x			x
Compresor Frick RXF 39	Motor eléctrico 75 H.P.			x			x			x			x
Formadora Alco	Motor eléctrico 100 H.P.	x			x			x			x		
Molino Urschell	Motor eléctrico 125 H.P.	x			x			x			x		
Equipo hidráulico L1	Motor eléctrico 60 H.P.	x			x			x			x		
Bomba centrífuga C. Ecovis	Motor eléctrico 60 H.P.	x			x			x			x		
Molino Seidelman	Motor eléctrico 75 H.P.	x			x			x			x		

Fuente: elaboración propia.

### 3.3.3. Plan estratégico de análisis de vibraciones

Tabla V. Plan estratégico de análisis de vibraciones

PLAN ESTRATÉGICO DE MONITOREO DE CONDICION 2019  
ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Equipo padre	Equipo hijo	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Compresor Frick RXF 68	Motor eléctrico 125 H.P.	x			x			x			x		
Compresor Frick RWB 177B	Motor eléctrico 500 H.P.	x			x			x			x		
Compresor Frick 222B	Motor eléctrico 150 H.P.	x			x			x			x		
Compresor Frick RWB 270	Motor eléctrico 300 H.P.	x			x			x			x		
Compresor Frick RWB 100	Motor eléctrico 150 H.P.	x			x			x			x		
Compresor Frick RXF 85	Motor eléctrico 235 H.P.	x			x			x			x		
Compresor Frick RXF 39	Motor eléctrico 75 H.P.	x			x			x			x		
Formadora Alco	Motor eléctrico 100 H.P.	x			x			x			x		
Molino Urschell	Motor eléctrico 125 H.P.	x			x			x			x		
Equipo hidráulico L1	Motor eléctrico 60 H.P.	x			x			x			x		
Bomba centrífuga C. Ecovis	Motor eléctrico 60 H.P.	x			x			x			x		
Molino Seidelman	Motor eléctrico 75 H.P.	x			x			x			x		
Turbina 1 Frigoscandia 1	Motor eléctrico 25 H. P	x			x			x			x		
Turbina 2 Frigoscandia	Motor eléctrico 25 H. P	x			x			x			x		
Turbina 1 Frigoscandia	Motor eléctrico 25 H. P	x			x			x			x		
Turbina 2 Frigoscandia 2	Motor eléctrico 25 H. P	x			x			x			x		

Fuente: elaboración propia.

## 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.1. Discusión de resultados de termografía

A nivel gerencial, tener una imagen global del estado general de los motores de los equipos críticos de la planta puede ser mucho enriquecedor que tener que analizar el reporte individual de cada uno de ellos, si bien esto es muy importante, podría ser de mayor interés para el jefe de mantenimiento.

No obstante, la gran diferencia entre las potencias de los motores, se puede observar que las temperaturas no difieren significativamente entre uno y otro. Por ejemplo, las diferencias entre los motores de 500 HP y 150 HP no son significativas, los diferenciales son realmente pequeños.

En el análisis estadístico se pudieron observar comportamientos muy interesantes y similares de los motores de compresores, los cuales siendo de potencia muy variada, emiten radiación infrarroja en valores muy similares, dicho en otras palabras, los valores de temperaturas se mantienen en magnitudes bastante cercanas entre sí, independientemente de su tamaño.

Es importante destacar que la tabla I muestra los valores de temperatura y no los diferenciales como indican los criterios de severidad; ambos métodos de presentación son aceptables. El criterio de cual utilizar dependerá del termógrafo y de la persona a quien se reporta la información; por ejemplo, puede darse el caso en que el termógrafo tenga mejor manejo de los  $\Delta T$  (diferenciales de temperatura) para apegarse a las normas, pero el gerente de

mantenimiento interprete mejor la condición de un equipo relacionando los valores absolutos de temperatura.

El comité técnico ISO de termografía establece que el criterio basado en la experiencia mecánica y eléctrica del termógrafo puede ser usado para presentar la información en diferenciales o valores absolutos de temperatura, (ISO TC 108 SC 5, 1993).

