



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

**DESARROLLO DE UNA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO, BASADO EN TÉCNICAS NO
DESTRUCTIVAS Y LA NORMA ISO 17359 PARA LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN No. 1 DE LA
PLANTA DE JABONES DE LAVANDERÍA**

Ing. Walter Gioveny Orellana Barrera
Asesorado por el Mtro. Ing. Rudy René Carias

Guatemala, junio de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DESARROLLO DE UNA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO, BASADO EN TÉCNICAS NO
DESTRUCTIVAS Y LA NORMA ISO 17359 PARA LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN No. 1 DE LA
PLANTA DE JABONES DE LAVANDERÍA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. WALTER GIOVENY ORELLANA BARRERA
ASESORADO POR EL MTRO. ING. RUDY RENÉ CARIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
MAESTRO EN ARTES EN INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

GUATEMALA, JUNIO DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	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	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE DEFENSA

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

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 UNA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO, BASADO EN TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS Y LA NORMA ISO 17359 PARA LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN No. 1 DE LA PLANTA DE JABONES DE LAVANDERÍA

Tema que me fuera aprobado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 06 de marzo de 2019.



Ing. Walter Gioveny Orellana Barrera

Ref.APT-2019-012

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 UNA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO, BASADO EN TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS Y LA NORMA 17359 PARA LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN NO. 1 DE LA PLANTA DE JABONES DE LAVANDERÍA"** presentado por el Ingeniero Mecánico Industrial **Walter Gioveny Orellana Barrera** quien se identifica con Carné 9516719, 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, junio de 2019.

Cc archivo/L.Z.L.A.

Ref.APT-2019-012

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 UNA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO, BASADO EN TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS Y LA NORMA 17359 PARA LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN NO. 1 DE LA PLANTA DE JABONES DE LAVANDERÍA"** presentado por el Ingeniero Mecánico Industrial Walter Gioveny Orellana Barrera quien se identifica con Carné 9516719, 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 Dario Álvarez Coti
Director

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



Guatemala, junio de 2019.

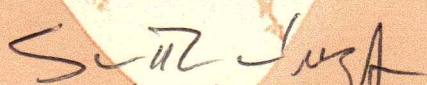
Cc: archivo/L.Z.L.A.

Ref.APT-2019-012

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 UNA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO, BASADO EN TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS Y LA NORMA 17359 PARA LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN NO. 1 DE LA PLANTA DE JABONES DE LAVANDERÍA"** presentado por el Ingeniero Mecánico Industrial **Walter Gioveny Orellana Barrera** quien se identifica con Carné 9516719.

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, junio de 2019.

Cc. archivo/L.Z.L.A.

Ref.APT-2019-012

En mi calidad como Asesor del Ingeniero Mecánico Industrial Walter Gioveny Orellana Barrera quien se identifica con carné No. 9516719 procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado "DESARROLLO DE UNA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO, BASADO EN TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS Y LA NORMA 17359 PARA LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN NO. 1 DE LA PLANTA DE JABONES DE LAVANDERÍA" 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"

Maestro. Ing. Rudy René Carias
Asesor(a)

Rudy René Carias
Ingeniero Mecánico
Colegiado 11125

Guatemala, junio de 2019.

Cc archivo/L.Z.L.A.

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por darme la vida, la salud y la sabiduría para alcanzar mis sueños y metas.
Mis padres	Que desde el cielo me dan su bendición y su amor eterno.
Mi esposa Aury y mi hijo Ariel	Fuente de inspiración para alcanzar mis metas y superación constante.
Mis hermanos	Miguel, Guilmar y Cecilia, por su amor y apoyo en todo momento.
Mis sobrinos	Que sirva de ejemplo y que nunca dejen de superarse.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por ser la fuente vida, fuente de iluminación, de sabiduría y ser la fortaleza en los momentos difíciles.
Mis padres	Miguel Ángel Orellana y Saraí Barrera, por su amor y apoyo, gracias a ellos alcanzo ésta meta, un abrazo y un beso hasta el cielo.
Mi esposa e hijo	Aury y Ariel, por su amor, por su apoyo, por su comprensión y paciencia durante el proceso.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por abrirme sus puertas y brindarme los recursos necesarios para mi carrera profesional.
Facultad de Ingeniería	Por ser la fuente de aprendizaje y conocimientos para poner en práctica en la industria.
Mis amigos	Por su apoyo, amistad y consejos en esta carrera.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XI
GLOSARIO.....	XIII
RESUMEN.....	XV
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PREGUNTAS ORIENTADORAS	XVII
OBJETIVOS	XXI
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XXIII
INTRODUCCIÓN.....	XXVII
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Mantenimiento	1
1.2. Tipos de mantenimiento.....	2
1.2.1. Mantenimiento correctivo	3
1.2.2. Mantenimiento preventivo	3
1.2.3. Mantenimiento basado en condición (CMB)	4
1.2.3.1. Toma de datos	5
1.2.3.2. Toma de decisiones	6
1.2.3.3. Objetivos del CBM	7
1.2.3.4. Técnicas de CBM.....	7
1.3. Planta de jabones de lavandería.....	9
1.4. Análisis de vibraciones	10
1.4.1. Pasos para análisis de vibraciones	12
1.4.2. Parámetros usados para medir la vibración.....	16
1.4.2.1. Puntos de medición.....	18

1.4.3.	Normas para análisis de vibraciones	21
1.4.4.	Causas de falla	23
1.4.4.1.	Desbalance	23
1.4.4.2.	Desalineación	24
1.4.4.3.	Excentricidad	25
1.4.4.4.	Rodamientos defectuosos.....	25
1.4.4.5.	Vibración debido a partes flojas	26
1.4.4.6.	Vibraciones fajas y poleas	27
1.4.4.7.	Vibraciones por torbellino de aceite	27
1.4.4.8.	Vibraciones en engranajes.....	28
1.4.4.9.	Vibraciones en motores	28
1.4.5.	Efectos de las vibraciones mecánicas.....	29
1.5.	Termografía infrarroja.....	30
1.5.1.	Tipos de termografía	31
1.5.2.	Ventajas de la termografía infrarroja	32
1.5.3.	Cámara termográfica	33
1.5.4.	Aplicaciones de la termografía infrarroja	35
1.5.4.1.	Inspección de sistemas eléctricos ...	36
1.5.4.2.	Inspección en sistemas mecánicos .	37
1.5.4.3.	Aplicaciones industriales.....	39
1.5.4.4.	Otras aplicaciones	40
1.5.4.5.	Visión nocturna	41
1.5.4.6.	Diagnóstico de motores	42
1.5.5.	Normativa ISO para termografía infrarroja	44
1.5.5.1.	Norma ISO 18434-1: 2008	44
1.6.	Análisis de aceite	45
1.6.1.	Objetivos del análisis de aceite	46
1.6.2.	Recomendaciones para el muestreo de aceite..	47
1.6.3.	Contaminación del aceite	48

1.6.4.	Tipos de desgaste	50
1.6.5.	Pruebas en aceites industriales	51
1.6.6.	Análisis de aceite en cajas de engranajes	53
1.6.7.	Normativa para análisis de aceite.....	54
1.7.	Indicadores de gestión de mantenimiento (Kpi's).....	55
1.7.1.	Disponibilidad de equipos.....	56
1.7.2.	Tiempo promedio entre fallas (MTBF)	57
1.7.3.	Tiempo medio de restauración (MTTRt).....	57
1.7.4.	Tiempo medio de reparación (MTTRr).....	58
1.8.	Norma ISO 17359 Directrices generales.....	58
2.	MODELO DE CBM SEGÚN NORMA ISO 17359	61
2.1.	Lista actual de equipos	63
2.2.	Criticidad del equipo	63
2.3.	Identificar modos de falla	66
2.4.	Selección de las técnicas de medición.....	71
2.5.	Criterios de alerta	71
2.6.	Toma de mediciones y lecturas	75
3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	79
3.1.	Según objetivo número 1, desarrollar el programa de monitoreo de la técnica Termografía Infrarroja	79
3.2.	Según objetivo número 2, realizar el plan de monitoreo de la técnica de análisis de vibraciones.....	83
3.3.	Según objetivo número 3, implementar el plan de monitoreo para el análisis de condición de aceite.....	85
3.4.	Según objetivo 4, establecer el monitoreo de indicadores y el desempeño de los equipos	86
3.5.	Propuesta de la estrategia de monitoreo de condición.....	89

3.6.	Toma de medidas y lecturas.....	90
3.7.	Plan del monitoreo de condición.....	95
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	97
4.1.	Análisis de vibraciones.....	97
4.2.	Análisis de termografía.....	102
4.3.	Análisis de aceite.....	107
4.4.	Disponibilidad y tiempo de paro.....	110
	CONCLUSIONES.....	115
	RECOMENDACIONES.....	117
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	119

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Frecuencia de la vibración	16
2.	Amplitud de la vibración	17
3.	Puntos de apoyo en un equipo	19
4.	Puntos de unión con la cimentación	20
5.	Posición de sensores de medición de vibración	20
6.	Severidad de los equipos, a partir de su velocidad y clase.....	22
7.	Desalineación en máquinas	24
8.	Esquema de excentricidad en un motor	25
9.	Vibraciones por partes flojas	26
10.	Cámara termográfica FLIR E40.....	34
11.	Termograma en blanco y negro y a color	35
12.	Imagen infrarroja de líneas de alta tensión.....	37
13.	Termografía de un freno de disco	39
14.	Localización de personas en la azotea de un edificio	41
15.	Diagrama de flujo del programa de monitoreo de condición.....	62
16.	Rangos de Criticidad	64
17.	Grado de criticidad de los equipos de la línea 1	65
18.	Tabla de severidad.....	66
19.	Ocurrencia o probabilidad	67
20.	Probabilidad de detección	68
21.	Análisis de modo y efecto de falla	69
22.	Selección de parámetros de monitoreo de condición	70
23.	Técnicas de monitoreo de condición equipos línea 1	71
24.	Severidad de los equipos	73

25.	Criterio de ΔT para termografía en componentes eléctricos.....	74
26.	Criterio de termografía para cojinete de motor	74
27.	Gravedad general del informe	74
28.	Cámara termográfica Fluke Ti25.....	75
29.	Analizador de vibraciones Fluke 805	76
30.	Factor Cresta (CF+).....	77
31.	Resultados de termografía en equipos de línea 1	80
32.	TermogrÁma de breaker de compresora 1.....	81
33.	TermogrÁma entrada de breaker compresora 3.....	82
34.	TermogrÁma salida de breaker compresora 3	82
35.	Resultado de vibraciones en motores y cajas reductoras	84
36.	Resultado de análisis de aceite	86
37.	Tiempo de paro no programado, línea 1	88
38.	Diagrama de flujo propuesta de ejecución del CBM.....	90
39.	Formato para medición de vibraciones	91
40.	Formato para mediciones de termografía	92
41.	Formato para control de criticidad de aceite	93
42.	Formato para disponibilidad de línea 1 semanal.....	94
43.	Cuadro de resultados de vibraciones.....	97
44.	GrÁficos de cajas y bigotes análisis de vibraciones	98
45.	Cajas y bigotes valores Norma ISO 10816	99
46.	GrÁficos cajas y bigotes factor cresta	101
47.	Cajas y bigotes norma de factor cresta.....	102
48.	Valores análisis de termografía.....	103
49.	GrÁfica de cajas y bigotes termografía.....	104
50.	GrÁfica cajas y bigotes para cojinetes de carga	106
51.	Resultado de análisis de aceite	107
52.	Cajas y bigotes ppm de hierro	108
53.	GrÁfico de criticidad de aceite.....	110

54.	Disponibilidad y tiempo de paro no programado	111
55.	Gráfica cajas y bigotes % de disponibilidad.....	112
56.	Gráfica disponibilidad en planta	113

ÍNDICE DE TABLAS

I.	Mediciones y parámetros para diagnóstico	8
II.	Valores particulares de amplitudes de vibración.....	15
III.	Categoría de las máquinas, a partir de su velocidad	21
IV.	Pruebas de análisis de aceite y su enfoque	53
V.	Límites de advertencia para engranajes.....	54
VI.	Listado de equipos línea 1	63
VII.	Valores cálculo de gráfica cajas y bigotes	98
VIII.	Valores cajas y bigotes factor cresta	100
IX.	Valores para la gráfica cajas y bigotes	104
X.	Valores para gráfico de cojinete carga	105
XI.	Valores para cajas y bigotes ppm de hierro.....	108
XII.	Valores para cajas y bigotes % de disponibilidad	112

LISTA DE SÍMBOLOS

Backup	Se refiere a un equipo de respaldo.
CMB	Mantenimiento basado en condición, se define como un programa de mantenimiento que recomienda acciones de mantenimiento, basadas en la información recolectada, a través del monitoreo de la condición.
ISO	Organización internacional de normalización para la creación de estándares internacionales.
KPI	Indicador clave de rendimiento.
MTBF	Tiempo medio entre fallas.
MTTRr	Tiempo medio de reparación.
MTTRt	Tiempo medio para restaurar.
NPR	Número prioritario de riesgo
TTO	Tiempo total de operación en el período.
TTR	Tiempo total empleado en restaurar el equipo después de cada falla.

GLOSARIO

Activo	Cualquier recurso que tiene un valor, un ciclo de vida y genera un flujo de caja.
Diagnosis	Diagnóstico de las fallas, se concentra en la localización cuando estas ocurren.
Disponibilidad	Refleja el porcentaje real de utilización de los equipos cuya magnitud al ser comparada con un nivel de referencia puede estar señalando una desviación sobre la cual se toman acciones preventivas o correctivas.
Excentricidad	Es el estado que presenta un rotor cuando la línea central-rotacional de un eje no es igual a la línea central-geométrica.
Frecuencia	Es la medida del número de veces que se repite un fenómeno por unidad de tiempo.
Indicador de gestión	Expresión cuantitativa del comportamiento y desempeño de un proceso.
Mantenimiento correctivo	Mantenimiento que se lleva a cabo, con el fin de corregir los defectos que se han presentado en un equipo.

Mantenimiento preventivo	Son las revisiones, mediciones e inspecciones programadas en los equipos o componentes.
Mantenimiento	Conjunto de técnicas y sistemas que permiten prever las averías, efectuar las revisiones, engrases y reparaciones eficaces.
Sistema	Conjunto de equipos instalados en secuencia que conforman una sola línea de maquinaria de producción.
Termografía	Técnica que permite medir temperaturas exactas a distancia y sin necesidad de contacto físico.
Vibración	Variación en el tiempo de una magnitud que describe el movimiento o posición de un sistema mecánico.
VOSO	Rutas de inspección de mantenimiento utilizando los sentidos del cuerpo (ver, oír, sentir, oler).

RESUMEN

El objetivo principal del trabajo fue desarrollar una estrategia de mantenimiento, basado en técnicas no destructivas y la norma ISO 17359 para la línea de producción No. 1 de la planta de jabones de lavandería. La gestión de mantenimiento es de vital importancia que busque mejorar sus operaciones para reducir los paros inesperados o no programados, para lograr ayuda a minimizar las pérdidas de producción por mantenimiento y aumentar la productividad y rentabilidad.

El desarrollo de una estrategia de mantenimiento, basado en monitoreo de condición se hizo bajo los lineamientos de la norma ISO 17359, el método utilizado fue no experimental de tipo descriptivo transversal, debido a que se obtuvieron datos recopilados y medidos por el departamento de mantenimiento. Se hizo medición directa de los equipos en planta, se definieron los equipos y su criticidad, se identificaron los modos y efectos de falla, se eligieron las técnicas de monitoreo de condición, las cuales fueron análisis de vibraciones, termografía, análisis de aceite. Se hizo el cálculo de la disponibilidad de planta, se tabularon los datos obtenidos para hacer análisis estadístico y empezar a llevar un histórico de condiciones de operación de los equipos.

Los resultados obtenidos en cada una de las técnicas aplicadas mostraron que algunos equipos se encuentran en condiciones críticas. En el análisis de aceite, se observó que tres equipos de nueve analizados necesitan cambio de aceite inmediato; en análisis de termografía, se determinó que el 36 % de los equipos necesitan programación y revisión para el próximo mantenimiento.

En el análisis de vibraciones, se observó que el 10% de los equipos están críticos y se debe reparar inmediatamente, el 25% de los equipos programarlos para el siguiente mantenimiento general, el 65% están en condiciones normales de operación y deben permanecer en monitoreo de condición. Se estableció el programa de monitoreo de condición para cada una de las técnicas, y se logró realizar la programación y calendarización de la aplicación de cada técnica, se estableció la gestión de mantenimiento por medio de órdenes de trabajo sistemáticas para cada técnica no destructiva.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PREGUNTAS ORIENTADORAS

Problema

El problema identificado es que no se hace ningún monitoreo de condición a los equipos, la lubricación se hace de forma empírica y poco controlada. No se hacen análisis de aceite para evaluar la calidad y el tiempo de vida del lubricante. Por tal motivo, la planta opera con tiempos de paro no programados de forma recurrente, éstos ocasionan pérdidas en producción, costos de mantenimiento por cambio de piezas sin haber hecho ningún tipo de medición y por fallas al no haberlas detectado con anticipación.

Descripción

En la planta de jabones se trabaja con un programa de mantenimiento donde se tienen identificados todos los equipos, codificados por ubicación, tipo, descripción y correlativo. El tipo de mantenimiento que se tiene programado es el sistemático, basado en frecuencias. Se ejecutan órdenes de trabajo de tipo correctivo, cuando el equipo falla o cuando en el mantenimiento preventivo se detecta alguna anomalía no prevista, también cuando el personal de producción reporta alguna falla y mal funcionamiento durante la operación.

La planta cuenta con los equipos de analizador de vibraciones y cámara termográfica que son útiles para la aplicación de las técnicas de mantenimiento de monitoreo de condición. Las herramientas no se utilizan de forma adecuada enfocada al mantenimiento, se usan de forma esporádica para revisar algún

equipo en cualquier momento. En el departamento de mantenimiento no se cuenta con el conocimiento del programa, basado en monitoreo de condición, ni los lineamientos que da la norma ISO 17359 sobre el diagnóstico de fallas. No hay tareas de mantenimiento definidas, seguimiento y análisis de equipos.

Se considera que no existe una estrategia de gestión de mantenimiento donde se haga un seguimiento, control y análisis de las condiciones de operación de los equipos se demuestra la necesidad de desarrollar una estrategia de mantenimiento, basado en monitoreo de condición. Se utilizará como base la norma ISO 17359 en la que se indican los pasos para desarrollar un Programa de Monitoreo de Condición y Diagnóstico de Máquinas. Se llevará una medición de los indicadores de mantenimiento como la disponibilidad y tiempos muertos de operación por mantenimiento.

Formulación del problema:

Pregunta central

¿Cómo afecta a la fábrica de jabón desarrollar una estrategia de mantenimiento, basado en técnicas no destructivas y la norma ISO 17359 para la línea de producción número 1 de la planta de jabones de lavandería?

1. Pregunta de investigación 1

¿Cómo se puede desarrollar el plan de monitoreo de la técnica de termografía para los equipos de la línea uno de la planta de jabones, por medio de la medición de la temperatura, según la norma ISO TC 108?

2. Pregunta de investigación 2

¿Cuál es la mejor forma de realizar el plan de monitoreo de la técnica de análisis de vibraciones, basado en la norma de Criterio de Severidad ISO 10816, a través de la medición del estado de las vibraciones en los equipos de la línea 1, de la planta de jabones?

3. Pregunta de investigación 3

¿De qué forma se puede implementar el programa de monitoreo para el análisis de condición del aceite lubricante en las cajas reductoras de los equipos de la línea 1, de la planta de jabones determinando la condición del aceite lubricante?

4. Pregunta de investigación 4

¿En función de qué, se puede medir el desempeño y los indicadores de mantenimiento de los equipos de la línea 1, de la planta de jabones de lavandería?

OBJETIVOS

General

Desarrollar una estrategia de mantenimiento, basado en técnicas no destructivas y la norma ISO 17359 para la línea de producción No. 1 de la planta de jabones de lavandería.

Específicos

1. Desarrollar el programa de monitoreo de condición de la técnica de termografía para los equipos de la línea No. 1 de la planta de jabones, por medio de la medición del comportamiento de la temperatura, según la norma ISO TC 108.
2. Realizar el plan de monitoreo de la técnica de análisis de vibraciones, basado en la norma de Criterio de Severidad ISO 10816, a través de la medición del estado de las vibraciones en los equipos de la línea 1, de la planta de jabones.
3. Implementar el programa de monitoreo para el análisis de condición del aceite lubricante en las cajas reductoras de los equipos de la línea 1, de la planta de jabones determinando la condición del aceite lubricante, según estudio realizado por laboratorio externo certificado.

4. Evaluar el monitoreo de indicadores y el desempeño de los equipos por medio del valor de la disponibilidad con la ayuda del historial de tiempos de paros no programados, por fallas en los equipos de la línea de producción No. 1.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

El enfoque fue mixto, debido a que se utilizaron variables cuantitativas y cualitativas, se incluyeron variables cuantitativas respecto a investigación, tabulación y análisis de las fallas, tiempos de paro y disponibilidad de equipos. Variables cualitativas para determinar la condición del equipo como, por ejemplo: bueno, aceptable, satisfactorio o no satisfactorio.

La investigación fue de diseño no experimental, debido a que no se realizaron pruebas de laboratorio o experimentos, se midieron y analizaron los equipos en operación, se realizó documentación para análisis y control.

El tipo del trabajo que se realizó fue descriptivo transversal, se describieron las tareas para la ejecución de las técnicas predictivas, se obtuvieron datos como los tiempos de paro no programados de la línea de producción de los reportes históricos del departamento de mantenimiento.

El alcance del trabajo es descriptivo y comprende a todos los equipos de la línea 1 de la planta de jabones. Se documentaron todos los procesos de aplicación de las técnicas predictivas y se hizo el registro de los resultados obtenidos. Se logró hacer mejoras a la gestión de mantenimiento aplicando técnicas predictivas y la medición de indicadores de mantenimiento como la disponibilidad y tiempo de paro no programado. Las variables a medir serán: tiempo de operación, tiempo de falla, número de fallas, equipo, tipo de falla.

Fases de la investigación

- Fase 1: Recopilación de datos

Consistió en la recopilación de la información histórica sobre la gestión de mantenimiento que se ha estado ejecutando, histórico de fallas de los equipos, tiempos de paro no programados, disponibilidad de los equipos y de la línea de producción, programación de las rutas de inspección y órdenes de trabajo. Todo se obtuvo de los registros de reportes en Excel, bitácoras y reportes del programa o software de mantenimiento que se utiliza actualmente.

- Fase 2: Revisión y análisis documental

Con la información recolectada y documentada se hicieron bases de datos con cálculos y datos específicos sobre las fallas, programación y seguimiento a las reparaciones, análisis de los valores de los indicadores de la gestión de mantenimiento. Se investigó sobre las técnicas predictivas de termografía, análisis de vibraciones y análisis de aceites como parte de la implementación de la gestión de mantenimiento, basado en monitoreo de condición para la línea 1 de la planta de jabones.

- Fase 3: Diseño del plan de mantenimiento

En esta fase se definieron las técnicas de monitoreo a implementar en la gestión de mantenimiento basado en condición. Se obtuvieron manuales guía de cada una de las técnicas, se detectó la necesidad de capacitar al personal que se encargará de la ejecución de las rutas de inspección. Se ingresaron al programa o software de mantenimiento, las nuevas actividades predictivas para cada equipo, definiendo su frecuencia trimestral, semestral o anual.

Se definió el proveedor del servicio de análisis de aceite, el cual se hizo con laboratorio externo certificado,

- Fase 4: Ejecución del plan de mantenimiento, basado en monitoreo de condición.

Se presentó el nuevo plan de mantenimiento, basado en monitoreo de condición, para la línea 1 de producción de jabones a la gerencia para su aprobación y seguimiento. Se desarrolló la documentación para informes físicos, electrónicos, control estadístico y nuevas metas de los indicadores.

- Fase 5: Propuesta de la estrategia de monitoreo de condición

En esta fase se llevarán controles estrictos, para garantizar que los resultados obtenidos de las técnicas de monitoreo sean registrados y analizados para la programación de órdenes de trabajo, medición constante de los indicadores de gestión, presentación de resultados a la gerencia. Se realizaron los formatos para la medición de vibraciones y termografía, también el formato para llevar el control del resultado de criticidad del aceite lubricante.

Se definió la frecuencia para cada técnica y se hizo un cronograma o programación anual del monitoreo de condición para los equipos de la línea 1, la población analizada consiste en diez motores eléctricos, siete cajas reductoras, trece breakers, once contactores, tres bombas y dos paneles eléctricos. La muestra analizada fue el total de los equipos de estas categorías utilizados en la línea uno de producción. Se aplicó la observación, tabulación y análisis de los resultados obtenidos.

INTRODUCCIÓN

La investigación es una innovación en la planta, se concentró en la empresa manufacturera de jabón, específicamente en los equipos de la línea uno, la principal función es fabricar jabones de lavandería en bola. Las líneas de producción están conformadas por secciones, según la fase del proceso: mezclado, secado, área de compresoras, corte, troquelado y empaque. La maquinaria está conformada por paneles eléctricos, motores eléctricos, cajas reductoras, bombas de engranajes, bombas centrifugas y empacadoras.

Desde el año 2013 al 2017, la demanda de producción ha incrementado un 42%, por lo que la exigencia de la disponibilidad del funcionamiento de los equipos de las líneas de producción ha aumentado. Se detectó la debilidad que la planta no cuenta con un programa de monitoreo de condición de los equipos, no se lleva un programa de lubricación eficiente y tampoco se hace análisis del aceite lubricante.

