



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

**PROPUESTA DE CREACIÓN DEL DEPARTAMENTO DE CONFIABILIDAD Y PLAN DE  
MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA EQUIPOS CRÍTICOS EN EL INGENIO SANTA ANA**

**Cristian Gamaliel Morataya Tohon**

Asesorado por el Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda

Guatemala, septiembre de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE CREACIÓN DEL DEPARTAMENTO DE CONFIABILIDAD Y PLAN DE  
MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA EQUIPOS CRÍTICOS EN EL INGENIO SANTA ANA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**CRISTIAN GAMALIEL MORATAYA TOHON**  
ASESORADO POR EL ING. EDWIN ESTUARDO SARCEÑO ZEPEDA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

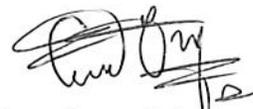
DECANO	Ing. Angel Roberto Sic García
EXAMINADOR	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma
EXAMINADOR	Ing. Julio César Campos Paiz
EXAMINADOR	Ing. Carlos Humberto Figueroa Vásquez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**PROPUESTA DE CREACIÓN DEL DEPARTAMENTO DE CONFIABILIDAD Y PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA EQUIPOS CRÍTICOS EN EL INGENIO SANTA ANA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 2 de marzo de 2015.



**Cristian Gamaliel Morataya Tohon**



Guatemala, 09 de julio de 2015  
REF.EPS.DOC.442.07.15.

Ing. Silvio José Rodríguez Serrano  
Director Unidad de EPS  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Estimado Ingeniero Rodríguez Serrano.

Por este medio atentamente le informo que como Asesor-Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), del estudiante universitario **Cristian Gamaliel Morataya Tohon** de la Carrera de Ingeniería Mecánica, con carné No. 200718833, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **PROPUESTA DE CREACIÓN DEL DEPARTAMENTO DE CONFIABILIDAD Y PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA EQUIPOS CRÍTICOS EN EL INGENIO SANTA ANA.**

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Edwin Estuardo Sarceño  
Asesor-Supervisor de Prácticas  
Área de Ingeniería Mecánica



c.c. Archivo  
EESZ/ra



Guatemala, 09 de julio de 2015  
REF.EPS.D.318.07.15

Ing. Roberto Guzmán  
Director Escuela de Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Estimado Ingeniero Guzmán:

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado: **PROPUESTA DE CREACIÓN DEL DEPARTAMENTO DE CONFIABILIDAD Y PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA EQUIPOS CRÍTICOS EN EL INGENIO SANTA ANA**, que fue desarrollado por el estudiante universitario **Cristian Gamaliel Morataya Tohon** quien fue debidamente asesorado y supervisado por el Ingeniero Edwin Estuardo Sarceño Zepeda.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte del Asesor - Supervisor de EPS, en mi calidad de Director apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,  
"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Silvio José Rodríguez Serrano  
Director Unidad de EPS



SJRS/ra



**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.Mecánica.211.2015

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, con la aprobación del Director de la Unidad de EPS, al trabajo de graduación titulado **PROPUESTA DE CREACIÓN DEL DEPARTAMENTO DE CONFIABILIDAD Y PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA EQUIPOS CRÍTICOS EN EL INGENIO SANTA ANA** del Estudiante **Cristian Gamaliel Morataya Tohon** y habiendo revisado el mismo, recomienda continuar el trámite.

**"Id y Enseñad a Todos"**

  
Ing. Roberto Guzmán Ortiz  
Director  
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, agosto de 2015  
/aej



**USAC**

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.261.2015

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor-Supervisor y del Director de la Unidad de EPS, al trabajo de graduación titulado: **PROPUESTA DE CREACIÓN DEL DEPARTAMENTO DE CONFIABILIDAD Y PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA EQUIPOS CRÍTICOS EN EL INGENIO SANTA ANA** del Estudiante **Cristian Gamaliel Morataya Tohon** Carné No. **2007-18833** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

**"Id y Enseñad a Todos"**

  
Ing. Roberto Guzmán Ortiz  
Director  
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, septiembre de 2015  
/aej



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **PROPUESTA DE CREACIÓN DEL DEPARTAMENTO DE CONFIABILIDAD Y PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA EQUIPOS CRÍTICOS EN EL INGENIO SANTA ANA**, presentado por el estudiante universitario: **Cristian Gamaliel Morataya Tohon**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

9/07/15  
Ing. Pedro Antonio Aguilar  
Decano



Guatemala, septiembre de 2015

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por permitirme la vida y darme sabiduría.
- Mi madre** Mirna Tohón Guzmán, por todos los sacrificios realizados, por ser la mejor guía y ejemplo a seguir.
- Mis abuelos** Por el apoyo y soporte brindado en todo momento.
- Mis hermanos** Victor, Julio y Cristina Tohon, por brindarme su apoyo.
- Mis amigos** Por brindarme su amistad y confianza.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por abrir sus puertas para mi superación académica.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por los conocimientos adquiridos en estos años.
<b>Ingenio Santa Ana</b>	Por permitirme realizar el EPS en sus instalaciones.
<b>Ing. Orlando Pinzón</b>	Por sus incontables enseñanzas, asesoramiento y la colaboración en la elaboración de este trabajo.
<b>Familia Santaneca</b>	Por su amistad y tiempo compartido.



2.2.3.	Mantenimiento predictivo.....	13
2.2.4.	Ventajas del mantenimiento predictivo en la industria azucarera.....	16
2.2.5.	Técnicas de mantenimiento predictivo a implementar en la empresa.....	17
2.2.5.1.	Técnica de análisis por medio de ultrasonido.....	17
2.2.5.1.1.	Aplicaciones de la técnica de ultrasonido ...	19
2.2.5.1.2.	Ultrasonido para monitoreo de rodamientos .....	21
2.2.5.2.	Técnica de análisis de vibraciones mecánicas .....	22
2.2.5.2.1.	Movimiento armónico simple senoidal .....	24
2.2.5.2.2.	Componentes de una señal de vibración .....	25
2.2.5.2.3.	Unidades de medición de vibraciones mecánicas.....	29
2.2.5.2.4.	Problemas comunes de vibraciones mecánicas.....	29
2.2.5.3.	Técnica de análisis por medio de termografía infrarroja.....	30
2.2.5.3.1.	Transferencia de calor ..	31
2.2.5.3.2.	Emisividad.....	33

	2.2.5.3.3.	Aplicaciones de la termografía infrarroja ....	34
2.3.		Costos evitados por detección de falla por desbalance mecánico en bomba de inyección 1 caldera 6, caso práctico de análisis de vibraciones .....	36
3.		FASE TÉCNICO PROFESIONAL (PASOS PARA LA CREACIÓN DEL DEPARTAMENTO DE CONFIABILIDAD Y PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA EQUIPOS CRÍTICOS) .....	41
3.1.		Establecimiento de un plan de mantenimiento predictivo .....	41
	3.1.1.	Medios físicos .....	43
		3.1.1.1. Instrumento de medición de ultrasonido .....	43
		3.1.1.2. Instrumentos de medición de vibraciones.....	44
		3.1.1.3. Instrumento de medición de termografía infrarroja .....	47
		3.1.1.4. Instrumento de registro de datos .....	49
	3.1.2.	Medios de gestión.....	50
	3.1.3.	Recurso humano (organigrama propuesto del Departamento de Confiabilidad) .....	53
3.2.		Definición de equipos críticos .....	55
	3.2.1.	Clasificación de equipos críticos.....	56
3.3.		Períodos de monitoreo .....	57
3.4.		Descripción del proceso para el análisis de ultrasonido .....	57
	3.4.1.	Establecimiento de línea base para rodamientos ...	59
	3.4.2.	Niveles de intervención en rodamientos .....	60
	3.4.3.	Lubricación por medio de ultrasonido .....	62
3.5.		Descripción del proceso para el análisis de vibraciones .....	64

3.5.1.	Parámetros a medir .....	65
3.5.2.	Adquisición de datos .....	65
3.5.3.	Mediciones puntuales (valor global RMS) .....	67
3.5.4.	Análisis espectral de vibraciones, problemas comunes.....	69
3.5.4.1.	Desbalance mecánico .....	71
3.5.4.2.	Desalineación mecánica.....	72
3.5.4.3.	Flojedad mecánica .....	74
3.5.4.4.	Falla en rodamientos.....	76
3.6.	Descripción del proceso para el análisis por medio de termografía infrarroja.....	81
3.6.1.	Termograma.....	84
3.6.2.	Análisis de termograma.....	85
3.6.2.1.	Análisis cualitativo .....	86
3.6.2.2.	Análisis cuantitativo .....	87
3.6.3.	Mapeo térmico.....	87
3.6.4.	Fallas comunes en sistemas eléctricos .....	89
3.7.	Elaboración de rutas de medición .....	89
3.8.	Rutas de medición en equipos rotativos.....	92
3.8.1.	Área Patio de Caña .....	92
3.8.2.	Área de Molinos .....	94
3.8.3.	Área de Calderas .....	96
3.8.4.	Área de Cogeneración .....	101
3.8.5.	Área de Centrífugas .....	103
3.9.	Creación del Departamento de Confiabilidad.....	106
3.9.1.	Recuperación de la inversión .....	106
3.9.2.	Retorno sobre la inversión.....	107
3.9.3.	Relación beneficio-costo .....	108

4.	FASE DE DOCENCIA (IMPLEMENTACIÓN DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO) .....	109
4.1.	Importancia que implica la implementación del mantenimiento predictivo en la maximización de la vida útil de equipos mecánicos en la industria azucarera.....	109
4.2.	Importancia de los historiales en el mantenimiento predictivo .....	110
4.3.	Capacitación.....	110
4.3.1.	Tema de la capacitación: uso adecuado de equipos de alta tecnología para técnicas de análisis predictivo .....	111
4.3.1.1.	Contenido del tema.....	111
4.3.1.2.	Programación .....	112
	CONCLUSIONES .....	113
	RECOMENDACIONES .....	115
	BIBLIOGRAFÍA.....	117
	APÉNDICES .....	119



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Organigrama División Industrial .....	5
2.	Mapa de la ubicación de la empresa.....	7
3.	Curva de relación de costos de mantenimiento .....	12
4.	Curva de evolución de fallas P-F .....	15
5.	Ventilador Over Fire 1 caldera 4 .....	23
6.	Vibración armónica senoidal .....	24
7.	Componentes de un movimiento armónico simple en dominio del tiempo .....	26
8.	Señal de vibración en tres dimensiones.....	27
9.	Espectro de una señal de vibración .....	27
10.	Representación del ángulo de fase.....	28
11.	Espectro electromagnético.....	32
12.	Punto 3H bomba 1 caldera 6.....	38
13.	Punto 4H bomba 1 caldera 6.....	38
14.	Pistola de ultrasonido Ultraprobe 10000 .....	44
15.	Instrumento de medición de vibraciones Adash Vibrio 4900.....	45
16.	Instrumento de medición de vibraciones Adash 4101 .....	46
17.	Instrumento de medición de vibraciones Adash A4400 Va4Pro.....	46
18.	Cámara termográfica Fluke Ti32.....	48
19.	Cámara termográfica SKF TIK110 .....	48
20.	Hand-Held .....	49
21.	Sistema informático de consulta .....	50
22.	Consulta realizada a picadora 2 T.A., análisis de vibraciones .....	51

23.	Líneas de tendencia en el tiempo, picadora 2 T. A. ....	52
24.	Organigrama propuesto del Departamento de Confiabilidad .....	55
25.	Diagrama de flujo de análisis de ultrasonido .....	58
26.	Plano de medición para análisis de ultrasonido .....	59
27.	Diagrama de flujo del proceso para análisis de vibraciones .....	64
28.	Planos de medición para ejes horizontales.....	66
29.	Espectro de desbalance .....	72
30.	Espectro de desalineación.....	74
31.	Imagen representativa de flojedad mecánica .....	75
32.	Espectro de flojedad mecánica .....	76
33.	Curva típica de falla de rodamientos.....	77
34.	Etapas de averías de rodamientos .....	79
35.	Diagrama de flujo del proceso de inspección termográfico.....	82
36.	Ejemplo de termograma.....	84
37.	Ruta de medición patio de caña T. A.....	92
38.	Ruta de medición de patio de caña T. B. ....	93
39.	Troceadora 1 y 2 T. A. y T. B.....	93
40.	Precuchilla, picadora y desfibradora T. A. y T. B. ....	94
41.	Ruta de medición de molinos T. A. y T. B.....	95
42.	Diagrama de puntos de medición de molinos T. B.....	96
43.	Ruta de medición para ventiladores de caldera 1 .....	97
44.	Ruta de medición para ventiladores de caldera 4 .....	97
45.	Ruta de medición para ventiladores de caldera 7 .....	98
46.	Ruta de medición para ventiladores de caldera 6 .....	98
47.	Ruta de medición para ventiladores de caldera 5 .....	99
48.	Diagrama de puntos de medición ventilador Over Fire .....	99
49.	Ruta de medición para bombas de inyección de agua .....	100
50.	Diagrama de medición general de bombas .....	100
51.	Ruta de medición para turbogeneradores.....	101

52.	Diagrama de puntos de medición de turbogenerador TGM .....	102
53.	Diagrama de puntos de medición de turbogenerador Topping .....	102
54.	Diagrama de puntos de medición de turbogenerador Trona .....	103
55.	Diagrama de puntos de medición de turbogenerador Condensing ....	103
56.	Ruta de medición para centrífugas .....	104
57.	Diagrama de puntos de medición de centrífugas automáticas de primera y refinería .....	105
58.	Diagrama de puntos de medición de centrifugas continuas de segunda y tercera .....	105

## TABLAS

I.	Rangos de sonido .....	18
II.	Frecuencias centrales para detectar fallos ultrasónicos.....	19
III.	Emisividad de materiales .....	34
IV.	Datos de mediciones puntuales .....	37
V.	Costos totales aproximados por corrección y no corrección de desbalance mecánico.....	40
VI.	Listado de equipos críticos para el monitoreo .....	56
VII.	Niveles de acción para rodamientos .....	61
VIII.	Tabla de severidad de vibración ISO 10816 .....	68
IX.	Clasificación de fallas eléctricas.....	86
X.	Listado de equipos críticos para monitoreo mediante inspección con termografía infrarroja .....	87
XI.	Técnicas de mantenimiento predictivo aplicada a los equipos críticos .....	90
XII.	Costos de inversión inicial y anual .....	106
XIII.	Ahorro promedio anual.....	107



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>dB</b>	Decibel
<b>f</b>	Frecuencia
<b>1X</b>	Frecuencia fundamental
<b>Hz</b>	Hertz
<b>A</b>	Indica posición axial
<b>H</b>	Indica posición horizontal
<b>V</b>	Indica posición vertical
<b>mm/s</b>	Milímetro por segundo
<b>Q</b>	Quetzal (Guatemala)
<b>RPM</b>	Revoluciones por minuto
<b>T A</b>	Tándem A
<b>T B</b>	Tándem B
<b>RMS</b>	Valor medio eficaz (Root Mean Square)



## GLOSARIO

<b>Amplitud</b>	Es la máxima desviación de un cuerpo desde la posición de equilibrio.
<b>Armónico</b>	Valor de amplitud que se presenta en múltiplos exactos de la frecuencia fundamental.
<b>Bandas laterales</b>	Frecuencias laterales a espacios similares una de otra, alrededor de la fundamental o de un armónico.
<b>Decibel</b>	Medida de la intensidad del sonido.
<b>Espectro</b>	Es la representación gráfica de la vibración, en la cual se enfrentan amplitud versus frecuencia.
<b>Fase</b>	Es la diferencia entre una marca establecida en el eje de rotación y la señal de vibración.
<b>Frecuencia</b>	Se refiere al número de ciclos por unidad de tiempo.
<b>ISO</b>	Organización Internacional para la Estandarización (International Standar Organization)
<b>NETA</b>	Asociación Internacional de Ensayos Eléctricos (Inter-National Electric Testing Association)

<b>Período</b>	Tiempo necesario para llevar a cabo una oscilación.
<b>RMS</b>	Es el valor eficaz de medición de la amplitud de la vibración.
<b>Termografía</b>	Técnica de inspección de no contacto que mide la radiación emitida por un cuerpo.
<b>Termograma</b>	Imagen producida por una cámara infrarroja, que muestra los puntos calientes de un objeto.
<b>Transductor</b>	Es un dispositivo capaz de convertir una determinada manifestación de energía de entrada en otra diferente a la salida.
<b>Ultrasonido</b>	Es una vibración mecánica con un rango mayor al audible por el oído humano.
<b>Vibración</b>	Oscilación de un objeto alrededor de una posición de equilibrio.

## RESUMEN

El presente informe del Ejercicio Profesional Supervisado fue realizado en el Ingenio Santa Ana en el período comprendido del 3 de septiembre de 2014 al 17 de abril de 2015.

En la fase de investigación se describen los tipos de mantenimiento, haciendo énfasis en el mantenimiento predictivo aplicado a la industria azucarera, así como las distintas técnicas de inspección y análisis que implica este tipo de mantenimiento para lograr los mejores resultados posibles, con el fin de alcanzar la máxima confiabilidad en los equipos. También se incluye como parte de esta fase, la investigación de costos de mantenimiento evitados por medio de análisis de vibraciones realizado a un equipo mecánico, por personal propio de la empresa.

En la fase técnico profesional se propone la creación de un Departamento de Confiabilidad, que se haga cargo de las tareas administrativas y técnicas analíticas del mantenimiento predictivo. Asimismo, se establece un listado de equipos críticos en el Ingenio Santa Ana, los cuales serán objeto de medición y análisis durante el período en el cual estos se encuentren en funcionamiento, con el objetivo de maximizar el tiempo de vida en los mismos. Todo esto conlleva por supuesto, a la creación de un plan de mantenimiento predictivo que incluya diagramas de los equipos considerados como críticos, así como diagramas de flujo donde se establecen rutas de medición que faciliten y ayuden a la eficiencia del programa establecido.

En la última fase, correspondiente a la de docencia, se hace énfasis sobre la calificación del personal encargado del mantenimiento predictivo y se propone la certificación del personal administrativo en las distintas técnicas de inspección predictiva, así como una capacitación al personal encargado de realizar el trabajo de campo.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Proponer la creación del Departamento de Confiabilidad y establecer un plan de mantenimiento predictivo para equipos críticos en el Ingenio Santa Ana.

### **Específicos**

1. Definir las técnicas de medición para el análisis predictivo en los equipos críticos.
2. Establecer los equipos críticos de cada área del ingenio, los cuales se analizarán mediante las técnicas definidas.
3. Elaborar programa y rutas de medición y análisis que faciliten el control sobre los equipos.
4. Diseñar diagramas de control de mediciones donde se indique los puntos de cada equipo.
5. Establecer organigrama interno del Departamento de Confiabilidad.



## INTRODUCCIÓN

Maximizar el tiempo de vida de los equipos es algo que cualquier empresa busca, pues esto conduce a la reducción de costos, no solo por la adquisición de repuestos sino también evitando paros inesperados en la producción. Para ello, el mantenimiento predictivo es una herramienta muy útil, pues no necesita que los equipos se detengan, logrando con esto que la producción sea continua.

En el Ingenio Santa se cuenta con equipo de alta tecnología para realizar análisis con técnicas predictivas que incluyen métodos no destructivos, por lo que contar con un departamento que se haga cargo directamente del mantenimiento predictivo resulta primordial para la consecución del objetivo principal, que es la maximización del tiempo de vida en los equipos mecánicos y eléctricos. Al no tener un departamento específico para realizar estas tareas, resulta complicado llevar un control de condición de equipos y establecer cuáles de estos deben ser analizados continuamente.

Durante el período del Ejercicio Profesional Supervisado se pretende conseguir la creación del Departamento de Confiabilidad, así como de un plan de mantenimiento predictivo en el que se abarquen los equipos de consideración crítica del Ingenio Santa Ana, para aplicar las técnicas de inspección establecidas. Este mantenimiento se implementará mediante tres técnicas de inspección no destructivas como lo son el ultrasonido propagado en el aire y estructuras, el análisis de vibraciones y la termografía infrarroja.