Analizar la temperatura de un grupo de motores mucho más grande que el del grupo de estudio utilizando estadística descriptiva, proporciona un nivel de certeza aceptable, que permite detectar desviaciones de la norma con facilidad y rapidez, pero sobre todo permite tomar decisiones relevantes en el sistema de gestión de mantenimiento. Siendo estas decisiones de carácter estratégico, su importancia se verá reflejada en un incremento de la disponibilidad de la maquinaria de la planta.

#### **4.2. Discusión de resultados de análisis de vibraciones**

Estos resultados según el modelo de la norma ISO 17359, conducen a la elaboración de un plan de acciones correctivas, las cuales deben llevarse a cabo para completar un ciclo de *CBM*.

Tabla VI. **Plan de acción correctiva para motores de turbinas de congelado**

Fecha de análisis	Descripción del equipo	Rango RMS en mm/seg.	Valor medido mm/seg. RMS	Falla específica	Condición según Norma ISO 10816	Acción correctiva
19/11/2017	Motor turbina # 1 túnel Supertrak	0.71-4.5	8.935		No operar	
19/11/2017	Motor turbina # 2 túnel Supertrak	0.71-4.5	8.2	Rotor desbalanceado	No operar	Balanceo dinámico de rotor
19/11/2017	Motor turbina # 3 túnel Supertrak	0.71-4.5	11.6		No operar	
Fecha de análisis	Descripción del equipo	Rango RMS en mm/seg.	Valor medido 1 mm/seg. RMS	Valor medido 2 mm/seg. RMS	Delta RMS	Condición según Norma ISO 10816
30/03/2018	Motor turbina # 1 túnel Supertrak	0.71-4.5	8.935	1.089	7.846	Equipo reacondicionado
30/03/2018	Motor turbina # 2 túnel Supertrak	0.71-4.5	8.2	0.5824	7.6176	Equipo reacondicionado
30/03/2018	Motor turbina # 3 túnel Supertrak	0.71-4.5	11.6	1.1346	10.4654	Equipo reacondicionado

Fuente: elaboración propia.

Las turbinas del túnel de congelado se encontraron en condición crítica, con valores *RMS* de vibraciones fuera del valor de severidad permitido por la norma. En este caso, se requirió de un balanceo dinámico del conjunto motor-turbina, luego se realizó una nueva medición de vibraciones a cada uno de ellos para verificar el cambio de condición.

Fonseca (2006), afirma que el análisis de vibraciones cumple con las dos etapas iniciales del *PdM*, que son detección y diagnóstico. En este estudio, se apreció claramente que la ruta de análisis de vibraciones detectó fallas específicas y determinó el nivel de severidad de acuerdo a una norma específica, la ISO 10816-3.

Resultados puntuales sobre la condición de los equipos, es lo que se esperaría de la aplicación de una técnica como la del análisis de vibraciones, los cuales son de suma importancia para evitar que los equipos alcancen el punto de falla funcional, cumpliendo así el objetivo del mantenimiento predictivo.

#### **4.3. Discusión sobre la importancia del modelo de gestión de mantenimiento basado en el monitoreo de condición.**

La importancia del modelo radica en que unifica las tecnologías de monitoreo que se apliquen en la empresa, con esto se logra tener una visión más amplia de la condición general de cada equipo al contar con más variables de análisis, aumentando las probabilidades de predecir una falla funcional, ya sea en la etapa incipiente o en la potencial. Esto complementa la gestión correctiva y preventiva, al proveerle al sistema de gestión, la información sobre cuando realizar sus intervenciones más eficientemente.

Las normas ISO garantizan que los procesos, como el mantenimiento, se realicen de forma estándar, que sean auditables y sobre todo que sean susceptibles de mejora continua. En el caso del monitoreo de condición, la norma ISO 17359, provee una metodología que ha sido puesta a prueba innumerables veces por muchas empresas a nivel mundial considerándola como la norma a seguir para la implementación del mantenimiento predictivo.