Por lo anterior, se plantearon los objetivos de desarrollar una estrategia de mantenimiento, basado en técnicas no destructivas bajo los lineamientos de la Norma ISO 17359, realizar un programa de monitoreo de condición para las técnicas de termografía y análisis de vibraciones realizando mediciones para determinar el estado de operación de los equipos. Implementar el plan de monitoreo de la condición del aceite lubricante, realizando análisis de laboratorio, por último, se planteó la medición y determinación de la disponibilidad y tiempo de paro de los equipos de la línea uno.

La finalidad principal o importancia del proyecto es mantener una alta disponibilidad de los equipos que componen la línea de producción. Generar un plan de mantenimiento, basado en monitoreo de condición, que garantice el control de las tareas de mantenimiento, tiempos de paro no programados y la disponibilidad de la línea de producción.

Para garantizar la disponibilidad de los equipos y un adecuado control de la ejecución de las tareas de mantenimiento, el método y procedimiento empleado fue hacer una sistematización por medio de la observación y medición directa en los equipos, se hizo trabajo de campo directo. Se obtuvieron los datos de tiempos de paro y número de fallas de los reportes de las líneas de producción y de mantenimiento.

Se creó una estrategia de mantenimiento por monitoreo de condición utilizando como guía la Norma ISO 17359, donde se establecen los lineamientos generales, para implementar un programa de monitoreo de condición y diagnóstico de máquinas.

Se pudo concluir que se implementaron las técnicas de inspección e interpretación de resultados. Las técnicas implementadas fueron el análisis de vibraciones, termografía y análisis de aceite. Se crearon rutinas de mantenimiento y planes de trabajo de los equipos para cada una de las técnicas aplicadas. Se generó el programa con frecuencias definidas para cada técnica y cada equipo, también la implementación de los formatos para las tomas de lecturas y presentación de resultados de las mismas.

El trabajo de investigación se desarrolló en los siguientes capítulos:

En el capítulo I, se hizo una descripción del marco teórico con los conceptos de mantenimiento, mantenimiento basado en monitoreo de condición, así como la descripción de las técnicas de ensayos o pruebas no destructivas que se aplicaron en los equipos de la línea de producción No. 1. Se describieron los lineamientos de la norma ISO 17359, se dieron los conceptos de los indicadores para medir la gestión de mantenimiento.

En el capítulo II, se desarrolló la estrategia del mantenimiento basado en monitoreo de condición, según el diagrama de flujo que propone la Norma ISO 17359. Se hizo la revisión y listado actualizado de equipos, se hizo el estudio de criticidad y análisis de modo y efecto de falla. Se definieron las técnicas a emplear, de acuerdo a la norma que aplica a cada técnica de monitoreo se establecieron los criterios de alerta y el procedimiento de toma de lecturas.

En el capítulo III, se presentaron los resultados obtenidos en las mediciones de las técnicas de vibraciones y termografía, se presentaron en cuadros tabulados e indicando cual fue la condición del equipo comparado con la norma. Se dio a conocer los resultados del cálculo de la disponibilidad de los equipos de la línea de producción. Se presentaron los resultados de la criticidad de la condición del de aceite realizados por el laboratorio externo contratado. Se tabularon los datos de cantidad de partículas (ppm) de hierro en el aceite.

Se presentó la propuesta para la ejecución del mantenimiento por monitoreo de condición. Se realizaron los formatos para la toma de mediciones de cada una de las técnicas, se definió la frecuencia para cada técnica y se presentó un cronograma anual indicando la aplicación de cada técnica en cada uno de los equipos.

En el capítulo IV, la discusión e interpretación de los resultados obtenidos, se presentaron en formatos tabulados e identificados. Se utilizó el análisis estadístico y la gráfica de cajas y bigotes para describir cuál fue el comportamiento de los datos obtenidos. Se realizó el cálculo de los tiempos de paro no programados, indicando la disponibilidad real de la línea de producción y se hizo un gráfico de control indicando cuál es la meta de la disponibilidad requerida por la empresa y cuál es la situación actual.

1. MARCO TEÓRICO

La evolución e historia del mantenimiento ha ido acompañada del desarrollo tecnológico-industrial de las compañías productoras, en sus inicios a principios del siglo XX, el mantenimiento tenía una baja importancia y era realizado por el mismo personal de producción u operativo. Con la introducción de la producción en línea y la automatización, se tuvo la necesidad de mejorar los planes y programas de mantenimiento. Se empezó a depender menos del recurso humano y depender más del buen funcionamiento de la maquinaria.

Martínez (2014) indica que uno de los objetivos para cumplir con las exigencias de hoy en día consiste en identificar mejores estrategias para el mantenimiento de los equipos. El mantenimiento ha evolucionado a lo largo de la historia, desde un tipo correctivo, con el objetivo de reparar al sufrir una avería. Luego se desarrolla el tipo preventivo que tiene como objetivo, lograr una mayor disponibilidad, mediante la realización de un mantenimiento programado. Finalmente, una modalidad basada en el análisis de tendencias, buscando mayor confiabilidad de los equipos, seguridad, mayor vida útil, utilizando técnicas como el mantenimiento, basado en condición, confiabilidad y mantenibilidad.

1.1. Mantenimiento

“Conjunto de técnicas y sistemas que permiten anticipar las averías, efectuar revisiones, engrases y reparaciones eficaces, dando a la vez normas de buen funcionamiento a los operadores de las máquinas, a sus usuarios, contribuyendo a los beneficios de la empresa” (Pesantez, 2007, p. 10). Es una

pieza fundamental en la industria que tiene como finalidad extender la vida útil de las máquinas de una forma que sea rentable para las empresas.

Según Villa (2011), indica que “el objetivo primordial de la implementación del mantenimiento es aumentar la disponibilidad de los equipos para aumentar la productividad, reduciendo el número de averías imprevistas y aumentar la vida útil de los equipos” (p. 31). El mantenimiento ha ganado importancia y los directivos de empresas ahora lo ven como una oportunidad de inversión con la finalidad de reducir los costos.

Con el propósito de maximizar la vida de los activos y minimizar el cambio innecesario de los componentes surge el tipo de mantenimiento, basado en condición (CMB), según Villar (2009) se evalúa la condición mecánica y eléctrica de la máquina, mientras está en funcionamiento. Se sabe que iniciando en la industria de la aviación el enfoque del mantenimiento, basado en condición fue ganando terreno en la década de 1970. Las empresas se están enfocando en la reducción de costos, tanto en equipos nuevos como en la compra de repuestos o insumos, la tendencia es preferir invertir en equipo de monitoreo y capacitación del personal para aprovechar al máximo la vida útil de los activos.

1.2. Tipos de mantenimiento

Desde sus inicios el hombre ha tenido la necesidad de equipos y herramientas, por lo que ha necesitado de un mantenimiento para extender su vida útil. Para cumplir con el objetivo se han utilizado diferentes técnicas, las cuales evolucionan de acuerdo a las exigencias y diferentes factores.

1.2.1. Mantenimiento correctivo

Valdez (2009), indica que: “el mantenimiento correctivo comprende el mantenimiento que se lleva, con el fin de corregir los defectos que se han presentado en el equipo” (p. 55). Es la actividad de mantenimiento destinada a corregir cualquier comportamiento que por diferentes causas se han salido de sus parámetros de operación normales.

Es la primera técnica de mantenimiento que se utilizó, según Villa (2011) “solo se limitaba a reparar o sustituir los componentes que presentaban averías” (p. 31). Es el mantenimiento que debe ejecutarse con urgencia por una falla imprevista a repararse lo antes posible por un estado o condición inesperada.

Generalmente, se ejecuta cuando se agota la vida útil de las partes, componentes, materiales y piezas en la maquinaria. También es denominado mantenimiento reactivo, de acuerdo a Pesantez (2007), “son tareas de reparación no programadas con el objetivo de restaurar la función de un activo después de producido un paro imprevisto” (p. 17). Es llamado reactivo, porque se acciona cuando el activo deja de cumplir su función para lo que fue diseñada y en ese momento empieza a producir pérdidas a la empresa.

1.2.2. Mantenimiento preventivo

La segunda técnica utilizada fue la de mantenimiento preventivo en la cual se instituyen períodos. Grijalva (2004), indica que son las exploraciones, controles e inspecciones programadas en los equipos o sus componentes. Estas actividades pueden ser constantes o cíclicas (diaria, semanal, anual, horas, kilómetros, etc.).

Esta definición coincide con Villa (2011), donde dice que en el mantenimiento preventivo: “se establece un intervalo periódico de tiempo para realizar tareas preventivas sin importar el estado de degradación de los componentes, esto con el fin de evitar fallos no programados” (p. 31). Se incurre en altos costos de mantenimiento porque se cambias piezas que todavía tenían tiempo de vida útil o se espera demasiado y la máquina cae en falla.

El mantenimiento preventivo tiene la característica que es programado, de acuerdo con Pesantez (2007), “es el mantenimiento determinado por las siguientes características: inspección, conservación, sustitución, mantenimiento correctivo, periodicidad” (p. 20). Entre sus desventajas se pueden mencionar incremento en el costo, fallas inesperadas entre intervalos, cambios innecesarios, tiempo de mantenimiento prolongado por tener que revisar una gran cantidad de piezas.

Del mantenimiento preventivo como tal, se derivan dos tipos de mantenimiento: el mantenimiento predeterminado y el mantenimiento basado en condición.

1.2.3. Mantenimiento basado en condición (CMB)

El mantenimiento basado en condición, se refiere a las actividades de mantenimiento iniciadas por la condición de un sistema. Villa (2011), lo define como: “actividad que recomienda acciones de mantenimiento basadas en la información recolectada a través del monitoreo de la condición, intenta evitar tareas de mantenimiento innecesarias mediante acciones solo donde hay evidencia de comportamientos anormales de un elemento” (p. 32). Se realizan mediciones y se tabulan para formar un histórico de parámetros.

El objetivo principal del monitoreo de condición en la maquinaria es reunir el mayor número de datos de su funcionamiento, con el propósito de detectar las fallas en las primeras etapas. Según Mundarain (2009), “la detección y diagnóstico de problemas en una máquina sin detener su funcionamiento, es el método de mantenimiento más conveniente” (p. 35). Se puede realizar en cualquier momento y a distancia lo que lo hace también un método seguro.

Toapanta (2009), indica que: “el monitoreo de condición es la medición de una variable fija que se considera representativa de la condición del equipo y su comparación con valores que indiquen que el equipo está en buen estado o deteriorado” (p. 33). Se pueden descubrir los inconvenientes anticipadamente cuando los efectos que causan la falla son iniciales y no afectan el funcionamiento del equipo.

Para una correcta aplicación del mantenimiento, basado en condición se deben seguir tres pasos fundamentales: toma de datos, procesamiento de datos y toma de decisiones. Villa (2011), hace una descripción completa de estos tres pasos.

1.2.3.1. Toma de datos

Obtener los datos principales con el objeto de saber el estado del sistema. Se clasifican en dos grupos:

Sobre los incidentes: contiene información de todos los equipos del sistema, lo que ha sucedido en cuanto a fallas, revisiones o instalaciones y las razones que las provocaron. Contiene información de lo que se realizó como reparaciones, mantenimientos, lubricación, entre otras.

Información de monitoreo: mediciones que están relacionadas con las condiciones de operación de los equipos. Son datos como análisis de vibraciones, presión, temperatura, estado de los aceites, condiciones ambientales.

1.2.3.2. Toma de decisiones

Es recomendable definir políticas de mantenimiento que busquen el logro de las metas o cumplimiento de los indicadores. Para el soporte de la toma de decisiones en la gestión de mantenimiento, basado en monitoreo de condición existen dos técnicas, las cuales se describen a continuación:

Diagnosis: diagnóstico de las fallas se concentra en la localización e identificación cuando estas ocurren. La localización de las fallas es un trabajo que da el aviso cuando algo no va bien en el equipo que está siendo monitoreado. aislar las fallas ayuda a localizar el componente que esta averiado y al identificar la falla, se localiza la naturaleza de la avería al ser detectado.

Prognosis: pretende predecir el progreso de las fallas. La predicción de las fallas es un trabajo que establece si la falla es inminente y calcula el tiempo en que puede fallar el componente.

Ruiz (2012), indica que: “En la medida que el mantenimiento basado en condición del activo, se abra paso y sea exitoso, se abrirán puertas a la verdadera Gestión de Activos en la compañía, garantizando un manejo completo de la organización, la operación y los activos” (p. 30). Debe destacarse que al realizar cada una de las mediciones de inspección, no se debe interrumpir el proceso. Se pueden programar de forma continua o periódica, dependiendo del tipo o necesidades del proceso.

1.2.3.3. Objetivos del CBM

El mantenimiento basado en condición debe cumplir con una alta gestión de mantenimiento. Ésta se puede medir y cuantificar para lo cual debe cumplir con los siguientes objetivos, según Ruiz (2012).

- Pronosticar o estimar el tiempo que el equipo puede trabajar sin presentar una falla.
- Mantener atención de las máquinas, indicar cuando hay una falla e indicar la gravedad de la misma.
- Diagnosticar las fallas, especificar el fallo en cada componente del equipo.
- Proteger las máquinas, evitar fallas que ocasionen paros inesperados, las máquinas están protegidas cuando se detienen con anticipación cuando sus valores de operación llegan a niveles considerados altos o peligrosos.

1.2.3.4. Técnicas de CBM

Para lograr su objetivo, el programa de mantenimiento basado en condición se apoya en diferentes técnicas, según Martínez (2014) “antes de que un equipo falle se pueden identificar síntomas de deterioro, sobre todo aquellos que están relacionados con la edad de operación” (p. 34). En este instante las técnicas de monitoreo a condición se utilizan para detectar alertas tempranas, con el fin de evitar las fallas o evitar consecuencias.

Las técnicas más utilizadas que se pueden mencionar:

- Análisis de aceite.
- Termografía Infrarroja.
- Monitoreo dinámico o análisis de vibraciones.
- Pruebas no destructivas (radiografías, ultrasonido, partículas magnéticas, líquidos penetrantes, endoscopia).
- Pruebas eléctricas.
- Rutas de inspección VOSO (ver, oír, sentir, oler).

En la tabla I, que se presenta a continuación, se muestran algunas técnicas y sus respectivas variables que se miden dentro del mantenimiento, por monitoreo de condición.

Tabla I. **Mediciones y parámetros para diagnóstico**

Rendimiento	Mecánica	Eléctrica	Análisis de aceite, calidad de producto y otros
Consumo de energía	Expansión térmica	Corriente	Análisis de aceite
Eficiencia	Posición	Voltaje	Análisis de trazas de hierro
Temperatura	Nivel de fluido	Inductancia	Dimensiones de producto
Termografía	Vibración	Resistencia	Propiedades físicas de producto
Presión	Vibración-velocidad	Capacitancia	Propiedades químicas (color, olor, apariencia)
Flujo	Vibración-aceleración	Campo magnético	Otras pruebas no destructivas
	Ruido audible	Aislamiento	
	Ultrasonido: ondas		

Fuente: Ruiz (2012, p. 45)

1.3. Planta de jabones de lavandería

La empresa manufacturera de jabón cuenta con varias plantas de producción que se manejan de forma independiente en las áreas de administración, procesos y mantenimiento. Cada planta corresponde al tipo de producto que fabrica, las diferentes plantas por tipo de proceso o producto son los siguientes:

- Planta de jabones de lavandería en bola
- Planta de líquidos (cuidado personal y cuidado del hogar)
- Planta de detergentes en polvo
- Planta de detergentes en barra
- Planta de corta grasa

Cada planta se compone de varias líneas de producción, debido a la variedad de presentaciones que se fabrican. La presente investigación se enfocó en la planta de jabones de lavandería, específicamente en los equipos o componentes de la línea número uno de producción. La línea se divide en varias secciones que corresponden a cada una de las fases del proceso, las cuales se mencionan a continuación:

- Mezclado
- Secado
- Compactación
- Corte
- Troquelado
- Empaque

Cada sección del proceso se conforma con una serie de maquinaria y componentes que cumplen cada una con su función específica para el cual fueron diseñadas. Los equipos seleccionados para el presente trabajo de investigación que conforman la línea uno de producción son los siguientes:

- Paneles eléctricos
- Motores eléctricos
- Cajas reductoras
- Bombas centrifugas
- Bombas de engranajes
- Bombas de vacío
- Breaker principales
- Contactores

Para una operación segura y confiable de los equipos de la planta de jabones es necesaria la prevención de posibles fallas. Si los problemas potenciales son anticipados y evitados el riesgo de falla y el tiempo de paro no programado de una máquina puede disminuirse. El desarrollo del presente trabajo sólo se enfocará en las técnicas de análisis de vibraciones, termografía y análisis de aceite. A continuación se hace una descripción de cada una de las técnicas.

1.4. Análisis de vibraciones

Una de las técnicas que más ha avanzado dentro de las tecnologías para el mantenimiento basado en condición es la de análisis de vibraciones. Para Ruiz (2012) “la vibración se define como toda variación en el tiempo, de una magnitud que describe el movimiento o la posición de un sistema mecánico, cuando la magnitud es alternativamente mayor o menor que cierto valor promedio” (p. 48).

Se mide por medio de la velocidad del objeto en movimiento, se obtienen ondas que se miden en el tiempo, la vibración es la amplitud.

La medida se hace por medio de las distintas ondas que se generan cuando el equipo se encuentra en funcionamiento. Existen tres maneras de medir la amplitud de las ondas, las que muestran verdaderamente la severidad de la vibración. Las medidas son:

Desplazamiento: medida total de la onda entre sus crestas pico a pico.

Velocidad: las ondas presentan cambios de velocidad, el máximo valor se mide en la cresta de la onda-pico. Ahora existe una norma para medir la velocidad en rms (raíz media cuadrada). La ventaja más importante es que se proporciona el valor de energía de la señal de vibración.

Aceleración: es la variación de la velocidad mientras el movimiento es máximo cuando la preliminar es cero y se expresa en $g=9.80665 \text{ m/s}^2$.

Según García (2011), la técnica de análisis de vibraciones para mantenimiento predictivo se basa en la detección de fallas en equipos rotativos principalmente. A través del estudio de los niveles de vibración, se obtiene la representación del espectro de vibraciones de un equipo por medio de su velocidad.

Para facilitar lo anterior, es necesario conocer y tener definidos los datos de la maquinaria para ser aplicada de forma efectiva y obtener resultados válidos y certeros. La información necesaria es: el tipo de cojinetes, tipo y número de fajas, número de dientes y tamaño en engranajes, velocidad o revoluciones de los motores.

Tapia (2011) indica que: “Mediante el análisis de vibraciones se puede determinar las fallas que ocasionan altos niveles de vibración como: Desbalances, desalineación de ejes, ejes doblados, fajas deterioradas, rodamientos defectuosos, rodamientos con holguras, cavitación, resonancias, defectos de engrane, problemas eléctricos en motores, entre otros” (p. 47). Se puede determinar la falla aun cuando no es susceptible a nuestros sentidos, logrando evitar el paro del equipo.

Cada uno de los equipos o componentes puede dar una señal de falla, pero es con un diagnóstico o estudio específico, que se puede determinar dónde y qué tipo de falla es, de acuerdo al estudio de la vibración en cada uno de los equipos.

De acuerdo con Doffuaa (2007), la vibración mecánica es la medida más utilizada para examinar la condición de los equipos. Se puede definir vibración como el movimiento desde su punto de reposo, a través de todas las posiciones y de retorno al punto de reposo, de donde nuevamente se repite el ciclo. Es lo que vemos en casos severos y se puede definir como período y el número de repeticiones del ciclo es la frecuencia.

Para realizar las mediciones de vibración en los equipos y así interpretar y analizar los resultados obtenidos en los equipos de medición cómo la frecuencia y amplitud, se tienen definidas las técnicas y los pasos para hacer las mediciones de forma correcta y efectiva.

1.4.1. Pasos para análisis de vibraciones

Para el inicio del programa de mantenimiento, basado en análisis de vibraciones, se empieza con la selección adecuada de los equipos que serán incluidos en el programa de monitoreo. El programa debe estar dirigido a la

selección de los equipos que están generando altos costos de mantenimiento o los equipos cuya criticidad es alta y una falla podría ocasionar pérdidas en la producción.

González (2009), indica que una vez escogidas las máquinas se inicia con la obtención de la siguiente información:

Espectros de referencia: los que son comunes propios de la máquina cuando trabaja en condiciones normales y medidos en varios puntos de la misma.

Historial de mantenimiento: información del fabricante sobre causas de fallas, datos de vibraciones estándares, información del operador en condiciones normales.

Datos técnicos específicos: revoluciones de los motores, potencia, tipos de cojinetes, cajas reductoras (ratio y número de dientes).

Conocimiento de la máquina: condición operacional, propósito de la maquinaria en el proceso, cambios en la vibración con el cambio de las condiciones operativas, como revoluciones por minuto, temperatura, aumento de la capacidad, entre otros.

Codificar e identificar la maquinaria: el código para identificar el equipo debe indicar ubicación, sistema, tipo de equipo, correlativo.

A continuación para cada equipo seleccionado se deben definir los siguientes rubros:

- Cantidad de puntos y dirección de las mediciones (axiales y radiales).
- Características a medir (desplazamiento, velocidad y aceleración).
- Definir el sensor más adecuado.

Definir los intervalos de frecuencia de medición. Después de culminados los aspectos anteriores, es recomendable hacer algunas mediciones para determinar lo siguiente:

Familiarizarse con los datos de vibraciones característicos de la maquinaria.

Los puntos óptimos de medición.

Al no contar con los datos característicos del fabricante con un equipo nuevo, se procede a la obtención de los datos con el equipo y el personal capacitado.

Durante la operación del equipo se irán obteniendo los cambios de los datos de vibraciones, al momento de tener variaciones de las condiciones del proceso.

Es preciso que para cada máquina se establezcan los criterios de operación normales y de severidad. De no tener datos brindados por el fabricante, se puede acudir a parámetros dados por normas como una referencia de inicio. Tener el historial de parámetros de operación y conocer la máquina es una buena base para redefinir los niveles de operación óptimos durante su funcionamiento.

Las mediciones de vibraciones, en general, se hacen en forma de velocidad (mm/s). Debido a que es la mejor indicación para evaluar las vibraciones de las máquinas rotativas en el rango de frecuencia de giro.

En la tabla II, se presentan los valores particulares de amplitudes de vibración en máquinas especificadas en la norma ISO 18816. Los valores sirven de referencia o como punto de partida cuando no se tienen registros en los equipos.

Es importante tener el historial de parámetros de la maquinaria en operaciones normales, para tener un dato real de comparación y lograr determinar en qué momento puede presentar alguna variación que indique la presencia de una falla.

Tabla II. **Valores particulares de amplitudes de vibración**

SEVERIDAD DE VIBRACIÓN RMS mm/seg	TIPO DE SOPORTE	
	RÍGIDO	FLEXIBLE
0.46		
0.71	Buena	
1.12		Buena
1.8		
2.8	Satisfactoria	
4.6		Satisfactoria
7.1	No Satisfactoria	
11.2		No Satisfactoria
18		
28	Inaceptable	
71		Inaceptable

Fuente: Cherres & Ñauta (2015, p. 23)

1.4.2. Parámetros usados para medir la vibración

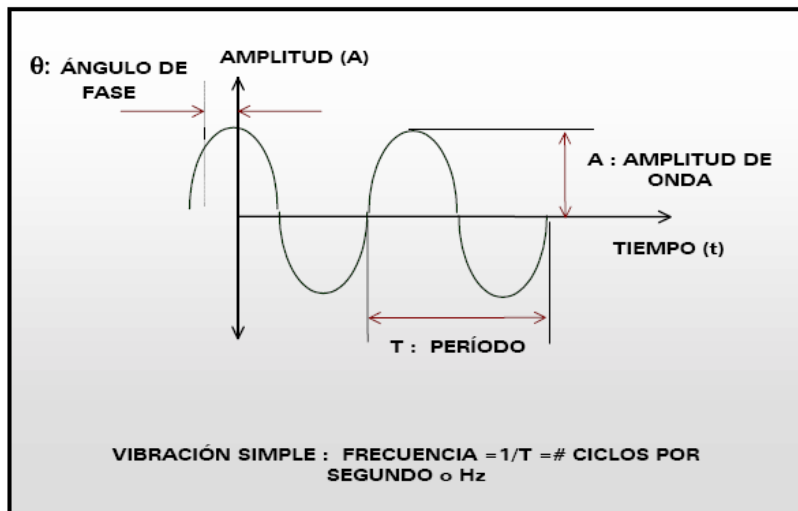
Los parámetros utilizados para la medición de las vibraciones de máquinas son siete, los cuales se describen a continuación:

- Frecuencia de la vibración:

Es el principal dato para situar el tipo de falla que existe en un equipo y el componente donde se ha originado la falla.

Como se observa en la figura 1, “la frecuencia es el inverso del período y la unidad característica de ésta es CPM (ciclos por minuto), también se utiliza el Hertz (Hz) o CPS (ciclos por segundo)” (González, 2009, p. 30).