También se toma en cuenta la parte económica que debe estar presente siempre que se trate de implementar nuevos proyectos; en este caso la creación de un nuevo departamento, que implica la compra de equipos de alta tecnología, certificaciones internacionales para contar con personal calificado, así como la contratación de personal que sea capaz de brindar calidad en la implementación del programa de mantenimiento, demostrando la rentabilidad que este proyecto conlleva.

# **1. GENERALIDADES**

## **1.1. Identificación de la empresa**

El Ingenio Santa Ana forma parte del Grupo Corporativo Santa Ana S. A., que con más de 45 años desde su fundación se ha convertido en uno de los líderes de la agroindustria azucarera guatemalteca. Santa Ana se dedica al cultivo de caña de azúcar, elaboración de azúcar y generación de energía eléctrica. También comercializa subproductos como la melaza, bagazo y cachaza.

### **1.1.1. Reseña histórica**

En 1968, un grupo de empresarios adquirió parte de los equipos Santa Juana y Canóvanas de Puerto Rico, iniciándose así la construcción del Ingenio Santa Ana, en la finca Cerritos, ubicada a 64,5 km. al sur de la ciudad de Guatemala, en el departamento de Escuintla, a 220 metros sobre el nivel del mar. La primera zafra prueba se realizó en 1969/1970, moliéndose 154 973,75 toneladas de caña y produciéndose 239 525 quintales de azúcar en 136 días; la capacidad instalada en esa época era de 3 500 ton/día. Actualmente tiene una capacidad instalada de 20 000 ton/día.

En 1993, comenzó a operar la refinería, diseñada para elaborar azúcar refinada de alta calidad, partiendo de azúcar blanca sulfatada, con capacidad de 500 toneladas de azúcar por día.

En el área de Cogeneración, el Ingenio Santa Ana produjo su propia energía eléctrica desde el comienzo de sus operaciones. En efecto, desde 1969 contó con una potencia instalada de 3 500 kW, hoy en día la capacidad instalada es de 120 MW.

Las operaciones de corte de caña, se iniciaron en el período 1977/1978. Se empleaban 1 200 cortadores para cortar 1 000 toneladas de caña diarias, con machete convencional. Hace 10 años, se inició el programa de capacitación permanente para el corte de caña con machete australiano, habiéndose incrementado la eficiencia en el corte, la calidad de producto final y los ingresos de los cortadores. Así también, se construyeron módulos habitacionales con todas las comodidades para albergar a los cortadores de cuadrilla, procedentes del altiplano guatemalteco, a los cuales se proporciona alimentación abundante en proteínas, complementada con sales de rehidratación oral.

En 1996, Santa Ana avanzó significativamente en sus planes estratégicos, al desarrollar una de las fábricas más eficientes, lo cual logró colocando mayor capacidad instalada con equipo de alta tecnología, ello apoyado por un proyecto de automatización industrial único en Centro América, alcanzando en las últimas zafas producciones récord de 7 000 000 de quintales de azúcar.

### **1.1.2. Visión**

Actualmente la visión del Ingenio Santa Ana está redactada como sigue:

“Ser el equipo líder por excelencia en la administración estratégica de la agroindustria azucarera, competitivo en el contexto empresarial que demanda el siglo XXI, a través de un alto grado de tecnificación en todas nuestras áreas y un equipo humano motivado, desarrollado y visionario que consolide como un

grupo de clase mundial; superándonos permanentemente por medio del mejoramiento continuo, con participación activa a todo nivel, sirviendo de modelo a otras empresas de Guatemala y Centro América para proyectarse al mundo”.

### **1.1.3. Misión**

La misión del Ingenio Santa Ana se encuentra redactada de la siguiente manera:

“Somos un grupo corporativo visionario, comprometido con el progreso y bienestar de Guatemala, dedicado a producir eficientemente bienes y servicios de óptima calidad, derivados de la caña de azúcar, por medio del desarrollo de los recursos humanos y tecnológicos para satisfacer las necesidades de nuestros clientes nacionales e internacionales”.

### **1.1.4. Estructura organizacional**

Como empresa, Grupo Corporativo Santa Ana S. A. está dirigido por una Junta Directiva, se estructura en siete divisiones incluyendo el *staff* de la Gerencia General. Está representada por un organigrama tipo funcional dado que tiene una mejor representación administrativa, como la figura 1 donde se observa el de la división industrial.

- Gerencia General

El gerente general es responsable de dirigir, planificar, coordinar, supervisar, controlar y evaluar las actividades de la gestión técnica y administrativa de las gerencias de división e impartir las instrucciones para la

ejecución de las funciones correspondientes, además de definir e interpretar las políticas establecidas por la dirección. El correcto desempeño de estas obligaciones requiere de un conocimiento funcional de todas las fases de la operación de la empresa y una buena comunicación con sus subordinados.

- División de Recursos Humanos

Su misión es satisfacer en forma eficaz los requerimientos del Recurso Humano adecuado mediante técnicas y procedimientos actualizados, propiciando las condiciones óptimas para su desarrollo personal y dentro de la empresa, con el propósito de lograr la mayor eficiencia del Grupo Corporativo.

- División Agrícola y Servicios

Es un equipo multidisciplinario, cuyo compromiso fundamental es el aprovechamiento integral sostenible de los recursos naturales, para el cultivo de caña de azúcar, servicios de cosecha, taller y transporte.

- División Administrativa

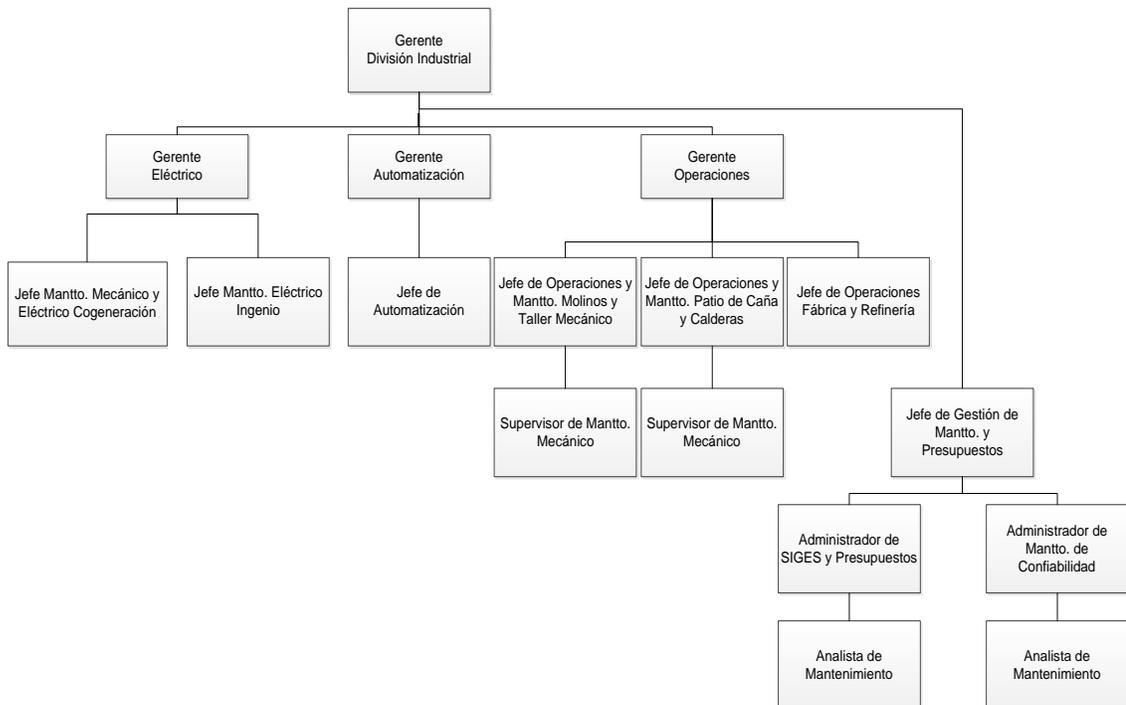
Es una división completamente de servicio, comprometida con todas las divisiones de la corporación, a quienes asiste en sus necesidades en forma eficiente y oportuna, a través de una organización adecuada, utilizando recurso humano capacitado y tecnología para satisfacer a sus clientes.

- División Industrial

Se ocupa de la transformación de la caña de azúcar y otros insumos en productos de óptima calidad, administrando los recursos humanos, físicos y

tecnológicos para satisfacer las necesidades de los clientes nacionales e internacionales.

Figura 1. Organigrama División Industrial



Fuente: Departamento de Gestión de Mantenimiento y Presupuestos.

- División de Informática

Es una organización estratégica que proporciona soluciones relacionadas con la planificación, comunicaciones, tecnología de la información, automatizaciones industriales y control de proceso para optimizar la producción y administración, mejorando la competitividad de los clientes internos, desarrollando la cultura de cambio permanente y los recursos humanos, utilizándolos eficaz y eficientemente.

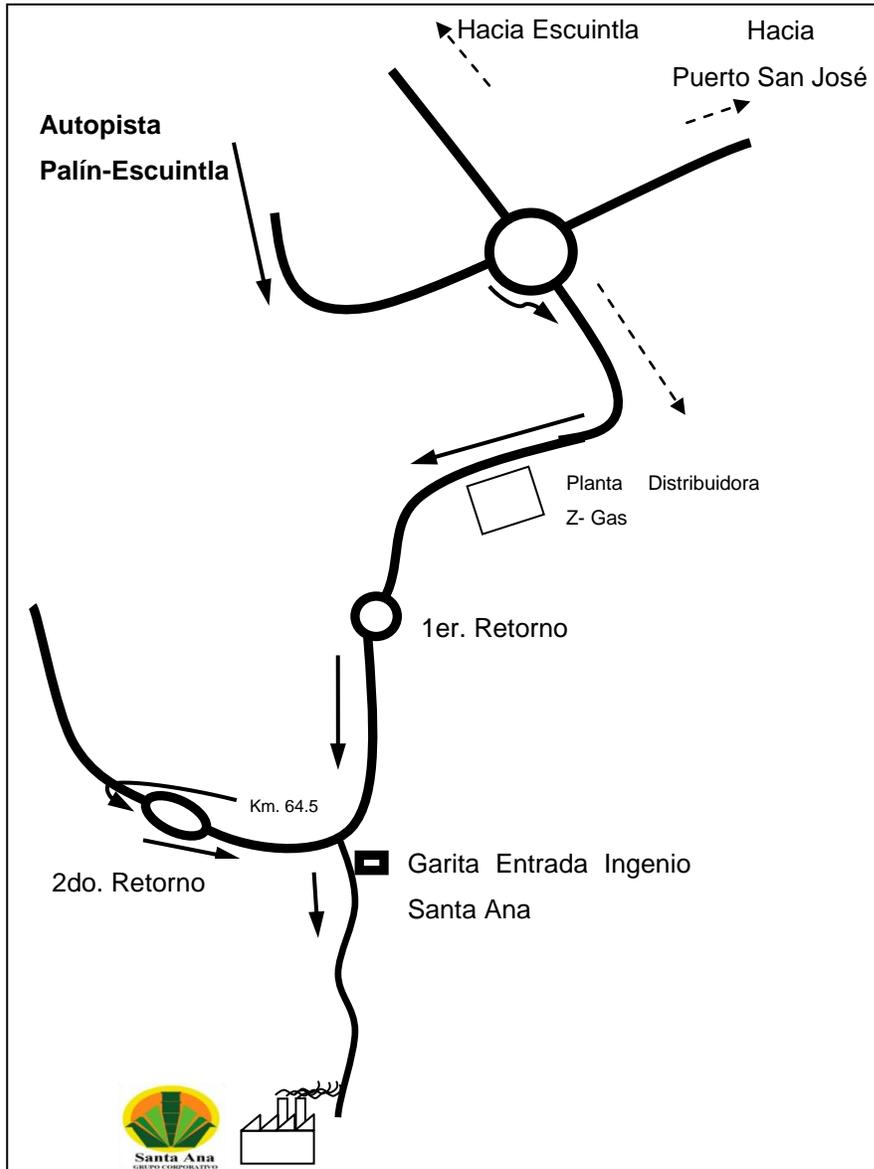
- División Financiera

Se encarga de la adecuada administración de los recursos financieros, para la ejecución del proceso productivo, del funcionamiento e inversión, generando información financiera confiable y oportuna, a través del desarrollo de recurso humano, de procedimientos y tecnología actualizada, para la adecuada toma de decisiones de la administración del grupo de empresas del Grupo Corporativo Santa Ana S. A., así como para otros usuarios que permita coadyuvar al logro del objetivo general de la organización.

#### **1.1.5. Ubicación**

Grupo Corporativo Santa Ana S. A. posee sus oficinas operativas donde se ubica el Ingenio Santa Ana en el km. 64,5 carretera a Santa Lucía Cotzumalguapa, en el interior de la finca Cerritos, departamento de Escuintla.

Figura 2. Mapa de la ubicación de la empresa



Fuente: Ingenio Santa Ana.



## **2. FASE DE INVESTIGACIÓN: ASPECTOS GENERALES Y MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Situación actual de la empresa**

El mantenimiento predictivo mediante la utilización de diversas técnicas, es poco utilizado en las empresas por varias razones, entre ellas el alto costo de adquisición de equipos y la falta de personal calificado. Actualmente el Ingenio Santa Ana cuenta con varios equipos para este tipo de análisis, tales como cámara de termografía infrarroja, equipo de ultrasonido aéreo, estructural y ecopulso, y analizadores de vibraciones mecánicas, entre otros, así como ingenieros certificados en análisis de vibraciones, ultrasonido y termografía. Sin embargo, aún no se cuenta con un departamento que se haga cargo específicamente de este tipo de mantenimiento y sus respectivos análisis, así como de rutas que faciliten la toma de mediciones para el control de los equipos establecidos.

### **2.2. Mantenimiento**

Se puede definir mantenimiento como una combinación de actividades mediante las cuales un equipo o un sistema se mantiene en, o se restablece a, un estado en el que puede realizar las funciones designadas. El papel del mantenimiento no debe ser encontrar la falla de la maquinaria, sino prevenir la falla, esto con el objetivo de maximizar la productividad, optimizar el rendimiento de la máquina y brindar un ambiente de seguridad.

En cualquier caso el personal de mantenimiento es el responsable de la conservación de la maquinaria o equipo, pues su labor está enfocada en que no se pierda el servicio que esta preste. No se trata únicamente de conservar y prevenir fallas, maximizando la vida útil de los equipos, sino que estos garanticen un retorno de inversión.

Para lograr que el personal de mantenimiento tenga bases firmes en las cuales basarse, es necesario establecer políticas que indiquen como actuar en cada caso presentado, de manera que se pueda sistematizar el trabajo, obteniendo simplificación y aumento en el rendimiento.

De acuerdo a la naturaleza y objetivos que se pretende alcanzar, el mantenimiento se puede clasificar en distintos tipos.

### **2.2.1. Mantenimiento correctivo**

El mantenimiento correctivo se encarga, no solo de sustituir la pieza que ocasionó el desperfecto, sino además identifica las causas que originaron la falla en la pieza, evaluando si es necesario reemplazarla por otra que se ajuste mejor a las exigencias del ritmo de trabajo y condiciones de operación de la unidad. El mantenimiento correctivo es el que ocasiona los mayores costos de operación dentro de una empresa.

Las fallas de la maquinaria se pueden originar por varias razones, entre las principales están la máquina o equipo mismo, el personal que la interviene y el ambiente circundante.

Con respecto al equipo, depende de sus propiedades inherentes, mecánicas, eléctricas, químicas, la calidad de los materiales y el fabricante. El

personal se convierte en una fuente de falla cuando sus habilidades y técnicas de aplicación son de baja calidad. Cuando el ambiente circundante es agresivo a la máquina, se torna en fuente de falla y resulta necesario brindar un ambiente que no afecte al equipo.

#### **2.2.1.1. Mantenimiento correctivo de emergencia**

Es el tipo de mantenimiento en que las fallas no se pueden predecir, obligando a actuar con la mayor rapidez posible para superar fallas producidas, evitar costos y daños materiales y humanos. Como mayor problema se tiene lo repentino que este puede ser y el no contar con repuestos en inventario conllevaría a pérdidas económicas mayores.

#### **2.2.1.2. Mantenimiento correctivo programado**

Se realizan planes para este tipo de mantenimiento únicamente a corto plazo. Para saber qué hacer, es recomendable contar con procedimientos, así como con los recursos necesarios para realizar correctamente la reparación. Este tipo de mantenimiento es común hacerse en fines de semana, en tiempos de producción baja y, en los ingenios azucareros, en la época de reparación.

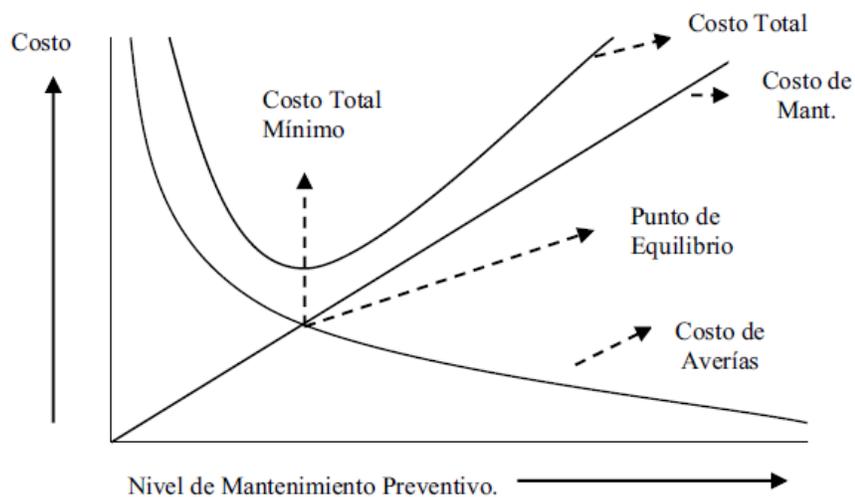
### **2.2.2. Mantenimiento preventivo**

El mantenimiento preventivo se define como el conjunto de actividades planeadas y programadas con base en una frecuencia, para prevenir y prolongar la vida útil de un equipo y sus componentes, antes que se presente la falla.

Su función es conocer sistemáticamente el estado de máquinas e instalaciones, para programar en los momentos más oportunos y de menos impacto en la producción, las acciones que tratarán de eliminar las averías que originan las interrupciones, teniendo como finalidad impedir que se presenten averías y reducirlas al mínimo, tomando para ello el tiempo necesario para la inspección de la maquinaria, el cambio de repuestos y la aplicación correcta y constante de lubricantes.

El mantenimiento preventivo consiste básicamente en la serie de trabajos a desarrollar en la maquinaria y equipo, para evitar interrupciones en el servicio que proporciona. Estos trabajos generalmente son tomados de manuales de fabricantes, puesto que dan los puntos de los equipos a los cuales hay que prestarles mayor atención.

Figura 3. **Curva de relación de costos de mantenimiento**



Fuente: GAITHER, Norman. *Administración de producción y operaciones*. p. 741.

Con el objetivo de reducir las averías, los encargados del mantenimiento preventivo pueden llegar a tal punto que su costo exceda al de las averías. El ingeniero encargado de dicho mantenimiento, debe determinar el punto de equilibrio entre costos de averías y mantenimiento preventivo. Esta relación puede observarse en la figura anterior.

Obsérvese que si bien se puede agregar o suprimir mantenimiento preventivo; de lo cual resulta una curva de costo de mantenimiento aproximadamente lineal, al aumentar los costos de mantenimiento preventivo, la magnitud de la reducción de costos por avería disminuye rápidamente y su curva es asintótica a la de mantenimiento preventivo.

