



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO A
TRAVÉS DEL MONITOREO DE CONDICIÓN UTILIZANDO E.N.D. BAJO LA NORMA ISO
17359:2011, PARA LA CONSERVACIÓN DE EQUIPOS CRÍTICOS EN LA INDUSTRIA
AVÍCOLA**

César Augusto Tejaxún Solloy

Asesorado por la MSc. Inga. Carola Berioska García García

Guatemala, abril de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO A
TRAVÉS DEL MONITOREO DE CONDICIÓN UTILIZANDO E.N.D. 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
POR

CÉSAR AUGUSTO TEJAXÚN SOLLOY

ASESORADO POR LA MSC. INGA. CAROLA BERIOSKA GARCÍA GARCÍA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL

GUATEMALA, ABRIL DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
EXAMINADORA	Inga. Paula Vanessa Ayerdi Bardales
EXAMINADOR	Ing. Edgar Quevec Robles
EXAMINADOR	Ing. René Alfonso Aguilar Marroquín
SECRETARIA	Inga. Gilda Marina Castellanos de Illescas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO A TRAVÉS DEL MONITOREO DE CONDICIÓN UTILIZANDO E.N.D. BAJO LA NORMA ISO 17359:2011, PARA LA CONSERVACIÓN DE EQUIPOS CRÍTICOS EN LA INDUSTRIA AVÍCOLA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, con fecha 31 de mayo de 2016.

César Augusto Tejaxún Solloy



FACULTAD DE
INGENIERÍA - USAC
ESCUELA DE
ESTUDIOS DE POSTGRADO

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142 / 2418-8000 Ext. 86226

AGS-MIMPP-001-2018

Guatemala, 30 de enero de 2018.

Director
César Ernesto Urquizú Rodas
Escuela de Mecánica Industrial
Presente.


Estimado Director:

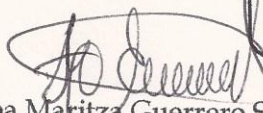
Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación de la estudiante **César Augusto Tejaxun Solloy** con carné número **8816179**, quien opto la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría de Ingeniería en Mantenimiento.

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


Sin otro particular, atentamente,

"Id y Enseñad a todos"


MSc. Inga. Carola García García
Asesor(a)


Dra. Inga. Alba Maritza Guerrero Spínola
Coordinadora de Área
Gestión y Servicios

ALBA MARITZA GUERRERO SPINOLA
INGENIERA INDUSTRIAL
COLEGIADA No. 4611


MSc. Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Director
Escuela de Estudios de Postgrado



Cc: archivo/la

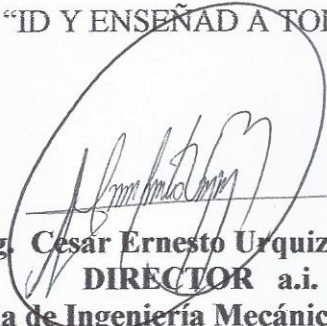
RESOLUCIÓN DE JUNTA DIRECTIVA: Proceso de Graduación aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011.



REF.DIR.EMI.035.018

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el Visto Bueno del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística del trabajo de graduación en la modalidad Estudios de Postgrado titulado **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO 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 estudiante universitario **César Augusto Tejaxún Solloy**, aprueba el presente trabajo y solicita la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Ing. César Ernesto Urquiza Rodas
DIRECTOR a.i.
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial



Guatemala, marzo de 2018.

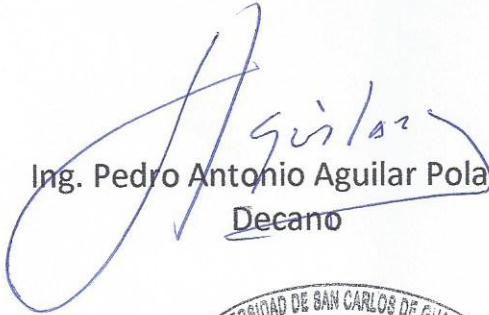
/mgp



DTG. 105.2018

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO A TRAVÉS DEL MONITOREO DE CONDICIÓN UTILIZANDO E.N.D. BAJO LA NORMA ISO 17359:2011, PARA LA CONSERVACIÓN DE EQUIPOS CRÍTICOS EN LA INDUSTRIA AVÍCOLA**, presentado por el estudiante universitario: **César Augusto Tejaxún Solloy**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, abril de 2018

/gdech



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:

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

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	5
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
3.1. Descripción del problema	7
3.2. Delimitación del problema	8
3.3. Problemas específicos.....	8
3.3.1. Problema específico 1	8
3.3.2. Problema específico 2	9
3.3.3. Problema específico 3	9
3.3.4. Problema específico 4	9
3.4. Formulación de pregunta.....	9
3.4.1. Pregunta auxiliar 1	10
3.4.2. Pregunta auxiliar 2.....	10
3.4.3. Pregunta auxiliar 3.....	10
3.4.4. Pregunta auxiliar 4.....	10
4. JUSTIFICACIÓN	11

5.	OBJETIVOS.....	13
5.1.	Objetivo general	13
5.1.1.	Objetivo específico 1	13
5.1.2.	Objetivo específico 2	13
5.1.3.	Objetivo específico 3	13
5.1.4.	Objetivo específico 4	14
6.	NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN	15
6.1.	Esquema de solución	16
7.	MARCO TEÓRICO	19
7.1.	Evolución del mantenimiento	19
7.2.	Clasificación del mantenimiento	21
7.2.1.	Mantenimiento predictivo (PdM).....	23
7.2.2.	Mantenimiento basado en condición (CBM).....	24
7.3.	Tecnologías END para monitoreo de condición	26
7.3.1.	Análisis de Vibraciones	26
7.3.1.1.	Vibración simple	26
7.3.1.2.	Vibración compuesta.....	27
7.3.1.3.	Vibración aleatoria y golpeteo intermitente.....	28
7.3.1.4.	Transformada de Fourier.....	29
7.3.1.5.	Frecuencia natural y resonancia	30
7.3.1.6.	Análisis espectral	30
7.3.1.7.	Desplazamiento, velocidad y aceleración de vibración.....	31
7.3.1.8.	Sistema de análisis de vibraciones	31
7.3.2.	Termografía.....	33
7.3.2.1.	Es sin contacto	34

	7.3.2.2.	Es bidimensional.....	34
	7.3.2.3.	Se realiza en tiempo real	34
	7.3.2.4.	Manejo y uso de la cámara.....	35
	7.3.2.5.	Ciencia térmica	35
	7.3.2.6.	Radiación.....	35
	7.3.2.7.	Aplicaciones.....	38
	7.3.2.8.	Técnicas de análisis	39
	7.3.2.9.	Rutinas de inspección e informes	40
	7.3.3.	Análisis de lubricantes	40
7.4.		Norma ISO 17359:2011. Monitoreo de condición y diagnóstico de fallas – lineamientos generales	42
8.		PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDO.....	43
9.		MARCO METODOLÓGICO	45
	9.1.	Diseño de la investigación	45
	9.2.	Tipo de investigación.....	45
	9.3.	Alcance.....	45
	9.4.	Fases para la implementación del modelo de mantenimiento predictivo en planta especialidades	46
	9.4.1.	Fase 1. Investigación documental sobre tecnologías predictivas	46
	9.4.2.	Fase 2. Entrenamiento	46
	9.4.3.	Fase 3. Revisión y actualización de equipos	47
	9.4.4.	Fase 4. Revisión de confiabilidad y criticidad	47
	9.4.5.	Fase 5. Selección del mantenimiento adecuado	48
	9.4.6.	Fase 6. Selección del método de medición	48
	9.4.7.	Fase 7. Recolección de información y análisis	48
	9.4.8.	Fase 8. Determinación de planes de acción.....	49

9.4.9.	Fase 9. Revisión y mejora continua	50
9.5.	Plan de muestreo y diseño de instrumentos de recolección de información.....	50
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	51
10.1.	Gráficos de barras.....	51
10.2.	Gráficos de análisis de tendencias.....	51
11.	CRONOGRAMA	53
12.	RECURSOS NECESARIOS Y FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO.....	55
12.1.	Recursos.....	55
12.1.1.	Recursos humanos	55
12.1.2.	Capacitaciones.....	55
12.1.3.	Equipos de termografía	56
12.1.4.	Servicios contratados de PdM.....	56
12.2.	Factibilidad del estudio.....	57
13.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59
14.	APÉNDICES	65
15.	ANEXOS	69

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esquema de solución	17
2.	Categorías del mantenimiento	22
3.	Curva P-F	24
4.	Representación de una onda sinusoidal de vibraciones	27
5.	Vibración aleatoria.....	28
6.	Onda de un golpeo intermitente	29
7.	Representación de la transformada de Fourier	30
8.	Criterio de severidad para vibraciones Mecánicas.....	33
9.	El rango IR dentro del espectro electromagnético	36
10.	Termograma de una trampa de vapor en buen estado	39
11.	Implementación del mantenimiento predictivo a través de <i>CBM</i>	54

TABLAS

I.	Clasificación de generaciones del mantenimiento	20
II.	Niveles de vibración referencial de alarma.....	32
III.	Clasificación de prioridad de reparación eléctrica para termografía....	40
IV.	Propuesta financiera	56

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
α	Alfa
ϵ	Epsilon
μm	Micrómetro
$W\alpha$	Radiación absorbida
$W\epsilon$	Radiación emitida
ρ	Ro
τ	Tau

GLOSARIO

CBM	<i>Condition-Based Maintenance.</i>
END	Ensayos no destructivos.
Espectro	Representación de una señal compleja en el dominio del tiempo, por medio de curvas sinusoidales con valores de frecuencia y amplitud específicos.
ISO	<i>International Organization for Standardization.</i>
kW	Abreviatura para la unidad de potencia kilowatt.
PdM	<i>Predictive maintenance.</i>
RCM	<i>Reliability centered maintenance.</i>
Termograma	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 existe un denominador común, en la industria cuando se habla de mantenimiento industrial; la mayoría concordará que el enfoque correctivo es la estrategia predominante, aunque exista un sector que ha ido evolucionando constantemente, no se puede decir que el mantenimiento de clase mundial sea una realidad en el país.

La siguiente etapa del mantenimiento, a la que probablemente muchas empresas se han movido o intentan llegar es el mantenimiento preventivo, y es en esta estrategia donde probablemente exista un estancamiento, se ha trabajado tanto para dejar atrás la estrategia correctiva y tener un programa preventivo, por ser un reto constante; sin embargo, el mantenimiento preventivo no debería ser la meta a alcanzar, se debe trabajar para obtener un nivel de gestión más integral.