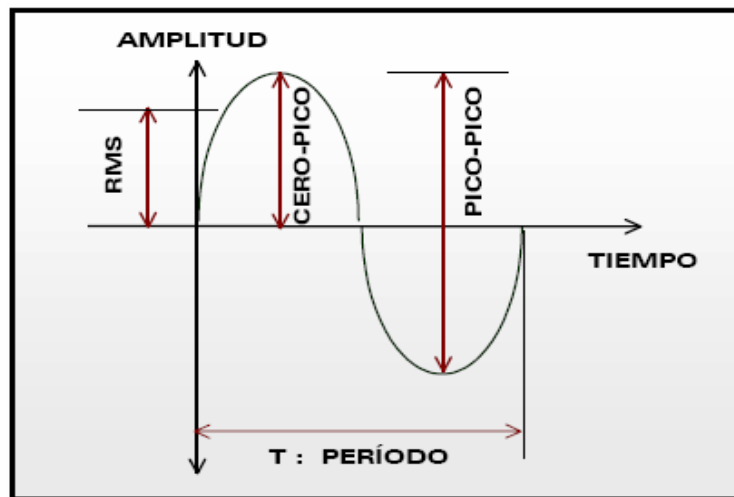
Figura 1. Frecuencia de la vibración



Fuente: González (2009, p. 30)

- Amplitud de la vibración: Muestra la importancia y severidad del problema, da una idea del estado de la máquina. En la figura 2, se puede ver las distintas formas de medir la amplitud de desplazamiento y velocidad. Se puede hacer la medición en amplitud pico, pico-pico y amplitud RMS (González, 2009).

Figura 2. **Amplitud de la vibración**



Fuente: González (2009, p. 31)

- Desplazamiento de la vibración: “Se define como la distancia total recorrida por el elemento que vibra entre los dos extremos límites del recorrido” (Tapia, 2011, p. 48). Es recomendable medir el desplazamiento al tener la sospecha que las posibles fallas se dan en el área de bajas frecuencias.
- Dirección: Se debe tomar en cuenta que la vibración puede producirse en tres direcciones rotatorias y tres de forma lineal.

- Fase: Ésta indica la posición de la pieza que vibra en un determinado instante respecto a otra pieza o un punto en ella.
- Velocidad de la vibración (mm/s): La velocidad es propiedad importante de la vibración. Ayuda a identificar la mayor cantidad de patrones de fallas primarias y de otros equipos, cuando están en modo de falla evidente de desbalanceo, desalineación y holgura mecánica (González, 2009).
- Aceleración de la vibración: La medición de la amplitud de la aceleración se hace cuando existen fuerzas importantes que se generan a altas frecuencias (González, 2009). Es recomendable medir la aceleración para determinar la severidad de la vibración en los equipos, cuando operen en frecuencias por arriba de 60,000 cpm.

Todos los parámetros son medidos en puntos lo más cercano posible a la zona de carga (rodamientos, chumaceras, apoyos, etc.).

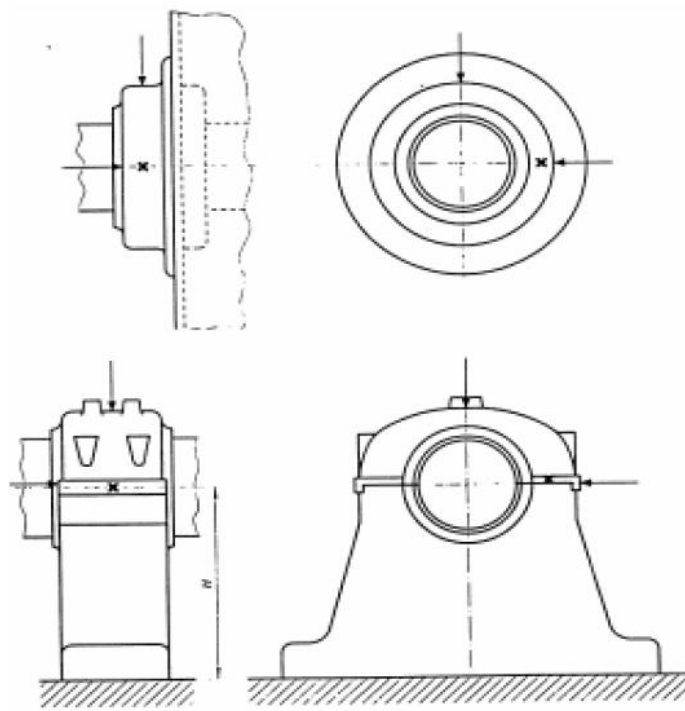
1.4.2.1. Puntos de medición

Es importante hacer el análisis de vibraciones en dos puntos principales para hacer una correcta medición y tener datos confiables. Según Tapia (2011) son los siguientes:

En los puntos de descanso, quiere decir en los puntos en los que está apoyada la máquina. Cuando se tiene el caso de motores eléctricos, es de vital importancia medir en los cojinetes o rodamientos.

En la figura 3, se muestran los puntos de medición de apoyo en descanso en un equipo.

Figura 3. **Puntos de apoyo en un equipo**

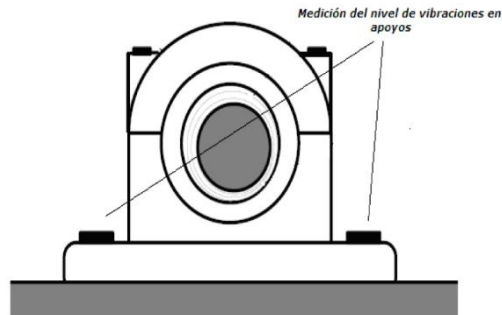


Fuente: Tapia (2011, p. 49)

Otro punto de medición importante son los puntos donde se une con la bancada.

En la figura 4, se muestran los puntos de medición de la unión con la cimentación, la unión con la cimentación es también la unión en la base o anclaje del equipo.

Figura 4. **Puntos de unión con la cimentación**

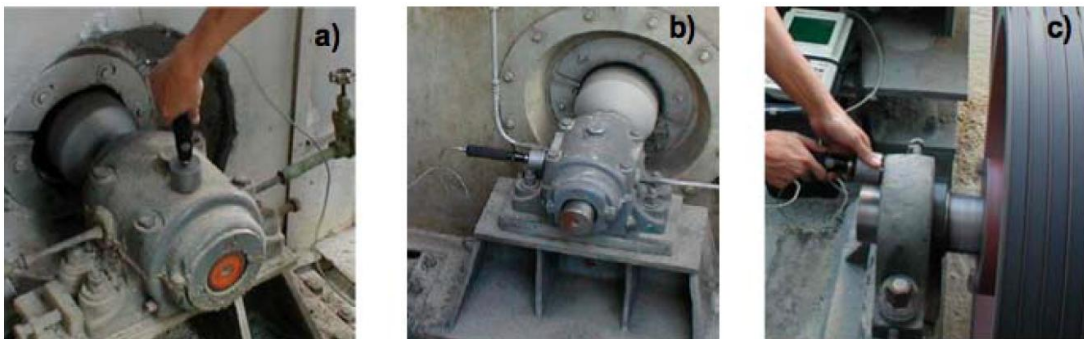


Fuente: Tapia (2011, p. 49)

Para una correcta y confiable medición de análisis de vibraciones, se debe tomar la medida en los tres ejes, radiales (horizontal y vertical) y en dirección axial.

En la figura 5, se muestra la posición correcta de los sensores en los tres ejes, al momento de realizar el análisis de vibraciones, se debe verificar que la zona este libre y segura.

Figura 5. **Posición de sensores de medición de vibración**



Fuente: Castellanos y Sánchez (2005, p.24)

1.4.3. Normas para análisis de vibraciones

En la aplicación de las vibraciones mecánicas, la norma ISO es una de las instituciones internacionales que es la encargada de estandarizar los límites para los criterios de severidad en las vibraciones de un elemento.

De acuerdo a Castellanos y Sánchez (2005), “La Norma ISO 10816-1 es la que se usa como guía para mediciones fuera de límite y para la evaluación de vibraciones mecánicas en máquinas” (p. 25).

Según la norma, las medidas de velocidad pueden ser categorizadas de la siguiente forma como se ve en la tabla III.

Tabla III. **Categoría de las máquinas, a partir de su velocidad**

Categoría	Características
CLASE I	La máquina puede ser separada en conductor y el conducido, o unidades conjuntadas que abarcan maquinaria de movimiento de hasta 15 kw (20 hp aproximada)
CLASE II	Maquinaria (motores eléctricos 15 kw (20 hp) hasta 75 kw (100 hp), sin cimentación especial, o motores montados rígidamente o máquinas con 300 kw (400 hp) montados con fundación especial.
CLASE III	Las máquinas grandes con conductores primarios (turbinas, motores eléctricos, etc.) y otras maquinarias con ensambles rotatorios grandes y montadas en fundaciones rígidas y pesadas que son razonablemente derechas en la dirección de la vibración.
CLASE IV	Incluye grandes conductores primarios y otras grandes maquinarias con grandes ensambles rotatorios montados en fundaciones las cuales son relativamente suaves en la dirección medida de la vibración, (turbogeneradores y turbinas de gas mayor que 10 MW (13500 hp).

Fuente: Norma ISO 10816-1

Como se puede apreciar en la tabla III, la norma hace una clasificación de las máquinas para hacer una correcta medición y ayuda para hacer un correcto análisis e interpretación de los resultados. La clasificación está hecha con base en la potencia de la máquina, el tipo de acoplamiento, la forma de la base o cimentación, el tipo de anclaje y el tamaño de los conductores. Todos son factores importantes a considerar para realizar la medición.

Los rangos típicos relacionados con la categoría de la máquina, tanto para valores RMS como pico se establecen en la figura 6:

Figura 6. **Severidad de los equipos, a partir de su velocidad y clase**

Severidad de la velocidad				CRITERIOS DE VELOCIDAD LIMITE Y CLASES DE MAQUINAS			
Mm/seg RMS	In/seg RMS	mm/seg Pico	In/seg Pico	Maquinas pequeñas Clase I	Maquinas medianas Clase II	Maquinas grandes	
						Soportes rígidos Clase III	Menos soportes rígidos Clase IV
0.28	0.011	0.51	0.02	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
0.45	0.018	0.76	0.03				
0.71	0.028	1.02	0.04				
1.12	0.044	1.52	0.06	Satisfactoria	Satisfactoria	Satisfactoria	Bueno
1.8	0.071	2.54	0.10				
2.8	0.11	4.06	0.16	Satisfactoria	Satisfactoria (alerta)	Satisfactoria	Satisfactoria
4.5	0.177	6.35	0.25	(alerta)			
7.1	0.280	10.16	0.40				
11.2	0.441	15.75	0.62	Inaceptable (parada)	Inaceptable (parada)	(alerta)	Satisfactoria
18.0	0.709	25.40	1.00			(Alerta)	
28.0	1.102	39.62	1.56			Inaceptable (parada)	
45.0	1.772	63.75	2.51			(parada)	

Descripción de criterios:

- Magnitud de la vibración baja, se dice que el rango es *Bueno*, es decir que el peligro de falla es mínimo.
- Magnitud de la vibración *Satisfactoria*, la maquina se encuentra en los límites normales.
- Magnitud de la vibración es *Satisfactoria Alerta*, esto indica que la vibración se encuentra cerca de los límites recomendados.
- Magnitud de la vibración es *Intolerable (Parada)*, la posibilidad de falla es alta y debe someterse a revisión la máquina de inmediato.

Fuente: Norma ISO 10816-1

En algunas ocasiones no serán suficientes las normas internacionales. En los puntos necesarios, se procede al diagnóstico con la revisión de espectros, de allí parten las acciones correctivas correspondientes.

1.4.4. Causas de falla

Los motivos por los cuales las vibraciones aumentan son debido a componentes defectuosos y las causas se describen a continuación.

1.4.4.1. Desbalance

Mejía (2009), indica que: “los desbalances en el rotor de un motor eléctrico son una de las fuentes más comunes de vibraciones” (p. 31). El desbalance produce fuerzas centrífugas que ocasionan vibraciones que se transmiten a los cojinetes y chumaceras. El desbalance puede clasificarse de acuerdo a su origen como:

Desbalance estático: se puede definir como el desplazamiento longitudinal paralelo del eje principal del rotor con respecto al eje de rotación.

Desbalance par: se da cuando se intercepta el eje de rotación del rotor con el eje longitudinal principal en el centro de masa del propio rotor.

Desbalance dinámico: es el desbalance en el cual no existe intercepción por parte el eje principal con el eje de rotación y tampoco es paralelo.

Las causas de desbalance más comunes son por desgaste y erosiones, corrosión y deformaciones en el rotor.

1.4.4.2. Desalineación

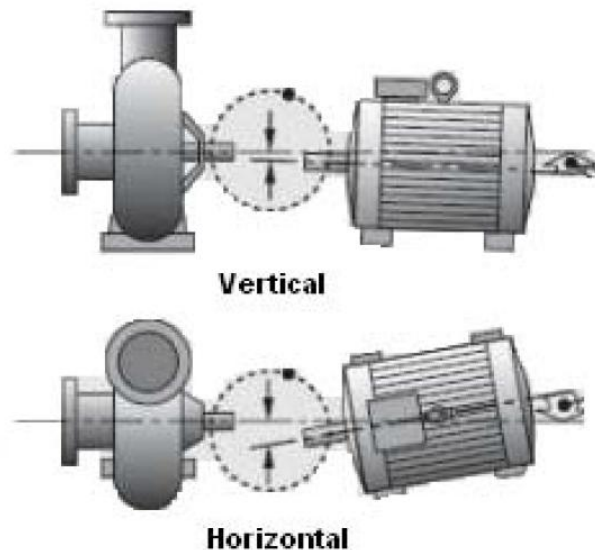
Cherres Ñauta (2015). Indican que: “Es el defecto más usual en la industria. El desalineamiento se produce entre dos ejes conectados, mediante acoplamientos” (p. 25). La desalineación puede ser de dos formas:

Desalineación vertical: ocurre cuando dos ejes no están en el mismo plano provocando vibración radial.

Desalineación horizontal: ocurre cuando los ejes entre si no son paralelos, es cuando entre los ejes existe un ángulo provocando vibración axial.

En la figura 7, se muestra la falta de alineación entre dos equipos.

Figura 7. **Desalineación en máquinas**

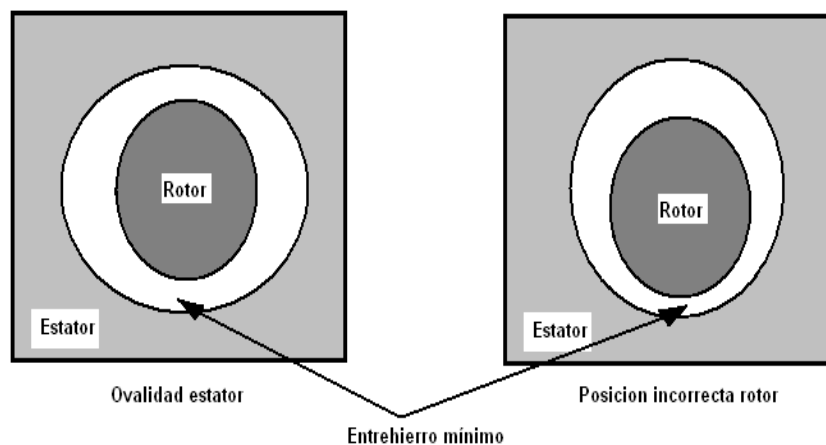


Fuente: Mejía (2009, p. 34)

1.4.4.3. Excentricidad

De acuerdo a González (2009), “la excentricidad es el estado que presenta un rotor cuando la línea central-rotacional de un eje no es igual a la línea central-geométrica” (p. 39). Es la causa número uno de origen de desequilibrio, lo que deriva de la situación de tener más peso de un lado de la línea central que del otro lado. En la figura 8, se muestra un ejemplo de excentricidad en una máquina.

Figura 8. Esquema de excentricidad en un motor



Fuente: Mejía (2009, p. 34)

1.4.4.4. Rodamientos defectuosos

Según Mejía (2009), “en todas las máquinas rotativas se utilizan cojinetes para apoyar los extremos del eje. Debido a que todas las vibraciones se transmiten directamente a los cojinetes y que éstas están en continua fricción, es de suma importancia determinar su estado con un análisis de vibraciones” (p. 37). La mayor parte de fallas en los cojinetes se deben a las siguientes causas:

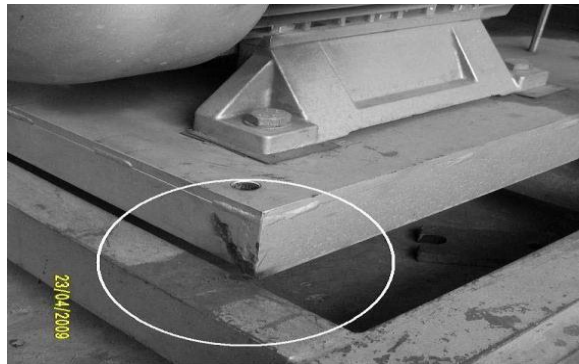
- Sobre carga del cojinete
- Lubricación ineficiente o excesiva
- Contaminación externa
- Instalación incorrecta
- Exposición a vibraciones cuando el cojinete está en reposo
- Defectos de fábrica

1.4.4.5. Vibración debido a partes flojas

“La soltura mecánica es debido al deterioro de la condición de ensamblaje de los elementos mecánicos, que se han excedido en las tolerancias permitidas o simplemente se han aflojado debido a movimiento del motor” (Mejía, 2009, p. 43). Quiere decir que pueden aparecer holguras en la base de la máquina y en los cojinetes afectando la alineación del eje.

La característica de la vibración por partes flojas es que la producen las fuerzas generadas por otro tipo de problemas, como la falta de alineación o desbalance. En la figura 9, se muestra un ejemplo de la vibración por partes flojas.

Figura 9. Vibraciones por partes flojas



Fuente: Mejía (2009, p. 43)

1.4.4.6. Vibraciones fajas y poleas

Tapia (2011), indica que: “las transmisiones por poleas y fajas son susceptibles de ser afectadas por una serie de problemas, cuyo origen se encuentra en gran medida en diferencias asociadas al montaje de la transmisión, aunque el envejecimiento de la faja también atenta contra los niveles de vibración” (p. 42). Por falta de simple inspección visual puede dar lugar a otros problemas, por ejemplo, la desalineación provoca éste tipo de problemas y también las fajas que han llegado a su factor de estiramiento máximo.

Las vibraciones producidas en equipos con transmisiones de fajas y poleas están asociadas a desgates, deterioro, desalineación y defectos en el montaje. Para evitarlas es necesario hacer revisiones visuales periódicas y utilizar equipo adecuado al momento de hacer los montajes, para asegurar el buen funcionamiento y evitar fallas en corto plazo.

1.4.4.7. Vibraciones por torbellino de aceite

Según Valdez (2009), “es el remolino de aceite presente al superar el doble de la velocidad crítica del rotor. El nivel de vibración ocasiona fatiga y desgaste acelerado en la película de aceite” (p. 142).

La adecuada interpretación de registros espectrales puede ser una forma fácil de detectar ésta falla, por la posible presencia de amplitudes a frecuencias inferiores a la frecuencia de rotación.

1.4.4.8. Vibraciones en engranajes

En las transmisiones de engranajes también se pueden presentar vibraciones, se generan frecuencias cuando dos ruedas dentadas engranan y se pueden dar por la velocidad, excentricidad y número de dientes.

Según González (2009), “al medir vibraciones en transmisiones de engranajes es posible la identificación de problemas como un error en la relación del número de dientes, excentricidad o error de criticidad, oscilaciones torsionales, desalineación y fractura o deterioro de los dientes” (p. 43). Un experto certifica en vibraciones y analista del espectro de la vibración puede lograr determinar el punto exacto de la vibración y la causa de la falla.

1.4.4.9. Vibraciones en motores

Al ser máquinas rotatorias como tal los motores eléctricos suelen presentar problemas de desalineación, desbalance, problemas de rodamientos, entre otros. También se les suman problemas electromecánicos característicos de los motores.

Según González (2009), entre las principales causas que generan vibración en los motores eléctricos se encuentran los siguientes:

- Desfase del centro magnético
- Barras del rotor rajadas o con fractura
- Corto circuito en las bobinas del estator
- Deformación por alta temperatura
- Pulso por torsión

Como se puede apreciar la detección de la falla por medio de vibraciones en los motores, requiere de mayor conocimiento y experiencia por los puntos en donde se puede dar la falla, debido a que no son puntos visibles.

1.4.5. Efectos de las vibraciones mecánicas

Los efectos producidos por las vibraciones mecánicas en los equipos pueden resultar nocivos para la maquinaria, estructuras y para el mismo personal que trabaja en el área.

De acuerdo a Castellanos y Sánchez (2005), la vibración en exceso puede producir:

Deterioro de la capacidad del personal operativo para hacer de forma eficiente sus funciones, provoca retrasos en la producción y, a la vez, pérdidas en las empresas.

Peligro de accidente para los colaboradores que trabajan con los equipos en operación que tienen vibraciones altas. Un ejemplo de ello son los que laboran con trituradoras y molinos.

Disminución de la vida útil de la maquinaria, lo que provoca que los índices de producción sean elevados.

La presencia de vibraciones es un indicador que los equipos no operan en condiciones estables, provoca mayores consumos de energía, combustibles e insumos.

Se puede incurrir en penalizaciones legales, según la legislación local, al provocar daños al personal por trabajar bajo esas condiciones.

Para resolver y corregir los problemas que producen las vibraciones, se tiene una variedad de técnicas para análisis de vibraciones, las cuales estudian su comportamiento. Por medio del uso de estas técnicas, se puede determinar con certeza las condiciones de operación a las cuales está sometido un equipo rotativo.

1.5. Termografía infrarroja

Una de las técnicas de mantenimiento, basado en condición más utilizadas y de mayor aplicación de la industria es la termografía. Es una técnica de mantenimiento, basado en condición, la cual permite medir y visualizar a distancia y sin ningún contacto con el equipo temperaturas en la superficie.

Iglesias y Abarca (2012), indican que: “la termografía es una técnica que permite medir temperaturas exactas a distancia y sin necesidad de contacto físico, con el objeto de estudiar y medir la captación de la radiación infrarroja, utilizando cámaras termográficas” (p. 14).

La termografía infrarroja representa una de las técnicas no destructivas o intrusivas, porque no se necesita entrar en contacto físico entre el equipo analizado y el equipo de medición, por lo que no afecta el funcionamiento y operación.

Según Carmona y Ochoa (2008), indican que la termografía infrarroja es: “una técnica que permite a distancia y sin contacto, medir la distribución de temperaturas en la superficie de un cuerpo. Para ello se hace el uso de

detectores de infrarrojo que permiten extraer una imagen cuantificable en temperatura, mediante cálculos llamada termograma” (p. 27). Por experiencia y según varios autores la principal ventaja de la termografía, es que no es necesario parar la máquina para revisarla, por lo que también es una técnica segura para el analista.

La termografía es usada como una técnica de investigación industrial, comercial y de desarrollo de pruebas. Para Delgadillo y Joaquín (2013), es la técnica “para hacer que la radiación infrarroja invisible sea visible, es la técnica de monitoreo de condición remoto que permite la medición de temperaturas y la formación de imágenes térmicas de un componente, equipo o proceso a partir de la radiación infrarroja” (p. 75).

En el mantenimiento basado en condición, la termografía infrarroja es utilizada como un método eficiente de ensayo no destructivo y forma parte importante de él. La ventaja de medir la temperatura sin tener contacto directo, la ha llevado a ser una mejor alternativa y de alto crecimiento sobre otros métodos.

El comportamiento térmico y la temperatura del equipo ha llegado a ser un factor crítico en el mantenimiento industrial.

1.5.1. Tipos de termografía

La termografía infrarroja se puede dividir en tres tipos, según su aplicación, su forma de obtener y analizar los resultados. Iglesias & Abarca (2012) describen cuáles son los tres tipos de termografía.

Termografía comparativa: Es la técnica usada para comparar equipos en iguales condiciones, con el objeto de evaluar el estado del componente que se inspecciona, cuando ésta técnica es aplicada correctamente las diferencias entre los componentes inspeccionados son indicadores de su condición.

Termografía inicial: Con un estudio inicial se tiene el objetivo de establecer un punto de referencia del componente, cuando opera en condiciones estables sin fallas. Es primordial establecer el estado normal del componente y usarlo como un punto de referencia para comparar con inspecciones posteriores.

Termografía cualitativa: Localiza e identifica las fallas que existen en los diferentes equipos monitoreados, se basa en el método comparativo de sus estados anormales de operación. La diferencia entre áreas o equipos similares puede significar un problema potencial, en la realidad se debe tener información de la estructura, sistema, objeto o proceso, a través de observarlo con imágenes de la radiación infrarroja, grabarlas y presentar la información.

1.5.2. Ventajas de la termografía infrarroja

La termografía infrarroja tiene ciertas ventajas tecnológicas sobre otros instrumentos de diagnóstico térmico, de acuerdo a Carmona y Ochoa (2008), se encuentran las siguientes:

- Alta resolución en temperaturas.
- Amplia resolución espacial.
- Medición de un amplio rango de temperaturas: -20°C hasta 2500°C .
- Incremento de seguridad y velocidad en las inspecciones.
- Incremento en la exactitud para localizar problemas.

- Identificación de problemas potenciales asociados a procesos térmicos.
- Reducción de fallas inesperadas y como consecuencia una disminución de reparaciones.
- Extensión del tiempo de vida de equipos o maquinarias.
- Habilidad para planear reparaciones.
- Es no intrusivo, por lo tanto, no requiere contacto físico ni modificación de las variables, sustancias o elementos del sistema analizado.
- Práctico y portátil, sobre todo en áreas peligrosas de trabajo.

Las ventajas que la termografía infrarroja tiene sobre otros métodos de detección térmica son bastantes y muy importantes para tomar en cuenta, puesto que brinda seguridad para el personal que lo ejecuta, es un método no intrusivo o invasivo, no necesita parar operaciones en los equipos, se puede prevenir accidentes, se evitan paros no programados y por consiguiente, pérdidas en la producción al detectar con tiempo de anticipación las fallas en los equipos.