### **2.2.3. Mantenimiento predictivo**

Este tipo de mantenimiento se define como el conjunto de actividades de monitoreo periódico de la maquinaria y sus componentes; con la finalidad de conocer su estado y poder predecir problemas potenciales o fallas que los equipos emiten al exterior a través de pruebas no destructivas y equipos de diagnóstico de alta tecnología, logrando con estos determinar cuando debería realizarse acciones correctivas. Se aplica a equipos críticos, donde el monitoreo sea confiable y económico.

Es importante resaltar que debido al desgaste al que se encuentran sometidos los equipos, las fallas son algo inevitable. Sin embargo se puede predecir el momento oportuno para realizar acciones de prevención o corrección, dependiendo la gravedad de la misma.

Algunos de los beneficios son:

- No influye en la disponibilidad de la maquinaria
- Predecir fallas futuras que pueden ocasionar paros no programados
- Mantenimiento preventivo más confiable
- Controlar la vida útil del equipo a través de historiales

Inconvenientes:

- Requiere personal mejor formado e instrumentación de análisis costosa.
- Se puede presentar averías en el intervalo de tiempo comprendido entre dos medidas consecutivas.

Aplicaciones:

- Maquinaria rotativa
- Motores eléctricos
- Equipos estáticos
- Aparatación eléctrica
- Instrumentación

El mantenimiento predictivo debe estar debidamente documentado, con procedimientos, personal capacitado y plenamente definida su aplicación, tanto los equipos como los costos que implica el desarrollo de sus actividades.

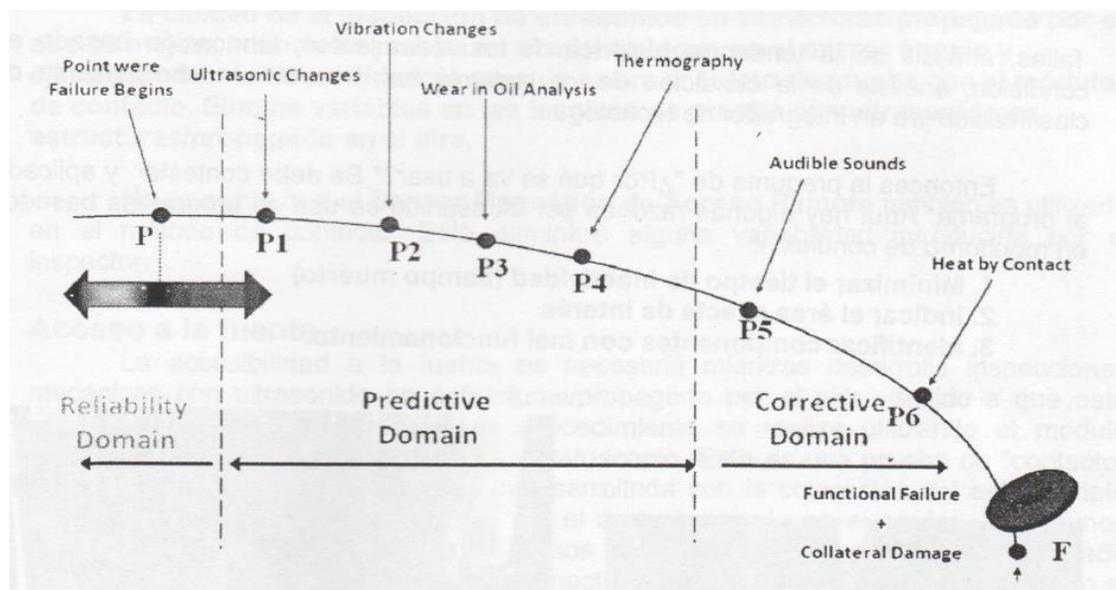
Su implementación está regida por un paso a paso definido que, a modo general, se compone de:

- Determinación de los equipos críticos.

- Determinación de técnicas de inspección.
- Definición de las rutinas predictivas y su frecuencia.
- Capacitación del personal técnico.
- Creación de historiales en sistemas computarizados.
- Inicio y seguimiento de la ejecución y resultados de las rutinas.
- Medición de indicadores del proceso y mejora con base en retroalimentación de resultados.
- Costos de la matriz de predictivo.

Básicamente se trata de la aplicación de técnicas de inspección que buscan definir la tendencia operacional de un equipo, bien sea a través de la extrapolación o el resultado de la toma de datos por medio del monitoreo de diferentes variables.

Figura 4. **Curva de evolución de fallas P-F**



Fuente: UE SYSTEM. *Ultrasonido propagado en el aire y estructuras*. p. 139.

La mejor forma de representar la evolución de las fallas en un equipo en general es por medio de la curva P-F, la cual también indica el momento en el que se aplica cada uno de los tipos de mantenimiento.

De esta forma se comprende que al inicio de cualquier falla, se presentan síntomas tan leves que son imperceptibles por el humano, las cuales se puede detectar fácilmente mediante algunas técnicas predictivas. Al no tener implementado el mantenimiento predictivo, la falla del equipo evoluciona y se hace perceptible, los operadores comienzan a percibir ruido o que el equipo se caliente más de la cuenta, entre otros síntomas.

#### **2.2.4. Ventajas del mantenimiento predictivo en la industria azucarera**

Tomando en cuenta lo costoso que resultan los paros no programados de la maquinaria, dando como resultado reducción en el tiempo y cantidad de producción, al implementar un programa de mantenimiento predictivo y crear un departamento que dé seguimiento al mismo, es posible obtener una reducción en los costos de operación, al minimizar las reparaciones no programadas.

Es importante mencionar que el rendimiento en la época de zafra depende en gran parte del mantenimiento que se realice en la maquinaria y equipos durante la época de reparación, la calidad del mismo tiene una relación directa con el producto final, por lo que un plan de mantenimiento predictivo reducirá tiempos improductivos, aumenta el tiempo de la vida útil y mejorará la calidad del azúcar.

## **2.2.5. Técnicas de mantenimiento predictivo a implementar en la empresa**

Existen diversas técnicas de análisis predictivo, sin embargo, se propone para la creación del Departamento de Confiabilidad iniciar con tres de estas, las cuales son: ultrasonido aéreoestructural, análisis de vibraciones y termografía infrarroja.

### **2.2.5.1. Técnica de análisis por medio de ultrasonido**

El ultrasonido se define como una vibración mecánica con un rango mayor al audible por el oído humano que se transmite a través de un medio físico y es orientado, registrado y medido en hertz con un instrumento creado para ese fin. Según la curva P-F vista anteriormente y tomando en cuenta únicamente las tres técnicas a utilizar, se logra observar que es el primer punto en el que ocurre una falla incipiente, lo cual debe ser aprovechado para evitar que ocurra un daño grave en el equipo.

- Principio físico

El sonido está conformado por un conjunto de ondas longitudinales que son producidas debido a vibración de los objetos y propagadas a través de un medio, siendo estos sólido, líquido y gaseoso, viajando la onda más rápido en los sólidos que en los líquidos y más rápido en los líquidos que en los gases.

Las características de una onda ultrasónica son:

- Ciclo: movimiento completo de una onda

- Longitud: es la distancia necesaria para completar un ciclo
- Amplitud: valor máximo que alcanza la onda en sentido positivo y negativo
- Frecuencia: es el número de ciclos realizados en un tiempo determinado

El sonido se divide en tres rangos como se muestra a continuación:

Tabla I. **Rangos de sonido**

<b>RANGOS DE SONIDO</b>	
Infrasónica	1 - 16 Hz
Audible	16 - 20 kHz
Ultrasónica	20 kHz en adelante

Fuente: UE SYSTEM. *Ultrasonido propagado en el aire y estructuras*. p. 27.

El método de ultrasonido en la ingeniería, utilizado para el ensayo de los materiales, es una técnica de ensayo no destructivo y tiene diversas aplicaciones, en especial para conocer el interior de un material o sus componentes según la trayectoria de las ondas sonoras. Al procesar las señales de las ondas sonoras se conoce el comportamiento de las mismas durante su propagación en el interior de la pieza y que depende de las discontinuidades del material examinado, lo que permite evaluar aquella discontinuidad acerca de su forma, tamaño, orientación, debido que dicha discontinuidad opone resistencia al paso de una onda.

### 2.2.5.1.1. Aplicaciones de la técnica de ultrasonido

La técnica del ultrasonido permite detectar:

- Fricción en máquinas rotativas
- Fallas y fugas en válvula
- Fugas de fluidos
- Fallas mecánicas y de rodamientos
- Arco eléctrico
- Efecto corona

Para detectar de mejor forma los fallos anteriores se recomienda utilizar la siguiente tabla, tomando en cuenta que es solo un punto de partida, ya que el ajuste de frecuencia puede variar para escuchar adecuadamente el sonido o filtrar sonidos en competencia.

Tabla II. **Frecuencias centrales para detectar fallos ultrasónicos**

<b>Propagado en el aire:</b>	
Eléctrico/Fugas	40 kHz
<b>Propagado en estructuras:</b>	
Baleros/Mecánico	30 kHz
Válvulas, Trampas de vapor	25 kHz
Fugas subterráneas, paredes	20 kHz

Fuente: UE SYSTEM. *Ultrasonido propagado en el aire y estructuras*. p. 27.

El sonido que se encuentra por encima de la captación del oído humano se considera ultrasonido. Casi todas las fricciones mecánicas, arcos eléctricos y

fugas de presión o vacío producen ultrasonidos en un rango aproximado a los 40 kHz. Estas son frecuencias con características muy aprovechables en el mantenimiento predictivo, puesto que las ondas sonoras son de corta longitud, atenuándose rápidamente sin producir rebotes. Por esta razón, el ruido ambiental por más intenso que sea, no interfiere en la detección del ultrasonido.

Parámetros que deben ser controlados en un sistema ultrasónico:

- Sensibilidad: es la capacidad de un transductor para detectar discontinuidades pequeñas.
- Resolución: es la capacidad del equipo detector de ultrasonido de separar por frecuencia y sensibilidad dos o más frecuencias relacionadas para evaluar sonidos de interés.
- Frecuencia central: es la frecuencia específica que deben utilizar los transductores para obtener una aplicación óptima.
- Reflexión: cantidad de energía ultrasónica que es reflejada a un ángulo igual al de la onda incidente.
- Absorción: es la disminución fraccional de la intensidad transmitida por unidad de espesor de absorbencia. Es esencialmente como una esponja donde el medio absorbe el sonido.
- Dispersión: es el esparcimiento de las ondas ultrasónicas en un medio debido a causas distintas de la absorción.
- Atenuación: es un término utilizado para describir la pérdida de energía. Cuanto más lejos se está de la fuente de sonido, menor sonido se escuchará.
- Decibel: es la unidad práctica de los niveles de intensidad relativa de los sonidos audibles.

La aplicación de la técnica de ultrasonido se hace indispensable, especialmente en la detección de defectos existentes en equipos rotativos, que giran a velocidades inferiores a los 300 rpm, donde la técnica de medición de vibraciones se transforma en un procedimiento menos eficiente.

#### **2.2.5.1.2. Ultrasonido para monitoreo de rodamientos**

La inspección ultrasónica en el monitoreo de rodamientos es el método más fiable para la detección de fallos incipientes. Esta inspección es útil reconociendo inicios de fallo por fatiga, condiciones de falla y problemas de lubricación. Para lograr el objetivo de alargar la vida útil de los equipos mecánicos, en este caso los rodamientos, se pueden realizar cuatro métodos de inspección, que pueden ser tan sencillos como dirigirse directamente al punto donde se sospecha de la existencia de una anomalía, así como determinar la tendencia de un grupo específico de equipos críticos y observarlos detenidamente, lubricarlos cuando sea necesario y tomar acciones pertinentes cuando muestre signos de inicios de falla. Los métodos son los siguientes:

- **Calidad sonora:** permite determinar si el rodamiento está en buen estado, en una etapa temprana de fallo o si este ya falló, identificando el sonido que este genera por medio de la intensidad, indicada en decibeles (dB). Para esto es muy importante entender el funcionamiento del equipo mecánico.
- **Comparativo:** comparando piezas con características similares tanto mecánicas como de operación, se puede dar cuenta cual debería ser el sonido normal del equipo y así poder identificar las anomalías o fallas.

- Tendencia histórica: este método se lleva a cabo mediante lecturas en el tiempo y estableciendo una línea base para un equipo, logrando así determinar si el rodamiento se encuentra en buen estado, necesita lubricación y cuál es su etapa de falla. Este método es muy importante si se pretende desarrollar un programa de lubricación basado en condición.
- Análisis con software: se pueden identificar anomalías grabando los sonidos y utilizando un programa de análisis espectral.

#### **2.2.5.2. Técnica de análisis de vibraciones mecánicas**

Una máquina ideal no produciría vibraciones, ya que toda la energía producida se emplearía en el trabajo específico a realizar. En la práctica, esto no suele suceder, sino que se producen vibraciones a causa de los diversos mecanismos involucrados. Los elementos de la máquina reaccionan entre sí, transmitiéndose fuerzas por toda la estructura del equipo hasta disipar dicha energía en forma de vibraciones.

Las vibraciones son causadas por fuerzas de excitación internas y externas, las cuales dependen sobre todo del estado de la máquina.

Las vibraciones mecánicas son transmitidas por medio de bases y estructuras, lo que causa fatiga en elementos mecánicos y vibraciones moduladas en el entorno. La severidad sobre los sistemas o equipos conlleva a condiciones críticas e inestables.

En el mantenimiento predictivo por medio de la técnica de análisis de vibraciones se estudia la evolución en el tiempo del comportamiento de los

equipos, lo cual ayuda a detectar las causas del exceso de vibración y programar acciones correctivas.

Figura 5. **Ventilador Over Fire 1 caldera 4**



Fuente: Ingenio Santa Ana.

En la figura anterior se muestra un ventilador colocado en voladizo, acoplado a un motor eléctrico que se encarga de brindar el movimiento. Ambos equipos generan vibraciones mecánicas que pueden provocar daños en sí mismos y en equipos aledaños, por lo que llevar un control adecuado es de gran utilidad.

Muchos factores influyen para obtener bajos niveles de vibración, como un buen diseño, montaje, calidad del equipo. Sin embargo, en la medida que se vayan deteriorando aparecerán ciertos cambios en sus propiedades dinámicas. Las holguras mecánicas aumentan, los ejes se desalinean, los rotores se desbalancean y los cojinetes se desgastan. Todo esto ocurre a distintas frecuencias de rotación, lo que hace necesario utilizar equipo de alta tecnología para determinar su causa raíz.



- Amplitud de la vibración: desplazamiento que tiene un cuerpo desde su posición de equilibrio.
- Frecuencia de vibración: es el número de ciclos que realiza un cuerpo por unidad de tiempo.
- Ciclo o período: es el tiempo entre puntos repetitivos en una onda periódica.

#### **2.2.5.2.2. Componentes de una señal de vibración**

Las señales de vibraciones en una máquina son la suma de diferentes señales generadas por su respectiva fuente de excitación, las que se presentan como una sola señal. Sin embargo, el análisis de vibraciones pretende separar el conjunto de señales en sus componentes más importantes. Para ello existen dos formas de visualizar dichas señales en un equipo en general:

- Dominio del tiempo

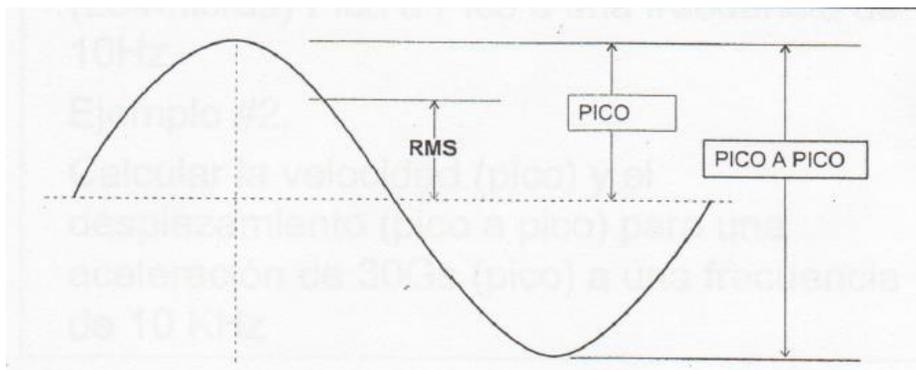
Esta visualización resulta muy útil al analizar señales impulsivas, como señales originadas en baleros y para las relaciones de fase de las señales.

Se dificulta este tipo de visualización cuando existe más de un componente en una señal de vibración, pues su representación amplitud vs. tiempo no permite observar dos señales por separado, sino únicamente la superposición de ambas.

En la gráfica del dominio del tiempo, las variables utilizadas para definir la señal son las siguientes:

- Pico: valor máximo de la amplitud en dirección positiva o negativa.
- Pico-Pico: es la distancia que existe desde un pico negativo hasta otro positivo.
- RMS (Root Mean Square): es el valor medio efectivo de una medición de vibración.

Figura 7. **Componentes de un movimiento armónico simple en dominio del tiempo**

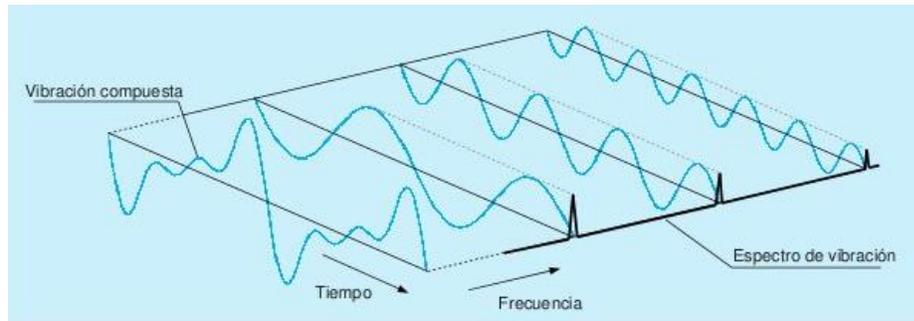


Fuente: MIRANDA, Carlos. *Análisis de vibraciones nivel 1*. p. 24.

- Dominio de frecuencia

Es la representación gráfica de una señal de vibración en tres dimensiones, cuyos ejes de análisis son: amplitud, tiempo y frecuencia.

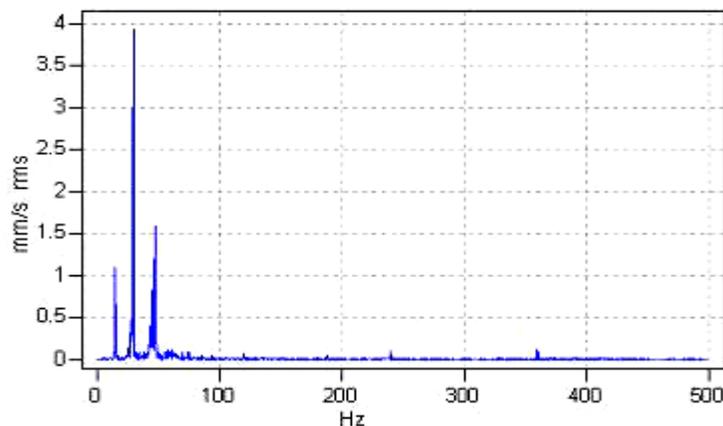
Figura 8. **Señal de vibración en tres dimensiones**



Fuente: *Transformada de Fourier*. [www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/fundamentos/transformada\\_fourier.html](http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/fundamentos/transformada_fourier.html). Consulta: 21 de febrero de 2015.

Para un gráfico en dos dimensiones amplitud vs. frecuencia, se muestra los picos máximos de la señal de vibración, la cual lleva el nombre de espectros de vibraciones.

Figura 9. **Espectro de una señal de vibración**



Fuente: *Análisis vibrodinámico de motores eléctricos*.  
[www.scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-59442010000100002](http://www.scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59442010000100002). Consulta: 22 de febrero de 2015.