El mantenimiento predictivo está empezando a aplicarse en muchas empresas, en algunas con poca o ninguna planificación y solamente en muy pocas empresas, existe el mantenimiento predictivo incluido en su modelo de gestión.

El objetivo primordial de este estudio es implementar un modelo de mantenimiento predictivo, basado en monitoreo de condición que utilice normas internacionales, debido a que se pretende llegar a un nivel de clase mundial, sin embargo, su aplicación debería ser en toda la industria nacional, por lo que se espera que este trabajo pueda servir de guía para que un día se logre.

1. INTRODUCCIÓN

La planta de especialidades está situada en el área urbana de Villa Nueva y elabora productos que se agrupan en formados, marinados y frituras, es una planta de tipo alimenticio, donde se deben cumplir con las normas y regulaciones que se exigen en la elaboración de productos para consumo humano, esto es parte de la industria avícola de Guatemala.

El departamento de mantenimiento de la planta ha alcanzado un estado 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.

A pesar de la solidez del mantenimiento preventivo, se siguen presentando fallas en los equipos con motores eléctricos mayores de 15 kW de manera regular; de los cuales se pueden mencionar: los de molinos de pasta de pollo, equipos hidráulicos que potencian las líneas de producción, los equipos de refrigeración, 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 sus 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.

Con el presente estudio, se hará 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 constituirá en la base del programa de mantenimiento predictivo, y se tomará

como grupo de estudio los equipos críticos con motores mayores a 15 kW para demostrar que las fallas de equipos críticos pueden detectarse en sus inicios y predecir el momento de rotura, lo brindará información valiosa para la intervención oportuna de mantenimiento.

Entre los beneficios que se esperan obtener están llevar la gestión de 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, que la empresa sufragará.

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

En el capítulo 2, se describirá la metodología que se utilizará para la implementación de mantenimiento predictivo que se basará en la norma ISO 17359:2011. Se propondrán las frecuencias de análisis, los responsables de la recolección de datos, y se definirán los datos que serán recolectados por el departamento de mantenimiento y los que recolectará una empresa consultora de monitoreo de condición.

En el capítulo 3, se expondrá todo lo relacionado a la recolección de datos y al análisis de resultados de 3 ensayos de cada uno de los equipos incluidos en el grupo de estudio.

Por último, en el capítulo 4, se harán las propuestas y recomendaciones sobre la implementación del programa de mantenimiento predictivo, basado en

el uso de la norma ISO 17359:2011 y de los resultados obtenidos del monitoreo de condición del grupo de equipos críticos que fueron sometidos a estudio.

Como un apartado anexo, se hará un resumen sobre el mantenimiento centrado en confiabilidad, *RCM*, que es la herramienta inicial que la norma recomienda.

2. ANTECEDENTES

Pasar de una estrategia preventiva a una predictiva implica cambiar una cultura en todos los niveles, desde la dirección hasta los técnicos que realizan las operaciones más básicas de mantenimiento, por lo que dicho cambio debe ser bien fundamentado y los resultados deben a su vez ser verificables para justificarlo.

Los cambios esperados fueron experimentados en diferentes industrias, dentro de las que se puede mencionar la industria petrolera, la de generación de energía, la del caucho, la alimenticia, entre otras.

En la industria petrolera, se han obtenido resultados como son: el incremento de la disponibilidad de los equipos, reducción de las pérdidas de producción y la reducción de los costos de mantenimiento, (Acevedo, 2012).

Un ejemplo del incremento de la disponibilidad de equipos está en la reducción de fallas eléctricas que se pueden detectar con la termografía. Los costos de mantenimiento disminuyen como una consecuencia de la detección de fallas incipientes que incide en una menor cantidad de mantenimientos correctivos y la reducción de pérdidas de producción, por analogía es consecuencia de la mayor disponibilidad y el menor número de fallas de los equipos.

En su tesis Kange y Lundell (2015) resumen los beneficios del mantenimiento predictivo de manera muy similar a los de la industria petrolera, también hacen énfasis en la coordinación que debe haber entre el mantenimiento predictivo y los programas de preventivo y correctivo existentes,

debido a que en su fase inicial el *PdM*, tiende a encontrar numerosas fallas ocultas que a su vez dispara el número de intervenciones correctivas. Estar consciente de los resultados iniciales permitirá no perder el objetivo final del mantenimiento predictivo.

De acuerdo a Fajardo y Ñauta Chuisaca (2015), un plan de mantenimiento predictivo como mínimo debe incluir análisis de vibraciones, termografía y análisis de aceites que son las tecnologías fundamentales para su implementación. Con estas tres técnicas se garantiza que las fallas sean detectadas en su fase inicial y se puedan monitorear y predecir el momento de su ocurrencia para actuar de manera preventiva antes de llegar a ellas, así evitar el paro de maquinaria. Esta es la función principal del *PdM* y es así como el factor costo-beneficio favorece a la empresa.

En su tesis, Fonseca (2006) concluye sobre la efectividad del mantenimiento predictivo afirmando que cumple con la detección y diagnóstico, al poder aislar una falla mecánica específica y determinar su nivel de severidad conforme a una norma internacional.

Para garantizar la correcta aplicación del mantenimiento predictivo (*PdM*), deberá seguirse un modelo previamente establecido, de manera que, sin importar quién dirija el programa *PdM*, el resultado sea replicable, éste no se logrará si se depende del criterio del responsable de la administración del programa. La norma ISO 17,359:2011 proporciona los lineamientos generales para la implementación de un modelo normalizado de monitoreo de condición y diagnóstico de máquinas. Los lineamientos que proporciona son generales y se adaptan a cualquier tipo de industria. Es una herramienta fundamental para el predictivo, que proporciona los requisitos que se deben considerar para la implementación de un sistema de monitoreo de condición (Peinado, 2016).

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1. Descripción del problema

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.

A pesar de existir inspecciones y rutinas de mantenimiento preventivo, la falla de equipos críticos en la planta de especialidades provocan a menudo que una de las dos o las dos 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 1 180 Kilogramos/hora, estos productos varían entre formados, empanizados y marinados para el consumo final.

3.2. Delimitación del problema

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; 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 implica buscar nuevas estrategias para el mantenimiento de los equipos, que permitan reducir, tanto las paradas de producción como tiempos de paro de maquinaria y equipo, siendo la implementación de un programa de mantenimiento predictivo a través del monitoreo de condición basado en la norma ISO 17359, este garantizaría las reducciones.

3.3. Problemas específicos

3.3.1. Problema específico 1

Falta de recursos técnicos y entrenamiento para un programa de mantenimiento predictivo.

3.3.2. Problema específico 2

Falta de rutinas predictivas de mantenimiento, para evitar paros de producción derivados de fallas en los motores de ventiladores de recirculación de aire en los túneles de congelado, de molinos de pasta, de equipos hidráulicos y de compresores de refrigeración.

3.3.3. Problema específico 3

Se evidencia la falta de un programa sistematizado de monitoreo de equipos; las pocas aplicaciones de ensayos no destructivos se realizan sin ninguna estrategia de mediano o largo plazo.

3.3.4. Problema específico 4

Sin una estrategia definida no se pueden medir los resultados de una buena gestión de mantenimiento, que deben reflejarse en incremento de la productividad y disminución de tiempos perdidos de maquinaria y equipo.

Como consecuencia de los problemas suscitados surgen las siguientes preguntas:

3.4. Formulación de pregunta

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

3.4.1. Pregunta auxiliar 1

¿Qué tipo de recursos de tecnología y recurso humano se necesitan para el monitoreo de condiciones en motores?

3.4.2. Pregunta auxiliar 2

¿Cómo ayudarían las técnicas de monitoreo de condiciones a evitar las pérdidas de eficiencia, los paros de producción y los tiempos muertos de equipos críticos en la planta de especialidades?

3.4.3. Pregunta auxiliar 3

¿Cómo determinar que equipos deben ser seleccionados para ser sometidos a un programa de monitoreo de condición?

3.4.4. Pregunta auxiliar 4

¿Cuál es la normativa internacional que se debe utilizar para implementar la estrategia de monitoreo de condición en motores eléctricos mayores a 15 kW?

4. JUSTIFICACIÓN

Una de las líneas de investigación de la maestría de mantenimiento es la utilización de normas que rigen los procesos que involucra la conservación de maquinaria y equipo, debido a que en una planta de producción avícola se cuenta con una gran variedad de procesos y sub procesos, que requieren de diferentes estrategias de mantenimiento, para garantizar la disponibilidad de todos los equipos; el uso de normas internacionales como las de *International Organization for Standardization (ISO)* constituye el medio para lograrlo. La variedad de procesos está asociada a una cantidad similar de equipos que dependiendo de la antigüedad de la empresa, pueden ser muy diferentes tecnológicamente; este factor es determinante en la elección de la estrategia a utilizar.

Los equipos más modernos y de alta tecnología, en su mayoría deben contar con un sistema de gestión predictivo, porque con toda certeza se contará con manuales y recomendaciones del fabricante. Contrario a los equipos antiguos que, probablemente fueron instalados desde que la empresa inició operaciones. Consiguientemente es necesaria la elección de diferentes estrategias de mantenimiento para cada tipo de equipo, dependiendo del grupo al que pertenezcan.

La planta cuenta con un programa formal de mantenimiento preventivo, en una etapa de madurez avanzada, evidenciada por el tipo de indicadores que maneja. Sin embargo, comienza a denotarse la necesidad de definir un sistema de gestión para aquellas operaciones predictivas que se ejecutan esporádicamente en algunos equipos, lo cual justifica la implementación de un

programa de mantenimiento predictivo, *PdM*, conocido así por sus siglas en inglés, cuya metodología se basa en la norma ISO 17359:2011. Dicha norma establece los requisitos generales para un programa de monitoreo de condición y diagnóstico de máquinas, *CBM*, también conocido por así por sus siglas en inglés. El uso de estas siglas en inglés se acepta y se utiliza en español para referirse al mantenimiento preventivo y monitoreo de condición, (Acevedo, 2012).