1.5.3. Cámara termográfica

La cámara de termografía infrarroja es el dispositivo que permite ver la distribución térmica superficial de un objeto, sin entrar en contacto con el equipo y con alta precisión.

Se puede definir una cámara termográfica “como un dispositivo que, a partir de las emisiones de infrarrojos medias del espectro electromagnético de los cuerpos detectados, forma imágenes luminosas visibles por el ojo humano” (Picazo, 2016, p.49). Las cámaras infrarrojas trabajan con longitudes de onda en la zona del infrarrojo térmico, por medio de una gama de colores y una escala se puede interpretar la temperatura a la que se encuentra un cuerpo.

En la figura 10, se muestra la imagen e información técnica de una cámara termográfica de última generación.

Figura 10. **Cámara termográfica FLIR E40**

Rango de temperaturas	-20 ° a 650 ° C
Almacenamiento	>1.000 imágenes JPEG radiométricas (en tarjeta de memoria incluida)
Emisividad	De 0.1 a 1.0 ajustable
Frecuencia de imagen	60 Hz
Cambio de visión	25°x19°
Sensibilidad térmica	0,07 ° C
Resolución del detector	160x120 pixeles
Medición	3 puntos, 3 tareas, isoterma y delta T
Video	SI
Autonomía	4 horas
Dimensiones	245x95x105 mm
Peso	825 g
Precio aproximado	4.000 €



Fuente: Picazo (2016, p. 51)

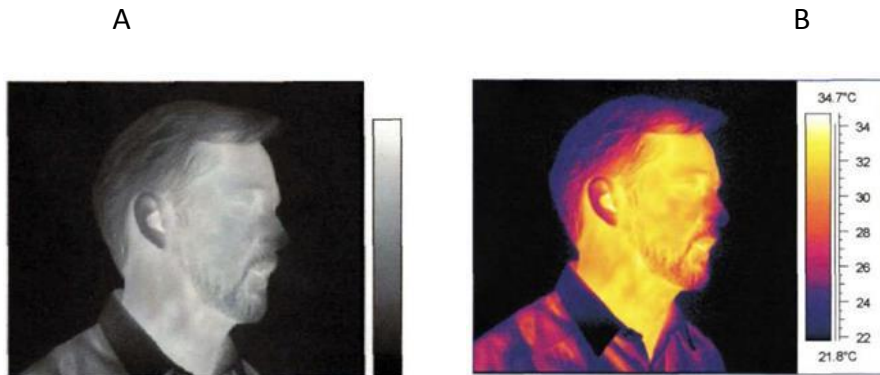
La imagen que se observa en la pantalla de la cámara termográfica es un mapa de temperaturas en el que las diferencias de energía radiante se ven en las variaciones de las densidades de la imagen. El mapa de densidades térmicas se denomina termograma.

En el termograma en blanco y negro, se muestra en tonos claros, los objetos más calientes, y en tonos más oscuros, los más fríos. También se utiliza el termograma a color, al momento de utilizarlo se debe tener el cuidado de interpretar los colores, debido a que existe variedad de paletas de color disponibles para los equipos termográficos. Por lo regular, los colores rojos y

amarillos muestran los objetos más calientes, y los colores azules y violetas, los objetos más fríos.

Es necesario aclarar que la cámara infrarroja no mide temperatura, lo que mide es la energía radiada en la superficie de los objetos. En la figura 11 a y b, se muestran los ejemplos de termograma en blanco y negro y a color.

Figura 11. **Termograma en blanco y negro y a color**



Fuente: Delgadillo y Joaquín (2013, p. 78)

1.5.4. **Aplicaciones de la termografía infrarroja**

Las aplicaciones de la termografía infrarroja son muy numerosas, debido a su técnica de aplicación es utilizada en diversos campos como una herramienta principal, y en otros, como secundaria. Gracias a que las imágenes pueden detectar incrementos de temperatura es utilizada en una gran variedad de áreas de la industria como una de las herramientas principales del mantenimiento predictivo.

Como principales aplicaciones de la termografía infrarroja, se pueden mencionar las siguientes:

1.5.4.1. Inspección de sistemas eléctricos

Debido a la gran importancia que tienen los equipos eléctricos en la industria la termografía infrarroja tiene su principal y más común aplicación en la inspección de sistemas eléctricos. De acuerdo a Abarca y Iglesias (2012), la termografía en estos sistemas se puede dividir en dos categorías:

Instalaciones de baja tensión:

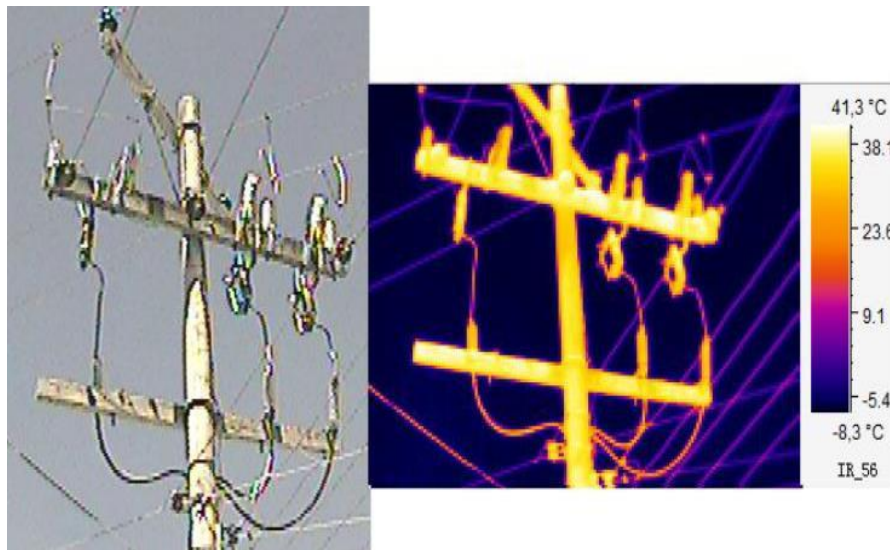
- Instalaciones de baja tensión
- Instalaciones corridas
- Averías internas de los fusibles
- Conexiones deficientes
- Avería de interruptor
- Conexiones de cableado suelto
- Monitoreo de paneles de control y fuerza
- Monitoreo de motores eléctricos

Instalaciones de alta tensión:

- Monitoreo de subestaciones
- Corrosión en seccionadores
- Instalaciones defectuosas
- Aislamiento en mal estado
- Instalaciones recalentadas
- Verificación de líneas de alta tensión
- Verificación en mandos de potencia
- Inspección al terminar la reparación

En la figura 12, se muestra la imagen real y la imagen infrarroja de una línea de alta tensión.

Figura 12. **Imagen infrarroja de líneas de alta tensión**



Fuente: Iglesias y Abarca (2012, p. 31)

En la figura se puede apreciar, según la escala de temperatura cuáles son los puntos más calientes en un poste con líneas de alta tensión, de acuerdo a la imagen y al rango de temperaturas, se determina cuál es la condición del sistema analizado.

1.5.4.2. Inspección en sistemas mecánicos

Los equipos que realicen movimientos provocan calentamientos en ejes y todo tipo de articulaciones, debido a rozamiento, el cual puede generar desgastes y fallos en los equipos. Según Cherres y Ñauta (2015) puede ser debido a:

- Deficiente lubricación
- Ajustes defectuosos
- Mal estado de los cojinetes
- Desgaste por uso
- Errores de alineación
- Motores recalentados
- Rodillos sospechosos
- Bombas sobrecargadas
- Ejes de motor recalentados

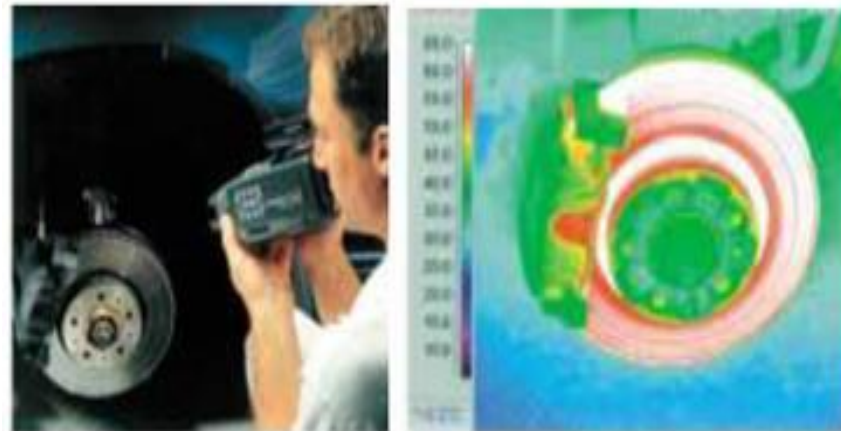
Estudios realizados han demostrado que las averías mecánicas provocan gran cantidad de calor antes de fallar Picazo (2016), indica que “las averías en los rodamientos del motor producen una gran cantidad de calor, debido a la fricción que se genera entre las pistas de rodadura y los elementos rodantes, el eje gira con mayor dificultad lo que sobrecarga el motor y genera calor” (p. 60). A simple vista no se puede detectar el fallo del rodamiento en un motor, generalmente nos damos cuenta hasta que empieza a producir ruido por la fricción, pero ese es indicio que la falla esta próxima a suceder, con el uso de la termografía se puede detectar con anticipación para evitar la falla.

Picazo (2016) explica que en un estudio realizado por (Gaberson, 1999)

Se estableció que basado a la relación entre desalineamiento y desequilibrio se tienen pérdidas de energía. Al haber un elevado desalineamiento las pérdidas de energía eran del 2% con un elevado incremento de la temperatura en el acoplamiento, el desequilibrio originaba pérdidas de energía del 1%. Estos estudios respaldan el uso de la termografía para identificar desalineación y desequilibrio. (p. 60).

En la figura 13, se muestra un análisis termográfico de freno de disco en un motor.

Figura 13. **Termografía de un freno de disco**



Fuente: Cherres y Ñauta (2015, p. 21)

Se observa en la imagen termográfica con un color fuerte rojizo, cuáles son las partes de mayor fricción y temperatura en un disco de freno, de ésta forma se pueden prevenir paros inesperados.

1.5.4.3. Aplicaciones industriales

La termografía infrarroja puede aplicarse a una variedad de procesos y áreas dentro de la industria, según Delgadillo y Joaquín (2013), las aplicaciones son las siguientes:

- Procesos de fabricación
- Control de procesos
- Funcionamiento de válvulas

- Aislamientos térmicos
- Carcasas de motores
- Calderas
- Líneas de vapor
- Hornos chimeneas

1.5.4.4. Otras aplicaciones

La técnica de termografía infrarroja, debido a su capacidad de detectar la transferencia de calor es utilizada en una amplia gama de procesos y equipos en general, Iglesias y Abarca (2012), mencionan las diferentes aplicaciones que posee la termografía:

- Tubería
- Fugas
- Fallas en aislamiento
- Tuberías obstruidas
- Localización de llamas
- Identificar el nivel en acumulación de depósitos
- Localizar humedad en trabajos de construcción
- Detectar puntos calientes en soldadura
- Monitoreo de materiales de uso en aeronáutica
- Monitorear moldes
- Verificar la temperatura en pavimentos
- Monitoreo en industrias de papel
- Localización de tumores en el cuerpo humano

1.5.4.5. Visión nocturna

Cherres y Ñauta (2015), indican que: “es bastante conocida y utilizada, no solo en el campo militar para localizar objetivos, sino también en su aplicación civil para vigilancia y detección. Son muy utilizadas las cámaras de termografía desde helicópteros para patrullar fronteras, azoteas, búsqueda y rescate” (p. 17).

La termografía infrarroja desde hace muchos años ha tenido aplicaciones importantes desde usos militares como en usos de vigilancia domiciliar y para búsqueda y rescate de personas por los cuerpos de socorro. En la figura 14, se muestra una imagen termografica de vigilancia en un edificio.

Figura 14. Localización de personas en la azotea de un edificio



Fuente: Cherres y Ñauta (2015, p.18)

La técnica de termografía infrarroja ha ganado importancia en el campo tanto industrial como domiciliar, gracias a sus bondades y a los avances tecnológicos se utiliza en la seguridad y vigilancia de edificios.

1.5.4.6. Diagnóstico de motores

En los motores de inducción los principales fallos se dan en los rodamientos y en los devanados del estator, los fallos en los motores se manifiestan como incremento o alta temperatura. Por esa razón es que la termografía es una herramienta predictiva muy útil para la detección de dichos fallos.

Para la detección y diagnóstico correcto de las distintas fallas en los motores se presenta una descripción de la clasificación de las fallas en cada una de las partes del motor, en donde se presentan incrementos de temperatura, por lo que generan las fallas más comunes en dichos equipos.

Fallas en el estator: las fallas en el núcleo se pueden dar en el núcleo y en el devanado presentando diferentes síntomas, los cuales pueden ser detectados por medio de termografía infrarroja, Picazo (2016) describe cuáles son las fallas en cada una de las partes del motor:

Fallas en el núcleo: corresponden a causas que inducen la formación de puntos calientes entre las laminaciones del estator, tal efecto se debe al deterioro paulatino del aislamiento entre la lámina provocado por estrés térmico, ambiental, eléctrico o mecánico, por roce entre rotor y estator a causa de rodamientos.

Fallas en los devanados: ocasionales cortocircuitos en el devanado provocan que el motor se caliente, por la reducción en la resistencia del conductor, lo que provoca mayor intensidad de corriente, debido a este tipo de fallas la termografía infrarroja se considera una técnica efectiva para detectar fallas de ese tipo.

Fallas en el rotor: según Picazo (2016), la principal falla en el rotor de los motores de inducción se da en las barras.

La rotura de barras es un fenómeno que supone una gran disipación de calor alrededor de la punta dañado, conceptualmente cuando una barra se rompe, las barras adyacentes pasan a conducir una corriente superior con lo que su calentamiento también incrementa, por lo que la termografía puede resultar un buen método para detectar este tipo de fallas. (p. 59)

Fallos externos: de acuerdo a Picazo (2016), se pueden dar fallas en la parte externa de los motores de inducción específicamente en las conexiones y empalmes “los datos estadísticos y argumentos de distintos artículos muestran la importancia del monitoreo, mediante la técnica de la termografía infrarroja, en las conexiones defectuosas para lograr un funcionamiento fiable, eficiente y seguro” (p. 60). Sobresale la importancia de monitorear la temperatura y al mismo tiempo identificar los puntos calientes en diferentes zonas del equipo.

Se puede concluir que la termografía infrarroja es una técnica muy útil en diversas aplicaciones de la industria y de forma importante en el mantenimiento industrial, siendo parte fundamental en el mantenimiento de monitoreo de condición.

La aplicación de la técnica de forma programada sistemática ayudará a la reducción de costos de producción y mantenimiento por paradas imprevistas, se aumenta la disponibilidad de los equipos, se logra tener un mayor tiempo de vida de los mismos. Se ha comprobado que su aplicación eficiente ayuda directamente a operar con reducción de costos de mantenimiento, reducción de pérdidas de producción por evitar paros no programados o de emergencia.

La aplicación de la termografía infrarroja se ha extendido, pues ha demostrado ser una técnica reconocida, se utiliza en el sector industrial, medicina y como apoyo en control de procesos, control de calidad e investigación y desarrollo.

1.5.5. Normativa ISO para termografía infrarroja

Para apoyar la gestión de mantenimiento en las distintas ramas de su aplicación existen diversas normas para el desarrollo correcto de los procesos de mantenimiento industrial, para este caso se citará la norma ISO 18434-1: 2008, que está directamente relacionada con el campo de la termografía en el mantenimiento por monitoreo de condición.

1.5.5.1. Norma ISO 18434-1: 2008

Supervisión de condición y diagnóstico de máquinas: suministra una introducción sobre la aplicación de la técnica de la termografía infrarroja en la supervisión y monitoreo de condición de la maquinaria, en donde se incluyen equipos auxiliares como válvulas, líquido, las máquinas accionadas eléctricamente y todo equipo relacionado con el intercambio de calor. También se mencionan las aplicaciones de la termografía infrarroja en cuanto a la evaluación del funcionamiento de los equipos o máquinas.

Procedimientos generales: habla de la terminología de termografía infrarroja que pertenece a la supervisión de condición, monitoreo y diagnóstico de máquinas. Describe los tipos de termografía infrarroja y sus ventajas, brinda una dirección para establecer los criterios de severidad para las fallas identificadas por termografía infrarroja, técnicas y requerimientos del entorno para hacer las mediciones de termografía infrarroja en maquinaria.

1.6. Análisis de aceite

El análisis de aceite es una técnica del mantenimiento de monitoreo de condición que brinda mayor información al departamento de mantenimiento, referente a condiciones de operación de la maquinaria, algunas empresas utilizan el laboratorio del proveedor de los lubricantes; mientras que otras contratan los servicios de laboratorios privados, es importante conocer dentro de las propiedades de un aceite factores importantes, los cuales se pueden mencionar la degradación, la contaminación y desgaste.

Arellano (2009), indica que el análisis de aceite radica en una serie de exámenes de laboratorio que se utilizan para evaluar el estado de los lubricantes usados. Al analizar los resultados, se obtiene la información que permite tomar decisiones en cuanto a la necesidad de cambiar el lubricante o de someterlo a un proceso de filtración.

La importancia de analizar las condiciones del aceite lubricante es saber el momento donde se tiene que hacer un cambio, para evitar desgaste en los equipos y optimizar el uso el aceite.

De acuerdo a Díaz (2007) “se hace más imprescindible utilizar los recursos en la mejor forma, esto pasa por usar los lubricantes hasta completar su vida útil. Los análisis de aceites son la única y mejor forma de asegurarse que se están utilizando adecuadamente los lubricantes” (p. 69).

Con un adecuado uso de los aceites lubricantes se pueden optimizar costos de mantenimiento, reducir tiempos de paro no programados y aumento en la disponibilidad de los equipos al reducir las fallas.

Según Gómez (2013), dentro del mantenimiento predictivo el análisis de aceite utilizado como una herramienta, permite obtener información exacta del estado de un sistema lubricado sin necesidad de que éste se encuentre fuera de operación, por medio de ésta técnica se pueden evaluar distintos parámetros de las condiciones de los aceites en operación.

Se puede concretar que existe gran necesidad de maximizar la vida de los aceites a su máxima capacidad, pero implica ser conocedor de los riesgos de extender los períodos de cambio; el análisis de aceite puede convertirse en la pieza fundamental de un programa de mantenimiento basado en condición.

1.6.1. Objetivos del análisis de aceite

Tener claros los objetivos para implementar un sistema de análisis de aceite es importante definir las metas, los recursos materiales y humanos para lograr que el sistema funcione, Díaz (2007) menciona que identificar posibles problemas, se tienen como principales objetivos:

- Identificar impurezas en los aceites, para evitar problemas relativos al desgaste de maquinaria y componentes.
- Detectar fuentes de contaminación posibles como agua, combustible, polvo, etc.
- Detectar posibles mezclas de aceite.
- Comprobar si mantienen sus especificaciones técnicas o han completado su vida útil.

Arellano (2009), también indica cuáles son algunos de los objetivos del análisis de aceite:

- 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.

La implementación de un sistema de análisis de aceite proporciona una serie de beneficios, tanto para los equipos como para la empresa que lo implementa y lo ejecuta de forma eficiente, Díaz (2007), indica cuáles son algunos de los beneficios del análisis de aceite, se describen a continuación:

Ahorros en los costos, prolongando la vida útil de los aceites y evitando cambios normalmente costosos antes de tiempo. Avisos previos de fallas en maquinaria o de un excesivo desgaste de los componentes. Proporciona una referencia para la comparación de máquinas idénticas. Determina si se está utilizando el aceite correcto.

La implementación de un sistema de análisis de aceite es un avance a la reducción de costos, reducción de insumos, ayuda a la reducción de consumo de recursos que se utilizan cuando se hacen cambios innecesarios.

1.6.2. Recomendaciones para el muestreo de aceite

Es necesario tener en cuenta algunas consideraciones para tomar las muestras de aceite de una forma correcta y efectiva, según Arellano (2009), las siguientes son algunas recomendaciones a seguir:

Las muestras de aceite lubricante deben ser tomadas del aceite en circulación y con el motor en operación.

La muestra debe ser tomada en el punto de muestreo ubicado después del equipo de separación y filtrado. Es recomendable tomar la muestra antes de refrescar con aceite nuevo.

La primera muestra de aceite que tome al abrir la válvula no debe considerarse, sino la siguiente, porque de lo contrario se estaría analizando el aceite acumulado en esa sección de la tubería. Utilizar botellas de muestras limpias y limpiar la línea de muestra antes de tomar la muestra, la cantidad adecuada de la muestra es de 0.75 a 1 litro. Las frecuencias de muestreo comienzan desde las 250 horas.

El recipiente empleado para la muestra debe ir debidamente marcado para su completa identificación. Los datos que se deben especificar con la muestra de aceite son: nombre y marca del aceite, volumen de aceite que utiliza el equipo, tipo de aceite, fecha de toma de la muestra.

En los equipos se pueden dar diferentes tipos de desgaste en las piezas que los componen, debido a los diferentes procesos industriales y a los diferentes ambientes en los que operan. Se pueden identificar algunas fuentes de desgaste primarias, pueden estas relacionadas con el tipo de aceite, degradación y contaminación.

1.6.3. Contaminación del aceite

Para la implementación de un sistema de análisis de aceites, se debe tomar en cuenta un factor muy importante como la contaminación y las fuentes de

contaminación del aceite. La contaminación puede ser por factores internos los que se dan en el interior del equipo o en el contenedor del aceite, también externos los que tienen que ver directamente con el ambiente de trabajo donde se encuentra el equipo.

De acuerdo a Díaz (2006), las fuentes de contaminación del aceite se pueden clasificar de la siguiente manera: Contaminación de aceite nuevo: se puede dar en las líneas de envasado con partículas metálicas y gomas; en el depósito de transporte puede contaminarse por partículas metálicas e incrustaciones del depósito; por último, en tanques de almacenamiento.

Ingreso de contaminación a los equipos: se puede dar por los respiraderos o los tapones de depósito de aceite del equipo. Puede ingresar contaminación durante el mantenimiento de los equipos y por los sellos o retenedores.

Contaminación en los depósitos de aceite: generalmente, en la parte superior interna de los depósitos se mantiene una neblina de humedad, lo cual produce acumulación de agua por condensación en el aceite.

Contaminación por agua: la contaminación por agua es altamente peligrosa, debido a la oxidación del lubricante y la degradación de los aditivos antiherrumbre y oxidación, puede darse también un incremento en la viscosidad.

Contaminación generada internamente: contaminación que genera partículas altamente abrasivas, lo que produce mayor desgaste en los componentes, por tal motivo es la contaminación más peligrosa para la maquinaria.

1.6.4. Tipos de desgaste

Los tipos de desgaste más agresivos son los que se producen por fuentes internas, mientras el equipo está en operación. Cherres y Ñauta (2015) dan una descripción de los desgastes generados:

Desgaste adhesivo: ocurre cuando dos superficies metálicas están en contacto, permitiendo que se desprendan partículas. Lubricación insuficiente o contaminada ocasiona esta condición.

Desgaste abrasivo: resulta del contacto de partículas pesadas que entran en contacto con las partes internas como polvo y metales. Hacer un proceso de filtrado logra reducir la abrasión.

Cavitación: ocurre cuando aire a presión o burbujas colapsan en el interior y ocasiona que las superficies se piquen o se fisuren. Para esto se usa un aditivo anti-espumante.

Desgaste corrosivo: es un resultado directo de la oxidación, lo causa una reacción química que remueve material de la superficie de los componentes.

Desgaste por fatiga: es producido por fisura de la superficie, lo que ocasiona que se generen partículas de desgaste.

Es necesario realizar las pruebas o análisis de aceite para detectar o prevenir la falla en los equipos, se recomienda llevar muestras de aceite al laboratorio para detectar contaminantes, deterioro o degradación del mismo. A continuación, se hace una descripción de las pruebas más utilizadas en el análisis de aceite, según Cherres y Ñauta (2015).

1.6.5. Pruebas en aceites industriales

Viscosidad: la viscosidad es la propiedad más importante de un aceite, es conocida como la resistencia de un líquido a fluir. Se ve afectada por la temperatura y la presión, es de vital importancia para diagnosticar el desempeño, se recomienda que si la viscosidad de un aceite tiene una diferencia del 10 % de la nominal debe considerarse el cambio.

Número de ácido total (TAN): por medio de este indicador se monitorean los niveles de ácidos generados por la oxidación de los aceites. Al momento de presentar un incremento en al TAN se debe considerar como operación en condiciones anormales y requiere de la intervención del departamento de mantenimiento.

Número total básico (TBN): indicador donde se mide la alcalinidad o reserva alcalina de los aceites, la corrosión ácida en los componentes se puede presentar con los niveles bajos de TBN lo que incrementa los niveles de desgaste.

Contenido de agua: el agua es un elemento crítico a monitorear, debido a que disminuye la capacidad del aceite para proteger las partes en movimiento, provoca herrumbre y desgaste en los componentes del equipo. También provoca turbidez, espuma y lodos en los depósitos.

Análisis espectrométrico: es la prueba o técnica más importante de los laboratorios de análisis de aceite, debido a que da información sobre el equipo, el desgaste y la contaminación de forma rápida y efectiva. Se utiliza para monitorear partículas metálicas muy pequeñas de 5 μ a 10 μ , arriba de ese rango es necesario utilizar otra técnica.