El mantenimiento basado en monitoreo de condición no debe ser considerado como una gestión independiente dentro del mantenimiento, sino como complemento de la gestión actual, al brindar información valiosa para la oportuna intervención correctiva y mejorar la preventiva, contribuyendo de esta forma a la gestión integral. Esto contrasta con las prácticas de la industria local, en la que se considera que el mantenimiento correctivo es una práctica equivocada y se tiene que sustituir por preventivo y siguiendo en esa línea de pensamiento, eventualmente alcanzar el mantenimiento predictivo.

Otra consideración importante que es necesario hacer sobre este modelo de monitoreo de condición, es el nivel de conocimientos que se requieren. El



nivel técnico de los mecánicos de mantenimiento es insuficiente, es imprescindible tener conocimientos sobre mantenimiento centrado en confiabilidad, *RCM*, y sobre cada una de las técnicas de monitoreo que se utilicen. De los costos de entrenamiento y de tecnología se deriva el alto costo de inversión inicial de un modelo de este tipo.



## CONCLUSIONES

1. La gestión de mantenimiento predictivo utilizando monitoreo de condición, es la herramienta que proporciona la mayor cantidad de tiempo para la planificación de mantenimientos correctivos programados. El objetivo del monitoreo de condición es detectar la aparición de fallas incipientes, por lo que permite determinar la frecuencia mínima que debe haber entre observaciones, sin correr el riesgo que se presente una falla potencial.
2. En el estudio realizado, se confirma que la termografía es una de las técnicas de *CBM* fundamentales para conocer la condición o estado actual de un grupo de equipos, pero los resultados deben ser comparados contra criterios termográficos de normas internacionales reconocidas, tales como *N.E.T.A.* o *Military Standard 2194*, por mencionar algunas. La información obtenida a través de ésta se utiliza en la toma de decisiones estratégicas de mantenimiento.
3. El análisis de vibraciones realizado en los motores eléctricos cumplió de forma fundamental al mantenimiento predictivo, detectando una falla específica y diagnosticando la severidad de la misma. Esto se reflejó claramente en los resultados de las turbinas de congelado, en las que se determinó, a través de los espectros de vibración, que la anomalía era el desbalance de los rotores y la magnitud *RMS* de vibración de dicho espectro, diagnosticó la severidad de la falla.

4. En las mediciones que se realizaron, se comprobó que el monitoreo de condición, es una de las etapas más avanzadas del mantenimiento, y requirió la aplicación de técnicas predictivas, tecnologías de punta y entrenamiento en las técnicas de *RCM*. Estas son algunas de las razones por las que su implementación tiene un costo elevado y desincentiva el seguimiento de los hallazgos que suelen reportarse en las primeras rutas de monitoreo de condición.

## RECOMENDACIONES

1. Implementar el modelo desarrollado, ya que será la herramienta que permitirá optimizar las frecuencias actuales de mantenimiento preventivo; que a su vez irá reduciendo la cantidad de mantenimientos correctivos. Sin embargo, determinar las frecuencias exactas de monitoreo, es algo que quedó fuera del alcance de este estudio, pudiendo ser objeto de un trabajo más amplio o a través de múltiples observaciones sucesivas, lo cual incrementaría la línea de tiempo para llegar a la frecuencia exacta.
2. Analizar los resultados de la condición de los equipos, utilizando gráficos de estadística descriptiva. De acuerdo a los resultados presentados en este estudio, los valores de temperatura recolectados por la técnica termográfica son independientes de la dimensión de los equipos, como es el caso de motores eléctricos. Esto será una herramienta fundamental en la planeación estratégica del mantenimiento.
3. Utilizar los análisis de vibraciones de forma regular, con el objetivo de conocer a profundidad la técnica, para explotar toda su capacidad de generación de información, antes de incursionar en nuevas técnicas de monitoreo de condición.
4. Un programa sólido de monitoreo de condición requiere de conocimientos avanzados, por lo es indispensable invertir en el entrenamiento en mantenimiento centrado en confiabilidad del