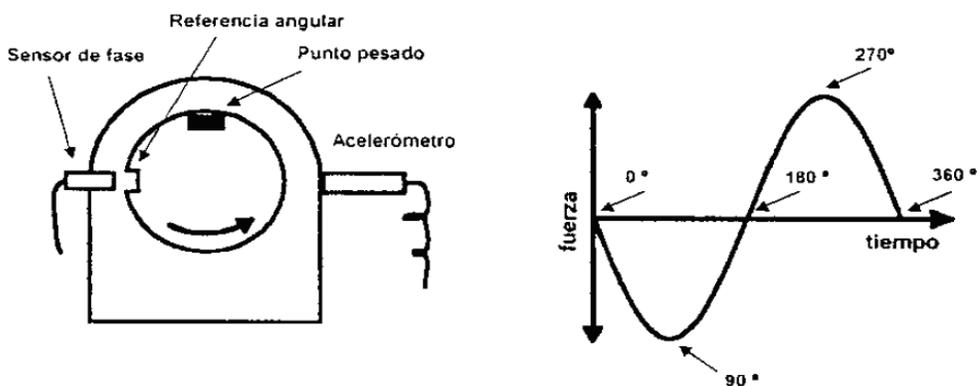
Este gráfico es el de mayor interés, pues muestra tanto la magnitud de la vibración (amplitud) así como la frecuencia a la cual ocurre. A través del método de análisis de espectros de vibraciones se puede determinar causas-raíz de problemas en equipos de forma más precisa.

- Ángulo de fase:

Su función es proveer información sobre como una parte de la máquina está vibrando con respecto de la otra. La fase indica la diferencia angular entre una marca establecida en el eje de rotación y la señal de vibración.

Cuando se mide el ángulo de fase en dos posiciones de la máquina, y se analiza la relación entre las mismas, se toma conocimiento de cómo se mueve el rotor. Dicha información es muy útil para determinar la causa de la vibración, debido a que algunos problemas producen relaciones de fase específicas.

Figura 10. **Representación del ángulo de fase**



Fuente: MIRANDA, Carlos. *Análisis de vibraciones nivel 1*. p. 63.

#### **2.2.5.2.3. Unidades de medición de vibraciones mecánicas**

- Desplazamiento: representa la distancia y es utilizada preferentemente en máquinas de baja velocidad. Sus unidades de medición son: mils (0,001 pulg.) y micrones (0,0001 cm).
- Velocidad: es la unidad más utilizada para la evaluación de máquinas de media velocidad. Sus unidades de medición son: pulg/s y mm/s.
- Aceleración: es la relación de cambio de velocidad. Es la unidad de medición más utilizada para evaluar altas frecuencias. Sus unidades de medición son G (1G=gravedad), pulg/s<sup>2</sup> y mm/s<sup>2</sup>.

#### **2.2.5.2.4. Problemas comunes de vibraciones mecánicas**

Son muchas las causas por las cuales se producen vibraciones mecánicas en los equipos, dependiendo de las características de estos y otros factores. Siendo las más comunes las citadas a continuación.

- Desbalance
- Desalineación
- Flojedad mecánica
- Fallas en rodamientos

Cada uno de estos problemas presenta características específicas, que pueden observarse y detectarse mediante el análisis espectral para poder llegar a la conclusión correcta.

### **2.2.5.3. Técnica de análisis por medio de termografía infrarroja**

Todo alrededor, incluso el propio cuerpo, emite constantemente energía térmica al medio ambiente. Esta energía invisible es emitida en la forma de energía radiante infrarroja.

Cuando un objeto se calienta, este va a irradiar más y más energía térmica desde su superficie, entonces se puede sentir esta radiación infrarroja. Sin embargo, nunca se podrá ver sin la ayuda de algún tipo de instrumento de medición de energía infrarroja.

En la industria la temperatura es el parámetro o variable de medición usado con más frecuencia, ya que proporciona una excelente indicación de la condición de un objeto. La temperatura es un factor relacionado con casi todos los procesos, equipos o sistemas eléctricos y mecánicos.

La medida de un objeto, puede ser adquirida por métodos de contacto o no contacto. En muchas ocasiones, es conveniente hacer registros de no contacto, ya sea por razones de seguridad, por limitaciones de acceso al objeto o por simplicidad.

La termografía es una técnica de no contacto para la determinación de la temperatura aparente de un cuerpo y se basa en la medición de la radiación en el espectro infrarrojo del objeto en estudio, para ello se utilizan sistemas con imágenes térmicas, en este caso la cámara termográfica.

La cámara termográfica registra la intensidad de la radiación y la convierte en una imagen visible.

### **2.2.5.3.1. Transferencia de calor**

Cuando existe una diferencia de temperatura entre dos objetos, o cuando un objeto cambia de temperatura, la energía calórica se transfiere de las áreas más calientes a las menos calientes hasta que se alcanza el equilibrio térmico.

La energía se puede transferir de tres formas: conducción, convección y radiación.

- **Conducción**

Es el proceso por el cual el calor fluye de una región de alta temperatura a una región de baja temperatura a través de un medio o en diferentes medios en contacto físico directo.

- **Convección**

Es el método primario por el cual el calor se mueve a través de un fluido, y se da entre líquido-gas, gas-sólido, líquido-sólido, siempre y cuando exista un gradiente de temperatura. Difiere de la conducción en el sentido que el fluido no solamente transfiere el calor por contacto sino por el desplazamiento entre sus propias moléculas, es decir se revuelven internamente sus zonas de alta y baja temperatura.

- **Radiación**

La radiación térmica es la radiación electromagnética emitida por un objeto como resultado de su temperatura y no requiere presencia de material y es estrictamente un fenómeno de superficie. La radiación térmica es el modo de

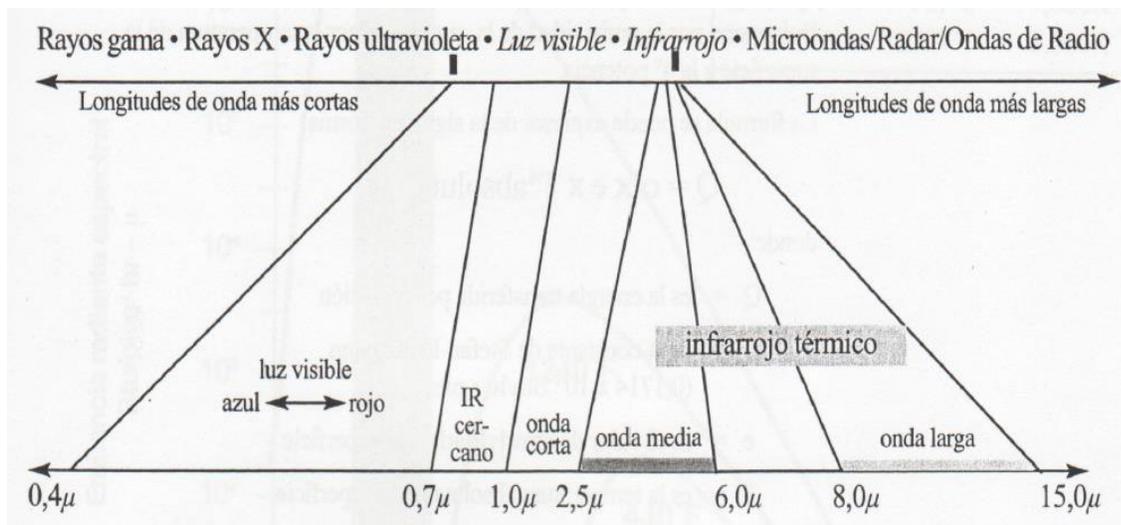
transferencia de calor más interesante, dada la forma en que se pueden observar los fenómenos térmicos.

Las diversas formas de radiación electromagnética y su relación entre sí se pueden mostrar en el espectro electromagnético.

La energía infrarroja es parte del espectro electromagnético, viaja a la velocidad de la luz y puede reaccionar en un objeto de tres maneras distintas:

- Transmisión: la radiación pasa a través del objeto sin crear reacción alguna.
- Reflexión: la radiación rebota en la superficie y en este caso, reacciona con el objeto.
- Absorción: el objeto absorbe la energía y produce efecto sobre este.

Figura 11. **Espectro electromagnético**



Fuente: Snell Group. *Aplicaciones de la termografía infrarroja*. p. 3-25.

Algo importante de considerar es que los instrumentos de imágenes térmicas no miden temperaturas, lo que miden los equipos infrarrojos es energía térmica irradiada y convierte dicha información en valores de temperatura aparente.

#### **2.2.5.3.2. Emisividad**

La emisividad es la propiedad de un material que describe su capacidad de irradiar energía comparándolo con un cuerpo negro con la misma temperatura.

La emisividad es por lo tanto una expresión de la capacidad de un objeto a emitir energía infrarroja.

La emisividad de un material que se está inspeccionando, depende de varios factores, tales como:

- Tipo de material
- Acabado de la superficie del material
- Niveles de temperatura del material
- Longitud de onda

Los valores de emisividad varían de un material a otro, siendo los mejores radiadores de energía los que tienen un valor cercano a la unidad y los peores los que tienen un valor cercano a cero.

Cuando se tenga un material cuya emisividad sea muy baja o el acabado superficial esté muy brillante o simplemente no se pueda detectar de forma

correcta la energía irradiada, es recomendable colocar un aislante negro y permitir que este alcance la temperatura del resto del objeto en estudio.

A continuación se detalla algunos ejemplos:

Tabla III. **Emisividad de materiales**

<b>Emisividad de algunos materiales comunes</b>	
Piel humana	0,98
Cinta aisladora o cinta de electricista	0,94
Pintura	0,90–0,95
Papel	0,90
Ladrillo	0,85
Agua	0,98
Nieve	0,98
Cobre (oxidado)	0,68
Cobre (pulido)	0,02
Aluminio (pulido)	0,05

Fuente: Snell Group. *Análisis de termografía infrarroja*. p. 3-39.

### **2.2.5.3.3. Aplicaciones de la termografía infrarroja**

- **Sistemas eléctricos**

Por medio de la técnica de análisis de termografía infrarroja se pueden inspeccionar componentes y sistemas eléctricos de todos los tamaños y formas,

y además, se pueden dividir en instalaciones de alta y baja tensión.

Fallas en sistemas de alta tensión que pueden ser detectadas:

- Oxidación de interruptores de alta tensión
- Conexiones recalentadas
- Conexiones mal aseguradas
- Defectos de aislamiento

Fallas en sistemas de baja tensión que pueden ser detectadas:

- Conexiones de alta resistencia
- Conexiones corroídas
- Daños internos en los fusibles
- Malas conexiones y daños internos

- **Sistemas mecánicos**

La temperatura en los sistemas mecánicos es de vital importancia. Rozamientos, fricciones, desalineamiento, entre otros, pueden producir temperaturas elevadas que acorte la vida útil de las máquinas y sistemas de transmisión, o incluso problemas más serios, como deformación de materiales.

Con ayuda de la termografía se puede reducir costos de mantenimiento y asimismo alargar la disponibilidad de las máquinas, ya que esta técnica permite inspeccionar las temperaturas de las diferentes partes de un sistema mecánico sin tener que detener el proceso.

Las principales aplicaciones de la termografía en sistemas mecánicos son:

- Análisis de rodamientos y poleas
- Diagnóstico de estado de cojinetes
- Desalineamiento
- Estado de lubricantes
- Inspección de soldadura
- Inspección en sistemas de vapor

Otras aplicaciones en las que la termografía infrarroja es una técnica muy utilizada son:

- Tuberías
- Instalaciones refractarias
- Detección de nivel de depósitos

### **2.3. Costos evitados por detección de falla por desbalance mecánico en bomba de inyección 1 caldera 6, caso práctico de análisis de vibraciones**

El desbalance como ya se mencionó, es uno de los problemas mecánicos más comunes en equipos rotativos, por lo que a continuación se realiza un análisis que demuestra lo rentable que es la técnica de análisis de vibraciones, aplicado por personal interno de la empresa.

El equipo mecánico al que se realiza el estudio, es una bomba centrífuga horizontal multietapas de inyección de agua de caldera. Para detectar alguna falla en este equipo, así como en cualquier equipo mecánico, es necesario

realizar mediciones periódicas, tanto toma de datos puntuales así como espectros para determinar la causa del exceso de vibración.

Los puntos de medición de mayor importancia en este caso, son el tres y el cuatro, que son los dos apoyos del eje de la bomba. Se realizaron mediciones antes y después de encontrar la falla con el fin de llevar un mejor control sobre el equipo. Las mediciones puntuales son las siguientes:

Tabla IV. **Datos de mediciones puntuales**

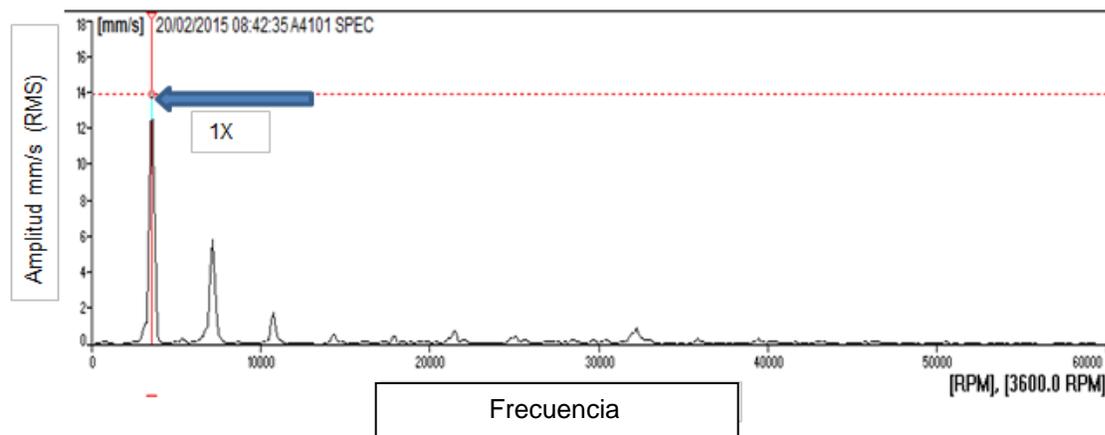
Fecha	Equipo	Punto Núm.	H
24/12/2014	Bomba alimentación 1 caldera 6	3	2,93
24/12/2014	Bomba alimentación 1 caldera 6	4	7,5
03/01/2015	Bomba alimentación 1 caldera 6	3	3,48
03/01/2015	Bomba alimentación 1 caldera 6	4	8,58
<b>20/02/2015</b>	<b>Bomba alimentación 1 caldera 6</b>	<b>3</b>	<b>12,5</b>
<b>20/02/2015</b>	<b>Bomba alimentación 1 caldera 6</b>	<b>4</b>	<b>31</b>
25/02/2015	Bomba alimentación 1 caldera 6	3	3,92
25/02/2015	Bomba alimentación 1 caldera 6	4	6,52
17/03/2015	Bomba alimentación 1 caldera 6	3	2,75
17/03/2015	Bomba alimentación 1 caldera 6	4	1,98

Fuente: elaboración propia.

Se puede observar en la tabla anterior los valores puntuales de vibración en los que se encontraba la bomba en estudio. En la fecha 20 de febrero, se observa como dichos valores suben abruptamente; sobre todo en el punto 4 llegando a 31 mm/s, valor que, según la tabla de severidad, indica que un daño grave puede estar ocurriendo en el equipo.

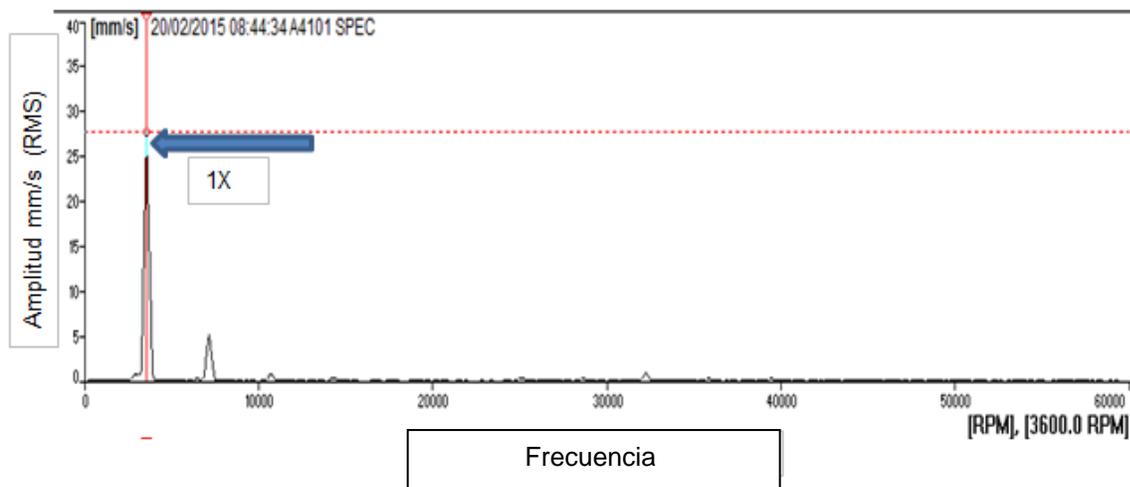
A continuación se tomaron los espectros respectivos, los cuales ayudan en la determinación de la causa raíz del exceso de vibración, con lo cual se puede proponer acciones correctivas para reducir el nivel de vibración.

Figura 12. **Punto 3H bomba 1 caldera 6**



Fuente: elaboración propia, con programa DDS.

Figura 13. **Punto 4H bomba 1 caldera 6**



Fuente: elaboración propia, con programa DDS.

Se logra observar mediante el análisis espectral que los valores que más afectan, se encuentran a la velocidad de giro de la bomba, motivo que aunado al análisis de fase realizado, que indicó estabilidad, conlleva a la conclusión que la causa del exceso de vibración es el desbalance mecánico.

Esta detección se logró antes que sucediera un daño catastrófico en el equipo, evitando así gastos mayores a los que se incurrieron.

De no corregirse el desbalance mecánico, se podría incurrir en una falla catastrófica con los siguientes costos:

- Rodamientos: Q 700,00.
- Eje de bomba nuevo: Q 20 000,00 hecho por personal interno.
- Anillos nuevos: Q 800,00 cada uno, hecho por personal interno. La bomba está compuesta por 8 anillos.
- Costo de mano de obra: Q 150,00 aproximadamente trabajando 2 personas, 1 mecánico especializado y 1 ayudante, durante 5 horas.

En cuanto al costo de la operación de detección realizada mediante análisis de vibraciones por personal interno, así como la intervención correctiva por personal externo, se tiene lo siguiente:

- Costo de análisis de vibraciones por personal experto: Q 300,00 por análisis, se realizaron 5 para el control adecuado.
- Costo por balanceo tercerizado: Q 4 000,00 depende de varios factores como empresa contratada y calificación de personal.
- Costo por transporte al punto de balanceo: Q 1 000,00 este valor depende del sitio de balanceo.

Tabla V. **Costos totales aproximados por corrección y no corrección de desbalance mecánico**

<b>Si se determina que es desbalance y se corrige</b>	
Ejecución	Valor
Costo de análisis de vibraciones	Q 1 500,00
Costo balanceo tercerizado	Q 4 000,00
Costo transporte	Q 1 000,00
<b>Total</b>	<b>Q 6 500,00</b>
<b>De no corregirse la falla</b>	
Ejecución	Valor
Rodamientos	Q 700,00
Eje nuevo	Q 20 000,00
Anillos de bronce nuevos	Q 6 400,00
<b>Total</b>	<b>Q 27 100,00</b>

Fuente: elaboración propia.

Con los datos de la tabla anterior se procede a realizar un análisis de retorno de inversión (ROI), de la siguiente manera:

$$\text{ROI} = (\text{ahorros} - \text{inversión}) / (\text{inversión})$$

$$\text{ROI} = (Q 27 100,00 - Q 6 500,00) / (Q 6 500,00) = 3,17$$

Los resultados obtenidos por costos de mantenimiento, sin contar costos improductivos ni mano de obra de personal operativo, demuestran que por cada Q 1,00 invertido en el análisis de vibraciones en la bomba de alimentación de agua de la caldera, se obtiene Q 3,17. Los datos utilizados para el análisis quedan sujetos a variables que afectan cada costo. Se utilizó costos promedios para la determinación del ROI.