Conteo de partículas: se utiliza para monitorear la cantidad de partículas en el aceite, no se especifica la composición del material. Es un método muy bueno para comprobar la eficiencia del filtro y es actualmente una de las técnicas del mantenimiento, basado en monitoreo de condición para detectar el inicio de condiciones anormales en los equipos.

Ferrografía analítica: utiliza el estudio microscópico para analizar las partículas y así determinar la composición del material, la fuente y el modo de desgaste. Se usa para establecer las características de la maquinaria por medio de examinar el tamaño, tipo, distribución y concentración de la partícula. Se usa solo para materiales ferrosos.

Insolubles: en el lubricante se pueden presentar partículas como materiales de desgaste, arcilla y arena, al adherirse a las superficies puede provocar desgastes al entrar en contacto, el nivel máximo de estas partículas permitido es del 2 %.

Punto de inflamación: es un punto de referencia para saber la temperatura máxima a la que se puede utilizar sin ningún riesgo, cuando el aceite es usado y se detecta una disminución de éste índice indica que el aceite está diluido, contaminado con otros aceites, cuando presenta un valor más alto indica evaporación.

Como se puede apreciar cada prueba o técnica de inspección del aceite es para un determinado objetivo y aplicación en los equipos industriales, a continuación en la tabla IV se muestran algunas pruebas de aceite y su enfoque.

Tabla IV. **Pruebas de análisis de aceite y su enfoque**

ANÁLISIS DE ACEITE	OBJETIVO	RESULTADO ESPERADO
Viscosidad	Salud del lubricante	Estable
Número de Neutralización (AN y BN)	Degradación del lubricante	Tendencia decreciente lenta
Punto de inflamación	Contaminación	Estable
Análisis de elementos por emisión atómica	Degradación de aditivos	Decremento suave
	Contaminación Metales de Desgaste	Negativo Negativo-Tendencia suave
FTIR-Análisis infrarrojo	Degradación de aditivos	Decremento suave
	Contaminación	Negativo
Conteo de partículas	Contaminación y/o desgaste	Estable en la meta establecida
Análisis de humedad	Contaminación	Negativo
Densidad ferrosa o partículas ferrosas	Desgaste	Decremento o Estable
Ferrografía analítica	Localización del tipo de desgaste presente	Identificación del tipo de desgaste, procedencia y causa
Resistencia a la oxidación RPVOT	Salud del lubricante	Estable
Pruebas de membrana y gota	Salud del lubricante	Conservación de aditivos
	Contaminación Desgaste	Negativo Negativo-Estable

Fuente: Cherres y Ñauta (2015, p. 36)

1.6.6. Análisis de aceite en cajas de engranajes

Las cajas de engranajes por su aplicación se encuentran bajo condiciones de esfuerzo, rozamiento y altas cargas, por tal motivo, las principales pruebas de aceite en estos equipos con la viscosidad y desgaste. Es de vital importancia mantener atención a la variación de la viscosidad, aunque se debe mantener atención importante a la adecuada selección del lubricante y la contaminación por agua.

En la tabla V, se muestran algunos lineamientos para cajas de engranajes en base a pruebas de laboratorio.

Tabla V. **Límites de advertencia para engranajes**

LÍMITES GENERALES DE ADVERTENCIA PARA ENGRANAJES		
Prueba de análisis de aceite	Límites de alarma	Siguiente acción recomendada
Análisis Espectrométrico	10 % de incremento sobre la muestra anterior	
RFS Espectroscopia de Filtro Rotatorio	Tasa de 2:1 o mayor de gruesos a finos	Ferrografía
Viscosidad	+20 %, -10% del grado nominal ISO	
Oxidación	0.2 Abs/0.1mm sobre la última muestra	TAN
Agua	0.25 % max.	Karl Fisher

Fuente: Díaz (2006, p. 91)

1.6.7. Normativa para análisis de aceite

Los laboratorios especializados en el análisis de aceite tienen como objetivo analizar las características físico-químicas. Todos los análisis están aprobados o ejecutados de acuerdo a las normas ASTM para determinar si continua en servicio o si requiere cambio. A continuación se mencionan algunas técnicas y la norma ASTM con la que se realiza:

- Viscosidad: ASTM D455 y ASTM 1745
- Punto de inflamación: ASTM D92
- Número de neutralización: ASTM D974
- Número básico total TBN: ASTM D664 y D2896
- Insolubles: ASTM D893

- Contenido de agua: ASTM D95
- Dilución por gases o combustibles: ASTM D92

Toda prueba o análisis también depende del tipo de aceite, puesto que puede ser industrial o automotriz, también depende del equipo en el que se esté utilizando. Todas las pruebas fisicoquímicas se realizan por métodos, según las normas ASTM, para el análisis de partículas sólidas se utiliza la norma ISO 4406.

Para el desarrollo de la presente propuesta, el análisis de aceite se realizó por parte de laboratorio externo certificado, el criterio de alerta que se utilizó fue el rango de gravedad general del informe. Para la discusión de resultados se tabularon solo dos variables del total medidas en el informe, las variables son la viscosidad y el total de partes por millón (ppm) de hierro.

1.7. Indicadores de gestión de mantenimiento (Kpi's)

Para monitorear la gestión del mantenimiento de los activos, en una empresa es necesario determinar y dar seguimiento estadístico a los indicadores de mantenimiento (kpi's).

Valdez (2009), dice que para evaluar y dar seguimiento al trabajo y resultados de los equipos y del departamento de mantenimiento es necesario establecer indicadores. Así de forma cuantitativa pueda evaluar el alcance de las metas que lleven al mejoramiento del mantenimiento de los equipos.

Una buena medida de la capacidad de uso del equipo en un tiempo programado es la disponibilidad la que, según Tapia (2011) “es la que permite determinar la probabilidad de que los equipos de una empresa estén aptos para su funcionamiento cuando se requieren en un período de tiempo dado” (p. 39).

La disponibilidad es el porcentaje de tiempo que el equipo estuvo en buen estado sin fallar, las empresas buscan una disponibilidad neta mayor a 98 %.

De acuerdo a Grijalva (2009), “Se deben crear reportes precisos y específicos de los resultados en cuanto al desempeño y logro de metas, deben ir incluso acompañados de gráficos actuales e históricos para una fácil comprensión e interpretación de los resultados” (p. 36). Para dar seguimiento a la gestión de mantenimiento es indispensable implementar y controlar los siguientes indicadores:

1.7.1. Disponibilidad de equipos

Según Valdez (2009), “es un indicador muy importante que refleja el porcentaje real de utilización de los equipos, el período de cálculo es mensual y se puede implementar sobre un equipo en particular o toda la planta en general” (p. 208).

En el cálculo de este indicador, se debe tomar en cuenta la información de las órdenes de trabajo y los reportes de mantenimiento. En las fórmulas que se describen a continuación se detallan los indicadores necesarios para medición de la disponibilidad.

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTRt}} \quad (1)$$

Donde:

MTBF: Mean time between failures

Tiempo medio entre fallas (Indicador de confiabilidad)

MTTRt: Mean time to restore

Tiempo medio para restaurar

Indicador de eficiencia de mantenibilidad

1.7.2. Tiempo promedio entre fallas (MTBF)

Indicador que facilita saber la frecuencia con la que ocurren las fallas, es el tiempo promedio que una máquina o equipo opera sin interrupciones por fallas. Se obtiene dividiendo el tiempo total de operación entre el número de paros por fallas.

$$MTBF = \frac{TTO}{\#F} \quad (2)$$

Donde:

TTO: Tiempo total de operación en el periodo

#F: Número total de fallas

1.7.3. Tiempo medio de restauración (MTTRt)

Indicador que mide la eficacia de la gestión de mantenimiento para solucionar las fallas que se presentan en un período. Incluye el tiempo para

analizar y diagnosticar la falla, tiempo en conseguir los insumos o repuestos y tiempo de planeación.

$$\text{MTTRt} = \frac{\text{TTR}}{\#F} \quad (3)$$

Donde:

TTR: Tiempo total empleado en restaurar el equipo después de cada falla.

#F: Número de fallas totales.

El indicador debe tender a bajar para indicar mejora en la mantenibilidad.

1.7.4. Tiempo medio de reparación (MTTRr)

Es el tiempo promedio que realmente se ha utilizado para reparar la falla y restaurar la operación del equipo, línea o maquinaria después que ocurrió la falla de funcionamiento.

1.8. Norma ISO 17359 Directrices generales

Norma internacional que proporciona orientación para el monitoreo y diagnóstico del estado de las máquinas. Se establecen los procedimientos generales que deben considerarse al establecer un programa de monitoreo de condiciones para todas las máquinas, equipos o componentes. La Norma presenta una visión general del procedimiento genérico recomendado para la aplicación de un programa de monitoreo de estado, dirige las actividades hacia el fallo de causa raíz, propone el enfoque del establecimiento de los criterios de alarma.

Para el desarrollo del programa de monitoreo de condición, la Norma propone los siguientes pasos:

- Identificación de los equipos
- Identificación de la función de los equipos
- Análisis de criticidad de los equipos
- Análisis de modo y efecto de falla
- Identificar los parámetros a medir
- Seleccionar las técnicas de medición
- Seleccionar los puntos de medición
- Definir los criterios de alarma
- Realizar las mediciones
- Comparar los resultados con el criterio de norma o alarma
- Determinar si es requerida una acción de mantenimiento
- Programar la acción de mantenimiento necesaria
- Tabular y archivar resultados para un record histórico
- Revisión
- Mejora continua

2. MODELO DE CBM SEGÚN NORMA ISO 17359

La estrategia de mantenimiento por monitoreo de condición, se desarrolló en la línea 1 de la planta de jabones de lavandería. La línea de producción está seccionada de acuerdo al proceso o fase de la fabricación del jabón, así mismo la maquinaria y equipos que la componen están distribuidos y codificados de esa forma. La maquinaria está distribuida de la siguiente forma:

Área de mezcla: Es la fase en la cual se inicia la producción, se hace la mezcla de materias primas y se hace la saponificación, cuenta con dos mezcladores tipo tanque cilíndrico con capacidad de 4,000 kg. Los equipos importantes o críticos son los motores y reductores de 60hp.

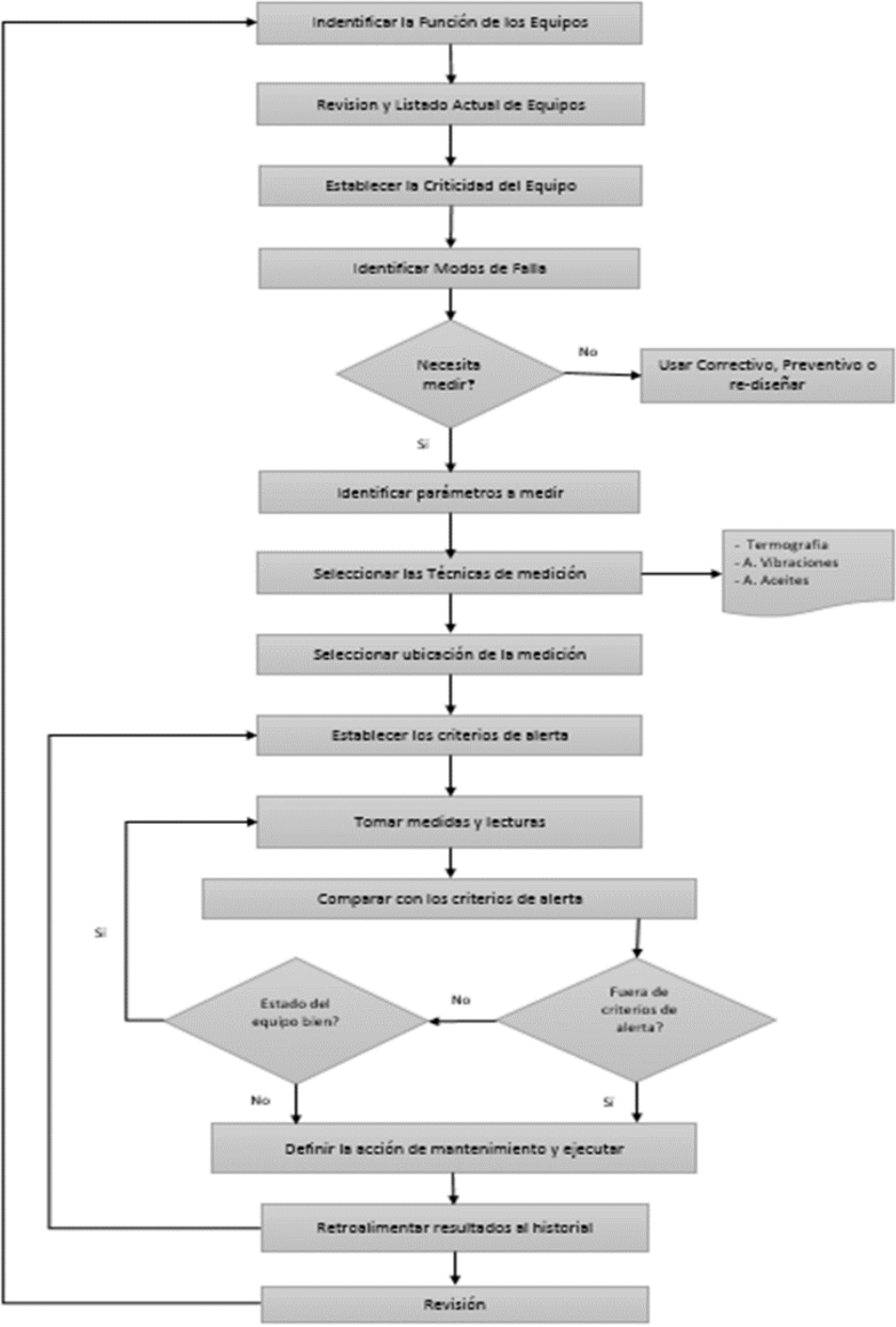
Atomizador: Es donde inicia la fase de sacado del jabón, pasa por una boquilla de atomización, y es enfriado por una cortina de agua y vacío, como equipos críticos cuenta con motor y caja reductora.

Área de compresoras: En ésta fase el jabón es compactado y cortado en forma de pellet, es un ciclo que consta de 3 compresoras de tornillo sin fin. Los equipos críticos en cada compresora son el motor y caja reductora de 100 hp.

Troquelado y empaque: Es donde se le da forma y tamaño a la bola de jabón y pasa por la empacadora automática formando 3pack de jabones.

El procedimiento general que se utilizó en el desarrollo del plan de monitoreo de condición, se presenta en la figura 15.

Figura 15. Diagrama de flujo del programa de monitoreo de condición



Fuente: Norma ISO 17359 (2003, p. 03)

2.1. Lista actual de equipos

De acuerdo al esquema que propone la norma ISO 17359 figura 15, después de identificar la función de los equipos en el proceso, a continuación en la tabla VI se presenta el listado principal de equipos de la línea de producción.

Tabla VI. **Lista de equipos línea 1**

Lista de equipos línea de producción 1	
Código	Descripción
111QMP001	PANEL ELÉCTRICO PRINCIPAL
111QMP002	PANEL ELÉCTRICO MEZCLADORES
111MXR001	MEZCLADOR 1
111MXR002	MEZCLADOR 2
111ATZ001	ATOMIZADOR
111COJ001	PRIMERA COMPRESORA
111COJ002	SEGUNDA COMPRESORA
111COJ003	TERCERA COMPRESORA
111TRQ001	TROQUELADORA DE JABÓN
111EMP001	EMPACADORA DE JABÓN
111BOM001	BOMBA DE VACIO PRINCIPAL
111BOM010	BOMBA DE MEZCLADORES
111BOM003	BOMBA DE AGUA DE ENFRIAMIENTO
111BOM004	BOMBA EP8 BOMBEO DE JABON

Fuente: elaboración propia.

2.2. Criticidad del equipo

Establecer o definir la criticidad de los equipos permite hacer una jerarquía de los mismos en función del impacto en las instalaciones, de ésta forma se pueden priorizar las órdenes de trabajo para mantenimiento, requerimiento y

manejo de repuestos y materiales, así como las políticas de mantenimiento y servicios.

El criterio de cálculo de la criticidad toma de referencia los aspectos como incidencia sobre la producción, grado de mantenibilidad y si existe un equipo redundante o *back up*.

Los valores de los criterios se clasifican en tres zonas para determinar la jerarquía de los equipos en cuanto a criticidad, ésta forma permite visualizar de forma más fácil la distribución de los equipos y es la que se utiliza para la toma de decisiones, enfocando los esfuerzos en la zona de más alto riesgo, debido a que es donde se ubica la mayor oportunidad de aumentar la disponibilidad de los equipos.

La figura 16 muestra la clasificación de rangos de criticidad que se manejan en planta para los equipos de la línea 1 de producción.

Figura 16. **Rangos de criticidad**

Efecto	Criticidad	Rango
Alta	Incidencia alta en la producción, genera altos costos de mantenimiento por fallas	≥ 175
Moderada	Incidencia moderada en la producción, se tiene un intervalo de tiempo para reparar	125 -174
Baja	El equipo es operable, pero necesita inspección, no indice drásticamente en la producción	< 125

Fuente: elaboración propia.

En la figura 17 que se presenta a continuación, se muestra el grado de criticidad de cada uno de los equipos.

Figura 17. **Grado de criticidad de los equipos de la línea 1**

UNIDADES	INCIDENCIA SOBRE LA PRODUCCION			GRADO DE MANTENIBILIDAD			EXISTE ALGUN EQUIPO DE BACK-UP/ES EL EQUIPO REDUNDANTE		Criticidad de manto	Sum Crit
	Inmediato	<= 24 hrs.	> 24 hrs.	Alto	Medio	Bajo	SI	NO		
	150	75	0	100	50	0	0	50		
Bombas de vacío										
Bomba de vacío principal Línea 1	1			1			1		A	250.0
Mezcladores										
Mezclador # 1		1			1		1		B	125.0
Mezclador # 2		1			1		1		B	125.0
Equipos de bombeo de jabón										
Bomba EP8 bombeo de jabón	1				1		1		A	200.0
Bomba de agua de enfriamiento		1			1		1		A	175.0
Bomba Mezcladores salida de jabon		1			1			1	A	175.0
Compresoras										
Primera Compresora	1				1			1	A	250.0
Segunda Compresora	1				1			1	A	250.0
Tercera Compresora	1				1			1	A	250.0
Cámaras de Atomización										
Cámara de Atomización Línea 1	1					1		1	A	200.0
Troqueladoras										
Troqueladora de jabón	1					1		1	A	200.0
Empacadoras										
Empacadora de jabón	1			1				1	A	300.0
Páneles de control										
Panel eléctrico principal	1					1		1	A	200.0
Panel eléctrico mezcladores	1					1		1	A	200.0

Fuente: elaboración propia

Como se puede observar en la tabla, por tratarse de una línea de producción y, sobre todo, porque no se cuenta con equipos redundantes, todos los equipos son de criticidad moderada y alta, porque indican inmediatamente en la producción lo que genera pérdidas y altos costos de operación.

2.3. Identificar modos de falla

Para continuar con lo establecido en la norma ISO 17359, se procede a identificar los modos de falla, el análisis del modo y efectos de fallas AMEF es un estudio que se utiliza para identificar las fallas potenciales de un proceso antes de que sucedan, con el objetivo de eliminarlas o de minimizar el riesgo de las mismas.

Para realizar el análisis de modo de fallas se utilizan los criterios de severidad, ocurrencia y detección. Con los valores de éstos tres criterios se obtiene el número prioritario de riesgo (NPR), el cual sirve para priorizar las acciones a ejecutar para minimizar las posibles fallas. En la figura 18, se muestra la tabla de severidad utilizada.

Figura 18. **Tabla de severidad**

Efecto	Efecto de Severidad	Valor
Peligroso sin alerta	Valor de severidad muy alto cuando un modo de Problema potencial afecta la operación del sistema sin alerta	10
Peligroso con alerta	Valor de severidad muy alto cuando un modo de Problema potencial afecta la operación del sistema con alerta	9
Muy alto	Identificar modos de Problema potenciales y su impacto en la confiabilidad del proceso o actividad	8
Alto	Sistema inoperable con equipo dañado	7
Moderado	Sistema inoperable con daños menores	6
Bajo	Sistema inoperable sin daños	5
Muy bajo	Sistema operable con una significativa degradación de rendimiento	4
Menor	Sistema operable con una degradación de rendimiento	3
Muy menor	Sistema operable con mínima interferencia	2
Ninguno	No hay efectos	1

Fuente: Hernández, (2005, p. 17)

El segundo criterio a tomar en cuenta es la ocurrencia o probabilidad, el cual se presenta en la figura 19.

Figura 19. **Ocurrencia o probabilidad**

PROBABIAD de fallo	Prob. Fallo	VALOR
Muy alta : Problemas casi inevitables	>1 in 2	10
	1 in 3	9
Alta: Fallos repetitivos	1 in 10	8
	1 in 20	7
Moderadas: Problemas ocasionales	1 in 80	6
	1 in 400	5
	1 in 2,000	4
Baja: Pocas Problemas relativamente	1 in 15,000	3
	1 in 150,000	2
Remota: Problema inverosímil	<1 in 1,500,000	1

Fuente: Hernández (2005, p. 17)

El tercer criterio utilizado en el análisis de modo y efecto de falla es la probabilidad o facilidad de detección, dicho factor es importante analizar, por condiciones de diseño, de proceso o de operación puede ser difícil la detección de fallas, se puede operar sin saber que se tiene una falla o aunque se tengan algunos inconvenientes so se logre detectar el origen de la falla. En la figura 20, se presenta el rango y criterio para la detección.

Figura 20. Probabilidad de detección

DetECCIÓN	Probabilidad de la DETECCIÓN	Valor
Absoluta incertidumbre	El control del diseño no puede detectar una causa potencial/mecanismo y modo de fallo subsecuente	10
Muy remota	Muy remota la probabilidad del control de diseño para detectar causas potenciales/mecanismos y modos de fallos subsecuentes	9
Remota	Identificar modos de Problema potenciales y su impacto en la confiabilidad del proceso o actividad	8
Muy baja	Muy baja la probabilidad del control de diseño para detectar causas potenciales/mecanismos y modos de fallos subsecuentes	7
Baja	Baja la probabilidad del control de diseño para detectar causas potenciales/mecanismos y modos de fallos subsecuentes	6
Moderada	Moderada la probabilidad del control de diseño para detectar causas potenciales/mecanismos y modos de fallos subsecuentes	5
Muy moderada	Muy moderada la probabilidad del control de diseño para detectar causas potenciales/mecanismos y modos de fallos subsecuentes	4
Alta	Alta la probabilidad del control de diseño para detectar causas potenciales/mecanismos y modos de fallos subsecuentes	3
Muy alta	Muy alta la probabilidad del control de diseño para detectar causas potenciales/mecanismos y modos de fallos subsecuentes	2
Casi seguro	Control de diseño detectará causas potenciales/mecanismos y modos de fallos subsecuentes	1

Fuente: Hernández (2005, p. 18)

A continuación, se procede a realizar el análisis de modo y efecto de fallas (FMEA) de los equipos de la línea 1 de la plana de jabones; éste análisis también ayuda con la elección de la técnica de mantenimiento de monitoreo. Se identifican las fallas funcionales para cada equipo.

El análisis se hizo agrupando los componentes y realizando el FMEA por clase de componente para no hacer análisis repetitivos por la similitud de

componentes que utiliza la máquina en cada sección del proceso. En la figura 21, se observa el resultado del análisis de modo y efecto de falla.

Figura 21. Análisis de modo y efecto de falla

Equipo o componente	Modos de Falla Potenciales	Efectos de Fallas Potenciales	S E V	Cuasas Potenciales	O C U	Controles de Ocurrencia	D E T	N P R	Acciones Recomendadas
Panel Eléctrico	Falta de suministro eléctrico	Breaker principal dañado	6	Calentamiento	3	Análisis de termografía	5	90	Monitoreo de condición
	Calentamiento de conexiones	Cable conductor dañado	6	Conexiones flojas	3	Análisis de termografía	5	90	Monitoreo de condición
Motor eléctrico	Motor sobrecalentado	Fallo en alimentación	6	Conexiones flojas	5	Análisis de termografía	3	90	Monitoreo de condición
		Fallo en embobinado	6	Trabaja en dos fases	5	Análisis de termografía	3	90	Monitoreo de condición
	Rodamiento dañado	Ruido y vibración	5	Contaminación y falta de lubricación	5	Análisis de Vibraciones	5	125	Monitoreo de condición
		Calentamiento	5	Contaminación y falta de lubricación	5	Análisis de termografía	5	125	Monitoreo de condición
Caja Reductora	Fallo de caja reductora	Desgaste de ruedas dentadas y ejes	7	Degradación de aceite lubricante	7	Análisis de aceite	8	392	Monitoreo de condición
			7	Contaminación del aceite lubricante	7	Análisis de aceite	8	392	Monitoreo de condición
	Rodamiento dañado	Ruido y vibración	5	Contaminación y falta de lubricación	5	Análisis de Vibraciones	5	125	Monitoreo de condición
		Calentamiento	5	Contaminación y falta de lubricación	5	Análisis de termografía	5	125	Monitoreo de condición
Panel eléctrico Empacadora	Calentamiento de fase, Desbalance	Perdida de potencia y energía	6	Terminales o borne flojo	5	Análisis de termografía	7	210	Plan de monitoreo de condición
		Calentamiento de componentes	4	Conductor deteriorado	5	Análisis de termografía	7	140	Monitoreo de condición
		Paro total de la empacadora	8	Corto circuito	6	Análisis de termografía	8	384	Plan de monitoreo de condición
Bomba	Desgaste del rotor	Bajo caudal y presión de bomba	4	Abrasión natural	5	Seguimiento a la presión y caudal	2	40	Rutinas de inspección
		Incremento de la temperatura	4	Fricción en partes internas	6	Análisis de Termografía	6	144	Plan de monitoreo de condición
	Falla de rodamiento	Parada de la bomba, Pérdida de la producción	6	Vida Útil, Falla en montaje	5	Análisis de Vibraciones	5	150	Plan de monitoreo de condición
			6	Falla o falta de lubricación	5	Análisis de Termografía	6	180	Plan de monitoreo de condición
			6	Contaminación	6	Verificación de sellos y retenedores	5	180	Rutinas de inspección

Fuente: elaboración propia.