La implementación de un modelo predictivo supone un avance significativo para la empresa, pero su mayor beneficiario será el departamento de producción. El uso de ensayos no destructivos requiere la adquisición de equipos de monitoreo de condición y la capacitación que dichas adquisiciones conlleva no solo incrementan el nivel de tecnificación de su personal sino que también colocan a la empresa en un nivel más alto dentro de la categoría de sus operaciones, llenando de esta manera las expectativas de mejora continua.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

Diseñar un modelo de mantenimiento predictivo basado en monitoreo de condición, siguiendo los lineamientos de la norma ISO 17359:2011, para mejorar la conservación de equipos críticos con motores eléctricos mayores 15 kW en la planta de especialidades.

5.1.1. Objetivo específico 1

Describir las tecnologías predictivas y las competencias del recurso humano son necesarios para la implementación de un programa de Monitoreo de Condición de equipos críticos en la planta de especialidades.

5.1.2. Objetivo específico 2

Establecer las tecnologías de monitoreo de condición que ayudarían a la reducción de paros de producción, tiempos muertos de equipos críticos, para evitar pérdidas de eficiencia en la planta de especialidades.

5.1.3. Objetivo específico 3

Utilizar las técnicas de RCM para determinar qué equipos deben ser sometidos a mantenimiento predictivo, a través del monitoreo de condición.

5.1.4. Objetivo específico 4

Utilizar la norma ISO 17359:2011 como una guía para la implementación de un programa de monitoreo de condición en equipos críticos con motores mayores de 15 kW.

6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

La ausencia de un Programa de Mantenimiento Predictivo (*PdM*) fue la causa de que el departamento de mantenimiento, no tenga control muchos parámetros que son clave en los equipos críticos de la planta de especialidades, específicamente la temperatura, los niveles de vibraciones mecánicas o el estado de los lubricantes utilizados en muchos de sus equipos. Corregir esta ausencia de *PdM* a través del monitoreo de condición tendrá como resultado que mantenimiento tenga el control que hasta ahora no ha tenido totalmente.

Debido a la cantidad de equipos de la planta, es necesario delimitar su número que se puedan someter a estudio un grupo piloto, por lo que se seleccionará un grupo determinado de equipos críticos con motores mayores a 15 KW.

Para la implementación de CBM se capacitará al personal del departamento de mantenimiento en termografía, análisis de vibraciones e interpretación de resultados de análisis de lubricantes, que serán las tecnologías a utilizar para monitorear los parámetros del grupo de estudio.

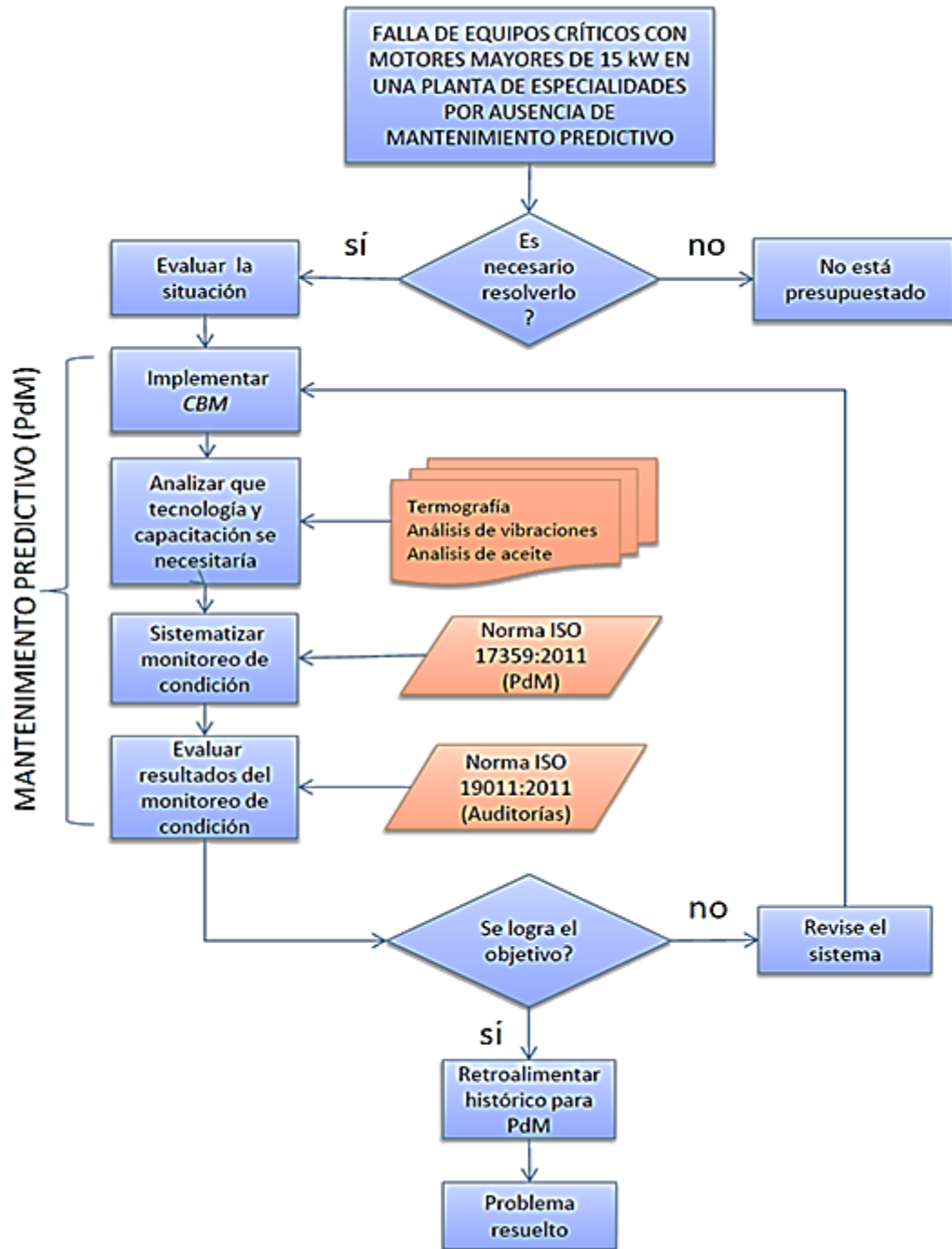
El tiempo de monitoreo de condición del grupo de estudio será de 9 meses, durante este período se analizarán los datos provenientes de ensayos no destructivos de termografía, análisis de vibraciones y análisis de lubricantes (END) para crear tendencias de los principales parámetros de los equipos, que se utilizarán para la toma de decisiones relacionadas a la detección temprana de las fallas.

6.1. Esquema de solución

El diagrama de solución presenta de manera resumida los pasos generales necesarios para implementar un programa de monitoreo de condiciones, planteando inicialmente, el problema general para después determinar si se necesita solucionarlo; si se toma la decisión, posteriormente se detallan los elementos más relevantes del proceso, para finalmente evaluar la mejora continua.

Las normas principales que se usarán serán la normas ISO 17359 e ISO 19011, que darán los lineamientos generales sobre los requisitos para la implementación de monitoreo de condición y lineamientos para la auditoría de procesos, porque ambas son fundamentales para la estandarización del *PdM*.

Figura 1. Esquema de solución



Fuente: elaboración propia.

7. MARCO TEÓRICO

El mantenimiento ha estado presente desde los inicios de la industria en general, la ha acompañado 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. La evolución puede verse también en cómo ha evolucionado la forma en que se define; desde las más variadas definiciones en que se le circunscribe a devolver a un equipo su condición de funcionalidad hasta la definición estandarizada dada por la Norma de Gestión de Activos PASS-55, que dice que el mantenimiento son:

“Todas aquellas actividades y prácticas sistemáticas y coordinadas a través de las cuales una organización administra de manera óptima sus activos y el comportamiento de estos, riesgos y gastos durante su ciclo de vida útil con el propósito de alcanzar su plan estratégico organizacional” (PASS-55, 2008).

7.1. Evolución del mantenimiento

Poder 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)

En su tesis, Acevedo, sobre la implementación de mantenimiento predictivo en facilidades de producción de petróleo, proporciona una tabla de generaciones de mantenimiento:

Tabla I. 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)
Expectativas del mantenimiento	Repare equipos cuando estén rotos	<ul style="list-style-type: none"> - Equipos con mayor disponibilidad - mayor duración de los Equipos - Bajos costos de mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> - Equipos con mayor disponibilidad y confiabilidad. - Incremento en la seguridad - Sin daño al ambiente - Mejor calidad de producto - Mayor duración de los equipos 	<ul style="list-style-type: none"> - Equipos con mayor disponibilidad y confiabilidad - Incremento en la seguridad - Sin daño al ambiente - Mejor calidad de producto - Mayor duración de los equipos - Mayor Costo – Efectividad - Manejo del Riesgo (legislación, procedimientos, entrenamientos, equipos para minimizar el riesgo, etc)
Visión sobre la falla del equipo	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)
Técnicas de mantenimiento	Todas las habilidades de reparación	<ul style="list-style-type: none"> - Mantenimientos mayores planeados y programados - Sistemas de planificación y control de los trabajos (PERT, Gantt, etc.) - Computadores grandes y lentos 	<ul style="list-style-type: none"> - Mantenimiento predictivo - Diseño basado en confiabilidad y mantenibilidad - Estudio de riesgos - Análisis de modos de falla y sus efectos (FMEA, FMECA) - Pequeños y rápidos computadores - Sistemas expertos - Trabajo en equipo y apoderamiento 	<ul style="list-style-type: none"> - Monitoreo por condición - Diseño basado en confiabilidad y mantenibilidad - Estudio de riesgos - Análisis de modos de falla y sus efectos (FMEA, FMECA) - Pequeños y rápidos computadores - Trabajo en equipo y apoderamiento - Uso de técnicas especializadas (RCA, RCM, TPM, PMO, Modelamiento de confiabilidad, optimización de repuestos etc.) - ERP – módulos de mantenimiento - "Outsourcing" - Internet

Fuente: Modelo para la implementación de Mantenimiento Predictivo en las facilidades de producción de petróleo. Acevedo (2012) p.25.

De la clasificación generacional del mantenimiento de la tabla I, se puede observar que el mantenimiento predictivo empezó a aplicarse en la tercera generación y durante la misma hubo un fuerte enfoque en mantenimiento centrado en la confiabilidad (Moubray, 1991).