### **3. FASE TÉCNICO PROFESIONAL (PASOS PARA LA CREACIÓN DEL DEPARTAMENTO DE CONFIABILIDAD Y PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA EQUIPOS CRÍTICOS)**

El objetivo principal de este capítulo es mostrar los pasos para la creación del Departamento de Confiabilidad, así como la implementación de un plan de mantenimiento predictivo para los equipos de consideración crítica en las diferentes áreas del Ingenio.

#### **3.1. Establecimiento de un plan de mantenimiento predictivo**

El objetivo primordial del mantenimiento predictivo es la medida y valoración periódica de una serie de variables de estado, lo cual implica el manejo de gran cantidad de datos que requieren medios para el almacenamiento y análisis, estos medios son:

- Físicos
- De gestión
- Humanos

Con medios físicos se hace referencia a los instrumentos de medición, captura y registro de datos. Los programas de gestión se encargan de manejar los datos capturados para la elaboración de informes y gráficos de evolución. Por último se tiene los medios humanos; incluye personal que realiza medidas rutinarias, que deben ser profesionales calificados, con conocimientos específicos del tipo de instrumentos a tratar.

Asimismo, la implantación requiere de ciertos pasos secuenciales:

## 1. Preparación inicial

Esta fase es primordial para llevar un control adecuado y sistematizado de los equipos, lo cual supone desarrollar las siguientes tareas:

- Definición del tipo de máquinas.
- Identificación, estudio de sus características y calificación de su importancia en el proceso productivo.
- Determinación de técnicas adecuadas de medición y parámetros.
- Estructurar la base de datos.
- Frecuencia de medición.
- Definición de rutas.
- Definición de alarmas para cada parámetro.
- Formación del personal involucrado.

## 2. Implantación propiamente dicha

Una vez se ha completado la preparación inicial, se debe llevar a cabo todas las medidas periódicas acordadas, con las rutas y frecuencias previstas, lo cual implica lo siguiente:

- Mediciones periódicas
- Registro de datos en el sistema o software establecido
- Establecimiento de niveles que indiquen un comportamiento anómalo
- Análisis y diagnóstico de anomalías

### 3. Revisión y análisis de resultados

Ya implantado el programa de mantenimiento predictivo, se debería llevar a cabo periódicamente un análisis crítico de los resultados obtenidos.

- Historial de medidas rutinarias y averías
- Análisis de resultados
- Cambio de niveles de alarma y frecuencias de medición de ser necesario

#### **3.1.1. Medios físicos**

Es indispensable, al implementar el mantenimiento predictivo, contar con instrumentos de medición de alta tecnología que permitan el correcto seguimiento y análisis del registro de datos. Los instrumentos a utilizar serán los que a continuación se describen:

##### **3.1.1.1. Instrumento de medición de ultrasonido**

El instrumento con el que se cuenta para análisis de ultrasonido es una pistola Ultraprobe 10000 (figura 14), que tiene varios accesorios los cuales mejoran la captura de datos y análisis de los mismos. Entre las características del equipo se puede mencionar las siguientes:

- Inspección en línea.
- Grabación de sonidos.
- Almacenamiento de información.
- Selección de aplicación: arco eléctrico, efecto corona, fugas en tuberías, trampas de vapor y problemas en rodamientos.

Se utilizará este equipo para llevar un control específicamente en rodamientos, para lograr el máximo tiempo de vida posible de estos elementos mecánicos.

Figura 14. **Pistola de ultrasonido Ultraprobe 10000**



Fuente: Ingenio Santa Ana.

Se ve en la figura anterior el instrumento de medición con sus accesorios, entre los que destaca el módulo de contacto, que es el adecuado para utilizar en la medición de los equipos mecánicos que cuenten con rodamientos.

### **3.1.1.2. Instrumentos de medición de vibraciones**

Siendo el análisis de vibraciones la técnica predictiva más utilizada en equipos rotativos, se ha logrado la creación de instrumentos cada vez más precisos, de mejor calidad y con más funciones. El ingenio Santa Ana posee para esta técnica analítica varios instrumentos, cada uno con algunas funciones

diferentes que el otro, pero todos cumplen con el objetivo primordial de medir la vibración mecánica causada o emitida por los equipos mecánicos.

El instrumento que por su facilidad de manejo se utilizará para mediciones puntuales es un Adash Vibrio 4900. Asimismo, se cuenta con el instrumento destinado a la toma de espectros mediante rutas definidas, según el equipo mecánico en estudio, siendo este el Adash 4101.

El más potente instrumento para la técnica de análisis de vibración es el Adash A4400 Va4Pro (figura 17), que será más utilizado para análisis en línea en el lugar donde esté ubicado el equipo mecánico.

Figura 15. **Instrumento de medición de vibraciones Adash Vibrio 4900**



Fuente: Ingenio Santa Ana.

Figura 16. **Instrumento de medición de vibraciones Adash 4101**



Fuente: Ingenio Santa Ana.

Figura 17. **Instrumento de medición de vibraciones Adash A4400  
Va4Pro**



Fuente: Ingenio Santa Ana.

Este último instrumento, permite entre otras cosas, conocer el comportamiento del equipo en el tiempo, balanceo dinámico con mucha facilidad, y cuenta con una herramienta de mucha utilidad como lo es la base de datos de rodamientos para determinar si estos tienen algún tipo de falla.

Todos los equipos anteriores en conjunto son capaces de cubrir las siguientes funciones:

- Determinar condiciones de rodamientos.
- Determinar problemas de desbalance, desalineación, flojedad mecánica, fallas en rodamientos y resonancia.
- Realizar mediciones en ruta.
- Análisis de ondas de tiempo.
- Análisis de espectros.
- Determinar la velocidad del equipo.
- Balanceo en uno y dos planos.
- Base de datos de rodamientos.
- Control y monitoreo de proceso de lubricación.
- Grabación de datos.

### **3.1.1.3. Instrumento de medición de termografía infrarroja**

Algo muy importante para el análisis mediante la técnica termográfica es contar con equipo de alta calidad. Para ello se cuenta con cámaras de termografía infrarroja, capaces de captar termogramas de acuerdo a la emisividad del material del que se encuentre hecho el equipo en estudio.

La función de las cámaras termográficas es registrar la intensidad de la radiación en la zona infrarroja del espectro electromagnético y convertirla en una imagen visible.

Figura 18. **Cámara termográfica Fluke Ti32**



Fuente: Ingenio Santa Ana.

Figura 19. **Cámara termográfica SKF TIKI10**



Fuente: Ingenio Santa Ana.

Las características de estos instrumentos son:

- Proporcionan imágenes claras
- Excelente sensibilidad térmica
- Alineación automática de las imágenes

- Corrección de emisividad
- Compensación de temperatura reflejada

#### 3.1.1.4. Instrumento de registro de datos

Para cargar los valores de medición al sistema o medio de gestión es imprescindible realizarlos con un instrumento que facilite dicho trabajo. Para esto se utilizará un equipo conocido como Hand Held, en el que se programa lo necesario para poder enviar los datos directamente al sistema de gestión a través de la red inalámbrica.

Este instrumento es fácil de utilizar, pero también es muy resistente para ambientes hostiles, por lo que es apto para su uso en un ingenio azucarero.

Figura 20. **Hand-Held**



Fuente: Ingenio Santa Ana.

### 3.1.2. Medios de gestión

Actualmente en el Ingenio Santa Ana se cuenta con un sistema informático de gestión de mantenimiento, mediante el cual se llevan a cabo de forma controlada las acciones preventivas y correctivas en los equipos que lo necesiten.

Se pretende utilizar este mismo medio de gestión de información para la implementación del mantenimiento predictivo, para llevar el registro de la información recolectada, así como graficar tendencias de los equipos en el tiempo. De la misma manera se identifica los puntos de medición mediante los diagramas que se pueden colocar en dicho sistema.

Figura 21. Sistema informático de consulta

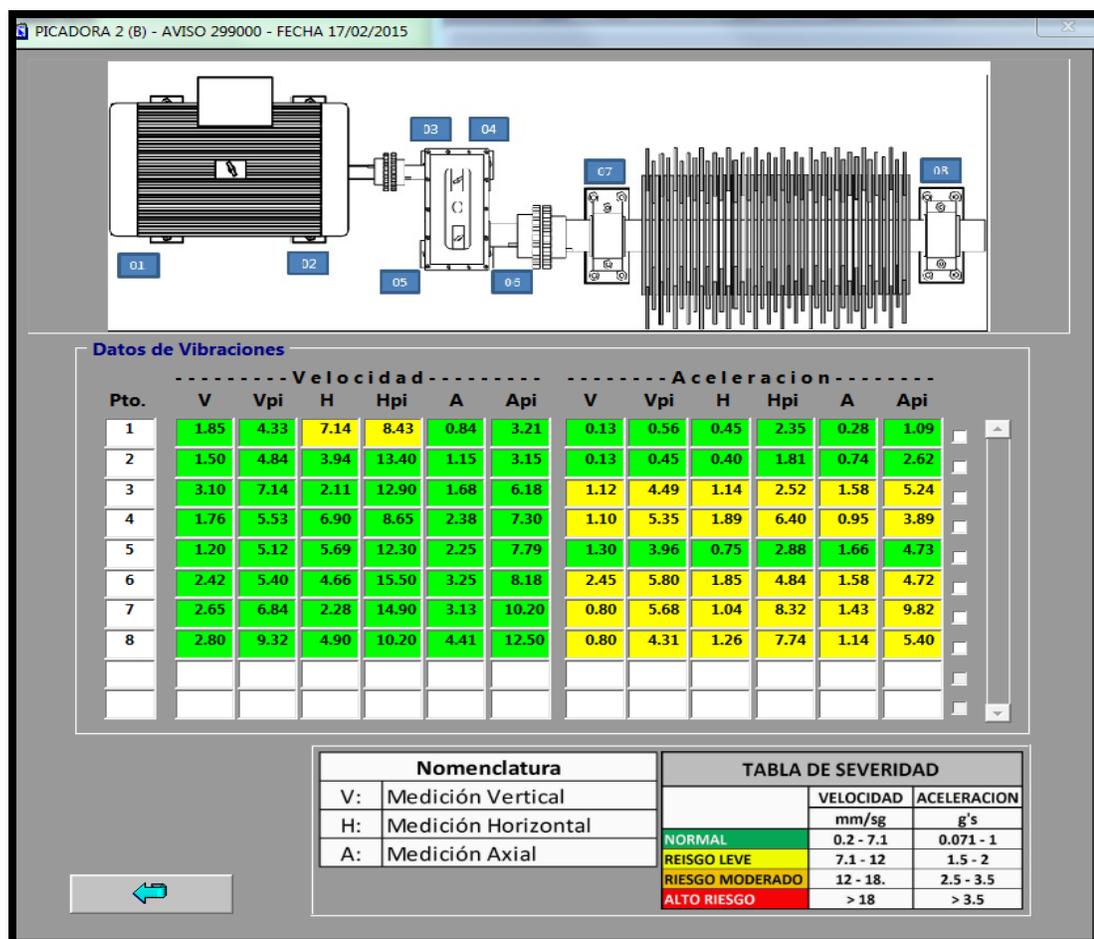


Fuente: elaboración propia, con programa SIGES.

Este programa cuenta con un sistema muy amigable que facilita y agiliza la revisión de los datos históricos de cada equipo según el área en que se encuentren ubicados.

En este programa de consulta se puede seleccionar los equipos requeridos por período de zafra (época con equipos en funcionamiento), técnica de inspección y área en la que se encuentren ubicados.

Figura 22. Consulta realizada a picadora 2 T. A., análisis de vibraciones

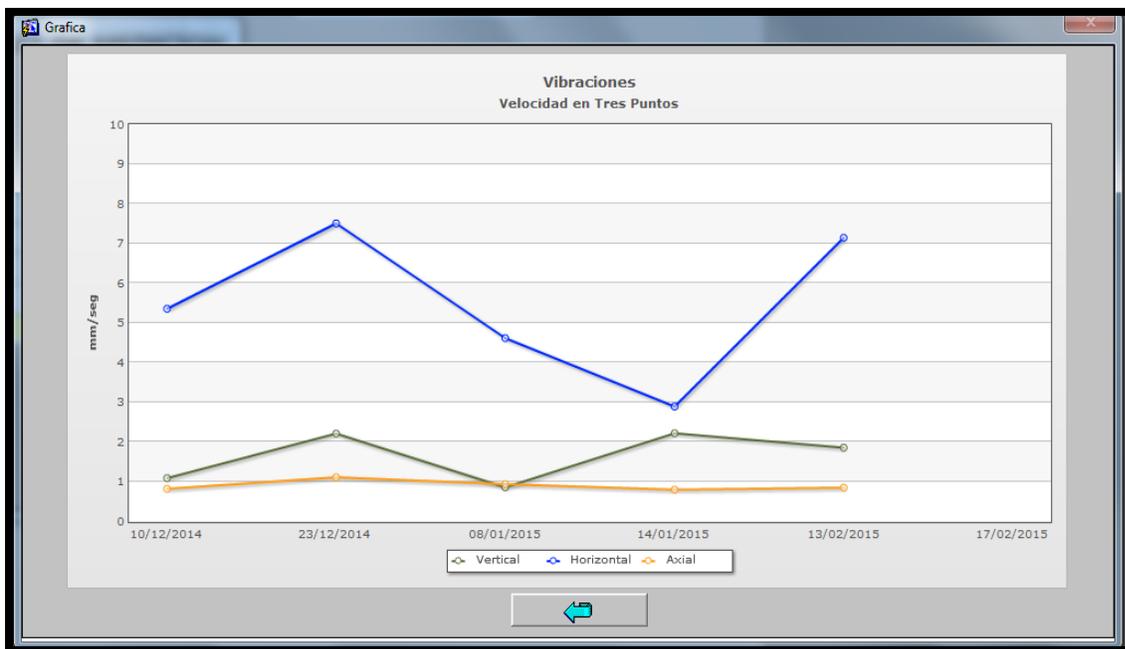


Fuente: elaboración propia, con programa SIGES.

En la figura anterior se ve un ejemplo de cómo se observan los datos tomados mediante la técnica de análisis de vibraciones. El equipo en estudio es una picadora del patio de caña. Asimismo, se tiene la tabla de severidad según la Norma ISO 10816 y también los distintos planos de medición. De la misma forma se podrá realizar la consulta de cualquiera de los equipos críticos que se necesite conocer el estado en el que se encuentran.

La figura 23 muestra la forma en que se puede visualizar la línea de tendencia en el tiempo de cualquier punto que se quiera analizar, lo cual asegura el historial para cada equipo crítico. En la misma gráfica se puede observar los tres planos de medición, así como el valor global de la misma.

Figura 23. **Líneas de tendencia en el tiempo, picadora 2 T. A.**



Fuente: elaboración propia, con programa SIGES.

### **3.1.3. Recurso humano (organigrama propuesto del Departamento de Confiabilidad)**

En el Departamento de Ingeniería de Confiabilidad se debe contar con especialistas que no solo sean expertos en la materia, sino que además respondan a un determinado perfil, pues de este derivarán sus decisiones y apreciaciones, lo que incidirá de forma directa en el trabajo a realizar.

Es de gran importancia el contar con personal calificado, con conocimientos amplios sobre los temas a tratar, en este caso el análisis de ultrasonido, análisis de vibraciones y análisis mediante la termografía infrarroja. Para lo cual el establecimiento de un organigrama interno, así como la descripción de habilidades y requisitos del perfil que cada persona integrante del departamento de confiabilidad debe tener, resulta primordial.

Por lo tanto, se recomienda que los cargos cumplan con ciertos requisitos mínimos, para brindar confianza en cuanto a la implementación del mantenimiento predictivo se refiere. A continuación se nombran los cargos propuestos, así como las habilidades con las que debe contar cada persona.

Jefe de Gestión de Mantenimiento y Presupuestos: es el encargado de presentar los resultados obtenidos a la Gerencia y departamentos respectivos, así como de la administración del presupuesto del Departamento de Confiabilidad.

Las habilidades y requisitos con los que debe contar son los siguientes:

- Ingeniero mecánico.
- Conocimiento en área de presupuestos.

- Conocimiento amplio en técnicas de análisis predictivo y uso de instrumentos de medición.
- Certificación en análisis de vibraciones nivel 1.
- Certificación en ultrasonido aéreoestructural nivel 1.
- Certificación en termografía infrarroja nivel 1.

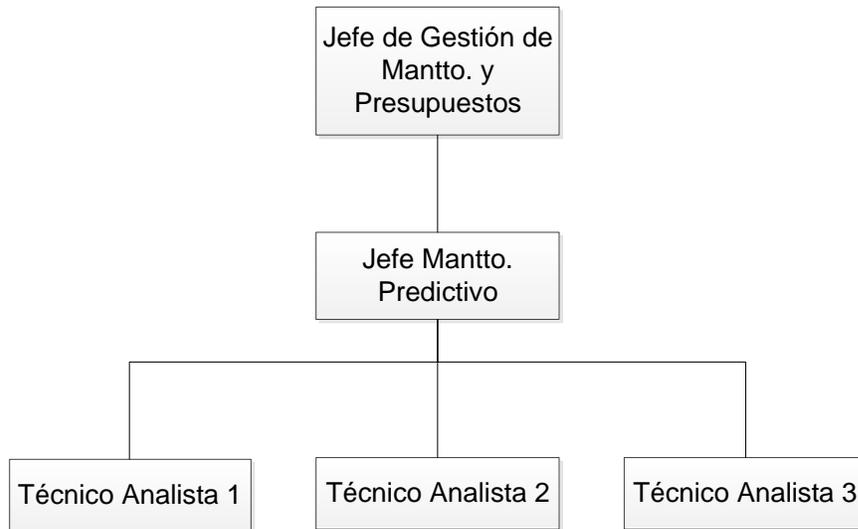
Jefe de Mantenimiento Predictivo: es el encargado de dar seguimiento a los datos recolectados, realizar análisis de los mismos y realizar reportes cuando sea necesario. Es el jefe inmediato de los técnicos analistas.

- Ingeniero mecánico.
- Conocimiento amplio en técnicas de análisis predictivo y uso de instrumentos de medición.
- Certificación en análisis de vibraciones nivel 1.
- Certificación en ultrasonido aéreoestructural nivel 1.
- Certificación en termografía infrarroja nivel 1.

Técnico analista: es el encargado de la recolección de datos, así como de informar cuando algún equipo presente indicios de fallas.

- Bachiller en Mecánica Industrial.
- Conocimiento de equipos mecánicos.
- Criterio en toma de decisiones.

Figura 24. **Organigrama propuesto del Departamento de Confiabilidad**



Fuente: elaboración propia.

### 3.2. Definición de equipos críticos

Los ingenios azucareros poseen una gran cantidad de equipos de diferentes grados de criticidad. Una máquina se considera crítica cuanto menos puede ser obviada en el proceso. Para determinar su grado de criticidad, se debe tomar en cuenta varios criterios: el costo del equipo, importancia dentro del proceso y complejidad del mantenimiento. Además de estos, se consideran otros parámetros como costos de reparación, costos de pérdida de producción y, el más importante, el potencial de daño a las máquinas del resto del proceso.

Es importante resaltar que en algunos casos los costos de criticidad no solo se estiman en dinero, sino muchas veces en daños a personal o al medio ambiente.