Del resultado del análisis de modo y efecto de falla se obtuvieron prácticamente las técnicas a emplear en el monitoreo de condición, las técnicas propuestas con anterioridad fueron las de análisis de termografía, vibraciones y análisis de aceite. Como se puede observar en los puntos críticos de los equipos de la línea de producción, se requiere de éste tipo de monitoreo para minimizar el impacto de las fallas en el proceso.

La norma ISO 17359 muestra una categorización de parámetros de monitoreo de condición por tipo de máquina, se puede ver en la figura 22.

Figura 22. **Selección de parámetros de monitoreo de condición**

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: Norma ISO 17359 (2003, p. 10)

2.4. Selección de las técnicas de medición

De acuerdo a la especificación de la norma en la figura 22, se determinó cuáles son las técnicas de monitoreo de condición que se aplicaron a los equipos de la línea 1 de producción clasificados por categoría o tipo de equipo. En la figura 23 se muestran las técnicas que se utilizaron en el monitoreo de condición en la línea 1 de la planta de jabones.

Figura 23. **Técnicas de monitoreo de condición equipos línea 1**

Técnica/Equipo	Motor Eléctrico	Bomba	Panel Eléctrico	Caja reductora
Análisis de Vibraciones	x	x		x
Termografía	x		x	
Análisis de aceite				x

Fuente: elaboración propia.

2.5. Criterios de alerta

Los criterios de comparación para los resultados obtenidos en las mediciones se utilizaron las normas respectivas para cada técnica utilizada, para el análisis de vibraciones se utilizó la Norma ISO 10816, severidad de equipos, a partir de su velocidad. Para el análisis de termografía, se utilizó el criterio del delta de temperatura de las normas ISO TC 108 y Neta 2003. Para el criterio de temperatura en los rodamientos de motores, se utilizó el criterio según la recomendación y límites del fabricante tanto del rodamiento como de la grasa, cabe mencionar que para la aplicación de ésta técnica se aplica mucho el criterio y capacidad del termógrafo.

El análisis de aceite se realizó con proveedor externo, certificado. El criterio utilizado es el resultado final en general de acuerdo a la clasificación y recomendaciones del proveedor. Para la presentación y discusión de los resultados además de la gravedad general del informe se tabularon dos variables de todas las analizadas y presentadas en el reporte final. Las variables son la viscosidad y las partes por millón (ppm) de hierro encontradas en el aceite.

Como apoyo para la medición y control de la gestión de mantenimiento, se hizo el cálculo de la disponibilidad de equipos y de la línea de producción, se utilizó la base de datos de los tiempos de paro no programados de la línea por semana, se tomó la medición de 25 semanas para hacer un análisis estadístico y tener un parámetro de inicio y comparación con los resultados que se obtengan en el futuro después de haber iniciado con el monitoreo de condición de los equipos de la línea 1 de producción.

Como parámetros de medición, se establecieron el que requiere la fábrica de jabón para el año 2019, los cuales son los siguientes:

- Porcentaje de disponibilidad del 99%
- Porcentaje de tiempos de paro igual al 1% de tiempo programado de producción semanal.

A continuación se presentan los cuadros indicando los parámetros de medición para cada una de las técnicas de monitoreo de condición.

El criterio para análisis de vibraciones se puede ver en la figura 24.

Figura 24. **Severidad de los equipos**

Severidad de la velocidad				CRITERIOS DE VELOCIDAD LIMITE Y CLASES DE MAQUINAS			
Mm/seg RMS	In/seg RMS	mm/seg Pico	In/seg Pico	Maquinas pequeñas Clase I	Maquinas medianas Clase II	Maquinas grandes	
						Soportes rígidos Clase III	Menos soportes rígidos Clase IV
0.28	0.011	0.51	0.02	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
0.45	0.018	0.76	0.03				
0.71	0.028	1.02	0.04				
1.12	0.044	1.52	0.06	Satisfactoria	Satisfactoria	Satisfactoria	Bueno
1.8	0.071	2.54	0.10				
2.8	0.11	4.06	0.16	Satisfactoria	(alerta)	Satisfactoria	Satisfactoria
4.5	0.177	6.35	0.25	(alerta)		Satisfactoria	
7.1	0.280	10.16	0.40	(alerta)		Satisfactoria	
11.2	0.441	15.75	0.62	Inaceptable (parada)	Inaceptable (parada)	(alerta)	Satisfactoria
18.0	0.709	25.40	1.00			(Alerta)	
28.0	1.102	39.62	1.56			Inaceptable (parada)	
45.0	1.772	63.75	2.51			Inaceptable (parada)	

Descripción de criterios:

- Magnitud de la vibración baja, se dice que el rango es *Bueno*, es decir que el peligro de falla es mínimo.
- Magnitud de la vibración *Satisfactoria*, la maquina se encuentra en los límites normales.
- Magnitud de la vibración es *Satisfactoria Alerta*, esto indica que la vibración se encuentra cerca de los límites recomendados.
- Magnitud de la vibración es *Intolerable (Parada)*, la posibilidad de falla es alta y debe someterse a revisión la máquina de inmediato.

Fuente: Norma ISO 10816-1

El criterio de alerta o de comparación para termografía se muestra en las figuras 25 y 26.

Figura 25. **Criterio de ΔT para termografía en componentes eléctricos**

Δ Temperatura (°C)	Baja Tensión	Tiempo de ejecución para el mantenimiento
> 50	Crítico	Inmediato
31 a 50	Severo	Lo mas pronto posible
21 a 30	Moderado	Antes de un mes
8 a 20	Tolerable	Programar
0 a 7	Permisible	Observación

Fuente: Norma ISO TC 108

Figura 26. **Criterio de termografía para cojinete de motor**

T °C <50	NORMAL
50°C ≤ T ≤ 120°C	PROGRAMAR REPARACIÓN
T °C > 120	REPARACION INMEDIATA

Fuente: elaboración propia.

El criterio de análisis de aceite es propio del laboratorio externo certificado que realizó los análisis, el análisis es proporcionado por el proveedor de lubricantes quien se encarga de enviar las muestras a su laboratorio, en la figura 27 se muestra el rango de medición para el informe final, por cada análisis.

Figura 27. **Gravedad general del informe**

0	1	2	3	4
NORMAL	ANORMAL	CRITICO		

Fuente: elaboración propia.

2.6. Toma de mediciones y lecturas

Continuando con los lineamientos de la Norma ISO 17359, se procedió a la toma de mediciones y lecturas en los componentes definidos anteriormente, en la planta de producción se cuenta con los equipos para medir termografía y vibraciones. Las mediciones de termografía y vibraciones fueron realizadas por personal capacitado interno, el análisis de aceite de las cajas reductoras lo realizó un laboratorio profesional certificado por medio del proveedor del aceite lubricante.

La cámara termográfica utilizada es una cámara marca Fluke modelo Ti25, que se puede ver en la figura 28.

Figura 28. Cámara termográfica Fluke Ti25



Fuente: elaboración propia.

El equipo analizador de vibraciones que se utilizó es el Fluke 805 (Vibration Meter), el analizador se muestra en la figura 29.

Figura 29. **Analizador de vibraciones Fluke 805**



Fuente: elaboración propia.

Para la anotación y tabulación de las lecturas obtenidas se utilizaron formatos internos del departamento de mantenimiento. Ésta fase empezará a ser de vital importancia en el monitoreo de condiciones de los equipos para poder formar bases de datos de cada técnica, hacer análisis estadísticos y generar tendencias del estado de operación de los mismos.

Este equipo cuenta con la característica que aparte de medir y dar el resultado de la vibración en RMS, también brinda el valor del Factor Cresta (CF+), esta medición da información sobre el daño de los cojinetes, mientras más alto sea el valor del factor cresta más daño tiene el cojinete.

Con éste medidor de vibraciones, la marca Fluke proporciona la tabla de rangos del factor cresta para complementar el resultado del análisis de vibraciones, indicándonos cuál es el estado del cojinete. La tabla de factor cresta se presenta en la figura 30.

Figura 30. **Factor Cresta (CF+)**

CF+	Gravedad
1 a 3	Bueno
4 a 6	Satisfactorio
7 a 9	No Satisfactorio
10 a 12	Inaceptable

Fuente: manual de usuario Fluke 805 (2018, p. 19)

Esta fase de toma de datos da lugar al siguiente capítulo del presente trabajo, en el cual se hace la toma de datos y presentación de resultados.

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

3.1. Según objetivo número 1, desarrollar el programa de monitoreo de la técnica Termografía Infrarroja

La termografía infrarroja fue aplicada a los principales componentes eléctricos de los equipos de la línea 1 como son: motor eléctrico (sobre la carcasa), contactor, breaker o flip-on principal y el cojinete de carga del motor. Los resultados mostrados son el delta o diferencia de temperatura como lo indican las normas, la diferencia se mide entre las fases de las conexiones de los interruptores eléctricos y entre equipos similares con cargas y condiciones similares.

De acuerdo a las condiciones encontradas en la medición, se coloreó según la norma, para mostrar si cumple o no cumple. Con fines ilustrativos en este trabajo se muestran algunos termogramas tomados en las conexiones de los interruptores. El informe de termografía se presentó en formatos adecuados para incluir la información necesaria para cada equipo, en el informe se incluirá el termograma de la medición realizada.

Para hacer un análisis y llevar un control histórico estadístico que permita tomar decisiones y programar las tareas de mantenimiento a ejecutar se presentaron los resultados tabulados y resumidos en el cuadro de la figura 31.

Figura 31. Resultados de termografía en equipos de línea 1

<u>Equipo/ Componente</u>	<u>(ΔT) Delta de temperatura en °C</u>			<u>T °C</u>
	<u>Motor</u>	<u>Breaker principal</u>	<u>Contactor</u>	<u>Cojinete de carga</u>
Panel Electrico principal	-----	3	-----	-----
Panel Electrico de mezcladores	-----	0.2	-----	-----
Mezclador 1	3	1	0.4	47.3
Mezclador 2	1.2	0.5	0.2	43.9
Atomizador	3	2	1	53.1
Compresora 1	3.3	3	1.4	44.3
Compresora 2	2.3	0.5	0.8	53.2
Compresora 3	2	0.2	1	48.8
Troqueladora	1.5	1	1	48.3
Empacadora	4.6	1	1	36.6
Bomba de agua	1.6	4	2	76.1
Bonba de vacío	1.3	5	2	50.8
Bomba para jabón	1.4	2	2	50.4

Fuente: elaboración propia.

Se puede observar que los resultados de termografía en los elementos eléctricos de acuerdo a la Norma ISO TC 108 están en parámetros permisibles, aunque están en verde se deben mantener en observación, mediante la ejecución del monitoreo de condición. La termografía del cojinete de carga en

cada uno de los motores se puede observar que la mayoría están en un rango normal, debido a que no superan los 50°C, el resto se encuentra en un rango en el que se requiere programar una reparación, debido a que se encuentran por encima de los 50°C, aunque no sobrepasa el límite máximo establecido por el fabricante y por las especificaciones de la grasa lubricante utilizada, la cual no debe sobrepasar los 120°C.

A continuación, se presentan algunos termogramas de casos en los que se encontraron problemas de calentamiento en elementos eléctricos de la planta, dichos problemas fueron solucionados. Problemas como estos son lo que demuestran y confirman la necesidad de un monitoreo de condición programado y sistemático, actualmente se hacen mediciones esporádicas y sin ningún tipo de control. Estas imágenes son incluidas en el reporte de termografía que se definió para el CBM.

Figura 32. **Termograma de breaker de compresora 1**

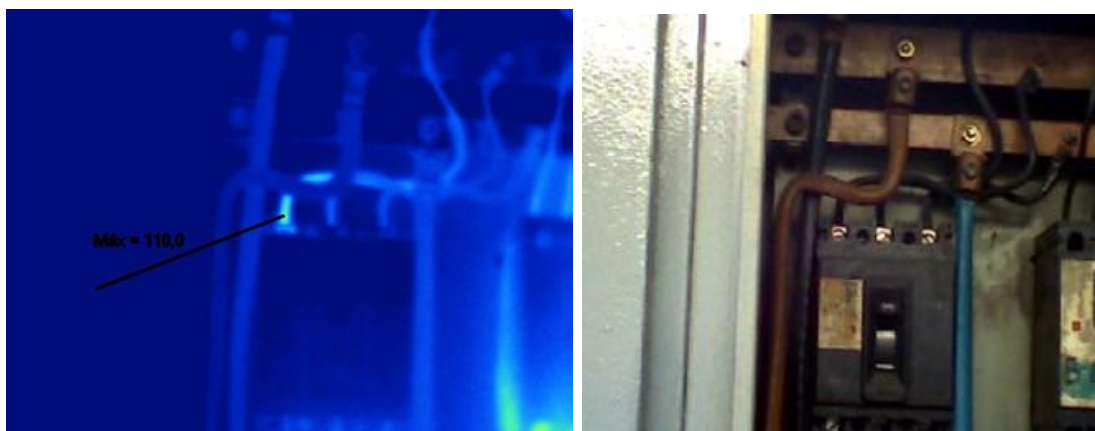
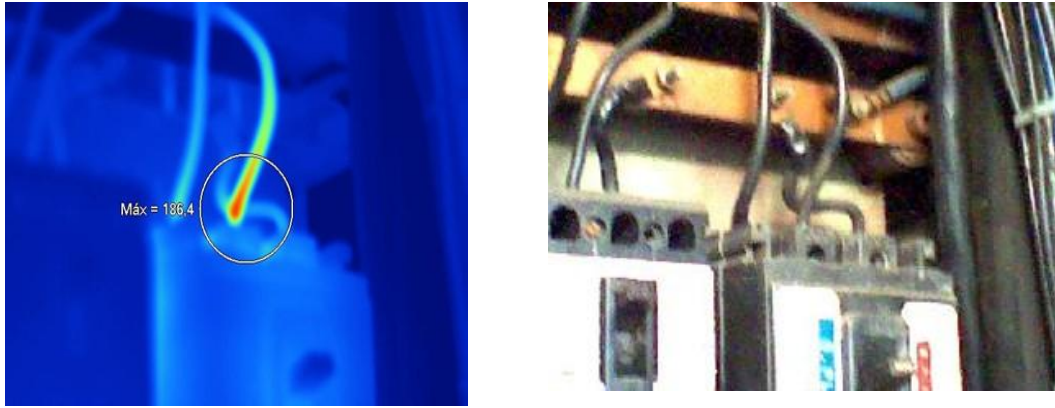


Imagen Infrarroja

Imagen normal

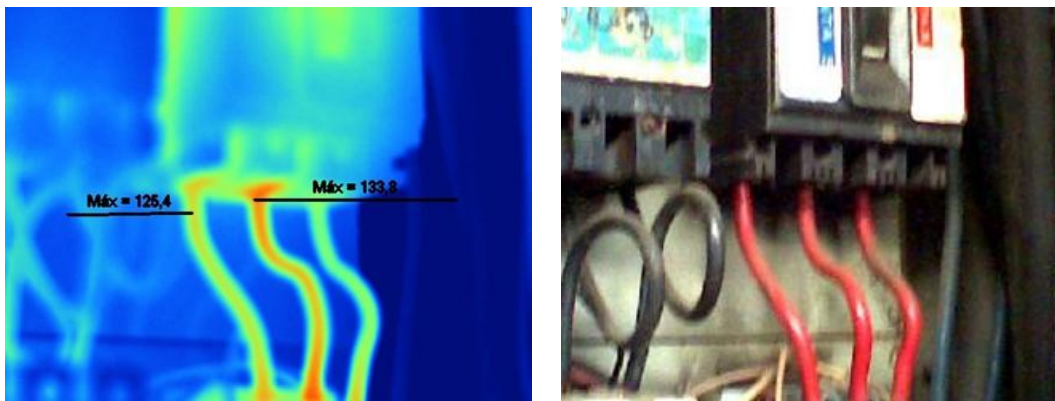
Fuente: elaboración propia.

Figura 33. **Termográma entrada de breaker compresora 3**



Fuente: elaboración propia.

Figura 34. **Termográma salida de breaker compresora 3**



Fuente: elaboración propia.

Se puede observar en las imágenes infrarrojas como el conductor de la fase que esta sobrecalentada el tono de color es más fuerte y rojizo, la temperatura a la que se encuentra el conductor es indicada en la imagen. De ésta forma durante el monitoreo de equipos se pueden detectar fallas tempranas antes de que se d  la falla funcional del equipo.

3.2. Según objetivo número 2, realizar el plan de monitoreo de la técnica de análisis de vibraciones

La toma de medidas y lecturas para el análisis de vibraciones, se obtuvo con el analizador Fluke 805 y la norma de referencia ISO 10816-1. Se hizo la medición directa en cada uno de los puntos de medición definidos en el capítulo anterior. Los datos se midieron en RMS, con la dimensional de la velocidad en pulgadas por segundo (in/s). RMS en análisis de vibraciones se considera como la vibración efectiva del equipo, los equipos medidores de vibraciones están configurados de esa forma.

De acuerdo con la norma ISO 10816, se determina que los equipos medidos en la línea 1 de producción son de categoría Clase II, debido a que son equipos en un rango de 20 hp a 100 hp, montados con base rígida.

En la presentación de resultados a la gerencia, lo importante es que de forma fácil, visual y gráfica se indique cuál es el estado de operación de los equipos, no se detienen a revisar cuáles son los valores puntuales obtenidos, de allí la importancia de comparar con una norma, para determinar la disponibilidad de los equipos.

Los resultados obtenidos se anotaron en formatos diseñados para la toma de éste tipo de análisis, en la imagen siguiente, figura 35 se muestran los resultados de las mediciones de vibraciones en los equipos de la línea 1 de producción, se definió medir vibraciones en los motores y cajas reductoras de cada uno de ellos.

Figura 35. Resultado de vibraciones en motores y cajas reductoras

<u>Equipo</u>	<u>Componente</u>	<u>RMS in/s</u>	<u>Condición según norma ISO 10816</u>	<u>Factor Cresta CF+</u>	<u>Condición según manual Fluke 805</u>
Mezclador 1	Motor	0.13	Satisfactorio alerta	12	Inaceptable
	Caja reductora	0.09	Satisfactorio	12	Inaceptable
Mezclador 2	Motor	0.08	Satisfactorio	10	Inaceptable
	Caja reductora	0.05	Satisfactorio	7	No satisfactorio
Atomizador	Motor	0.15	Satisfactorio alerta	7	No satisfactorio
	Caja reductora	0.06	Satisfactorio	2	Bueno
Compresora 1	Motor	0.06	Satisfactorio	5	Satisfactorio
	Caja reductora	0.03	Bueno	1	Bueno
Compresora 2	Motor	0.04	Bueno	4	Satisfactorio
	Caja reductora	0.03	Bueno	1	Bueno
Compresora 3	Motor	0.03	Bueno	5	Satisfactorio
	Caja reductora	0.03	Bueno	1	Bueno
Troqueladora	Motor	0.18	Satisfactorio alerta	8	No satisfactorio
	Caja reductora	0.13	Satisfactorio alerta	6	Satisfactorio
Bomba de agua	Motor	0.19	Satisfactorio alerta	10	Inaceptable
	Bomba	0.10	Satisfactorio	2	Bueno
Bomba de vacío	Motor	0.49	Inaceptable	7	No satisfactorio
	Bomba	0.50	Inaceptable	11	Inaceptable
Bomba para jabón	Motor	0.04	Bueno	6	Satisfactorio
	Bomba	0.03	Bueno	1	Bueno

Fuente: elaboración propia.

La presentación de los resultados obtenidos de las mediciones en forma gráfica y visual como en el cuadro anterior sirve para alertar de forma inmediata a los departamentos tanto de mantenimiento como de producción.

El indicador de colores muestra la condición de los equipos en operación, lo que propone realizar planes de acción lo antes posible, pero al realizarlo de esa forma se incrementa el mantenimiento correctivo, a simple vista se ve que se tiene que trabajar en corregir vibraciones en algunos equipos y cambio de cojinetes, por eso es necesario llevar un control de monitoreo programado y hacer un análisis estadístico descriptivo con el cual se puedan establecer tendencias para lograr normalizar la operación de los equipos.

3.3. Según objetivo número 3, implementar el plan de monitoreo para el análisis de condición de aceite

El análisis de aceite de las cajas reductoras fue realizado en un laboratorio certificado por medio del proveedor del aceite lubricante de la fábrica de jabón, a pesar de medir diferentes variables para determinar la condición del lubricante, se manejó una tabla con un rango de 0 a 4 con el que se establece la criticidad en general del aceite, indicando si está en estado normal o crítico de operación.

Para el monitoreo, control y tabulación de datos sobre el estado del aceite, se tomará en cuenta solo la variable de cantidad de partículas de hierro en ppm, porque es el mayor indicador de problema crítico de desgaste en el equipo.

Figura 36. **Resultado de análisis de aceite**

0	1	2	3	4
NORMAL		ANORMAL		CRITICO

Equipo	Componente	Criticidad	Fe ppm
Mezclador 1	Caja reductora	2	67
Mezclador 2	Caja reductora	2	35
Atomizador	Caja reductora	3	98
Compresora 1	Caja A	4	96
	Caja B	4	750
Compresora 2	Caja A	1	16
	Caja B	4	310
Compresora 3	Caja A	2	23
	Caja B	4	256

Fuente: elaboración propia.

Como se puede ver en la figura 36, se encontró aceite lubricante con problemas de contaminación de partículas ferrosas, lo que indica desgaste interno de los equipos, como resultado de diagnóstico general se tiene grados anormales y críticos, solo uno en grado normal.

3.4. Según objetivo 4, establecer el monitoreo de indicadores y el desempeño de los equipos

Para el cálculo la disponibilidad el cual es el indicador de mantenimiento (kpi) que se usó para medir la eficiencia de la gestión de mantenimiento y el desempeño de los equipos, se obtuvo la base de datos de los tiempos de paro no programados durante veinticinco semanas.

Se presentan los tiempos de paro de la línea 1 por semana en minutos, se expresa el porcentaje del tiempo de paro y el porcentaje de disponibilidad de los equipos de la línea de producción.

Los datos obtenidos son de mucha importancia para saber cómo se encuentra en estos momentos la eficiencia de operación de los equipos. Se nota la importancia de llevar un control de este tipo y la aplicación de monitoreo de condición, llevando un control gráfico-estadístico, se puede medir la eficiencia del monitoreo de condición, el cual tiene como objetivo disminuir las fallas inesperadas de los equipos.

Durante la medición de los tiempos de paro y la disponibilidad en el transcurso del tiempo, se podrá comparar si la cantidad de minutos de paro no programado disminuye y la disponibilidad de equipos o de línea aumenta. La planta pretende fijar para el año 2019 como meta un 99% de disponibilidad.

Esto se deberá medir posteriormente a la puesta en marcha de la propuesta del presente trabajo, no es un alcance que se encuentre dentro de los objetivos a alcanzar en dicho trabajo.

En la figura 37, se observa el cuadro con los datos obtenidos del tiempo en minutos de los paros no programados, el porcentaje de tiempo y el porcentaje de disponibilidad.

Figura 37. **Tiempo de paro no programado, línea 1**

Mes	Semana	Min.	% min	Disponibilidad
				%
Marzo	SEMANA 1	105	1.22%	98.78%
	SEMANA 2	90	1.01%	98.99%
	SEMANA 3	275	2.39%	97.61%
	SEMANA 4	275	2.88%	97.12%
Abril	SEMANA 5	165	4.58%	95.42%
	SEMANA 6	405	4.02%	95.98%
	SEMANA 7	65	1.00%	99.00%
	SEMANA 8	460	4.56%	95.44%
Mayo	SEMANA 9	950	10.15%	89.85%
	SEMANA 10	600	6.94%	93.06%
	SEMANA 11	470	5.44%	94.56%
	SEMANA 12	325	2.82%	97.18%
Junio	SEMANA 13	235	5.44%	94.56%
	SEMANA 14	250	2.48%	97.52%
	SEMANA 15	135	1.56%	98.44%
	SEMANA 16	215	2.13%	97.87%
Julio	SEMANA 17	235	6.53%	93.47%
	SEMANA 18	465	4.61%	95.39%
	SEMANA 19	515	5.96%	94.04%
	SEMANA 20	580	5.75%	94.25%
	SEMANA 21	55	0.71%	99.29%
Agosto	SEMANA 22	285	3.30%	96.70%
	SEMANA 23	940	9.33%	90.67%
	SEMANA 24	270	3.28%	96.72%
	SEMANA 25	405	4.02%	95.98%

Fuente: elaboración propia.

En los resultados obtenidos se puede observar que no se cumple con lo que la planta de producción quiere establecer como meta de la disponibilidad que es del 99%. Después de la puesta en marcha de la propuesta que se hizo en cuanto al monitoreo de condición será necesario seguir utilizando esta herramienta, tabulando y analizando los resultados para determinar en el futuro la efectividad y cumplimiento del mantenimiento basado en condición CBM.