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

7.2. Clasificación del mantenimiento

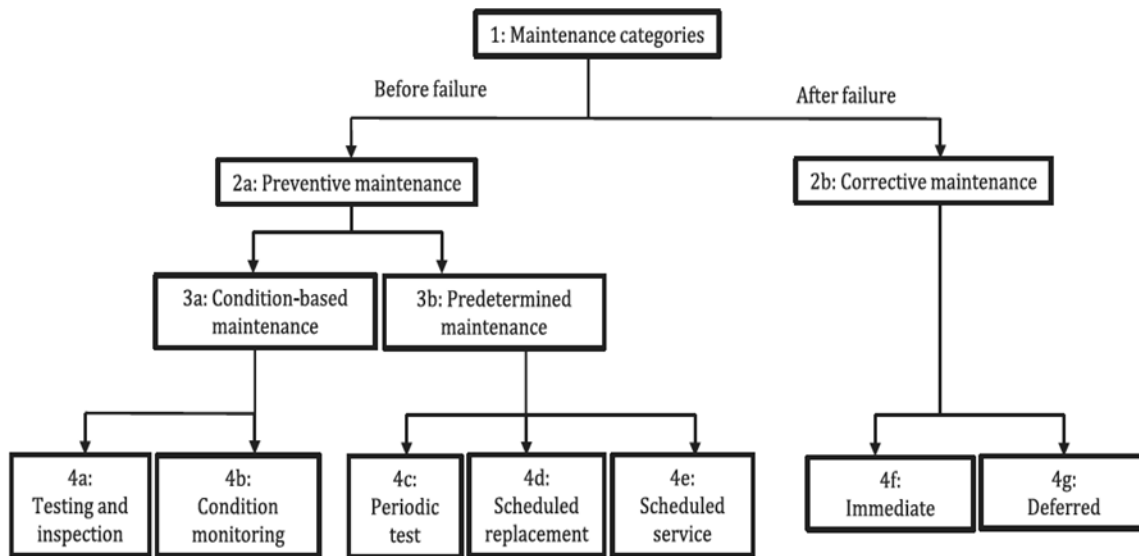
Según García (2012), la clasificación del mantenimiento fue un tema ampliamente discutido por décadas y aun así no se ha logrado unificar criterios que enumeren todos los tipos; no se ha logrado una única clasificación, que como fórmula matemática, pueda explicar cuáles son las etapas por la que debe ir pasando a medida que llega a un punto de madurez alto 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. Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Collection and data exchange of reliability and maintenance data for equipment.

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. (ISO 14224, 2016).

7.2.1. 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 (ISO 2041, 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 mucho 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, sino que comienzan a fallar paulatinamente en un período de semanas o meses, dando señales de ello a medida que van fallando; resulta fácil comprender que ninguna otra estrategia nos brinda mayor margen de tiempo para la planeación de intervenciones de mantenimiento y por ello, se debe considerar al mantenimiento predictivo como la fuente número uno de mantenimiento planificado.

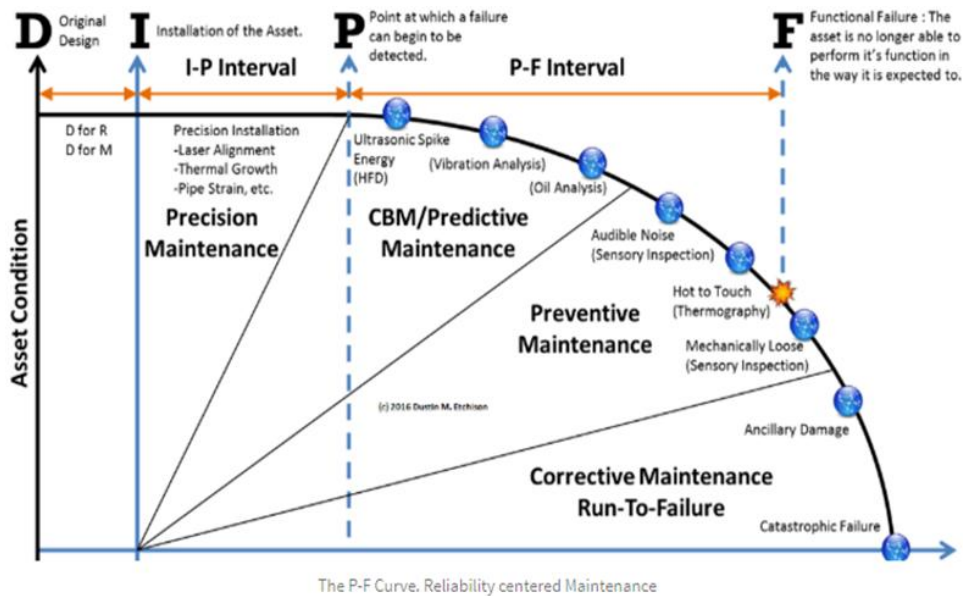
7.2.2. Mantenimiento basado en condición (CBM)

Para ISO 14224 (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 ilustración 3 muestra claramente el dominio del monitoreo de condición y porque 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: sep. 2017.

Para 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 este 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 de 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.

7.3. Tecnologías END para monitoreo de condición

La curva P-F sugiere 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 podemos mencionar las siguientes: inspección visual, ultrasonido, análisis de vibraciones, termografía IR, análisis de lubricantes, pruebas eléctricas estáticas, entre otras. Las 3 técnicas de ensayos no destructivos a aplicar en este caso se describen a continuación:

7.3.1. Análisis de Vibraciones

De acuerdo a ISO 2041, (2009). La 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, siendo su valor mayor o menor.

Sin embargo, para propósitos prácticos, es necesario hacer una diferenciación de términos relacionados a descripción básica de la vibración: AMAQ-S.A. (2005), proporciona definiciones simples, previas a establecer un programa de monitoreo de condición por vibraciones mecánicas:

7.3.1.1. Vibración simple

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).

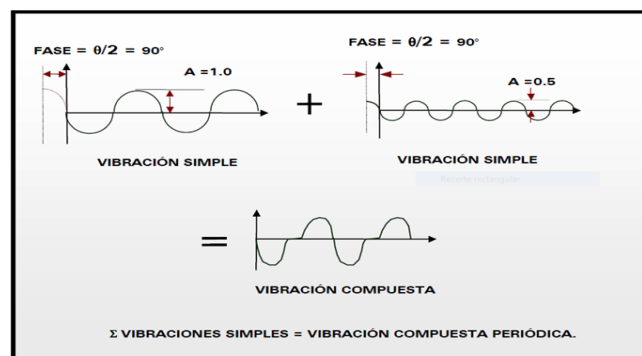
En el contexto de vibraciones, la amplitud es la cantidad de movimiento que puede tener un cuerpo a partir de un punto de equilibrio o neutral, se mide regularmente en valores pico-pico para desplazamiento y valores cero-pico y RMS para velocidad y aceleración.

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

7.3.1.2. 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



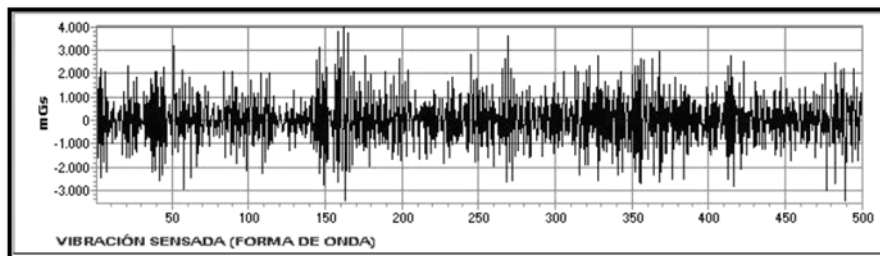
Fuente: Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico; A-MAQ S.A.; consultado: Agosto 2017.

7.3.1.3. Vibración aleatoria y golpeteo intermitente

También existen variaciones que no cumplen patrones especiales o que se repiten constantemente o que simplemente no se puede determinar dónde comienzan y dónde 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.

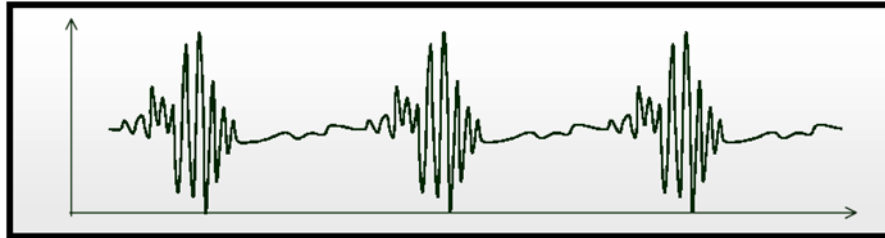
Con las ilustraciones siguientes se puede apreciar cuánto se ha complicado la representación de las vibraciones de un equipo.

Figura 5. **Vibración aleatoria**



Fuente: Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico; A-MAQ S.A.; consultado: Agosto 2017.

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



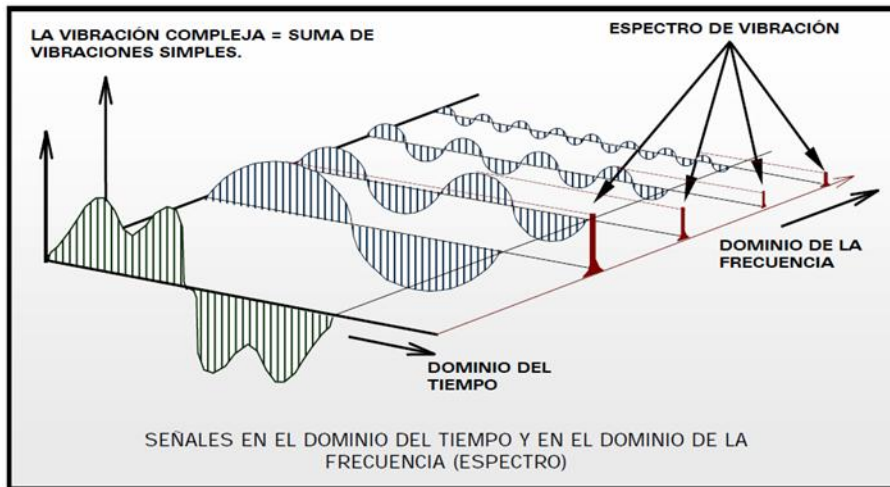
Fuente: Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico; A-MAQ S.A.; consultado: Agosto 2017.

7.3.1.4. 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 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: Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico; A-MAQ S.A.; consultado: Agosto 2017.

7.3.1.5. 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.

7.3.1.6. 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.

7.3.1.7. 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.

7.3.1.8. 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”.