### 3.2.1. Clasificación de equipos críticos

Hay muchos equipos que intervienen en el proceso de la producción de azúcar, cachaza y generación de energía eléctrica en los ingenios azucareros. Sin embargo, solo algunos son de consideración crítica de acuerdo a varios factores o criterios. Es a estos equipos a los que se brindará un seguimiento mediante las técnicas de mantenimiento predictivo ya mencionadas. En el Ingenio Santa Ana los equipos críticos de acuerdo al área en que se encuentran ubicados son los siguientes:

Tabla VI. **Listado de equipos críticos para el monitoreo**

ÁREA	EQUIPO	CATEGORÍA
Patio de caña	Troceadora	Crítico, ligeramente costoso, fácil reconstrucción
	Precuchilla	
	Picadoras	
	Desfibradora	
Molinos	Molinos	Crítico, costoso
	Conductores Intermedios	
	Reductores Planetarios	
Calderas	Ventilador Over Fire	Crítico, ligeramente costoso, difícil reconstrucción
	Ventilador Forzado	
	Ventilador Inducido	
	Ventilador Secundario	
	Ventilador Aumentador	
	Bombas de Alimentación de Agua de Calderas	
Centrífugas	Centrífugas de Primera Automáticas G-8	Crítico, ligeramente costoso, difícil reconstrucción
	Centrífugas de Primera Automáticas G-16	
	Centrífugas de Segunda Continuas	
	Centrífugas de Tercera Continuas	
	Centrífugas de Refinería	
Cogeneración	Turbogeneradores	Crítico, costoso

Fuente: elaboración propia.

### **3.3. Períodos de monitoreo**

El período de monitoreo que debe realizarse a un equipo, dependerá de varios factores, entre ellos las horas de operación, historial de operación y las condiciones de diseño presentadas por el fabricante. Algunos criterios en los que se basa el establecimiento de períodos de monitoreo son:

- Monitoreo semanal: equipos con alta criticidad que están sometidos a condiciones de operación severa, defectos de diseño o falta de información en su historial de operación.
- Monitoreo mensual: máquinas con criticidad intermedia, en condiciones normales de operación, con defectos de diseño mínimos o despreciables.
- Monitoreo anual: todos los equipos con criticidad mínima o para los que su fabricante garantiza larga vida.

Para la implementación del programa de mantenimiento predictivo en el Ingenio Santa Ana se propone iniciar con un monitoreo mensual, para la mayoría de equipos críticos, para que sea posible el registro de datos de todos los equipos que se han definido.

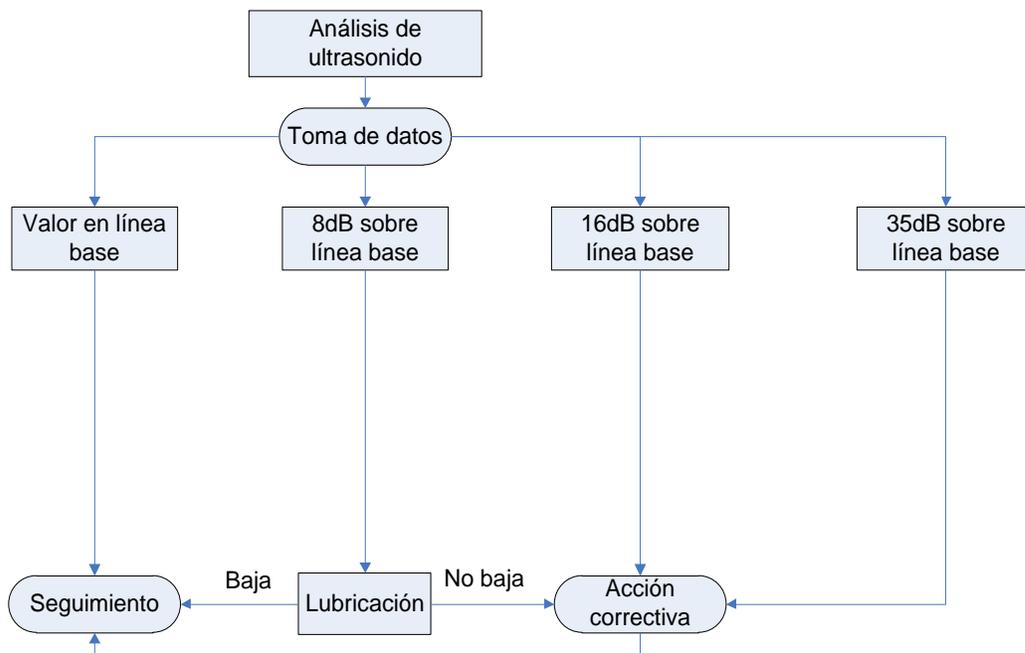
Conforme transcurra el tiempo, la adquisición de datos cambiará de período de monitoreo, ya sea que se amplíe o se reduzca el tiempo dependiendo de los resultados obtenidos y la tendencia de cada equipo.

### **3.4. Descripción del proceso para el análisis de ultrasonido**

Para poder llevar control de la mejor manera en los equipos mecánicos que cuenten con rodamientos, se recomienda basarse en un diagrama de flujo

como el mostrado en la siguiente figura, que indique los pasos a seguir en los equipos en estudio, dependiendo del escenario que se presente.

Figura 25. **Diagrama de flujo de análisis de ultrasonido**



Fuente: elaboración propia.

La toma de datos de cada equipo se realizará con la pistola de ultrasonido Ultraprrobe 10000 (figura 14), así como el instrumento de registro de datos, se utilizará la sonda magnética como módulo de contacto y se colocará siempre en la posición horizontal y en el mismo lugar, esto para obtener una mayor exactitud en la inspección, lo cual se logra realizando una marca en el punto de medición.

Figura 26. **Plano de medición para análisis de ultrasonido**



Fuente: Ingenio Santa Ana.

### **3.4.1. Establecimiento de línea base para rodamientos**

Se conoce como línea base, al establecimiento de un valor de ultrasonido dado en decibeles (dB), que es posible definir mediante el método histórico de obtención de datos. Tratándose de elementos mecánicos, es aconsejable que la frecuencia de inspección seleccionada en el instrumento de medición sea de 30 kHz.

El método histórico requiere el monitoreo de un componente en el tiempo y así establecer una historia que es parte permanente de los registros. Analizando las desviaciones de los rodamientos (incremento en dB), acompañado de un cambio de patrones de sonido, se obtiene una indicación para una intervención de corrección planeada.

La línea base entonces se puede lograr, mediante la recopilación de información por medio de inspecciones en el tiempo, identificando puntos específicos de prueba en los equipos y grabando con el instrumento de medición toda la información relevante.

Para recolectar la información necesaria para establecer la línea base se debe estandarizar la forma de medición, utilizando los siguientes pasos:

- Seleccionar y marcar los puntos de prueba.
- Utilizar sensor magnético para realizar medición.
- Establecer un ángulo de inspección (recomendable 90°).
- Establecer frecuencia de inspección (30 kHz rodamientos).
- Ajustar la sensibilidad del instrumento hasta que la operación mecánica del equipo se escuche claramente.
- Escuchar el sonido con audífonos mientras observa el medidor.
- Grabar los resultados obtenidos.

La base de este tipo de inspección es la preservación de sus registros y la consistencia. Cuando se analiza la tendencia de las condiciones de un equipo o máquina, es necesario evitar la variabilidad, desarrollando la inspección de la misma manera.

### **3.4.2. Niveles de intervención en rodamientos**

El objetivo primordial del análisis de tendencia histórica de ultrasonido en los rodamientos, es conocer cuándo se debe tomar una decisión de intervención en estos. Para esto se utilizan los niveles de acción, con los que se puede establecer si un rodamiento se encuentra en buen estado, su necesidad

de lubricación, un estado de variaciones mínimas, su progresión a un estado de fallo o cuando se ha producido un fallo extremo.

Los niveles de acción se toman a partir de la línea base establecida del rodamiento. Es decir, la línea base se observa como la lectura inicial del rodamiento, asumiendo que este se encuentra en buen estado. Una vez fijados los decibeles de la línea base para el rodamiento, se puede analizar el incremento de intensidad en estos elementos mecánicos, para determinar la severidad del problema y elegir la acción correctiva. Se debe considerar que estos niveles de acción son únicamente pautas, por lo que siempre se tiene que evaluar cada situación individualmente con sus riesgos inherentes y repercusiones económicas, para así determinar si se interviene o no para corregir el problema.

Tabla VII. **Niveles de acción para rodamientos**

<b>Por encima de la línea base</b>	
8 dB	Lubricación
16 dB	Daño / Fallas visuales
35/+ dB	Daño extremo

Fuente: UE SYSTEM INC. *Ultrasonido propagado en el aire y estructuras*. p. 147.

Al rebasar la línea base por 8 dB, resulta apropiado la lubricación del rodamiento, solo lo suficiente para regresar a la lectura inicial de la línea base.

Superar la línea base por 16 dB es indicio de una etapa temprana de falla. Los rodamientos podrían presentar ralladuras o grietas que son visibles al ojo humano. Cuando esta etapa progresa, los defectos se van desarrollando con un

marcado aumento en la temperatura y los niveles de ultrasonido. Asimismo, empieza la aparición de frecuencias de falla. En esta etapa debe ocurrir un monitoreo más frecuente, la planeación de acción correctiva y la posibilidad de corroboración con otra tecnología complementaria.

Si la línea base establecida, es superada por 35 dB o más, daño extremo ha ocurrido en el rodamiento y el aceleramiento de la falla ha comenzado. El nivel de sonido es tan intenso como para ser audible. La temperatura se eleva sobrecalentando el rodamiento. Esta es una etapa muy crítica y peligrosa debido a que las separaciones de los elementos rodantes aumentan y pueden ser causantes de fricción adicional en una máquina, lo cual puede conducir al daño potencial a otros componentes. Durante la última fase de esta etapa, las frecuencias de falla pueden desaparecer, ya que espacios libres y tolerancias se han aflojado debido a las condiciones degradantes de los rodamientos y las pistas, lo que permite un mayor movimiento del eje. En esta etapa, la consideración de una acción correctiva inmediata debe ocurrir, o por lo menos, un aumento extremo en el período de monitoreo de los equipos.

### **3.4.3. Lubricación por medio de ultrasonido**

Según muchos estudios realizados, únicamente el nueve por ciento de los rodamientos de equipos rotativos operan lo suficiente para alcanzar el tiempo de vida de diseño. La causa principal de fallo en un 43 % es la lubricación, seguida por problemas en el montaje con un 27 %, ambas causas se pueden prevenir.

La cantidad correcta de lubricación es de suma importancia. Si existe sobrelubricación en un cojinete, se acumula presión en la carcasa o chumacera, y se generará calor que degradará el lubricante, lo que conduce a una condición

de fallo. Por otro lado, si no existe la suficiente lubricación en el cojinete, este se frotará contra la superficie sólida, provocando fricción y desgaste.

Por medio del ultrasonido es posible una lubricación basada en condición que brinda una mayor exactitud, para esto se debe utilizar el nivel de acción de 8 dB sobre la línea base, que indicará en que momento es apropiada la lubricación. Sin embargo, el tema de la lubricación es algo que siempre se tendrá como un dilema, pues tanto un período largo de lubricación como uno muy corto conducen al aumento del potencial de fallo.

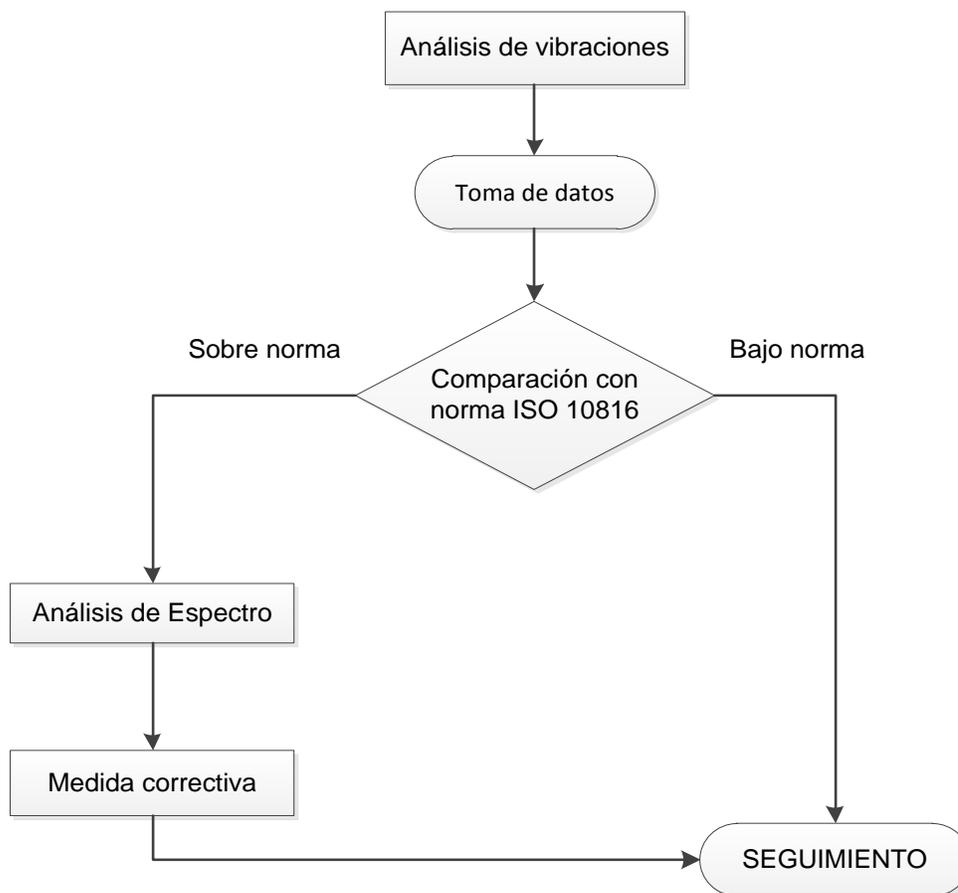
Para evitar al máximo la lubricación inadecuada, se propone seguir los siguientes pasos:

- Determinar mediante la tabla de niveles de acción, el aumento de 8 dB sobre la línea base, pues a medida que la película de lubricante se reduce el nivel de sonido aumentará, yendo acompañada de un sonido de ráfaga uniforme indicando la falta de lubricación.
- Lubricar agregando lo suficiente para reducir el nivel de sonido o si es posible para regresar a la lectura de la línea base.
- De ser necesario esperar un un tiempo prudente (5 min) para observar el resultado de la lubricación, ya que algunos lubricantes necesitan tiempo para cubrir uniformemente la superficie de apoyo.
- Lubricar un poco a la vez, mientras escucha el sonido cambiar, pareciéndose a una catarata de agua.

### 3.5. Descripción del proceso para el análisis de vibraciones

Es conveniente basarse en un flujo-grama para llevar a cabo el análisis de vibraciones, que indique los pasos a seguir de acuerdo a los resultados obtenidos de la inspección. Se recomienda utilizar el siguiente esquema:

Figura 27. Diagrama de flujo del proceso para análisis de vibraciones



Fuente: elaboración propia.

Para el análisis de equipos mediante la técnica de vibración, se realiza la toma de datos mediante mediciones puntuales; las cuales indican, de acuerdo

al equipo, la severidad en la que se encuentra y, el análisis espectral, que indica la causa del valor de la vibración generada. Para realizar dicho análisis es necesario tomar lecturas de magnitud, su frecuencia, velocidad y aceleración.

### **3.5.1. Parámetros a medir**

El transductor es el elemento utilizado en las mediciones de vibraciones mecánicas y pueden medir desplazamiento, velocidad y aceleración.

- Desplazamiento: es la distancia a la que la vibración provoca a una parte del elemento mecánico moverse, es oscilatorio y se mide generalmente en milésimas.
- Velocidad: utilizado comúnmente para frecuencias medias, se mide en milímetros/segundo o pulgadas/segundo, es indicador de problemas como desbalance mecánico, desalineación, soldadura mecánica, entre otros.
- Aceleración: se utiliza para conocer fallas en altas frecuencias como sucede con rodamiento y engranes, la dimensional de medición es la constante de gravedad (g).

### **3.5.2. Adquisición de datos**

Los datos se tomarán con los instrumentos de medición correspondientes, que brindan valores en milímetros/segundo RMS o gravedad RMS para la amplitud y hertz (Hz) para la frecuencia de rotación. El lugar exacto ubicado en el equipo mecánico en el cual se toman las mediciones de vibración se denominan puntos de medición. Estos puntos se ubican en la carcasa de los rodamientos, elementos de transmisión de potencia y en la estructura de un elemento rotativo. Los puntos son seleccionados por medio de un criterio personal o bien basado en manuales generales.

Es necesario saber cómo se deben tomar los datos para que el análisis de vibraciones sea efectivo, de lo contrario los datos serán erróneos. Para esto se utilizan los planos de medición que consta de tres posiciones para ejes horizontales: horizontal, vertical y axial.

- Posición vertical: es decir radialmente al eje, con el sensor colocado verticalmente sobre el eje.
- Posición horizontal: también radial al eje, pero el sensor colocado en dirección horizontal.
- Posición axial: el sensor se coloca paralelo al eje.

Figura 28. **Planos de medición para ejes horizontales**



Vertical



Horizontal



Axial

Fuente: Ingenio Santa Ana.

Para máquinas con ejes verticales, como el caso de las centrífugas, se tomará las siguientes posiciones para la adquisición de datos:

- Posición horizontal-frontal: radialmente al eje, con el sensor colocado en forma horizontal frente al eje.

- Posición horizontal-lateral: radialmente al eje, con el sensor en dirección lateral al frente del eje.
- Axial: el sensor se debe colocar en la misma dirección del eje.

El objetivo de analizar estas componentes, es conocer el comportamiento de la vibración en las diferentes direcciones, puesto que proporcionan información valiosa de la causa-raíz de dichas vibraciones. Para ello se deben tomar valores puntuales que indiquen el valor de la vibración global y espectros de vibración, que coadyuvan a determinar la fuente del problema.

### **3.5.3. Mediciones puntuales (valor global RMS)**

La medición del valor global es la función principal de los instrumentos manuales sencillos. El valor global es la energía total medida en un rango de frecuencias. Medido numéricamente, un valor mayor que lo normal provee una indicación que algo anda mal en el equipo mecánico. Es con esta medición entonces, que se detecta la falla para proceder a un análisis más extenso que determine la fuente del exceso de la vibración.

Obtener el valor global es el primer paso para determinar el estado de la máquina rotativa. Se tomará como parámetro la Norma ISO 10816 (tabla VIII), que establece directrices para determinar la severidad de la vibración en equipos que operan en rangos de frecuencia de hasta 200 Hz, utilizando para ello valores globales RMS de velocidad.

Tabla VIII. **Tabla de severidad de vibración ISO 10816**

<b>VIBRATION SEVERITY PER ISO 10816</b>					
<b>Machine</b>		<b>Class I small machines</b>	<b>Class II medium machines</b>	<b>Class III large rigid foundation</b>	<b>Class IV large soft foundation</b>
<b>in/s</b>	<b>mm/s</b>				
<b>Vibration Velocity Vrms</b>	<b>0.01</b>	<b>0.28</b>			
	<b>0.02</b>	<b>0.45</b>			
	<b>0.03</b>	<b>0.71</b>		<b>good</b>	
	<b>0.04</b>	<b>1.12</b>			
	<b>0.07</b>	<b>1.80</b>			
	<b>0.11</b>	<b>2.80</b>		<b>satisfactory</b>	
	<b>0.18</b>	<b>4.50</b>			
	<b>0.28</b>	<b>7.10</b>		<b>unsatisfactory</b>	
	<b>0.44</b>	<b>11.2</b>			
	<b>0.70</b>	<b>18.0</b>			
	<b>0.71</b>	<b>28.0</b>		<b>unacceptable</b>	
	<b>1.10</b>	<b>45.0</b>			

Fuente: GONZÁLEZ, Francisco Javier. *Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado*.  
p. 154.

Donde:

- Grupo I. Componentes individuales hasta 15 kW.
- Grupo II. Las máquinas de medio tamaño, entre 15 kW y 75 kW.
- Grupo III. Equipos grandes en fundiciones pesadas y rígidas.
- Grupo IV. Equipos grandes en estructuras ligeras relativamente flexibles.

La norma ISO es aplicable a máquinas pequeñas acopladas directamente, motores eléctricos, bombas, generadores, turbinas de gas y vapor, turbocompresores, turbo bombas y ventiladores. Muchas de estas

máquinas pueden ser con acoples rígidos o flexibles. El eje de rotación puede estar en posición horizontal, vertical o inclinado en un cierto ángulo.