personal que estará involucrado en monitoreo de condición. Así mismo, el conocimiento en termografía y análisis de vibraciones requiere de capacitación especializada y muchas veces, la certificación es indispensable. Si bien es cierto que estos análisis pueden ser subcontratados, la capacidad de análisis que brinda la experiencia en *RCM* no lo es.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Acevedo, A. M. (2012). *Modelo para la implementación de mantenimiento predictivo en las facilidades de producción de petróleo*. Tesis de Especialización en Gerencia de Mantenimiento, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
2. Aguillón, P. R. (2004). *Tribología y lubricación industrial y automotriz*. (4a. ed.). Medellín, Colombia.
3. *Allied Reliability Group*. (2013). *PdM Secrets Revealed* (6ta. ed.). Charlestone, South Carolina, Estados Unidos.
4. AMAQ-S.A. (2005). *Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico*. Medellin.
5. B., Juan C. Hidalgo. (30-31 de Octubre de 2003). *La importancia de la correlación de las tecnologías predictivas en el diagnóstico de motores eléctricos*. León.
6. Bengtsson, M. (2004). *Condition based maintenance systems - An investigation of technical constituents and organizational aspects*. Licentiate Thesis, Mälardalen University, Department of Innovation, Design, and Product Development, Vasteras, Sweden.
7. Butcher, S. (2000). *Assesment of Condition-Based Maintenance in the Department of Defense*.

8. Fajardo, D. A., & Ñauta Chuisaca, J. J. (2015). *Estudio de Implementación de mantenimiento predictivo en la compañía ecuatoriana de caucho Erco*. Tesis Ingeniería Eléctrica, Universidad Politecnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.
9. Fonseca, B. A. (2006). *Detección de fallas en motores de inducción mediante análisis de vibraciones*. Tesis de Maestría en Ciencias de Ingeniería, Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Computación, México, D. F.
10. García, J. F. (2012). *Situación de la gestión del mantenimiento de las fábricas procesadoras de hule natural técnicamente especificado en Guatemala, según la Matriz de Clase Mundial*. Trabajo de Graduación Maestría de Mantenimiento, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Guatemala.
11. Garrido, S. G. (2003). *Organización y Gestión Integral de Mantenimiento*. Madrid, España: Diaz de Santos.
12. Garrido, S. G. (2009). *Mantenimiento Predictivo* (Vol. 3). (Renovetec, Ed.) Madrid, España: Renovetec.
13. Infrared Training Center. (2017). *Manual para el curso de Termografía Nivel 1* (Rev. 1.1 ed.). (ITC, Ed.) Estocolmo, Suecia.
14. *International Organization for Standardization*. (2003). *ISO 17359. Condition monitoring and diagnosis of machines-General guidelines*. Switzerland.