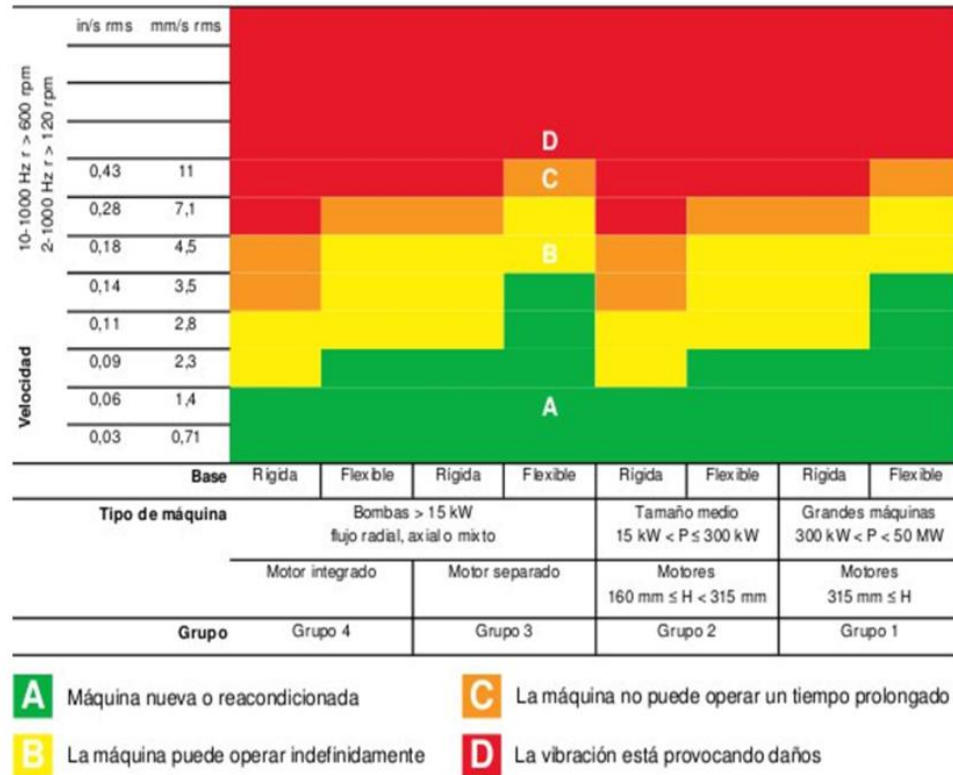
Entonces, un análisis de vibraciones debe ser realizado por alguien con entrenamiento y experiencia, que domine la teoría y el uso del equipo necesario.

Tabla II. **Niveles de vibración referencial de alarma**

NIVEL DE EMERGENCIA	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.
NIVEL DE PRECAUCIÓN	Valor referencial de operación continua 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.
NIVEL DE OBSERVACION	Valor referencial de operación continua sin restricciones, que indica que el equipo dinámico se encuentra en condición de funcionamiento aceptable bajo observación programada.
NIVEL NORMAL	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 10816:2003. Vibraciones mecánicas. Evaluación de la vibración de la máquina mediante mediciones en partes no rotativas. 2003.

Figura 8. **Criterio de severidad para vibraciones Mecánicas**



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

7.3.2. Termografía

Soriano y 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 razones que hacen de la termografía infrarroja una técnica fundamental END:

7.3.2.1. Es sin contacto

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

7.3.2.2. Es 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.

7.3.2.3. Se realiza en tiempo real

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 IRT 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 varias áreas relacionadas:

7.3.2.4. 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.

7.3.2.5. Ciencia térmica

Se trata del conocimiento básico y entendimiento de las dos primeras leyes de la termodinámica: 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.

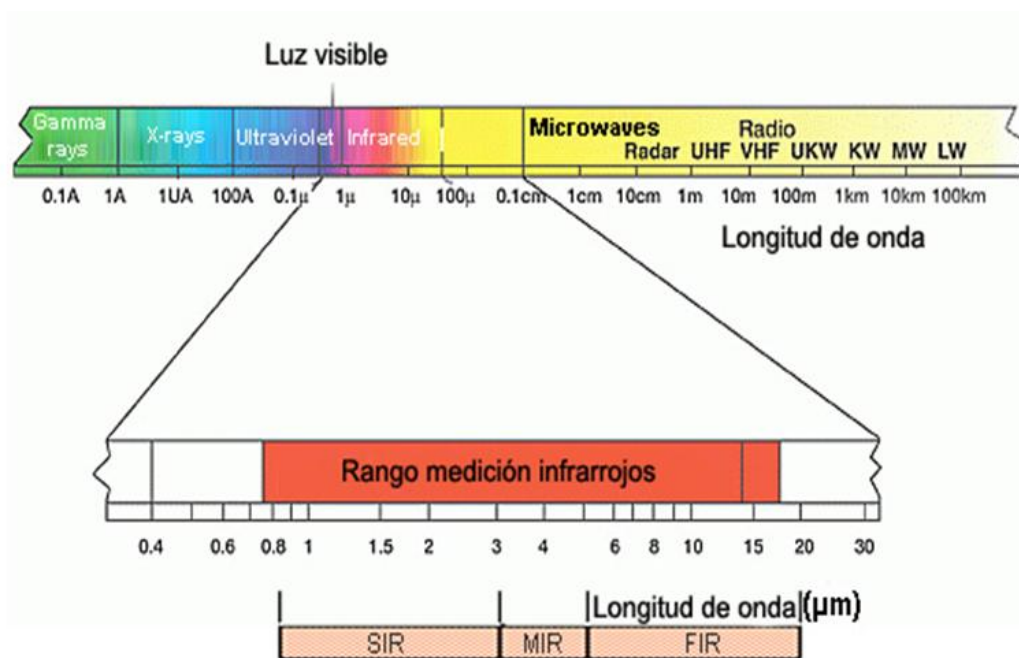
7.3.2.6. Radiación

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 μm para el infrarrojo cercano, de 1,0-2,5 μm para el infrarrojo de onda corta, de 2,0-5,0 μm para el infrarrojo de onda media, y de 8-14 μm para el infrarrojo de onda larga.

Figura 9. El rango IR dentro del espectro electromagnético



Fuente: [http://www.academiatesto.com.ar/cms/radiacion-infrarroja-en-el-espectro-de-ondas-2;](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, ϵ
- Absortividad, α
- Reflectividad, ρ
- Transmisividad, τ

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, llevan a la ecuación número 5:

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

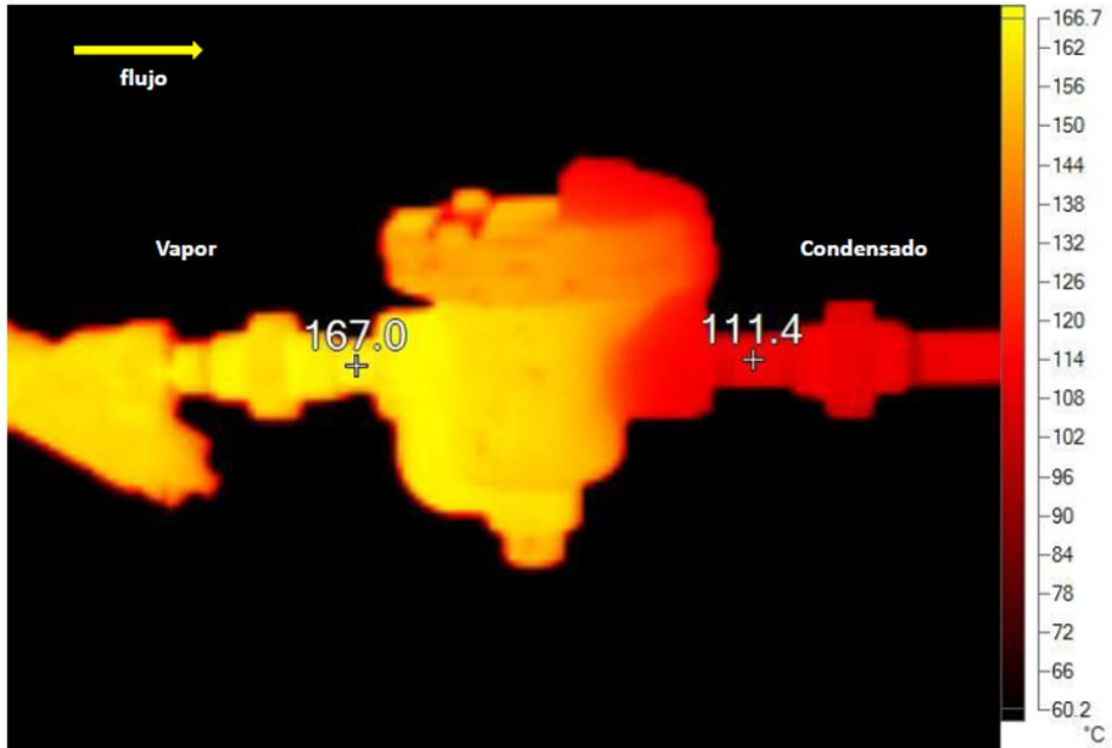
La radiación importante y que debe ser captada en un termograma es la radiación saliente y como ésta tiene dos componentes $W_{\text{SALIENTE}} = W_{\epsilon} + W_p$, el termógrafo debe realizar cálculos que le permitan determinar únicamente el valor de la radiación emitida, que será la que finalmente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

7.3.2.7. 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 10. **Termograma de una trampa de vapor en buen estado**



Fuente: elaboración propia.

La figura 10 ejemplifica una aplicación típica en la industria, y corresponde a un termograma tomado en la planta de especialidades, en ella se muestra un diferencial de temperatura correspondiente a la transformación de vapor a condensado a través de una trampa de condensados

7.3.2.8. **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).

7.3.2.9. 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, pero que deben ser capaces de entender sin dificultad un informe de termografía redactado profesionalmente. La figura 10 muestra la clasificación de severidad y la prioridad de reparación de equipos eléctricos.

Tabla III. **Clasificación de Prioridad de Reparación Eléctrica para Termografía**

Criterio de Severidad	
ΔT	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: Norma ISO TC 108 apartado 11.3

7.3.3. Análisis de Lubricantes

Según Estupiñan (2001): El análisis de aceite consiste en una serie de pruebas de laboratorio que se usan para evaluar la condición de los lubricantes usados o los residuos presentes. Al estudiar los resultados del análisis de residuos, se puede elaborar un diagnóstico sobre la condición de desgaste del

equipo y sus componentes. Lo anterior, permite la planificación de paros y reparaciones con tiempo de anticipación, reduciendo los costos y tiempos muertos involucrados. Los objetivos por los que se realiza un análisis de lubricantes son los siguientes:

- Control de la degradación del lubricante.
- Monitorear daño mecánico de componentes (desgaste).
- Control de contaminantes por sólidos, fluidos o gases.
- Verificar que se está usando el lubricante adecuado.