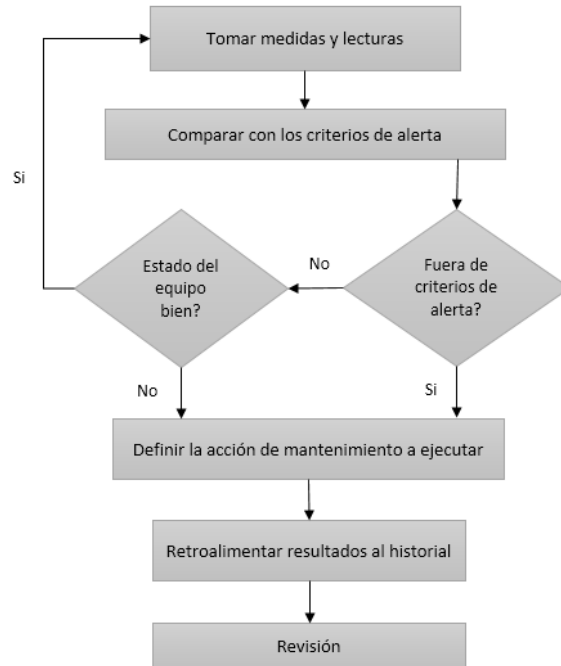
3.5. Propuesta de la estrategia de monitoreo de condición

Para llevar a cabo el monitoreo de condición en los equipos de la línea 1 de la planta de jabones, se propuso el modelo de la norma ISO 17359, debido a que en el capítulo 2 del presente trabajo se desarrolló la primera parte de lo que dicta la norma, en esta fase se hizo la propuesta para la parte práctica de la medición de la condición de los equipos aplicando las técnicas no destructivas de análisis de vibraciones, termografía y análisis de aceite lubricante.

En la propuesta del plan de mantenimiento, basado en monitoreo de condición CMB, se incluye un cronograma anual con la programación de cada técnica por equipo, se realizaron los formatos para la toma de mediciones y presentación de resultados. Aparte del diagrama de flujo en el que se basa el plan de monitoreo, también se mencionan los pasos principales en secuencia para llevar a cabo el programa.

En la figura 38 se muestra el diagrama de flujo que se propuso para la ejecución de las tareas del monitoreo de condición.

Figura 38. Diagrama de flujo propuesta de ejecución del CBM



Fuente: Norma ISO 17359

3.6. Toma de medidas y lecturas

Para la toma de medidas y lecturas se realizaron los formatos a utilizar para la medición de cada una de las técnicas propuestas. Se definió y se presentó un cronograma con la programación y frecuencia de las mediciones de las técnicas de monitoreo de condición para los equipos de la línea 1 de producción.

En la figura 39 se muestra el formato para realizar la medición de análisis de vibraciones en los equipos de la línea uno, en el encabezado se incluye la fecha de medición, nombre del responsable que realiza la medición y el equipo utilizado.

Figura 39. Formato para medición de vibraciones

ANÁLISIS DE VIBRACIONES EQUIPOS LÍNEA 1					
Responsable: _____			Fecha de medición _____		
Equipo utilizado: _____					
Norma para criterio de condición:		Norma ISO 10816, Severidad de equipos			
<u>Equipo</u>	<u>Componente</u>	<u>RMS in/s</u>	<u>Condición según norma ISO 10816</u>	<u>Factor Cresta CF+</u>	<u>Condición según manual Fluke 805</u>
Mezclador 1	Motor				
	Caja reductora				
Mezclador 2	Motor				
	Caja reductora				
Atomizador	Motor				
	Caja reductora				
Compresora 1	Motor				
	Caja reductora				
Compresora 2	Motor				
	Caja reductora				
Compresora 3	Motor				
	Caja reductora				
Troqueladora	Motor				
	Caja reductora				
Bomba de agua	Motor				
	Bomba				
Bomba de vacío	Motor				
	Bomba				
Bomba para jabón	Motor				
	Bomba				

Fuente: elaboración propia.

Como se puede ver en el formato de la figura 39, se incluye el nombre de la máquina y el componente directo al que se le hace la medición, se coloca la lectura indicada por el equipo y de una vez se hace la comparación con los criterios de alerta, luego se coloca cuál es la condición del equipo según la norma. Esto se realizó para luego presentar los resultados, con el fin de ser más eficaz y que el analista tome nota de los equipos que pueden estar en alerta.

Figura 40. Formato para mediciones de termografía

ANÁLISIS DE TERMOGRAFÍA EQUIPOS LÍNEA 1				
		Fecha de medición _____		
Responsable: _____				
Equipo utilizado: _____				
Norma para criterio de condición:		Norma ISO TC108, NETA 2003		
Equipo/ Componente	(ΔT) Delta de temperatura en °C			T °C
	Motor	Breaker principal	Contactador	Cojinete de carga
Panel Electrico principal				
Panel Electrico de mezcladores				
Mezclador 1				
Mezclador 2				
Atomizador				
Compresora 1				
Compresora 2				
Compresora 3				
Troqueladora				
Empacadora				
Bomba de agua				
Bonba de vacío				
Bomba para jabón				

Fuente: elaboración propia.

Para el control y análisis de la criticidad y condición del aceite se hizo un formato para llevar los datos históricos y la presentación de resultados, el informe general se recibirá de forma electrónica por parte del proveedor del aceite lubricante. En el formato se anotará el grado de criticidad y la cantidad de ppm de partículas de hierro. En la figura 41 se presenta el formato.

Figura 41. **Formato para control de criticidad de aceite**

CRITICIDAD EN ACEITE DE CAJAS REDUCTORAS

Fecha: _____

Responsable: _____

Criterio de criticidad del aceite

0	1	2	3	4
NORMAL	ANORMAL		CRITICO	

Equipo	Componente	Criticidad	Fe ppm
Mezclador 1	Caja reductora		
Mezclador 2	Caja reductora		
Atomizador	Caja reductora		
Compresora 1	Caja A		
	Caja B		
Compresora 2	Caja A		
	Caja B		
Compresora 3	Caja A		
	Caja B		

Fuente: elaboración propia.

Figura 42. **Formato para disponibilidad de línea 1 semanal**

DISPONIBILIDAD LINEA 1

Responsable: _____

Mes	Semana	Tiempo de paro (min.)	% min	Disponibilidad
				%
Enero	SEMANA 1			
	SEMANA 2			
	SEMANA 3			
	SEMANA 4			
Febrero	SEMANA 5			
	SEMANA 6			
	SEMANA 7			
	SEMANA 8			
Marzo	SEMANA 9			
	SEMANA 10			
	SEMANA 11			
	SEMANA 12			
Abril	SEMANA 13			
	SEMANA 14			
	SEMANA 15			
	SEMANA 16			
Mayo	SEMANA 17			
	SEMANA 18			
	SEMANA 19			
	SEMANA 20			
	SEMANA 21			
Junio	SEMANA 22			
	SEMANA 23			
	SEMANA 24			
	SEMANA 25			

Fuente: elaboración propia.

La frecuencia de las mediciones de las técnicas del monitoreo de condición, se definió de la siguiente forma:

- Análisis de termografía cada 3 meses
- Análisis de vibraciones cada 3 meses
- Análisis de aceites lubricantes cada 6 meses
- Medición de disponibilidad de línea semanal

Para la medición de termografía y vibraciones se dividieron los componentes en dos grupos para distribuir la carga de trabajo. Debido a que el monitoreo de condición será realizado por personal del departamento de mantenimiento, las mediciones de termografía están programadas para realizarse en el lapso dos semanas consecutivas. Al siguiente mes se realizará el estudio de vibraciones también en el transcurso de dos semanas.

La comparación de los resultados con los criterios de alerta o parámetros definidos, se hará con los criterios de cada norma definidos en el capítulo número 2. En el formato de toma de mediciones se colocará la condición, según la norma y se trasladaran los resultados a las jefaturas de mantenimiento y producción.

Después de que las jefaturas tengan los resultados se precederá a definir las acciones de mantenimiento a ejecutar y a su respectiva programación.

Todos los datos obtenidos en las mediciones se trasladarán a una base de datos electrónica para retroalimentar el historial y de esa forma obtener más y más información para fortalecer las bases hasta llegar a conformar el mantenimiento predictivo.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Análisis de vibraciones

De los resultados obtenidos de las mediciones de vibraciones, se hizo el análisis estadístico tabulando los datos por tipo de componente, con ello se hizo el estudio por separado entre la vibración y el valor de factor cresta que otorga el equipo de vibraciones, que indica el estado del cojinete de carga del motor. El análisis estadístico se hizo utilizando la herramienta del gráfico de cajas y bigotes, los datos se presentan a continuación en la figura 43.

Figura 43. Cuadro de resultados de vibraciones

Equipo	Componente	RMS in/s	Condición según norma ISO 10816	Factor Cresta CF+	Condición según manual Fluke 805
Mezclador 1	Motor	0.13	Satisfactorio alerta	12	Inaceptable
	Caja reductora	0.09	Satisfactorio	12	Inaceptable
Mezclador 2	Motor	0.08	Satisfactorio	10	Inaceptable
	Caja reductora	0.05	Satisfactorio	7	No satisfactorio
Atomizador	Motor	0.15	Satisfactorio alerta	7	No satisfactorio
	Caja reductora	0.06	Satisfactorio	2	Bueno
Compresora 1	Motor	0.06	Satisfactorio	5	Satisfactorio
	Caja reductora	0.03	Bueno	1	Bueno
Compresora 2	Motor	0.04	Bueno	4	Satisfactorio
	Caja reductora	0.03	Bueno	1	Bueno
Compresora 3	Motor	0.03	Bueno	5	Satisfactorio
	Caja reductora	0.03	Bueno	1	Bueno
Troqueladora	Motor	0.18	Satisfactorio alerta	8	No satisfactorio
	Caja reductora	0.13	Satisfactorio alerta	6	Satisfactorio
Bomba de agua	Motor	0.19	Satisfactorio alerta	10	Inaceptable
	Bomba	0.10	Satisfactorio	2	Bueno
Bomba de vacío	Motor	0.49	Inaceptable	7	No satisfactorio
	Bomba	0.50	Inaceptable	11	Inaceptable
Bomba para jabón	Motor	0.04	Bueno	6	Satisfactorio
	Bomba	0.03	Bueno	1	Bueno

Fuente: elaboración propia.

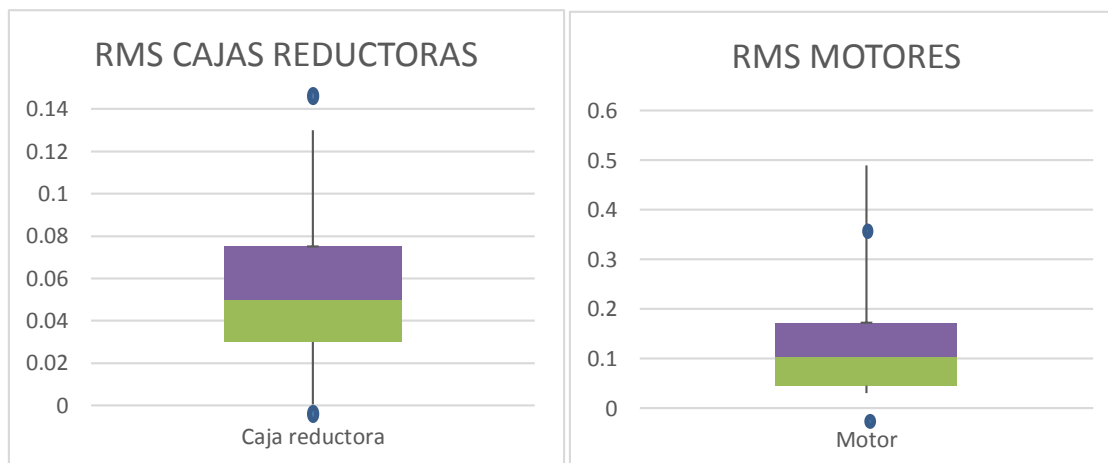
Los datos obtenidos se ordenaron en el cuadro de la figura 43 y siguiendo el procedimiento, se realizó la gráfica de cajas y bigotes, obteniendo los valores que se observan en la tabla VII.

Tabla VII. **Valores cálculo de gráfica cajas y bigotes**

	Caja Reductora		Motor Eléctrico	
	Valores	Ancho	Valores	Ancho
Min	0.03	0.03	0.03	0.03
Q1	0.03	0	0.045	0.015
Mediana	0.05	0.02	0.105	0.06
Q3	0.075	0.025	0.172	0.0675
Máximo	0.13	0.055	0.49	0.3175
Valor atípico 1	0.0375		0.014	
RIQ	0.045		0.127	
Valor atípico 2	0.1425		0.363	

Fuente: elaboración propia.

Figura 44. **Gráficos de cajas y bigotes análisis de vibraciones**



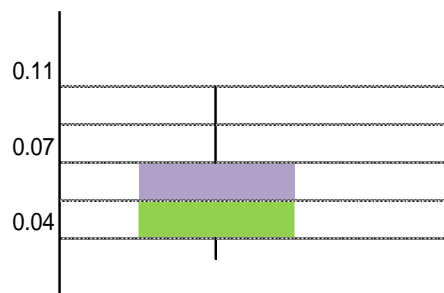
Fuente: elaboración propia.

Se pudo observar en la figura 44 que los datos de las cajas reductoras son asimétricos a la derecha, por lo que hay más mediciones de la media hacia el límite inferior, hay más variabilidad en las cajas reductoras que en los motores. El gráfico de los motores es bastante simétrico, y muestra menos variabilidad en los datos, ya que los mismos son valores muy cercanos entre sí.

También se puede corroborar en los valores obtenidos de las cajas reductoras que no se tiene ningún dato atípico, en el caso de los motores si se tiene uno, que al compararlo con la norma es el que nos da un valor crítico o inaceptable. En la figura 45 se observa una gráfica de cajas y bigotes con los valores que pide la Norma ISO 10816-1 para que las vibraciones estén dentro de parámetros normales aceptables.

Al respecto Castellanos (2005), afirma que todos los resultados obtenidos de un análisis de vibraciones se deben comparar con los rangos permitidos y establecidos por normas internacionales, debido a que es necesario que se garantice y se justifiquen los criterios con los que hizo el análisis para dar un diagnóstico y recomendación en los planes de acción a tomar.

Figura 45. **Cajas y bigotes valores Norma ISO 10816**



Fuente: elaboración propia.

Haciendo una comparación directa entre gráficas se confirma la necesidad del monitoreo de condición para no llegar a estas instancias, se necesita la programación y la intervención inmediata por parte del departamento de mantenimiento para hacer las correcciones necesarias antes de que los equipos lleguen a la falla funcional.

Al momento de presentar el análisis de los resultados del análisis de vibraciones se ve la criticidad de poseer mano de obra calificada para interpretar los resultados. De esto Castellanos (2005) opina que el monitoreo de condición de análisis de vibraciones lo debe realizar personal o empresas subcontratadas con experiencia y de preferencia certificadas en vibraciones, para garantizar diagnósticos seguros y confiables.

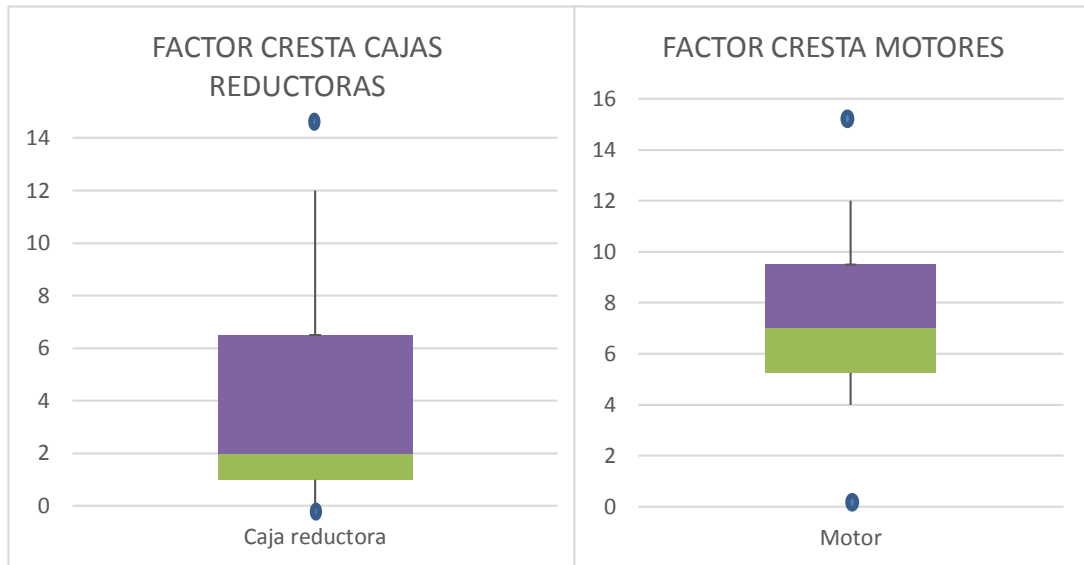
De los valores de la figura 43 se obtuvieron las mediciones del factor cresta, tanto para motores como para cajas reductoras. Los valores medidos y tabulados se operaron para obtener la tabla VIII y proceder con los gráficos.

Tabla VIII. **Valores cajas y bigotes factor cresta**

	Caja Reductora		Motor Eléctrico	
	Valores	Ancho	Valores	Ancho
Min	1.00	1.00	4.00	4.00
Q1	1.00	0.00	5.25	1.25
Mediana	2.00	1.00	7.00	1.75
Q3	6.50	4.50	9.50	2.50
Máximo	12.00	5.50	12.00	2.50
Valor atípico 1	-7.25		-1.13	
RIQ	5.50		4.25	
Valor atípico 2	14.75		15.88	

Fuente: elaboración propia.

Figura 46. Gráficos cajas y bigotes factor cresta

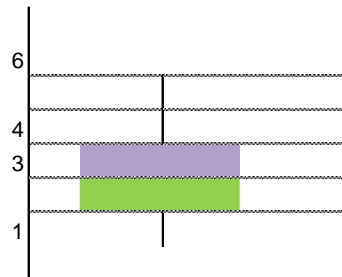


Fuente: elaboración propia.

Se observó en los gráficos de la figura 46 que para las cajas reductoras hubo más variabilidad en los datos, las dos gráficas, aunque en mayor proporción, la de cajas reductoras son asimétricas a la derecha, indicando que se tiene la mayoría de datos hacia los límites superiores, quedando fuera de rango aceptable. Ninguno de los dos casos muestra valores atípicos completamente fuera de rango (outlier), se confirma que las cajas reductoras son las que menos problemas de cojinete presentan. La gráfica de motores está desfasada hacia arriba, teniendo sus valores mínimos muy por encima de lo que dicta la norma.

En la figura 47 se observa la gráfica de cajas y bigotes, según la norma del factor cresta empleado por el equipo Fluke 805.

Figura 47. **Cajas y bigotes norma de factor cresta**



Fuente: elaboración propia.

Comparando la gráfica de la figura 47, que indica los valores mínimos y máximos de la norma del factor cresta Fluke 805, para la operación buena y satisfactoria del cojinete en los equipos operativos, se ve y se confirma la necesidad del monitoreo de condición para no llegar a estos extremos. La mayoría de los equipos necesitan intervención inmediata para evitar la falla funcional de los equipos, lo que por añadidura traería paro no programados en la línea de producción provocando pérdidas en producto terminado afectando las ventas y la rentabilidad de la planta.

4.2. Análisis de termografía

Para el análisis y discusión de los datos o resultados obtenidos en el estudio de termografía, al igual que en el análisis de vibraciones, se realizó una tabulación y agrupación de datos por elemento realizando un análisis estadístico con la herramienta del gráfico de cajas y bigotes, los valores se presentan en la figura 48.

Figura 48. Valores análisis de termografía

<u>Equipo/ Componente</u>	<u>(ΔT) Delta de temperatura en °C</u>			<u>T °C</u>
	<u>Motor</u>	<u>Breaker principal</u>	<u>Contactador</u>	<u>Cojinete de carga</u>
Panel Electrico principal	-----	3	-----	-----
Panel Electrico de mezcladores	-----	0.2	-----	-----
Mezclador 1	3	1	0.4	47.3
Mezclador 2	1.2	0.5	0.2	43.9
Atomizador	3	2	1	53.1
Compresora 1	3.3	3	1.4	44.3
Compresora 2	2.3	0.5	0.8	53.2
Compresora 3	2	0.2	1	48.8
Troqueladora	1.5	1	1	48.3
Empacadora	4.6	1	1	36.6
Bomba de agua	1.6	4	2	76.1
Bonba de vacío	1.3	5	2	50.8
Bomba para jabón	1.4	2	2	50.4

Fuente: elaboración propia.

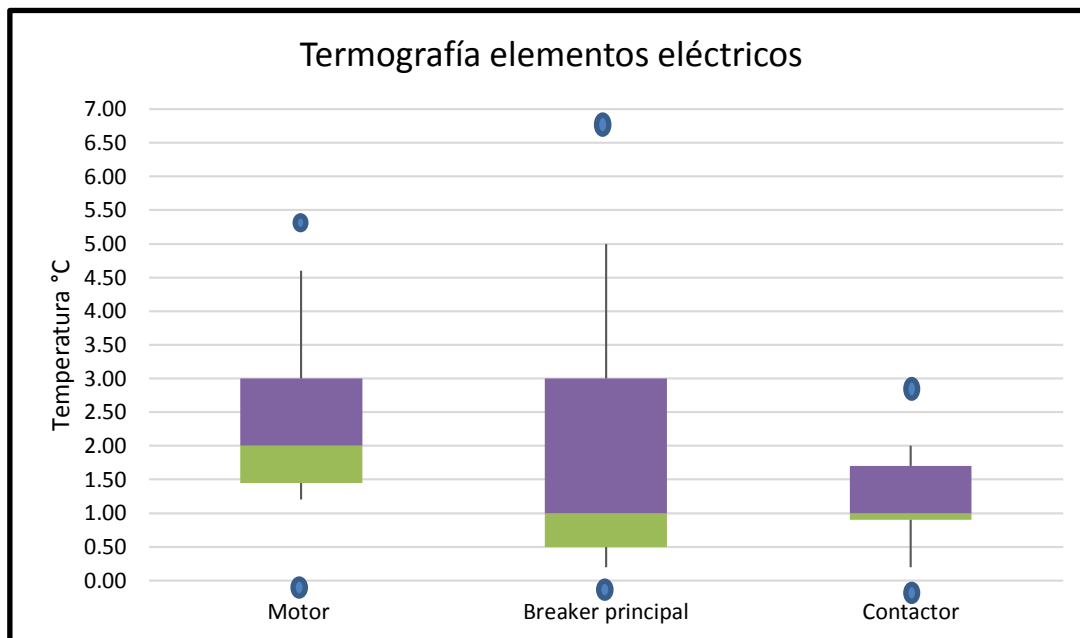
De acuerdo al procedimiento para la gráfica de cajas y bigotes se obtuvieron los valores de la tabla IX.

Tabla IX. Valores para la gráfica cajas y bigotes

	Motor		Breaker principal		Contactor	
	Valores	Ancho	Valores	Ancho	Valores	Ancho
Mínimo	1.20	1.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Q1	1.45	0.25	0.50	0.30	0.90	0.70
Mediana	2.00	0.55	1.00	0.50	1.00	0.10
Q3	3.00	1.00	3.00	2.00	1.70	0.70
Máximo	4.60	1.60	5.00	2.00	2.00	0.30
Valor atípico 1	-0.88		-3.25		-0.30	
RIQ	1.55		2.50		0.80	
Valor atípico 2	5.33		6.75		2.90	

Fuente: elaboración propia.

Figura 49. Gráfica de cajas y bigotes termografía



Fuente: elaboración propia.

Una de las características que se pudo observar en la figura 49 es que, para los tres equipos, se tiene una distribución asimétrica a la derecha, sobre todo los

datos del breaker principal. Se ve que los datos tienen una tendencia hacia los límites inferiores, los breakeres principales son los elementos que mayor variabilidad tienen.

Como se pudo comparar con la Norma ISO TC 108 los tres elementos eléctricos están cumpliendo con el delta de temperatura, manteniéndose dentro de parámetros normales. Las mediciones en motor y Breaker presentan las temperaturas más elevadas dentro del rango normal, por lo que la norma recomienda mantenerse en observación y monitoreo para programar una reparación cuando sea necesario.

La temperatura elevada en los motores solo es un indicio para mantenerse en monitoreo, pues no se indica la falla específica, al respecto Abarca (2012) concluye que la termografía infrarroja sirve para detectar sobrecalentamiento en motores eléctricos, aunque se vea cuál es el área donde se está dando el calentamiento no se puede indicar la causa que lo está provocando.

Para el análisis de la medición de termografía de cojinete de carga de los motores tenemos los valores en la tabla X.