### **3.5.4. Análisis espectral de vibraciones, problemas comunes**

Basado en la tabla de severidad adoptada de la Norma ISO 10816, cuando se detecta un valor global que causa alarma se procede al análisis para encontrar la causa de dicho exceso de vibración, siendo de mucha utilidad el análisis espectral. Los espectros más recurrentes son: desbalance, desalineación, flojedad mecánica y fallos en rodamientos.

Se debe cubrir dos etapas cuando se realiza el análisis espectral:

- Colectar información necesaria
- Analizar el espectro

Cierta información básica de los equipos en análisis es necesario conocer para realizar un diagnóstico mediante un espectro, por lo que se debe identificar todos los componentes de una máquina que puedan provocar exceso de vibración.

- Si las máquinas están conectadas a una bomba o ventilador, se debe conocer el número de álabes o aspas que tenga el equipo.
- Conocer las características de los rodamientos donde estén presentes.
- Conocer el número de dientes de los engranajes, en caso de haber.
- Si el equipo opera con otro muy próximo, conocer la frecuencia del segundo, puesto que puede influenciar debido a las vibraciones causadas a través de la estructura.
- En caso de los motores, tomar los datos de las placas.

- Identificar la frecuencia de rotación del equipo.

Para el análisis de los espectros también es necesario contar con información de relevancia que facilite la evaluación del equipo.

- Adquirir los datos en tres planos en cada lugar donde esté ubicado un cojinete o esté soportado el eje de rotación.
- El ángulo de fase suele tener gran importancia.
- Evaluar vibraciones globales de toda la máquina.

Una vez que la información es conocida, se procede al análisis espectral. Al haber identificado la frecuencia de rotación, se debe determinar el rango de frecuencias del espectro.

- Identificar armónicas de la frecuencia fundamental
- Identificar frecuencias de falla de cojinetes
- Identificar frecuencias de álabes o aspas
- Identificar frecuencias de falla de engranajes
- Identificar vibraciones de equipos adyacentes

El espectro genera picos a frecuencias identificadas como falla. Estos pueden o no serlo, sobre todo si existen armónicos.

- Si el pico aparece a la frecuencia fundamental de falla, y otro pico aparece al doble, es casi seguro que exista una falla.
- Si no aparece ningún pico a la frecuencia fundamental, pero si a dos, tres y hasta cuatro veces, hay una indicación válida de frecuencia de falla.
- La lectura de fase es de mucha utilidad para identificar problemas de espectros similares.

#### **3.5.4.1. Desbalance mecánico**

Aproximadamente la mitad de los problemas en máquinas rotativas ocurren por desbalance. Este problema ocurre cuando el eje central de masa no coincide con la línea central geométrica.

La vibración causada por un desbalance puro, conlleva una amplitud similar al ochenta por ciento de la vibración global, ocurriendo a la frecuencia de rotación (1X). Si el desbalance es muy severo, o cuando la rigidez horizontal difiere mucho de la vertical, suelen aparecer armónicos, los que no deberán ser mayor que la fundamental, caso contrario no debe sospecharse de un desbalance.

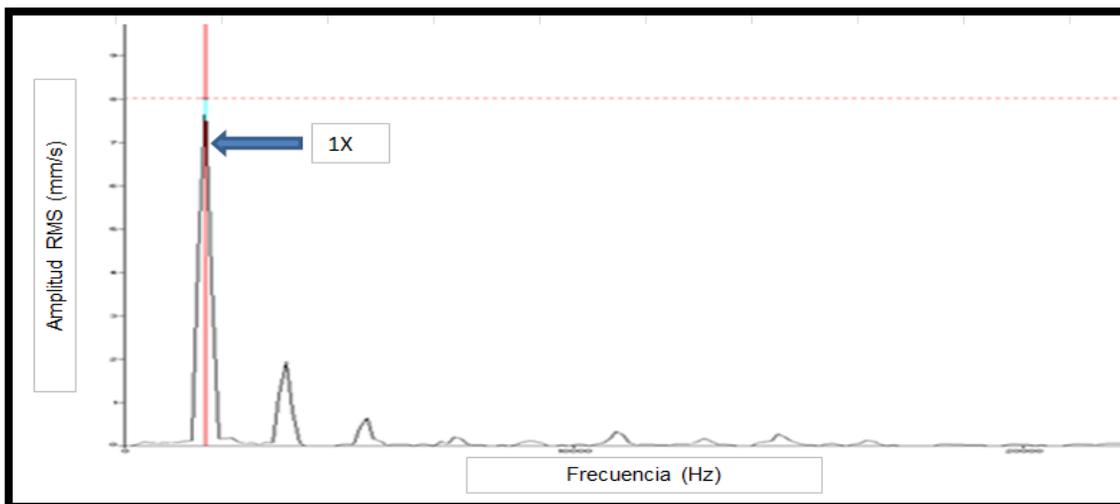
El desbalance puede ser causado por un número de factores, incluyendo fabricación, piezas mal fundidas, depósito de materiales extraños en álabes, rotores, paletas, entre otros, o la colocación de pesos en reparaciones anteriores, sin el debido balanceo. En bombas, un desgaste desigual en los impulsores es la causa más común de desbalance.

El problema de desbalance normalmente provocará que el cojinete soporte una carga dinámica más elevada que la especificada según el diseño, lo cual provocará fallas por fatiga en el cojinete. La fatiga no es más que el resultado de esfuerzos cíclicos aplicados sobre la superficie que soporta la carga, y metalográficamente se observa como un desprendimiento de metal.

Para el diagnóstico acertado de desbalance se debe observar si ocurren los siguientes acontecimientos:

- La medición global es alta y ocurre a baja frecuencia, la amplitud se incrementa más en el sentido horizontal que en el vertical.
- Las mediciones espectrales tienen una amplitud en 1X, de hasta el 80 % del total del valor global.
- Las armónicas ocurridas son de baja amplitud o inexistentes.
- En la medición de fase el sensor mostrará  $90^\circ (\pm 30^\circ)$  de diferencia de fase entre el plano horizontal y el vertical del mismo punto.
- El ángulo de fase en la posición horizontal debe permanecer estable en el tiempo.

Figura 29. **Espectro de desbalance**



Fuente: elaboración propia, con programa DDS.

### 3.5.4.2. **Desalineación mecánica**

Junto al desbalance, la desalineación es una de las causas más comunes de problemas en los equipos. La desalineación es causada cuando los ejes,

acople y cojinete no están propiamente alineados a lo largo de su línea central. Existen dos tipos de desalineación que puede ser angular y paralela.

La desalineación angular ocurre cuando los ejes son unidos formando un ángulo entre sí, de tal manera que se induce una fuerza que tiende a doblar los ejes.

Por otro lado la desalineación paralela ocurre cuando las líneas centrales de los ejes son paralelas, pero desplazadas una de la otra.

Una desalineación angular pura es causante de una vibración en el plano axial a la frecuencia de rotación del equipo. Una desalineación paralela, produce una vibración radial a dos veces la velocidad de rotación. Además, si la desalineación es excesiva se pueden producir vibraciones a tres veces las revoluciones de giro.

Las posibles causas de una desalineación son las siguientes:

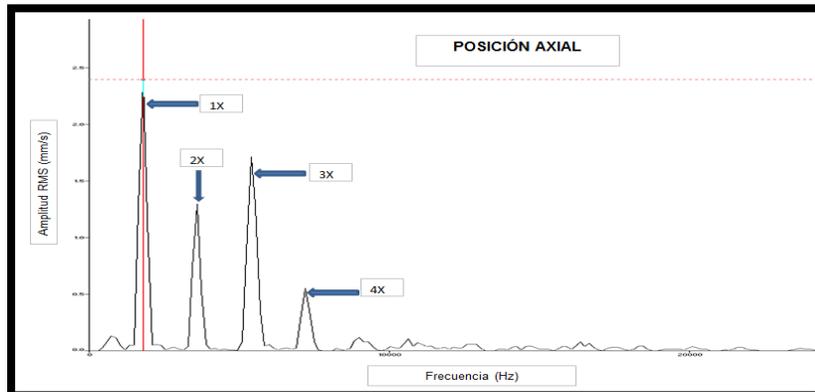
- Expansión térmica debido a trabajos con calor
- Máquinas de acople directo que son alineadas de forma inadecuada
- Fundiciones desniveladas, con bases flojas o con bases disparejas

La desalineación generalmente produce un aumento de carga en los cojinetes más alta que la de diseño, lo que provocará rotura por fatiga. Esta se produce en la zona de carga del rodamiento y genera agrietamiento en la superficie del material.

El diagnóstico de desalineación mediante espectros se puede determinar si ocurre lo siguiente:

- La amplitud de las vibraciones en el plano horizontal se incrementan en dos y tres veces la velocidad de rotación.
- La desalineación típicamente presenta un valor axial alto respecto al radial.
- La amplitud en 2X no siempre está presente, pero si está puede variar desde un 30 hasta un 200 % de 1X.
- El espectro puede contener armónicos de 3X a 10X.
- En el análisis de fase para desalineación angular, en la posición axial la fase difiere  $180^\circ$  a través del acople.
- La desalineación paralela, hay una diferencia de fase de  $180^\circ$  a través del acoplamiento en la posición radial.

Figura 30. **Espectro de desalineación**



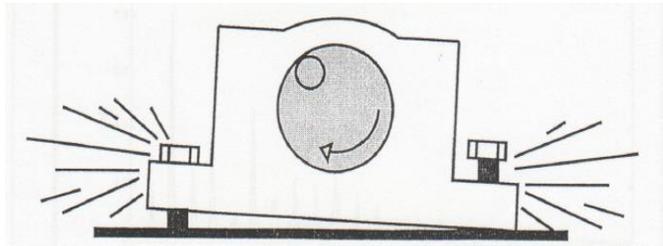
Fuente: elaboración propia, con programa DDS.

### 3.5.4.3. Flojedad mecánica

La flojedad o soltura mecánica, así como el montaje incorrecto entre componentes, es generalmente caracterizado en el espectro por una larga sucesión de armónicas de la frecuencia fundamental o la mitad de esta, con

amplitudes elevadas. Estas armónicas suelen ser esporádicas, ya que pueden mostrar picos en 2X, 3X, 4X, 5X, entre otros.

Figura 31. **Imagen representativa de flojedad mecánica**



Fuente: MIRANDA, Carlos. *Análisis de vibraciones nivel 1*. p. 139.

Son varias las causas de las flojedades mecánicas, entre ellas están:

- Que la máquina tenga su montaje flojo.
- Que uno o varios componentes de la máquina estén flojos.
- El rodamiento ha desarrollado una avería que rompió sus elementos, o agrandó el alojamiento del cojinete.

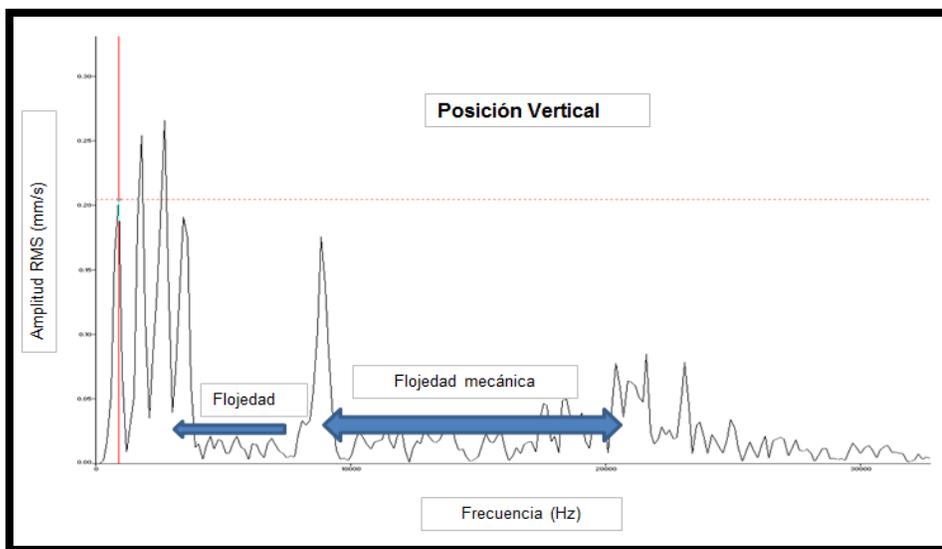
Si la flojedad es debida al cojinete, el efecto es el mismo que el desbalance o incluso más severo. Por otro lado si la flojedad es debida a un componente mecánico, es posible un daño secundario.

Es muy probable la existencia de flojedad mecánica cuando se dan los siguientes escenarios:

- La vibración global posee un valor radial alto, sobre todo en el plano vertical.

- En el plano axial las vibraciones son regularmente bajas.
- En cuanto al espectro, este presenta frecuencia rotacional anormal seguida por armónicas altas, posiblemente a la mitad de la frecuencia fundamental así como a 2X, 3X, entre otros, estos picos disminuyen con el aumento de la frecuencia.
- Si la máquina es de acoplamiento rígido y la componente radial 2X es alta, es otro síntoma de flojedad mecánica.
- Si existe un levantamiento del piso en el espectro.

Figura 32. **Espectro de flojedad mecánica**



Fuente: elaboración propia, con programa DDS.

#### 3.5.4.4. **Falla en rodamientos**

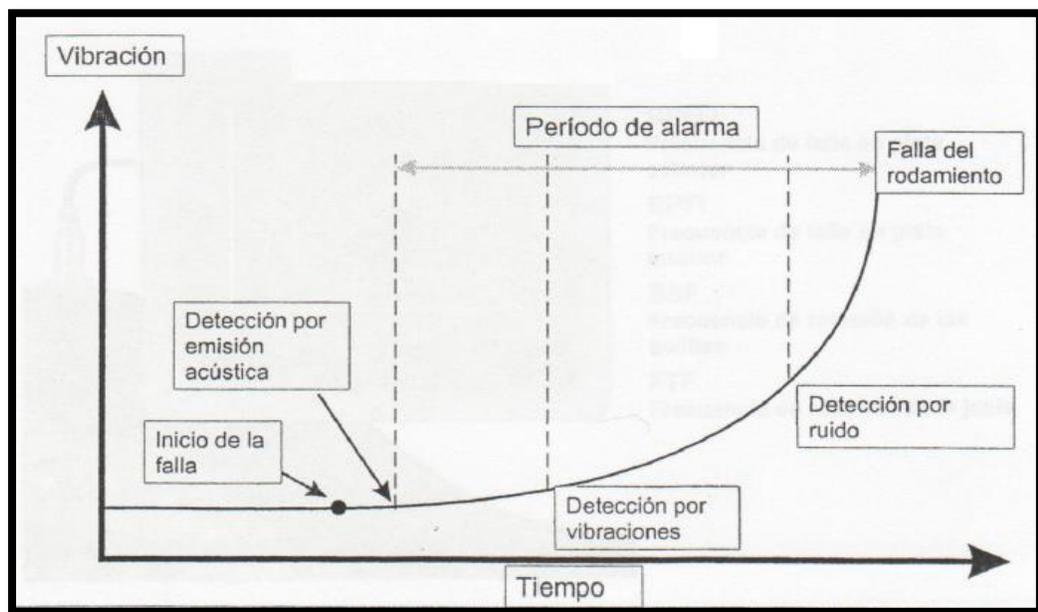
Un rodamiento puede fallar por muchas razones, entre ellas: lubricación incorrecta, contaminación del lubricante, cargas elevadas causadas por

desbalance, desalineación, soltura mecánica, montaje inadecuado, fatiga, entre otras.

Generalmente las carga cíclicas causantes de fatiga en el rodamiento, aparecen inicialmente debajo de la zona de rodadura con carga en forma de picaduras, y se van extendiendo sobre la superficie con el transcurso del tiempo. Cuando los elementos rodantes pasan sobre esta falla, estos se fragmentan de nuevo causando el problema conocido como *spalling*. Este problema se incrementa progresivamente hasta inutilizar el rodamiento.

La fatiga también es causante de otro problema, que ocurre cuando se forman cráteres en la superficie y penetran en el material. Este tipo de fatiga es causada también por cargas excesivas, que generan ruido y vibración.

Figura 33. **Curva típica de falla de rodamientos**



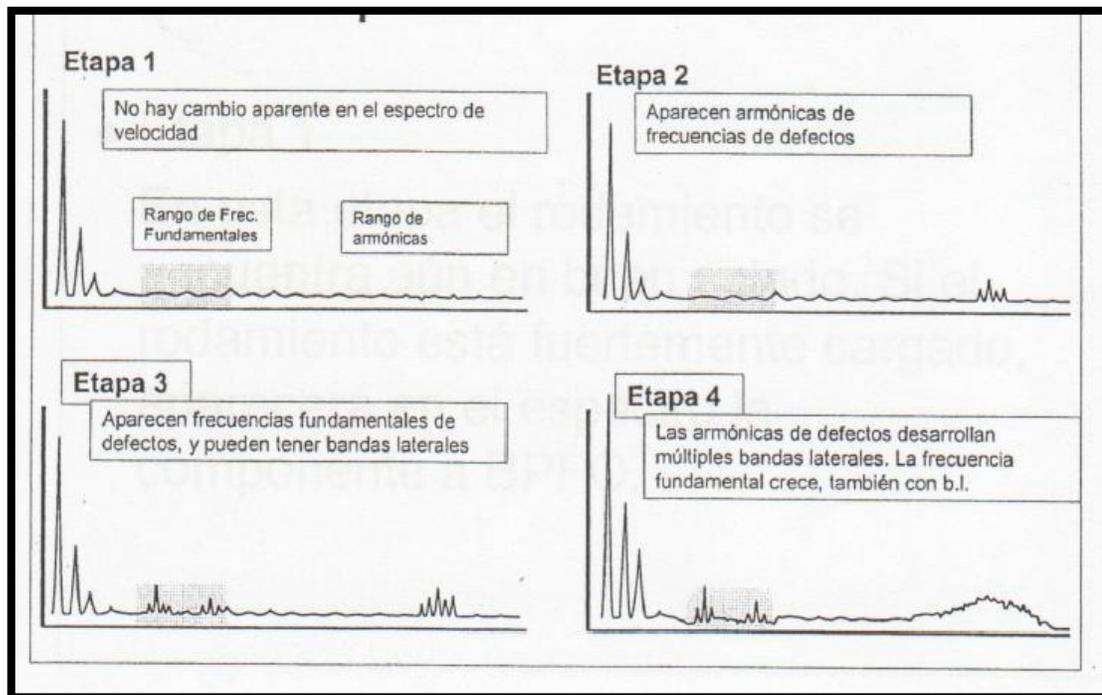
Fuente: MIRANDA, Carlos. *Análisis de vibraciones nivel 1*. p. 98.

Muchos rodamientos entran en etapas de falla y continúan operando. Sin embargo, con el paso del tiempo estas fallas se incrementan rápidamente provocando roturas catastróficas. Cuando el rodamiento presenta fallas en etapas tempranas, el período de monitoreo debe ser lo más corto posible, para aumentar la confiabilidad de la máquina.

Generalmente las fallas en un rodamiento progresan por cuatro etapas antes de que ocurra la falla catastrófica. Cada una de estas etapas muestra características espectrales definidas.

- Etapa 1. Cuando un elemento del cojinete inicia con una falla, no es perceptible en el espectro de velocidad debido a que su amplitud es muy baja comparada con los resultantes de otras fuentes.
- Etapa 2. A medida que el defecto aumenta, armónicas del defecto fundamental aparecen en el espectro de velocidad, siendo estas, indicadores más tempranos del problema existente. Hacia el final de esta etapa aparecen bandas laterales en los picos armónicos.
- Etapa 3. La falla va en aumento y los armónicos lo hacen de la misma manera. Normalmente a mayor número de armónicos, el problema es más grave. En esta etapa puede tomarse la decisión de cambiar el rodamiento.
- Etapa 4. Con el progreso de la falla, progresan y aumentan los armónicos y las bandas laterales, así como la presencia de ruido. En esta etapa puede disminuir el valor global, causado por la expansión de múltiples defectos en la pista, lo que implica que los impactos severos disminuyan.