Hablar del control de la degradación del lubricante es monitorearlo desde su fase inicial, darle seguimiento periódico y determinar en qué momento reemplazarlo antes de que deje de ejercer su función principal.

De acuerdo con Aguillón (2004), el monitoreo de los aceites es una de las herramientas más valiosas que el ingeniero de mantenimiento tiene a su disposición con la finalidad de maximizar la vida útil de los equipos mecánicos. Las diferentes técnicas para el monitoreo período de los aceites usados como el análisis físico-químico, la espectrofotometría por emisión atómica, el conteo de partículas y la ferrografía permiten evaluar el estado del aceite para su cambio oportuno y el grado de desgaste de los diferentes mecanismos del equipo, el cual si es anormal permitirá implementar correctivos que eviten la parada no programada o en caso contrario trabajar con confiabilidad y cuantificar la vida real de servicio del equipo que debe estar de acuerdo con lo especificado por el fabricante.

Un programa moderno de análisis de aceite según Trujillo (2007), debe ser considerado como una cadena donde la integridad y la fortaleza de cada eslabón es idéntica; es la herramienta efectiva para incrementar la confiabilidad

de la maquinaria. Ese programa utiliza la tecnología, los conocimientos de la operación del equipo y los resultados del análisis de aceite para establecer acciones específicas de mantenimiento y permitir una lubricación óptima.

El análisis de aceite no sólo va a permitir monitorear el estado de desgaste de los equipos, detectar fallas incipientes, sino también establecer un programa de lubricación basado en condición.

7.4. Norma ISO 17359:2011. Monitoreo de condición y diagnóstico de fallas – lineamientos generales

Originalmente fue publicada en 2003, su última actualización es del 2011 y es la que está 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*.

Este modelo se basa en las siguientes etapas:

- 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
- Entrenamiento

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ÍNDICE DE TABLAS

GLOSARIO

ANTEDECENTES

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

JUSTIFICACIÓN

OBJETIVOS

ALCANCE

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Evolución del mantenimiento

1.2. Clasificación del Mantenimiento

1.2.1. Mantenimiento predictivo (*PdM*)

1.2.2. Mantenimiento basado en condición (*CBM*)

1.3. Tecnologías END utilizadas para monitoreo de condición

1.2.1. Análisis de vibraciones

1.2.2. Termografía

1.2.3. Análisis de lubricantes

1.4. Norma ISO 17359:2011. *Monitoring condition and diagnostics of machines – general guidelines.*

2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO, A TRAVÉS DEL MONITOREO DE CONDICIÓN

UTILIZANDO ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS BAJO LA NORMA 17359:2011.

3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE MONITOREO DE CONDICIÓN UTILIZANDO ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN EQUIPOS CRÍTICOS

4. PROPUESTA DEL MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO A TRAVÉS DE MONITOREO DE CONDICIÓN UTILIZANDO ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS BAJO LA NORMA 17359:2011.

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

9. MARCO METODOLÓGICO

9.1. Diseño de la investigación

Es una investigación no experimental que consistirá en diseñar un programa de mantenimiento predictivo para la planta de especialidades, a través del establecimiento de un programa de monitoreo de condición utilizando como base la norma ISO 17359 y apoyándose en otras tales como: ISO 2041 para definiciones y vocabularios; ISO 19011 para auditar el sistema, ISO TC 108 para termografía; ISO 10816 para análisis de vibraciones; ISO 4406 para análisis de lubricantes (fluidos hidráulicos, aunque para cada tipo de análisis efectuado se utiliza una norma ISO diferente).

9.2. Tipo de investigación

La investigación es de tipo descriptivo y utilizará los requisitos de la norma ISO 17359:2011, para implementar paso a paso un programa de mantenimiento predictivo utilizando END para monitoreo de condición de los equipos.

9.3. Alcance

El alcance estará delimitado al grupo de equipos mayores a 15 kW que resulten del análisis de *RCM* (confiabilidad y criticidad) en los cuales se aplicarán END de monitoreo de condición.

9.4. Fases para la implementación del modelo de mantenimiento predictivo en planta especialidades

Se seguirá la metodología del modelo de la norma ISO 17359:2011, pero adaptándola a las condiciones de la planta de especialidades. El modelo base de la norma se encuentra en el capítulo de anexos.

9.4.1. Fase 1. Investigación documental sobre tecnologías predictivas

Fase previa de investigación y profundización sobre mantenimiento predictivo, monitoreo de condición, ensayos no destructivos, análisis de vibraciones, termografía y análisis de lubricantes y se determinarán cuáles de las técnicas predictivas las aplicará el departamento de mantenimiento y cuales se contratarán.

9.4.2. Fase 2. Entrenamiento

Fase muy importante en la que se involucrará al personal de mantenimiento en el nuevo modelo de gestión predictivo.

- Capacitación en mantenimiento centrado en confiabilidad, *RCM*.
- Certificación en termografía del *Infrared Training Center* Nivel 1.
- Entrenamiento local en termografía a electricistas del departamento de mantenimiento.

Menciona Allied Reliability, Inc (2015) que es importante establecer el tipo de ejecución se implementará en la empresa:

- Interno: todas las tecnologías son manejadas por la organización.
- Contratado: todas las tecnologías son ejecutadas por una empresa especializada en servicios de *PdM*.
- Híbrido: parte del programa es ejecutado por la organización y parte por una empresa de servicios de *PdM*.

9.4.3. Fase 3. Revisión y actualización de equipos

Se debe revisar que la matriz de equipos corresponda a los que están activos y en uso, de no ser así debe ser depurada e ir agregando los que hagan falta.

- Levantamiento de equipos
- Identificación de funciones
- Codificación

9.4.4. Fase 4. Revisión de confiabilidad y criticidad

Determinar la criticidad de equipos para luego establecer una matriz en las cuales se deben priorizar en base a la experiencia del departamento de mantenimiento.

- Establecer la matriz de criticidad
- Realizar análisis de confiabilidad para determinar modos de falla, efectos, síntomas y criticidad para elegir los equipos a incluir en el programa de monitoreo de condición.

9.4.5. Fase 5. Selección del mantenimiento adecuado

- Se debe analizar si los equipos son antiguos o modernos de alta tecnología para decidir la estrategia correcta.
- Determinar si los equipos necesitan ser incluidos en una estrategia predictiva, preventiva o correctiva.

9.4.6. Fase 6. Selección del método de medición

Se deben tomar en cuenta el criterio de las personas entrenadas y certificadas en cada tecnología predictiva para la selección de estos elementos.

- Identificación de los parámetros a medir.
- Selección de las técnicas predictivas.
- Análisis de vibraciones.
- Termografía.
- Análisis de lubricantes.
- Determinar frecuencia de medición.
- Determinar puntos de medición.
- Establecer qué normas se usarán para priorizar niveles de severidad y alarmas.

9.4.7. Fase 7. Recolección de información y análisis

Es una fase muy importante, que ayudará a la correcta elección de acciones correctivas.

- Realizar mediciones periódicas y revisar tendencias siguiendo rutas predictivas.

- Evaluar los resultados de las mediciones contra las normas ISO correspondientes y los criterios de alerta propios establecidos por la empresa.
- Emitir diagnóstico de condición de equipos
- Evaluar los resultados y determinar si es necesario hacer una nueva inspección hasta que se genere un nivel de confianza alto en el resultado de condición obtenido.

Los instrumentos de recolección de la información a utilizar fueron diseñados tomando en cuenta los criterios de cada norma relacionada a cada una de las técnicas, en la sección de Anexos se adjuntan tres de los mismos, siendo estos:

- Informe de termografía
- Informe de análisis de vibraciones
- Reporte de análisis de lubricantes

9.4.8. Fase 8. Determinación de planes de acción

Se hará uso de la información recolectada y analizada para planificar que planes de acción se llevarán a cabo.

- Determinar las acciones correctivas derivadas de los resultados debidamente analizados y priorizados de la recolección de información de la condición de los equipos.
- Actualizar los registros históricos de condición de los equipos para la generación de tendencias.

9.4.9. Fase 9. Revisión y mejora continua

La mejora continua debe ser auditada para garantizar que el programa se mantenga funcional, para lograrlo se debe hacer uso de una herramienta estandarizada.

- Auditar el programa *CBM* utilizando la norma ISO 19011, para garantizar la confiabilidad del sistema.
- Informar a la gerencia sobre los resultados para generar las acciones correspondientes de mejora continua.

9.5. Plan de muestreo y diseño de instrumentos de recolección de información

La norma ISO 17359:2011 establece en su dos primeras fases de implementación, el uso de las técnicas de *RCM* para la elección de los equipos que serán sometidos a monitoreo de condición. Estas técnicas se basan en criterios de criticidad y confiabilidad, que serán aplicados a la maquinaria de la planta de especialidades y será de esta forma en que se seleccionaran los equipos de muestra para el estudio.

Los instrumentos para la recolección de información se presentan como ejemplos en el capítulo de anexos.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Cada técnica de ensayo no destructivo está regida por una norma ISO y el uso y aplicación de los criterios correspondientes a cada uno de ellos lleva a tres grupos de análisis, por razones de tiempo y presupuesto, para finalmente, tener en forma gráfica la tendencia de la condición de los equipos que se monitorean.

El monitoreo de condición conforme a la norma ISO 17359:2011, es continuo, sin embargo, en este caso se limitará a 3 ensayos de termografía, análisis de vibraciones y análisis de lubricantes del grupo de estudio de equipos críticos

10.1. Gráficos de barras

Se utilizará esta herramienta estadística para hacer comparaciones entre mediciones en diferentes puntos del tiempo y para establecer el grado de avance de las mediciones.

10.2. Gráficos de análisis de tendencias

Se utilizarán instrumentos de estadística descriptiva para construir gráficos de tendencias para el seguimiento en el tiempo de los parámetros a monitorear en los equipos, con la finalidad de predecir en que momento una intervención de mantenimiento debe efectuarse antes de llegar al punto de rotura o falla. Estas gráficas podrán ser individuales o por grupos de equipos, lo que

dependerá del tipo de análisis que se desee, para dichas gráficas se utilizará Excel de Microsoft Office.