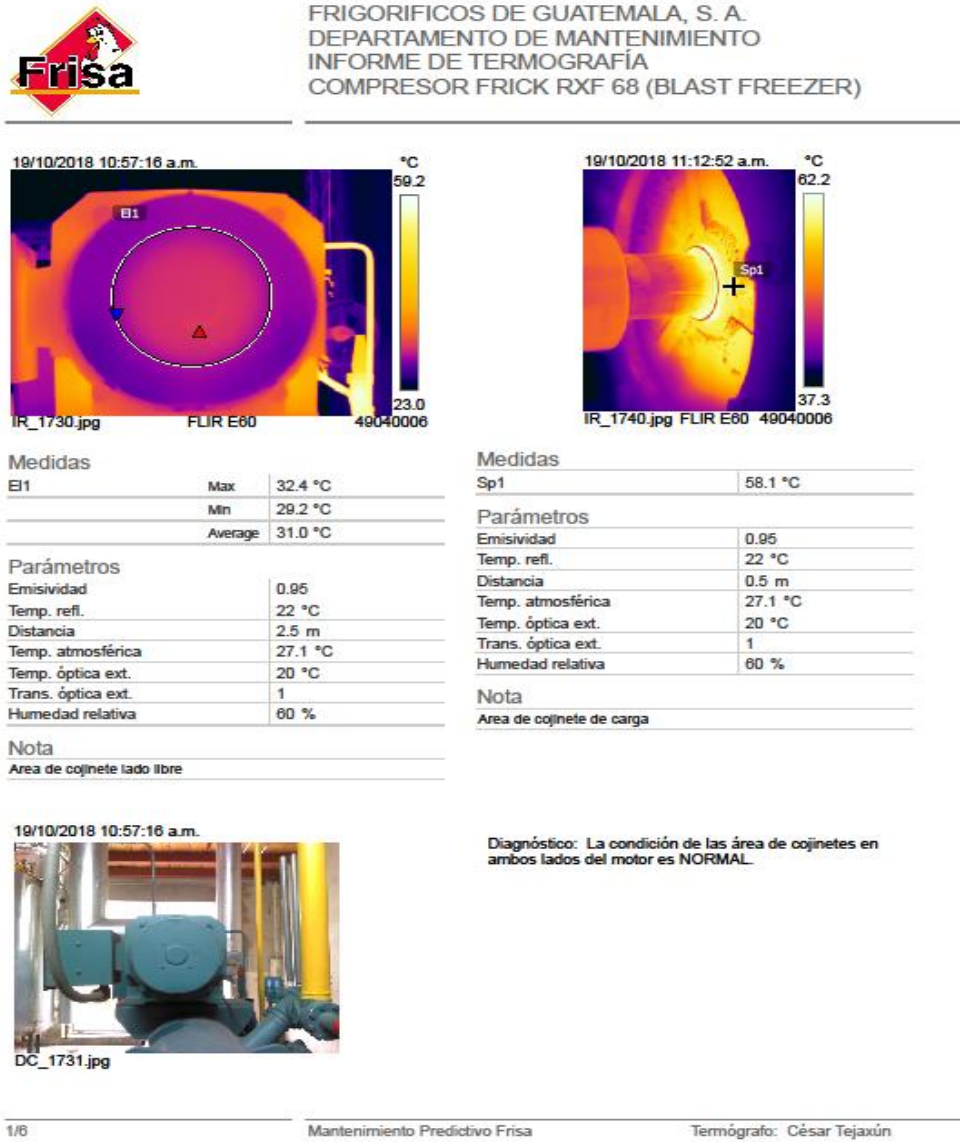


15. *International Organization for Standardization*. (2009). *ISO 2041:2009 Mechanical vibration, shock and condition monitoring - Vocabulary*. Norma internacional.
16. *International Organization for Standardization*. (2016). *ISO 14224:2016. Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment*. Norma internacional.
17. ISO TC 108 SC 5. (1993). *Conditioning monitoring and diagnosis of machine systems*. ISO Editorial Programme.
18. Kange, B., & Lundell, S. (2015). *Evaluation of the Potential for Predictive Maintenance. A Case Study at Fortum*. Master's thesis in Production Engineering and Sustainable Energy Systems, Chalmers University of Technology, Department of Product and Production Development, Gothenburg, Sweden.
19. Kothamasu, R., Huang, S., & William H., V. (15 de Marzo de 2006). System health monitoring and prognostics – a review of current paradigms. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (28), 1012-1024.
20. Mobley, K. (2002). *An introduction to preventive maintenance* (Second edition ed.).
21. Moubray, J. (1991). *Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad, RCM II*. Ashville, North Carolina, Estados Unidos: Aladon LLC.

22. P., E. A. (Mayo de 2001). *Impacto del Mantenimiento Proactivo en la Productividad*. Perú.
23. Peinado, J. P. (19 de julio de 2016). *Preditec/IRM*. Recuperado el Septiembre de 2017, de [www.preditec.com](http://www.preditec.com): <http://www.preditec.com/notas-tecnicas/gestion-y-fiabilidad-del-mantenimiento/modelo-de-certificacion-de-sistemas-de-monitorizado-de-la-condicion-segun-la-norma-iso-17359-2011/>
24. Prajapati, A., Bechtel, J., & Ganesan, S. (19 de octubre de 2012). Condition based maintenance: a survey. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 18(4), 384-400.
25. Semapi. (2018). *Curso Analista de Vibraciones Categoría I ISO 18436-2*. Buenos Aires, Argentina.
26. Shin, J.-H., & Jun, H.-B. (January de 2015). On condition based maintenance policy. *Journal of Computational Design and Engineering*(2), 119-127.
27. Soriano, M. C., & Rafael Royo Pastor. (2016). *Termografía Infrarroja. Nivel II*. Madrid: FC Editorial.
28. Trujillo, G. (Abril-mayo de 2007). Análisis de aceite, una estrategia proactiva y predictiva. *Revista Machinery Lubrication*, 18, 1-5.