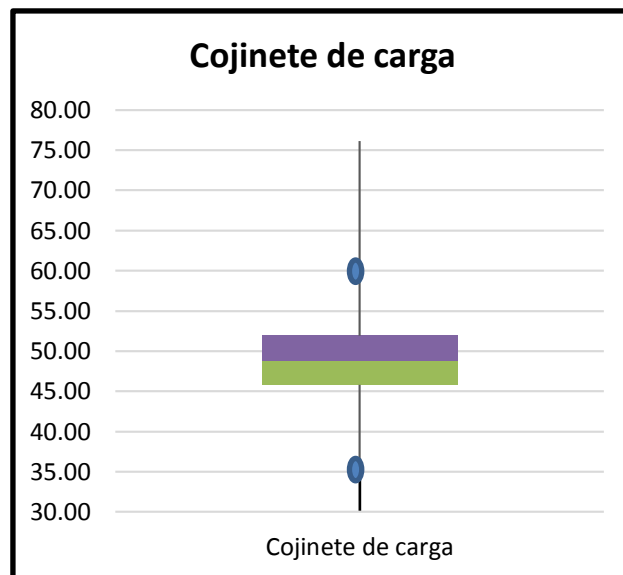
Tabla X. **Valores para gráfico de cojinete carga**

Cojinete de carga		
	Valores	Ancho
Mínimo	36.60	36.60
Q1	45.80	9.20
Mediana	48.80	3.00
Q3	51.95	3.15
Máximo	76.10	24.15
Valor atípico 1	36.58	
RIQ	6.15	
Valor atípico 2	61.18	

Fuente: elaboración propia.

Con los datos obtenidos en la tabla X se procedió a generar el gráfico de cajas y bigotes de termografía para el grupo de cojinetes de carga de los motores eléctricos, la gráfica se ve en la figura 50.

Figura 50. **Gráfica cajas y bigotes para cojinetes de carga**



Fuente: elaboración propia.

Se pudo observar que la distribución de datos es simétrica y agrupados, el 55% está dentro del rango de operación permisible, según la norma es hasta los 50°C. El 36% está arriba de 50°C por lo mínimo y requiere programar una revisión. Se tienen dos valores atípicos, uno es extremadamente bajo por lo que no es necesario enfocarnos en él. El segundo dato que sobre pasa los 70°C se deben programar para el siguiente paro de mantenimiento.

Con la experiencia del termógrafo y con el conocimiento de la marca, tipo de cojinete, tipo y calidad de grasa se sabe cuál es la temperatura de operación del cojinete recomendada por el fabricante. Esta información es muy importante tomarla en cuenta para las mediciones y los resultados obtenidos.

4.3. Análisis de aceite

Los resultados del análisis de aceite fueron entregados por parte del proveedor del aceite lubricante, al ingeniero de mantenimiento por medio de un informe completo para cada una de las cajas reductoras a las que se les hizo el estudio. El indicador importante es el de la criticidad del aceite en términos generales, el proveedor maneja una escala de 0 a 4, siendo 0 la escala para condiciones aceptables y 4 para condiciones críticas y de emergencia para cambio de aceite.

De todas las variables que mide el proveedor para el monitoreo de condición solo se manejó el resultado de la cantidad o nivel de contaminación en ppm del hierro (Fe), debido a que es el indicador de desgaste interno de piezas del equipo. A continuación, en la figura 51 se muestran los resultados del análisis de aceite.

Figura 51. Resultado de análisis de aceite

		0	1	2	3	4
		NORMAL		ANORMAL		CRITICO
Equipo	Componente	Criticidad	Fe ppm			
Mezclador 1	Caja reductora	2	67			
Mezclador 2	Caja reductora	2	35			
Atomizador	Caja reductora	3	98			
Compresora 1	Caja A	3	96			
	Caja B	4	750			
Compresora 2	Caja A	1	16			
	Caja B	4	310			
Compresora 3	Caja A	2	23			
	Caja B	4	256			

Fuente: elaboración propia.

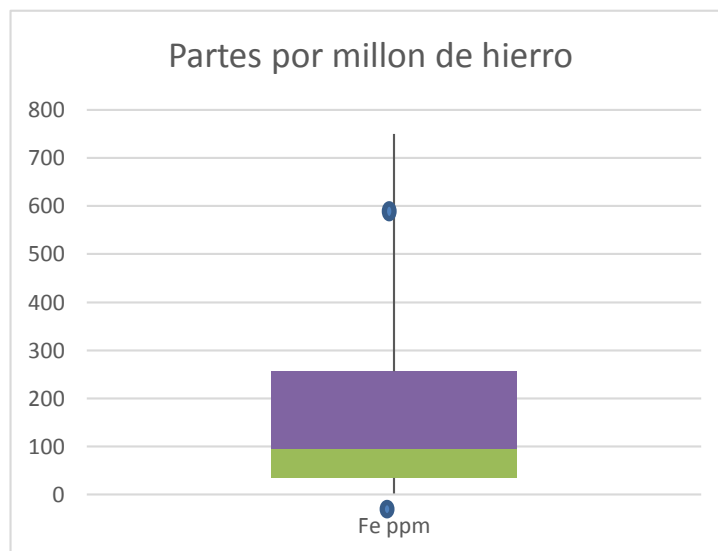
De los resultados tabulados en la figura 51 se hizo el análisis estadístico para las partes por millón (ppm) de hierro encontrado en el aceite, se utilizó la gráfica de cajas y bigotes como se muestra en la tabla XI y en la figura 52.

Tabla XI. **Valores para cajas y bigotes ppm de hierro**

Partes por millón de hierro		
	Valores	Ancho
Mínimo	16.00	16.00
Q1	35.00	19.00
Mediana	96.00	61.00
Q3	256.00	160.00
Máximo	750.00	494.00
Valor atípico 1	00.50	
RIQ	221.00	
Valor atípico 2	587.50	

Fuente: elaboración propia.

Figura 52. **Cajas y bigotes ppm de hierro**



Fuente: elaboración propia.

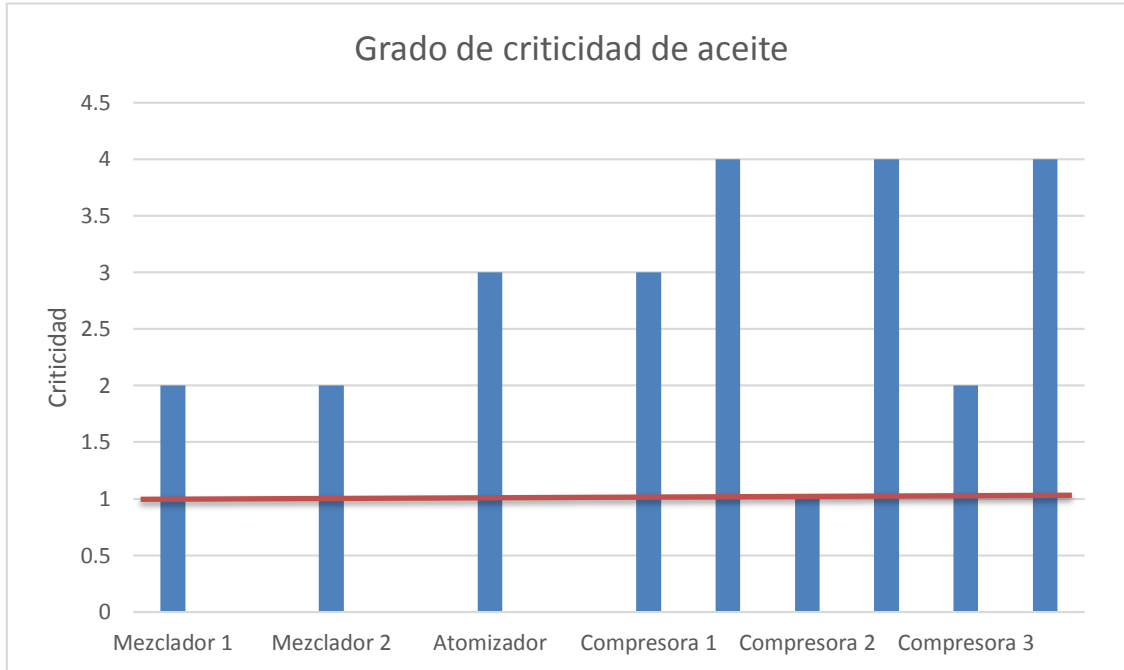
Se ve que la gráfica de la figura 52 indica una distribución asimétrica hacia la derecha, los datos están agrupados, pero sobre el rango permisible aceptable. Se puede ver que solo un dato está dentro del rango normal. Se tiene un valor atípico fuera del rango de los valores obtenidos, lo que indica que no se ha cambiado el aceite en mucho tiempo y no se cuenta con un monitoreo frecuente, este valor está demasiado alto fuera de rango de los obtenidos en los equipos similares.

Se demuestra la necesidad del monitoreo de aceites, debido a la criticidad encontrada en la mayoría de los equipos Arellano (2009) indica que es justificable la implementación del monitoreo de la condición aceites en una planta, debido a los beneficios que se obtienen por detección temprana de anomalías, permite el cambio a tiempo de aceite, también permite el monitoreo de condición en cajas reductoras sin necesidad de que el equipo este fuera de operación.

El control sobre el estado del aceite en términos de criticidad se hizo realizando un gráfico de control de barras colocando la meta o rango deseado, el cual es nivel 1, al analizarlo se observó que los equipos tuvieron el grado crítico por arriba de 1, según el informe final de proveedor externo. De esta manera se hicieron las recomendaciones necesarias al departamento de mantenimiento y al de producción para considerar la programación de cambio de aceite lo antes posible.

En la figura 53 se presenta el gráfico de criticidad de aceite.

Figura 53. **Gráfico de criticidad de aceite**



Fuente: elaboración propia.

4.4. Disponibilidad y tiempo de paro

Con los datos históricos que se obtuvieron de los tiempos de paro de la línea 1 de producción, se obtuvieron la cantidad de fallas, el tiempo de restauración y el tiempo de operación programado, realizando el cálculo del porcentaje (%) de disponibilidad de línea. Cabe mencionar que la fábrica de jabón entre sus metas para el año 2019 quiere llegar a una disponibilidad del 99%.

El cuadro con los resultados obtenidos se muestra en la figura 54.

Figura 54. Disponibilidad y tiempo de paro no programado

Mes	Semana	Min.	% min	Disponibilidad
				%
Marzo	SEMANA 1	105	1.22%	98.78%
	SEMANA 2	90	1.01%	98.99%
	SEMANA 3	275	2.39%	97.61%
	SEMANA 4	275	2.88%	97.12%
Abril	SEMANA 5	165	4.58%	95.42%
	SEMANA 6	405	4.02%	95.98%
	SEMANA 7	65	1.00%	99.00%
	SEMANA 8	460	4.56%	95.44%
Mayo	SEMANA 9	950	10.15%	89.85%
	SEMANA 10	600	6.94%	93.06%
	SEMANA 11	470	5.44%	94.56%
	SEMANA 12	325	2.82%	97.18%
Junio	SEMANA 13	235	5.44%	94.56%
	SEMANA 14	250	2.48%	97.52%
	SEMANA 15	135	1.56%	98.44%
	SEMANA 16	215	2.13%	97.87%
Julio	SEMANA 17	235	6.53%	93.47%
	SEMANA 18	465	4.61%	95.39%
	SEMANA 19	515	5.96%	94.04%
	SEMANA 20	580	5.75%	94.25%
	SEMANA 21	55	0.71%	99.29%
Agosto	SEMANA 22	285	3.30%	96.70%
	SEMANA 23	940	9.33%	90.67%
	SEMANA 24	270	3.28%	96.72%
	SEMANA 25	405	4.02%	95.98%

Fuente: elaboración propia.

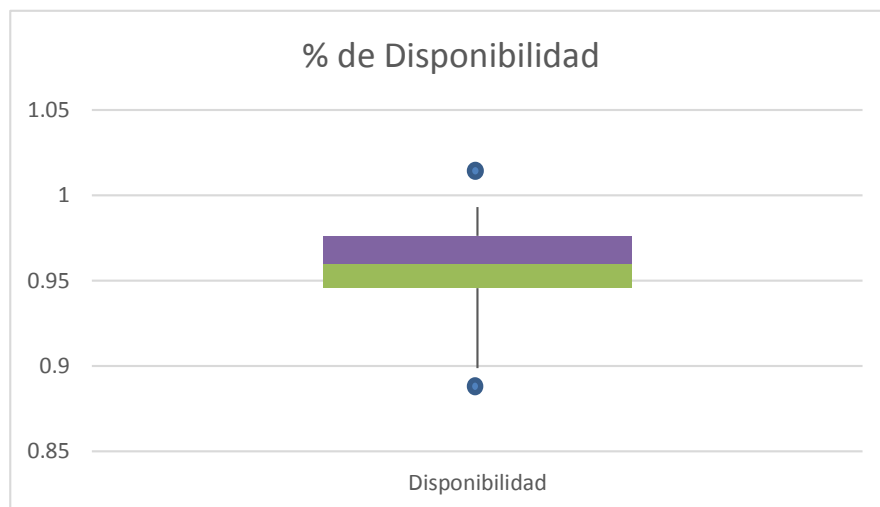
En la figura 55 y la tabla XII, se presentaron los valores y la gráfica de cajas y bigotes, la cual fue la herramienta utilizada para el análisis de los resultados obtenidos.

Tabla XII. **Valores para cajas y bigotes % de disponibilidad**

% Disponibilidad		
	Valores	Ancho
Minimo	0.90	0.90
Q1	0.95	0.05
Mediana	0.96	0.01
Q3	0.98	0.02
Maximo	0.99	0.02
Valor atipico		
1	0.90	
RIQ	0.03	
Valor atipico		
2	1.02	

Fuente: elaboración propia.

Figura 55. **Gráfica cajas y bigotes % de disponibilidad**



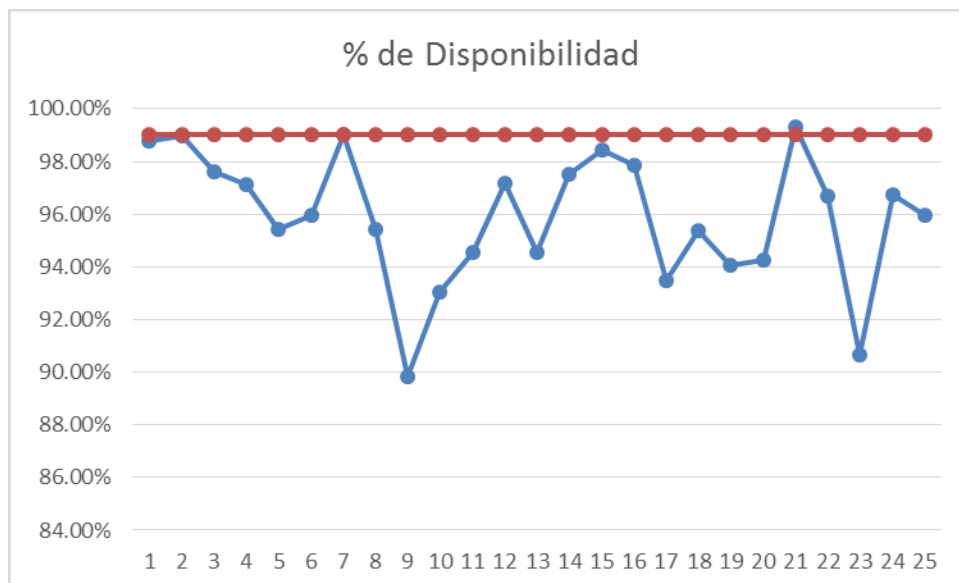
Fuente: elaboración propia.

Se tuvo como resultado una distribución simétrica, no se obtuvieron valores atípicos o extremadamente fuera de rango, los valores de disponibilidad se mantuvieron en un rango muy parecido, pero fuera del rango que pretende

obtener la fábrica de jabón. Como apoyo al control de resultados, se realizó un gráfico de líneas indicando la meta requerida por la fábrica de jabón, donde se pudo observar la irregularidad y la distancia a la que se está de la meta propuesta, se puede observar en la figura 56.

La tabulación, medición y análisis del indicador (kpi) de disponibilidad es de mucha utilidad para tener un punto de partida y así evaluar la efectividad del monitoreo de condición y de las acciones tomadas para corregir las fallas o elementos fuera de rango antes que se llegue a la falla funcional. Al respecto Grijalva (2009) menciona que los indicadores de mantenimiento ayudan a establecer metas y tomar decisiones, a la vez que se deben crear informes precisos del desempeño de los activos acompañados de gráficos que sean fáciles de interpretar.

Figura 56. **Gráfica disponibilidad en planta**



Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. La fábrica de jabón se ve beneficiada, debido a que se desarrolló el programa de mantenimiento, basado en monitoreo de condición y técnicas no destructivas, siguiendo los lineamientos y pasos de la norma ISO 17359 para la línea de producción uno, se diseñaron los formatos para la toma de mediciones, también se elaboró la programación para la ejecución de las técnicas no destructivas.
2. Se pudo desarrollar el plan de monitoreo de condición de la técnica de termografía para los equipos de la línea 1 de producción, siguiendo los lineamientos de la norma ISO 17359 y haciendo las mediciones de los equipos y componentes basado en la Norma ISO 108 TC, se hizo la medición de la temperatura de los cojinetes de carga de los motores; también se observó que requieren intervención debido a que están fuera del rango de temperatura, según norma, se realizó el formato para la toma de mediciones y la programación anual.
3. La mejor forma de realizar el plan de monitoreo de condición para la técnica de análisis de vibraciones fue tomar como base y criterio de alerta la Norma ISO 10816, se midieron las vibraciones de los equipos y se determinó comparando con el criterio de alerta de la norma que un 50% de los equipos se encuentran en condiciones aceptables de operación, el otro 50 % está operando fuera de rango, por lo que necesita intervención de mantenimiento, se realizó el formato y la programación anual.

4. Se pudo implementar el programa de monitoreo para el análisis de aceites lubricantes en las cajas reductoras de la línea uno, tomando como base el resultado de criticidad del informe final y recomendaciones del laboratorio certificado externo; se estableció la condición del aceite lubricante con el que están operando los equipos, comprobándose que solo el 11 % de los equipos están en condiciones normales de operación del aceite, el 89 % de los equipos tienen aceite lubricante en condiciones inoperables por lo que se requiere el cambio inmediato, se definió una programación anual y frecuencia para el análisis de condición del aceite.

5. El desempeño y los indicadores de mantenimiento de los equipos de la línea uno se pudo medir haciendo el cálculo de la disponibilidad de los equipos durante los últimos 6 meses, se logró establecer el nivel de disponibilidad y desempeño de los equipos, se presentó el modelo de análisis, de seguimiento y presentación de resultados con frecuencia semanal. Este modelo servirá para medir la eficiencia del monitoreo de condición con el transcurrir del tiempo.

RECOMENDACIONES

1. Mantener actualizados todos los datos históricos de control y seguimiento en la planta de producción, tales como tiempos de paro, cantidad de fallas, tiempos de restauración y disponibilidad de la línea de producción, listados de equipos y criticidad de los mismos para que mantenga una mejora continua en el desarrollo del monitoreo de condición, según los lineamientos de la Norma ISO 17359.
2. Gestionar un programa de capacitación para el personal de supervisión de mantenimiento sobre la técnica de termografía infrarroja para que el programa de mantenimiento por monitoreo de condición se lleve a cabo, según la programación y alta eficiencia, adquirir una cámara termográfica nueva, para garantizar la correcta medición del análisis de termografía.
3. Mejorar la medición y análisis de la técnica de vibraciones por medio de la adquisición de un equipo de vibraciones que brinde el espectro de frecuencia de la vibración, a la vez, se tendrá que gestionar una capacitación para el ingeniero y el supervisor de mantenimiento en análisis de vibraciones.
4. Realizar el cambio de aceite inmediato de los equipos que obtuvieron grado de criticidad dos, tres y cuatro, para asegurarse de empezar un monitoreo de condición con los equipos con funcionamiento normal de operación. Llevar un estricto monitoreo y supervisión por medio de análisis de aceite, también contar con un adecuado almacenaje de lubricantes, identificados y libres de contaminación.

5. Llevar una medición semanal de la disponibilidad de la línea de producción, verificando los resultados y las acciones tomadas, según las recomendaciones del monitoreo de condición. De esta forma, el cálculo de la disponibilidad servirá con el transcurrir del tiempo para medir la efectividad del monitoreo de condición, a través de la disminución de los tiempos de paro no programado y el incremento en la disponibilidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aldana, D, y Muñoz, C. (2017). *Aplicación de la termografía infrarroja como método de inspección no destructivo de un túnel de viento de baja velocidad*. Tesis de grado Ingeniería Aeronáutica. Fundación Universitaria Los Libertadores, Colombia.
2. Arellano, G. (2009). *Implantación de análisis de aceite en motores de combustión interna del ciclo Diesel*. Tesis de grado Ingeniería Mecánica. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.
3. Carmona, F, y Ochoa, J. (2008). *Procedimiento para el mantenimiento predictivo en subestaciones de 115/34.5/13.8 kV, utilizando técnicas de termografía y ultrasonido. Caso de estudio empresa Electricidad de Valencia*. Trabajo Especial de Grado Ingeniería Eléctrica. Universidad de Carabobo, Valencia.
4. Castellanos, M, y Sánchez, M. (2005). *Programa de mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones en equipos críticos de la industria azucarera*. Trabajo de graduación Maestría en mantenimiento. Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”, San Salvador, El Salvador.
5. Cherres, D, y Ñauta, J. (2015). *Estudio de implementación del sistema de mantenimiento predictivo en la compañía ecuatoriana del caucho*

Erco. Tesis Ingeniería Eléctrica. Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

6. Delgadillo, L, y Joaquín, V. (2013). *Diagnóstico del mantenimiento a motores jaula de ardilla aplicando tecnología de termografía infrarroja*. Tesis Ingeniería Mecánica Eléctrica. Instituto Politécnico Nacional, México D.F.
7. Díaz, J. (2006). *Documento de apoyo a la gestión de mantenimiento para la selección y aplicación de lubricantes*. Tesis Ingeniería Mecánica. Universidad Austral de Chile, Chile.
8. Gómez, Y. (2013). *Contribución al desarrollo y mejora para la cuantificación de la degradación en aceites lubricantes usados de MCI, a través de la técnica de espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)*. Tesis Doctoral Doctorado en Sistemas propulsivos en medios de transporte. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia.
9. González, J. (2013). *Desarrollo de un sistema de monitoreo de la condición, mediante análisis de vibraciones en central microhidráulica*. Tesis Ingeniería Mecánica. Universidad de Chile, Santiago de Chile.
10. González, R. (2009). *Implementación del mantenimiento predictivo basado en el análisis de vibración en los compresores de tornillo de una empresa procesadora y enlatadora de productos del mar*. Tesis Maestría de Mantenimiento. Universidad de Oriente, Barcelona, España.

11. Grijalva, L. (2004). *Manual de operación, diseño y propuesta de implementación del programa de monitoreo de condición en la planta San Miguel de Cementos Progreso, S.A.* Tesis Ingeniería Mecánica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
12. Iglesias, F, y Abarca, D. (2012). *Elaboración de un plan de mantenimiento predictivo mediante la aplicación de termografía industrial en los motores eléctricos de la planta de Eurolit en la empresa Tubasec C.A.* Tesis Ingeniería de Mantenimiento. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
13. Martínez, L. (2014). *Metodología para la definición de tareas de mantenimiento basado en confiabilidad, condición y riesgo aplicada a equipos del sistema de transmisión nacional.* Trabajo de Investigación Magister en Ingeniería Eléctrica. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
14. Mejía, J. (2009). *Análisis de Vibraciones en motores eléctricos asíncronos trifásicos.* Tesis Ingeniería Mecánica Eléctrica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
15. Mundarain, C. (2009). *Diseño de un programa de mantenimiento basado en monitoreo de condición enfocado a la mejora de la efectividad de los activos rotatorios.* Tesis Ingeniería Mecánica. Universidad de Oriente, Venezuela.
16. Padilla, N. (2013). *Análisis de aceite para detección temprana de fallas en motores Caterpillar.* Tesis Ingeniería Mecánica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

17. Pesántez, A. (2007). *Elaboración de un plan de mantenimiento predictivo y preventivo en función de la criticidad de los equipos del proceso productivo de una empresa empaquera de camarón*. Tesis de grado Ingeniería Industrial. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.
18. Picazo, M. (2016). *Diagnóstico de máquinas eléctricas mediante técnicas de termografía infrarroja*. Tesis Doctoral Doctorado en Mantenimiento. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
19. Riquelme, M. (2013). *Proyecto en monitoreo de condiciones para mantenimiento predictivo de palas electromecánicas*. Tesis Ingeniería Eléctrica. Universidad de Chile, Santiago de Chile.
20. Ruiz, A. (2012). *Modelo para la implementación de mantenimiento predictivo en las facilidades de producción de petróleo*. Monografía de Grado Especialista en Gerencia de Mantenimiento. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
21. Suárez, L. (2006). *Análisis de modo y efecto de falla de una llenadora tipo lineal*. Tesis Ingeniería Mecánica. Universidad Simón Bolívar, Venezuela.
22. Tapia, M. (2011). *Diseño de plan de mantenimiento predictivo para la línea de producción extrusión de bolsas plásticas en la empresa Kalusin Importing Company (KICO, S.A.)*. Tesis de grado Ingeniería Mecánica. Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena de Indias.

23. Toapanta, O. (2009). *Implementación de un análisis de mantenimiento basado en condición de los compresores recíprocos y de tornillo*. Tesis Ingeniería Mecánica. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Ecuador.
24. Valdés, J, y San Martín, E. (2009). *Diseño de un plan de mantenimiento preventivo-predictivo aplicado a los equipos de la empresa Remoplast*. Tesis de grado Administrador Industrial. Universidad de Cartagena, Cartagena de Indias.
25. Villa, L. (2011). *Mantenimiento predictivo aplicado a máquinas sometidas a velocidad y carga variables mediante análisis de órdenes*. Tesis Doctoral Doctorado en Ingeniería de Ciencias y Automática. Universidad de Valladolid, Valladolid.
26. Villar J. (2009). *Metodología para la detección y prevención de fallas en equipos instalados de producción*. Tesis de grado Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