Los resultados que se analizarán serán todos aquellos provenientes de la recolección de datos que se hará utilizando los siguientes instrumentos:

- Criterios de severidad de normas ISO: como aprecia en las ilustraciones 8 y 12, cada norma ISO define criterios de severidad para priorizar las reparaciones o acciones correctivas, por tal razón el uso de esos criterios será indispensable para ponderar cada inspección que se realice.
- Rutas predictivas: una ruta predictiva es una listado que agrupa funcionalmente las inspecciones por cada técnica predictiva a utilizar y en los resultados obtenidos se priorizaran los equipos por severidad, de esta forma se simplificará el análisis de los datos.

11. CRONOGRAMA

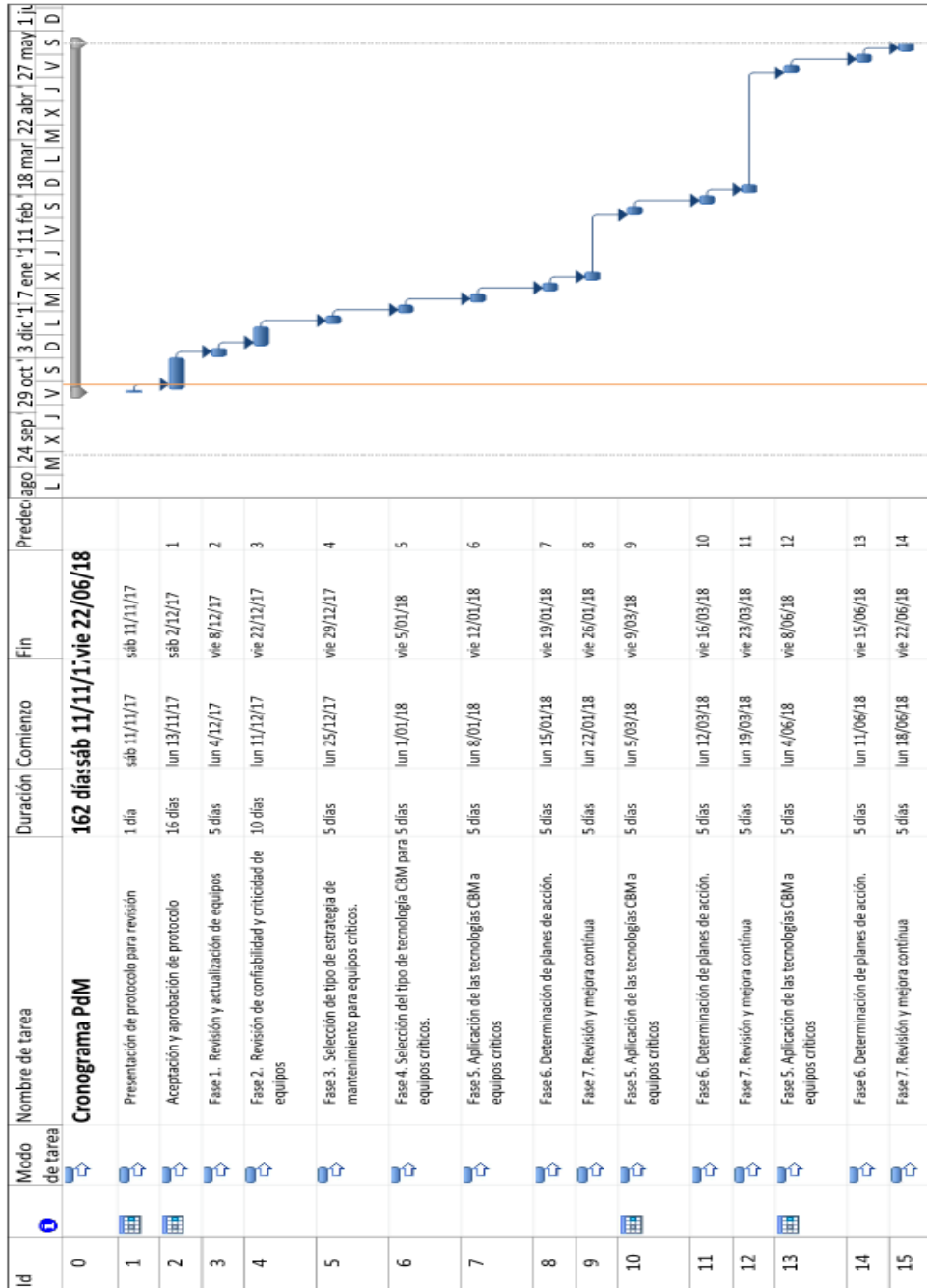
El tiempo estimado para la realización del estudio es de 9 meses, período en el cual se estiman hacer 3 inspecciones por cada técnica a utilizar y los resultados que se obtengan de estas mediciones constituirán la línea base para la continuidad del Programa de Monitoreo de Condición.

El proyecto se subdivide en 4 etapas:

- Presentación y aprobación del protocolo del trabajo de graduación.
- Inicio de la aplicación de la norma ISO 17359, que incluye la primera medición los parámetros a monitorear.
- Segunda medición utilizando las técnicas de *CBM*.
- Tercera medición de la condición de equipos monitoreados.

El resultado de las 3 mediciones constituirá la base de datos para iniciar la construcción de tendencias del comportamiento de los parámetros monitoreados en los equipos críticos objetos del estudio.

Figura 11. Implementación del mantenimiento predictivo a través de **CBM**



Fuente: elaboración propia.

12. RECURSOS NECESARIOS Y FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Para la realización de este estudio se cuenta con la autorización de la gerencia corporativa de mantenimiento de la industria avícola, pero la gerencia de mantenimiento corporativo, espera que se justifiquen cada uno de los recursos que se utilizarán, con el objetivo presupuestar las inversiones después de terminado el estudio. Los recursos a utilizar se clasifican de la siguiente manera:

12.1. Recursos

12.1.1. Recursos humanos

- Asesor: profesional que brindará asesoría para la elaboración del trabajo de graduación.
- Estudiante: la persona que realiza el estudio de implementación del programa de mantenimiento predictivo.
- Personal de planta: técnico electricista que apoyará en el área de termografía.

12.1.2. Capacitaciones

- Gestión de mantenimiento basado en confiabilidad
- Termografía con certificación nivel 1 ITC
- Capacitación de electricistas en termografía y mantenimiento predictivo.

12.1.3. Equipos de termografía

- Cámara termográfica Termacam Flir E60
- Camara termográfica Fluke Ti25
- Anemómetro

12.1.4. Servicios contratados de Pdm

- Servicios de análisis de vibraciones
- Servicios de análisis de lubricantes

Tabla IV. Propuesta financiera

RECURSOS	DESCRIPCION	DURACIÓN TOTAL (DIAS)	COSTO POR DIA (Q)	TOTAL (Q)
RECURSO HUMANO				
Asesor	Cuota por asesoría en la realización del documento de Tesis de Graduación.			Q 2,500.00
Estudiante	Sueldo aproximado estimado en base a la duración total del proyecto de Tesis de Graduación.	Q 120.00	Q 350.00	Q 42,000.00
Técnico electricista de planta	Sueldo aproximado estimado en base a la duración del tiempo invertido en toma de termogramas	Q 60.00	Q 200.00	Q 12,000.00
CAPACITACIONES				
Gestión de Mantenimiento y Confiabilidad	Cuota única por capacitación en Mantenimiento Centrado en Confiabilidad y Mantenimiento Predictivo.			Q 6,935.00
Termografía Nivel 1	Cuota única por la certificación en Termografía Nivel 1, del Infrared Technology Center			Q 24,750.00
SERVICIOS DE ANALISIS VIBRACIONES				
		No. DE ANALISIS	COSTO POR ANALISIS	
Análisis de Vibraciones	Realización de 3 rutinas de Medición, Captura y Análisis de Vibración en equipos críticos.	Q 3.00	Q 8,760.00	Q 26,280.00
Análisis de Lubricantes	Realización de 3 Análisis de Lubricantes al grupo de equipos críticos seleccionados.	Q 3.00	Q 6,469.00	Q 19,407.00
EQUIPO				
Cámara termográfica IR	Compra de cámara termográfica Flir Termacam E60			Q 62,050.00
TOTAL				Q 195,922.00

Fuente: elaboración propia.

El total de esta propuesta será cubierta por el departamento de mantenimiento de la industria avícola y representa el total de la inversión inicial para la implementación de un programa de mantenimiento predictivo, a través del monitoreo de condición. El personal capacitado y el equipo son recursos del departamento que se consideran, serán indispensables, para la continuidad de la gestión del *PdM*.

12.2. Factibilidad del estudio

Se concluye que el estudio para la implementación de la gestión de mantenimiento predictivo, a través del monitoreo de condición es factible, debido a que se cumplen con los requerimientos de recurso humano, técnicos, de equipo y financiamiento.

13. 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. Aguilón, 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*. Medellín.
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. (2009). *ISO 2041:2009 Mechanical vibration, shock and condition monitoring - Vocabulary*. Norma internacional.

15. 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.
16. Aguillón, P. R. (2004). *Tribología y lubricación industrial y automotriz*. (4a. ed.). Medellín, Colombia.
17. Allied Reliability Group. (2013). *PdM Secrets Revealed* (6ta. ed.). Charlestone, South Carolina, Estados Unidos.
18. AMAQ-S.A. (2005). *Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico*. Medellín.
19. 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.
20. 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.
21. Butcher, S. (2000). *Assesment of Condition-Based Maintenance in the Department of Defense*.
22. 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 Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.

23. 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.
24. 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.
25. Garrido, S. G. (2003). *Organización y Gestión Integral de Mantenimiento*. Madrid, España: Diaz de Santos.
26. Garrido, S. G. (2009). *Mantenimiento Predictivo* (Vol. 3). (Renovetec, Ed.) Madrid, España: Renovetec.
27. Infrared Training Center. (2017). *Manual para el curso de Termografía Nivel 1* (Rev. 1.1 ed.). (ITC, Ed.) Estocolmo, Suecia.
28. International Organization for Standardization. (2009). *ISO 2041:2009 Mechanical vibration, shock and condition monitoring - Vocabulary*. Norma internacional.
29. 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.