## APÉNDICES

Figura 33. Instrumento de recopilación de información termográfica




Fuente: elaboración propia.



# ANEXOS

Figura 34. Instrumento de recopilación de vibraciones mecánicas



Expertos en Máquinas Eléctricas Rotativas

**Reporte de Vibraciones Mecánicas**

Código Doc.  
N/D

<b>Analista:</b> Daniel Palencia Jr.	
<b>Área / Proceso:</b> Turbina # 1 Túnel Super Trak. *	
<b>Ruta:</b> FRISA TÚNELES DE CONGELADO	
<b>Nota:</b> Análisis de Vibración - Motor / Ventilado en Voladizo. Equipo en Operación sobre estructura metálica. Motor Sterling EI , 30 HP , 1175 rpm. Hoja técnica para seguimiento del próximo servicio # 17705. Este número está estampado sobre el motor con números de golpe.	

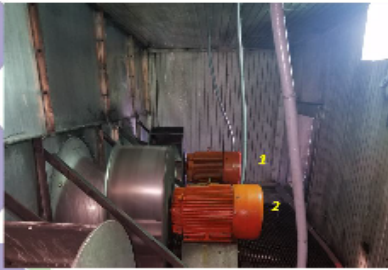
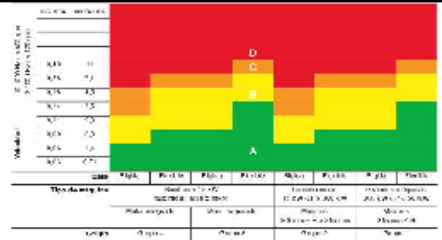
  

Estatus	
(FS) Fuera de servicio.	
(MA) En mantenimiento.	
<b>(OP) En operación</b>	
(PC) Prueba con carga.	
(AI) Acceso Inseguro.	
(PV) Prueba en vacío.	
(PT) Punto de medición.	

<b>Tipo de MAquina:</b> Máquina Grupo 2 / Base Rígida.	<b>Síntoma(S):</b> Desbalanceo.
--	---------------------------------

Fotografía del Equipo	Tabla ISO 10816-3
	

Fecha	PT	Ubicación / Estado	Grupo ISO 10816	Máx. Valor Global mm/Seg RMS	Condición según Norma ISO 10816-3
11/19/2017	H	Tapadera trasera al centro.	Grupo II	8.935	D(No Operar)
11/19/2017	V	Tapadera delantera al centro	Grupo II	7.253	D(No Operar)
11/19/2017	A	Base del motor, parte trasera hacia al frente.	Grupo II	3.710	C(Operación R.)
<b>VALORES LUEGO DEL MANTENIMIENTO 30 MARZO DE 2018</b>					
30/03/2018	H	Tapadera trasera al centro.	Grupo II	1.0898	A
30/03/2018	V	Tapadera delantera al centro	Grupo II	1.5652	B
30/03/2018	A	Base del motor, parte trasera hacia al frente.	Grupo II	0.9281	A