30. 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.
31. 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.
32. 1Moubray, J. (1991). *Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad, RCM II.* Ashville, North Carolina, Estados Unidos: Aladon LLC.
33. P., E. A. (Mayo de 2001). *Impacto del Mantenimiento Proactivo en la Productividad.* Perú.
34. Peinado, J. P. (19 de julio de 2016). *Preditec/IRM.* Recuperado el septiembre de 2017, de 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/>
35. 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.

36. Shin, J.-H., & Jun, H.-B. (January de 2015). On condition based maintenance policy. *Journal of Computational Design and Engineering*(2), 119-127.
37. Soriano, M. C., & Rafael Royo Pastor. (2016). *Termografía Infrarroja. Nivel II*. Madrid: FC Editorial.
38. Trujillo, G. (Abril-mayo de 2007). Análisis de aceite, una estrategia proactiva y predictiva. *Revista Machinery Lubrication*, 18, 1-5.

14. APÉNDICES

Apéndice 1. Normas Internacionales utilizadas en este estudio

NORMA	AÑO	DESCRIPCIÓN
ISO 10816	2003	Vibraciones mecánicas. Evaluación de la vibración de la máquina mediante mediciones en partes no rotativas.
ISO 14224	2016	Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment.
ISO 2041	2009	Mechanical vibration, shock and condition monitoring- Vocabulary.
ISO 17359	2011	Condition Monitoring and diagnostics of machines - General guidelines.
ISO 19011	2002	Directrices para la Auditoría de los Sistemas de Gestión.
ISO 4406	2017	Hydraulic fluid power - Fluids - Method for coding the level of contamination by solid particles.

Fuente: elaboración propia.

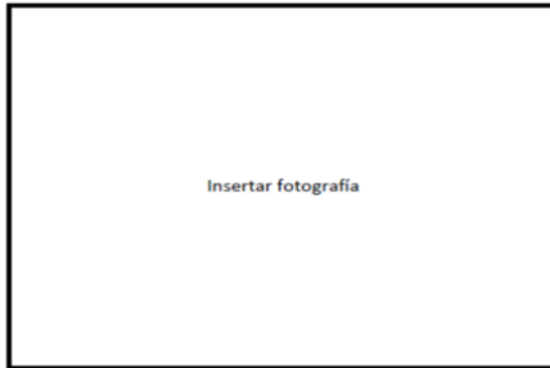
Apéndice 2. Instrumento de recolección de datos de termografía

DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO
MANTENIMIENTO PREDICTIVO

INFORME DE TERMOGRAFÍA

Fecha de inspección: _____

Realizado por: _____



Criterio de severidad

> de 40°C	20°C - 40°C	10°C - 20°C	< 10°C
Reparar de inmediato	Reparar tan pronto sea posible	Reparar cuando el tiempo lo permita	Normal

Resumen de la inspección	
Equipo	_____
Código	_____
Ubicación	_____
% de carga	_____
Delta de temperatura	_____
Falla	_____
Fecha y hora de la imagen	_____

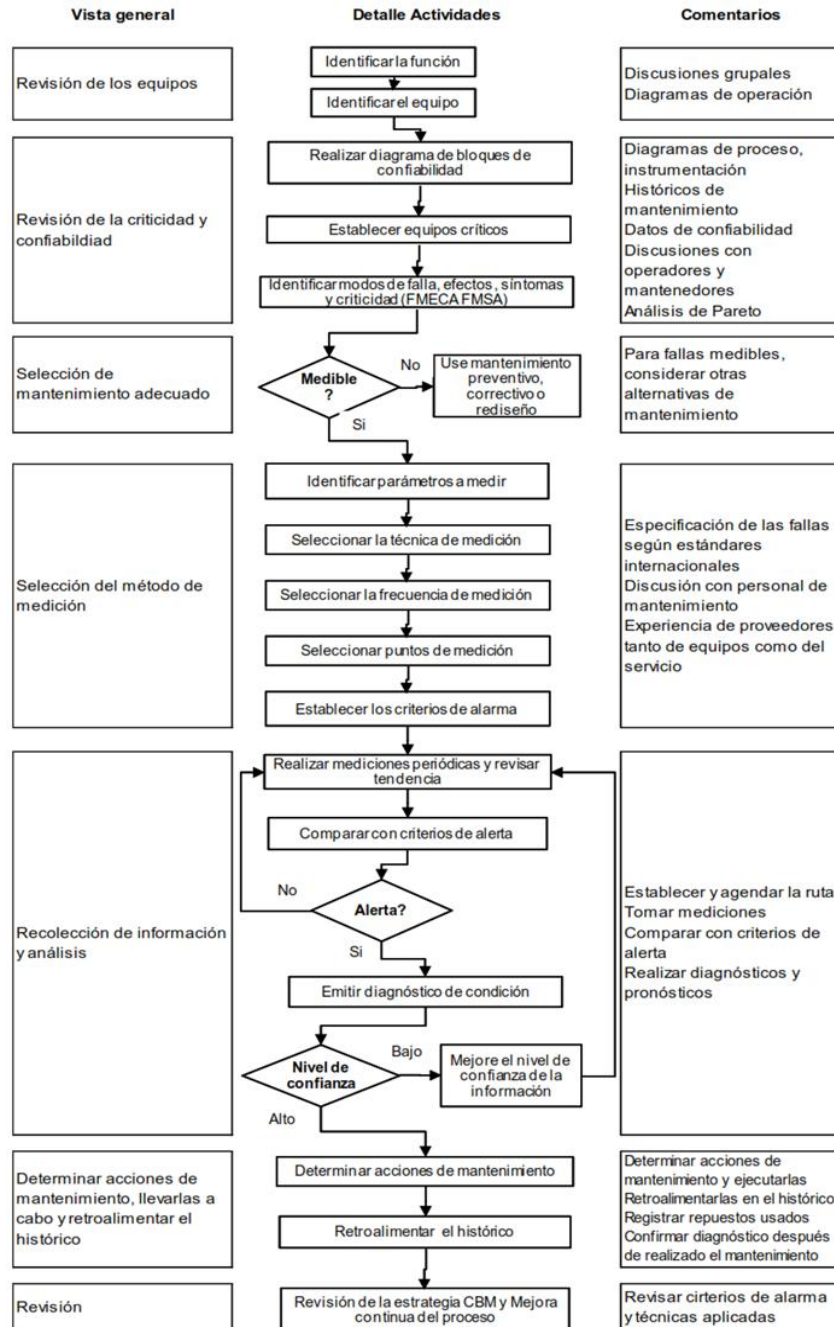
Parámetros de medidas	
Emisividad del objeto	_____
Temperatura reflejada	_____
Distancia	_____
Temperatura ambiental	_____
Húmedad relativa	_____

Análisis y acción correctiva recomendada:	
Reparado por:	Fecha:

Fuente: elaboración propia.

15. ANEXOS

Anexo 1. Modelo para implementación de monitoreo de condición, *CBM*



Fuente: Norma ISO 17359. Condition Monitoring and diagnosis of Machines – General Guidelines.

Anexo 2. Instrumento de recolección de datos para análisis de lubricantes



Reporte de Análisis de Lubricante

North America: +1-877-808-3750

0	1	2	3	4
NORMAL	ANORMAL			CRITICO

Severidad General del Reporte

Información de Cuenta	Información del Componente	Información de muestra
Número de cuenta: 296132-0000-0000 Nombre de Compañía: FRIGORIFICOS DE GUATEMALA Contacto: CESAR TEJAXUN Dirección: 1ST CALLE 2-91 ZONA 5 VILLA NUEVA GT Teléfono: +502-6632-2300	ID de Componente: COM0000030 ID Secundaria: COMPRESOR FRICK BLAST FREEZER Filtro de tipo de componente: REFRIGERATION COMPRESOR Fabricante: FRICK Modelo: RXF-68 Aplicación: PLANT/INDUSTRIAL Capacidad de sumidero: 120 L	Número de Huella: 17153B07304 Número de laboratorio: G-283390 Localización de Laboratorio: Guatemala City Analista de Datos: BJN Tomada: 03-jun-2017 Entregado: 05-jun-2017 Recibido: 07-jun-2017 Completado: 08-jun-2017
Información de filtro	Información Misceláneo	Información del Producto
Tipo de filtro: WIRE MESH Índice de Micrón: 0		Fabricante del Producto: FRICK Nombre del Producto: #3 Grado de Viscosidad: ISO 68
Comentarios: Debido al resultado del analisis de CONTEO DE PARTICULAS, se sugiere filtrar el sistema para mejorar la limpieza del mismo. y/o Cambio del filtro es sugerido si no hecho en el tiempo del muestreo (como aplicable); El conteo de partículas se encuentra a NIVEL SEVERO; Por favor de proveer el tamaño de micron del filro para poder señalar el conteo de partículas adecuadamente con el uso del filtro:		

Muestra #	Metales de Desgaste (ppm)										Metales Contaminantes			Fuente de Varios Metales (ppm)					Metales Aditivos (ppm)					
	Hierro	Cromo	Niquel	Aluminio	Cobre	Plomo	Estaño	Cadmio	Plata	Vanadio	Silice	Sodio	Potasio	Titanio	Molibdeno	Antimonio	Manganeso	Litio	Boro	Magnesio	Calcio	Bario	Fósforo	Zinc
1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5

Muestra #	Información de muestra							Contaminantes			Propiedades de líquido					
	Fecha de toma	Fecha de recibo	Tiempo de Aceite h	Tiempo de unidad h	Cambio de Aceite	Aceite Agregado L	Cambio de Filtro	Dilución de Combustible % de Vol	Hollin % de Vol	Agua % de Vol	Viscosidad 40 ° C cSt	Viscosidad 100 ° C cSt	Número de Acido mg KOH/g	Número Básico mg KOH/g	Oxidación abs/cm	Nitración abs/0.1 mm
1	03-jun-2017	07-jun-2017	6900	6900	No	0	No			<.1 - FTIR	64.9		0.06		6	3

Muestra #	Conteo de Partículas (partículas/mL)									Método de prueba	Análisis Adicionales	
	Código ISO Basado en 4/6/14	> 4 µm	> 6 µm	> 10 µm	> 14 µm	> 21 µm	> 38 µm	> 70 µm	> 100 µm			
1	22/21/19	32412	19385	7615	3259	1108	146	15	2	ISO-11500		

Los comentarios son un consultivo y se basan en el supuesto de que la muestra y los datos presentados son válidos. Lubricante o ausencia de tiempo del componente limita la evaluación. Ninguna garantía expresada o implícita.

Fuente: Resultados de análisis de lubricantes proporcionado por Polaris Laboratories. Junio 2017.