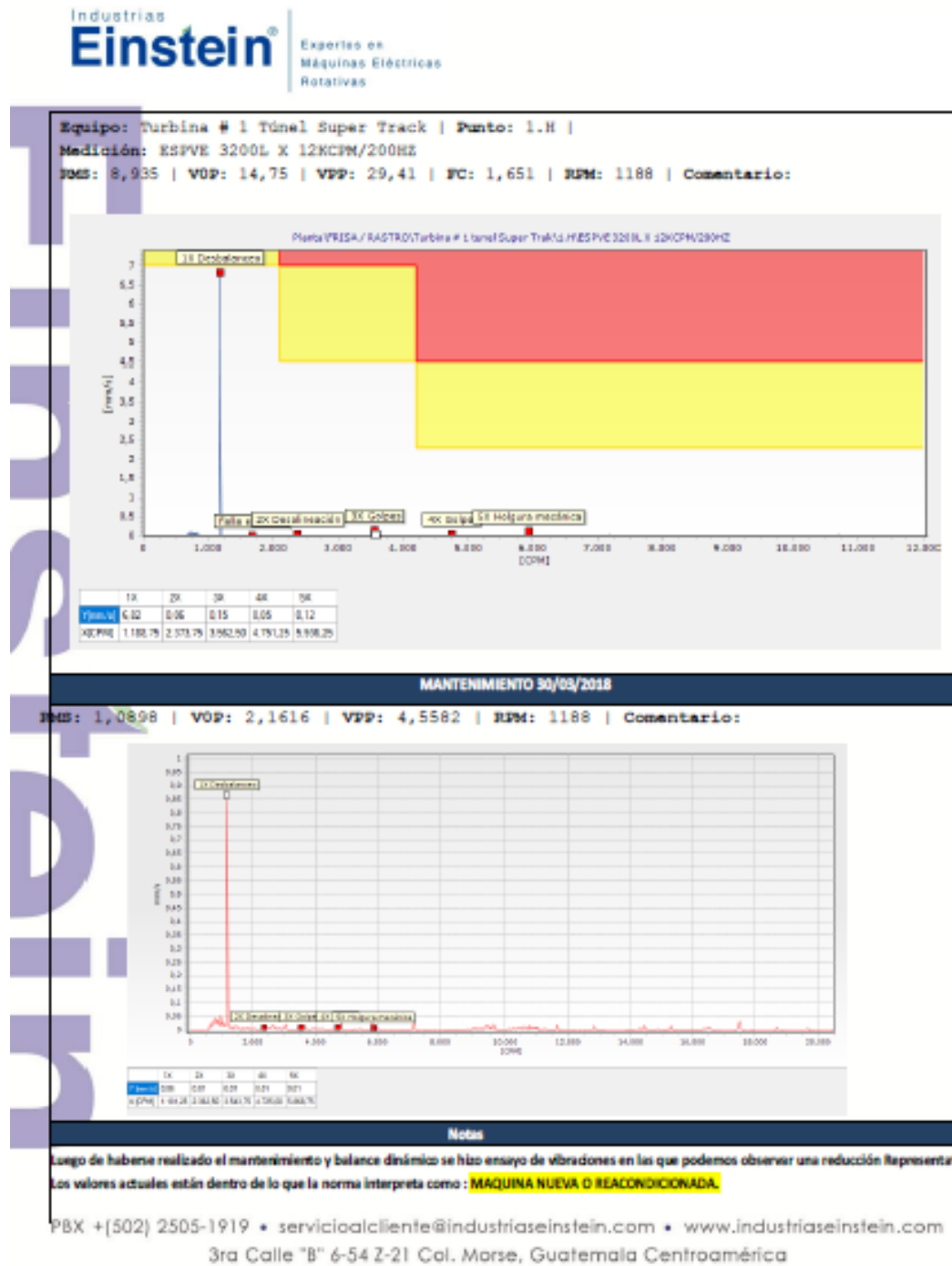
  

CONCLUSIONES GENERALES	
Recomendación: (INSPECCION PROGRAMADA TRIMESTRALMENTE.) -> SEGUIMIENTO PARA GENERAR TENDENCIAS.	

PBX +(502) 2505-1919 • servicioalcliente@industriaseinstein.com • www.industriaseinstein.com  
 3ra Calle "3" 6-54 Z-21 Col. Morse, Guatemala Centroamérica

Fuente: reporte elaborado por Industrias Einstein, marzo 2018.

Figura 35. Espectros mostrando la evolución de la vibración después del balance dinámico del rotor de la turbina



Fuente: reporte elaborado por Industrias Einstein, marzo 2018.