Figura 34. **Etapas de averías de rodamientos**



Fuente: MIRANDA, Carlos. *Análisis de vibraciones nivel 1*. p. 101.

Existe una relación física entre la geometría de los rodamientos y la señal de vibraciones emitida por los defectos de cada componente del rodamiento. El punto de partida es que los rodamientos defectuosos generan frecuencias de vibración a las velocidades de rotación de cada componente y, cada una de estas frecuencias, se puede calcular si se conocen las dimensiones geométricas del rodamiento.

Los principales componentes de un rodamiento y a los cuales se les puede calcular las frecuencias de fallo son:

- Pista externa

- Pista interna
- Jaula
- Elemento rodante

Las fórmulas para calcular cada una de las frecuencias de fallo de los componentes del rodamiento son:

- Frecuencia de falla de elementos rodantes (BSF)

$$BSF = 0,5N \times \left(\frac{D}{d}\right) \times \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2\right]$$

- Frecuencia de falla de la jaula (FTF)

$$FTF = 0,5N \times \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)\right]$$

- Frecuencia de falla en la pista externa (BPFO)

$$BPFO = 0,5Nn \times \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)\right]$$

- Frecuencia de falla en la pista interna (BPFI)

$$BPFI = 0,5Nn \times \left[1 + \left(\frac{d}{D}\right)\right]$$

Donde:

N= velocidad del eje en revoluciones por segundo

D= diámetro medio del rodamiento

d= diámetro del elemento rodante

n= número de bolas o rodillos

Sin embargo, gracias a la alta tecnología desarrollada en los instrumentos de medición y software de análisis, se cuenta con programas en los que basta únicamente con ingresar el código de cojinete así como la velocidad de rotación del equipo, para que automáticamente se generen las frecuencias de fallas de los componentes de los rodamientos. Es de esta forma como se realizará el análisis de fallas en rodamientos en el programa de mantenimiento predictivo, actualizando la base de datos que ya incorpora el software.

### **3.6. Descripción del proceso para el análisis por medio de termografía infrarroja**

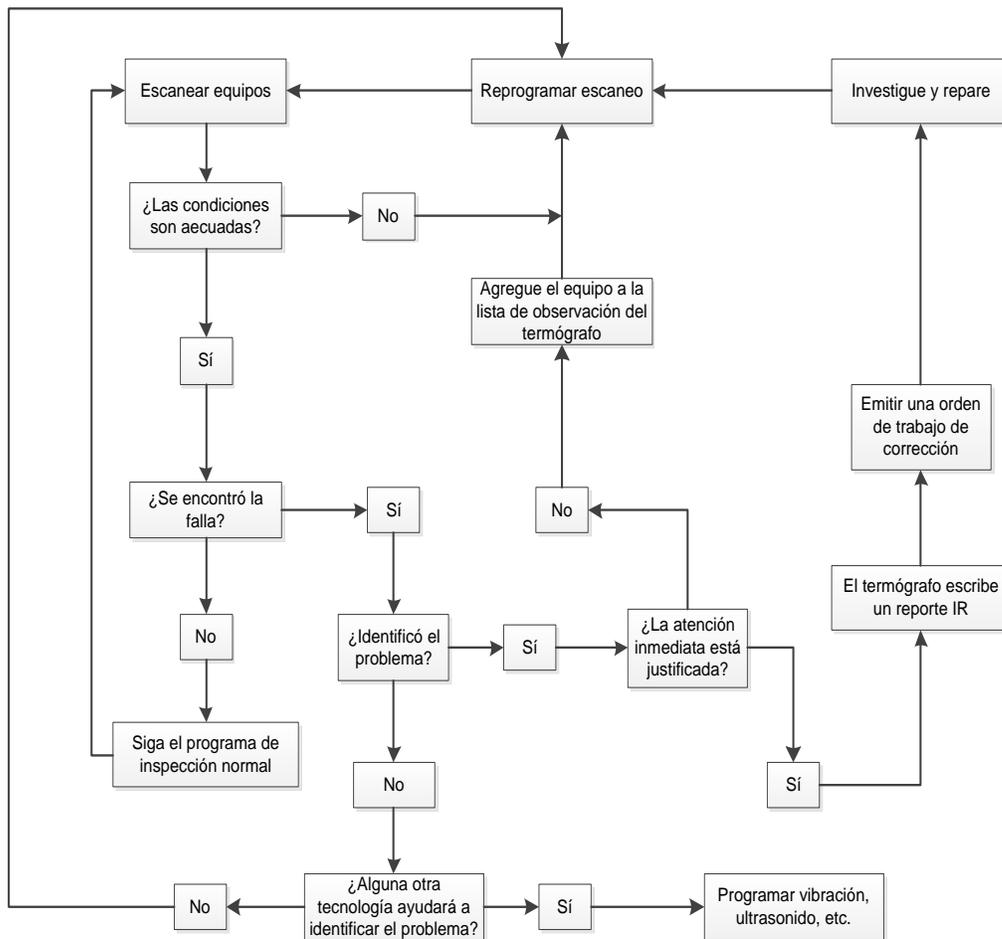
Muchos problemas en los sistemas y equipos son provocados por un calentamiento anormal. La termografía infrarroja permite observar estos patrones térmicos invisibles antes que se presenten fallas de mayor magnitud.

El principal objetivo de la termografía es entonces, ayudar a una fácil localización de las señales térmicas de estos problemas entre la gran cantidad de problemas que ocurren.

La termografía es útil también para determinar la temperatura aparente del componente con el problema. Dicha información es relevante para poder determinar la causa o severidad del problema así como para lograr una reparación exitosa.

El análisis mediante termografía infrarroja conlleva una serie de pasos que conviene establecerlos mediante un diagrama de flujo que ayude a lograr una mejor inspección con los mejores resultados posibles.

Figura 35. **Diagrama de flujo del proceso de inspección termográfica**



Fuente: Snell Group. *Aplicaciones de la termografía infrarroja*. p. A-3.

En la implementación del programa de mantenimiento predictivo en el Ingenio Santa Ana, se iniciará únicamente con la inspección a instalaciones y

componentes eléctricos de los equipos críticos establecidos con sus respectivas frecuencias de monitoreo.

El propósito principal será detectar fallas incipientes en los equipos mencionados, para luego implementar la inspección termográfica a los equipos mecánicos y demás objetos posibles.

Pasos para realizar la inspección térmica:

- Definir la tarea: definir los equipos críticos que se van a revisar.
- Realizar inspección inicial: esto para poseer valores o parámetros normales de funcionamiento.
- Iniciar inspección: ejecutar las inspecciones a los equipos críticos establecidos.
- Análisis y creación de informe: realizar análisis de los resultados obtenidos en las inspecciones y realizar informe de ser necesario.

Para la captura de un termograma se debe realizar lo siguiente:

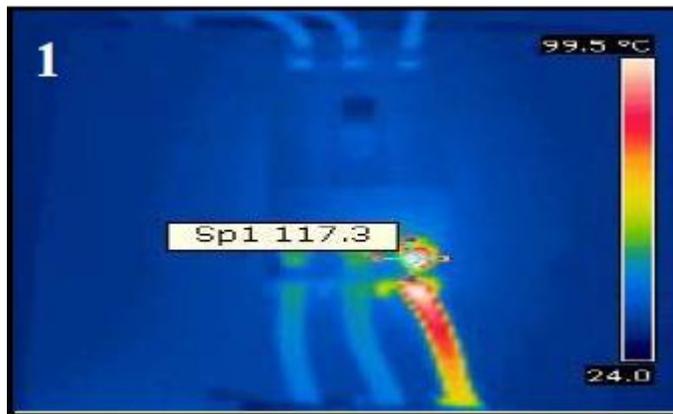
- Retiro de tapas o protecciones de los componentes a inspeccionar.
- Revisión de las instalaciones con la cámara termográfica.
- Elaboración de informe con imágenes térmicas y visuales de los elementos que presentan anomalías.
- Detalle de las posibles causas del sobrecalentamiento y recomendaciones para su mejora.

### 3.6.1. Termograma

Se conoce como termograma a la imagen térmica que se obtiene mediante el uso de la cámara termográfica, y es una imagen de intensidad de radiación térmica que se utiliza para conocer el estado de un equipo o sistema eléctrico o mecánico.

El termograma brinda temperaturas aparentes que dependen, sobre todo, de la emisividad del material que se esté inspeccionando.

Figura 36. **Ejemplo de termograma**



Fuente: elaboración propia, con programa SmartView.

En la figura anterior se ve un ejemplo de termograma, en el cual se nota claramente un sobrecalentamiento en una de las conexiones eléctricas en Sp1, que es el punto de temperatura ajustado por medio de la cámara termográfica.

### **3.6.2. Análisis de termograma**

Para evaluar la criticidad del análisis térmico se han desarrollado procedimientos que cualifican y cuantifican el estado del equipo y sus componentes. Uno de estos criterios es la excepción termográfica la cual sucede por medio de un diferencial de temperatura, entre la temperatura monitoreada y la de referencia. Existen otros criterios estándares o normas que sirven para el análisis así como para la valoración cualitativa y cuantitativa de las fallas.

Para determinar si la condición es aceptable o no, se destacan cuatro factores como: la experiencia del personal, patrones termográficos, recomendaciones del fabricante y normas o publicaciones técnicas reconocidas.

La norma NETA (Inter-National Electric Testing Association) por ejemplo, proporciona criterios de clasificación de fallas eléctricas, en la cual se puede comparar entre temperatura de punto de interés con temperatura ambiente o con un objeto similar en condiciones óptimas.

La definición de las prioridades de la norma NETA (tabla IX) es la siguiente:

- Baja: la diferencia de temperatura indica una posible falla, por lo que será necesario investigar.
- Media: el gradiente de temperatura indica deficiencia, la reparación se deberá realizar en la próxima parada disponible.
- Alta: los gradientes empiezan a ser muy significativos, se debe intervenir lo antes posible.

- Crítica: una diferencia mayor a 40 °C por encima de la temperatura ambiente o 15 °C sobre un punto similar son indicio de deficiencias importantes, se debe reparar inmediatamente.

Tabla IX. **Clasificación de fallas eléctricas**

Clasificación de fallas eléctricas según <b>NETA</b> (International Electric Testing Association )			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• O/A: Por encima de la temperatura ambiente</li> <li>• O/S: Por encima de la temperatura de un punto similar</li> </ul>			
Nivel	Diferencia de Temperatura	Clasificación	Acción
1	1°C - 10°C O/A ó 1 °C a 3°C O/S	Baja	En observación / Puede Esperar.
2	11°C - 20°C O/A ó 4°C a 15°C O/S	Media	Realizar mantenimiento en la próxima parada disponible.
3	21°C - 40 °C O/A ó >15 °C O/S	Alta	Reparar tan pronto como sea posible.
4	>40 °C O/A ó >15 °C O/S	Crítica	Reparar inmediatamente

Fuente: NETA, Inspecciones con termografía.

La Norma ISO 18434-1 también es de mucha utilidad, sobre todo porque ayuda a identificar entre dos técnicas para la práctica del análisis termográfico por medios comparativos: análisis cualitativo y análisis cuantitativo.

### 3.6.2.1. Análisis cualitativo

Se refiere a la práctica de medir temperaturas aparentes (temperatura leída o corregida por la cámara termográfica), comparando componentes

similares bajo las mismas condiciones de operación para encontrar una potencial falla.

### 3.6.2.2. Análisis cuantitativo

Es la práctica termográfica en la que interviene la emisividad, reflectividad, transmisividad, para realizar un diagnóstico de la falla.

### 3.6.3. Mapeo térmico

Al igual que en el análisis por medio de ultrasonido y vibraciones, es perentorio contar con rutas que faciliten las inspecciones por medio de termografía infrarroja, es a esto a lo que se llama mapeo térmico. Como ya se dijo, en este caso no se toman los puntos de medición como en las otras técnicas predictivas, pues con esta técnica únicamente se analizarán sistemas eléctricos y no mecánicos. Los equipos a inspeccionar se muestran en la tabla siguiente:

Tabla X. **Listado de equipos críticos para monitoreo mediante inspección con termografía infrarroja**

AREA	EQUIPO	TERMOGRAFÍA	PERÍODO DE INSPECCIÓN
Patio de caña	CCM patio T. A.	x	Mensual
	Transformadores patio T. A.	x	
	Motores de patio T. A.	x	
	CCM patio T. B.	x	
	Transformadores patio T. B.	x	
	Motores de patio T. B.	x	

Continuación de la tabla X.

<b>Molinos</b>	CCM molinos T. A. (Reductores planetarios)	x	Mensual
	Transformadores molinos T. A.	x	
	Motores de molinos T. A.	x	
	CCM molinos T. B.	x	
	Transformadores molinos T. B.	x	
	Motores de molinos T. B.	x	
	Variadores bombas de molinos T. A. y T. B.	x	
<b>Calderas</b>	CCM caldera 1 y 4	x	Mensual
	Transformador caldera 4	x	
	CCM caldera 7	x	
	Transformadores caldera 7	x	
	CCM conductores de bagazo	x	
<b>Centrífugas</b>	CCM centrífugas continuas	x	Mensual
	CCM centrífugas G-8	x	
	CCM centrífugas G-16	x	
	CCM centrífugas de refinería	x	
	Motores centrífugas continuas	x	
	Motores centrífugas G-8	x	
	Motores centrífugas G-16	x	
	Motores centrífugas de refinería	x	

Fuente: elaboración propia.

Estos equipos por lo tanto, se deben inspeccionar con una periodicidad mensual mientras se establece un control efectivo, que basado en los resultados obtenidos, demostrará si el tiempo entre inspecciones se debe reducir o se puede aumentar.

#### **3.6.4. Fallas comunes en sistemas eléctricos**

Las inspecciones en sistemas eléctricos representan la principal aplicación de la termografía infrarroja, es por ello que durante el período de implementación únicamente se evaluarán estos equipos, donde los componentes de alta y baja tensión son candidatos naturales para el análisis mediante esta técnica.

La gran mayoría de fallas en sistemas eléctricos tienen relación con varios factores, entre ellos:

- Incremento en la resistencia eléctrica
- Sobrecargas
- Cortocircuitos
- Conexiones sueltas
- Conexiones sucias
- Conexiones corroídas
- Mal contacto en la conexión
- Adelgazamiento del conductor
- Desequilibrio de fase

Estas son las principales causas de falla que se encontrarán en las inspecciones con la cámara termográfica, las cuales se deberán corregir basados en la norma NETA (tabla IX).

#### **3.7. Elaboración de rutas de medición**

Con la elaboración de rutas se busca establecer tanto los puntos de medición como una sistematización que haga el proceso de ingreso de datos y

análisis lo más eficaz posible. Como primer paso se debe establecer qué técnica de análisis predictivo se utilizará para cada equipo, de acuerdo a las necesidades y características de cada uno.

Algo muy importante para el establecimiento del mantenimiento predictivo es obtener información de los equipos cuando se realiza algún cambio significativo, tanto antes como después de hacerlo. Por ese motivo el período de monitoreo en el área del patio de caña se propone de quince días puesto que en ese lapso de tiempo aproximadamente, se realiza mantenimiento programado, el cual implica cambio de equipos o elementos mecánicos que los conforman.

Cabe resaltar que los puntos de medición de los equipos críticos serán los mismos (en el plano horizontal) tanto cuando se realice análisis de ultrasonido como de vibraciones mecánicas. Sin embargo, no será así para el análisis termográfico, pues este será utilizado únicamente en sistemas eléctricos, por lo que el método de adquisición de datos será distinto, debido a que es una técnica de inspección de no contacto.

Tabla XI. **Técnicas de mantenimiento predictivo aplicada a los equipos críticos**

AREA	EQUIPO	VIBRACIONES PUNTUALES	ANALISIS ESPECTRAL DE VIBRACIONES	ULTRASONIDO	TERMOGRAFÍA
Patio de caña	Troceadora	x	x	x	x
	Precuchilla	x	x	x	x
	Picadoras	x	x	x	x
	Desfibradora	x	x	x	x

Continuación de la tabla XI.

<b>Molinos</b>	Molinos	x	x	x	x
	Conductores intermedios	x	x	x	x
	Reductores planetarios	x	x	x	x
<b>Calderas</b>	Ventilador Over Fire	x	x	x	x
	Ventilador Forzado	x	x	x	x
	Ventilador Inducido	x	x	x	x
	Ventilador Secundario	x	x	x	x
	Ventilador Aumentador	x	x	x	x
	Bombas de alimentación de agua de calderas	x	x	x	x
<b>Centrífugas</b>	Centrífugas de primera automáticas G-8	x	x	x	x
	Centrífugas de primera automáticas G-16	x	x	x	x
	Centrífugas de segunda continuas	x	x	x	x
	Centrífugas de tercera continuas	x	x	x	x
	Centrífugas de refinería	x	x	x	x
<b>Cogeneración</b>	Turbogeneradores	x	x		x

Fuente: elaboración propia.

Lo correcto al establecer los puntos de medición para la obtención de datos es estandarizando la forma de hacerlo. Se tomará como punto inicial siempre, para equipos rotativos, el que esté ubicado en el inicio del tren de movimiento, sabiendo que este consiste en una fuente de potencia, acoples intermedios y toda una serie de elementos móviles como bombas, ventiladores y demás componentes que intervienen en procesos continuos. Esto resulta de manera muy sencilla al contar con diagramas que indiquen dichos puntos, de acuerdo al equipo que se encuentre en estudio.

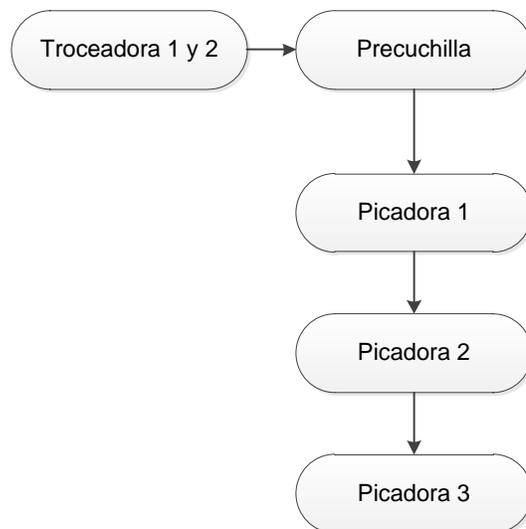
### 3.8. Rutas de medición en equipos rotativos

A continuación se presentan los diagramas de algunos equipos críticos, indicando los puntos de medición para cada uno, así como diagramas de flujo que muestran la ruta a seguir de acuerdo a la ubicación de los equipos mecánicos en las diferentes áreas.

#### 3.8.1. Área Patio de Caña

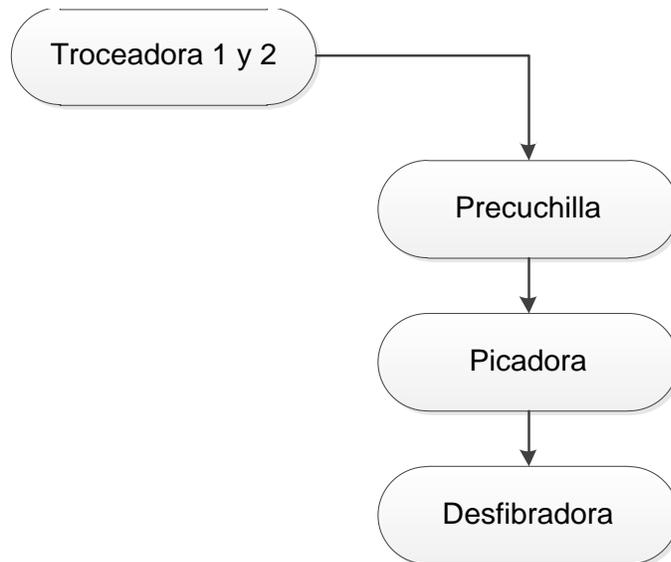
El diagrama de flujo, correspondiente a los equipos críticos del patio de caña, queda establecido como se ve en la figura siguiente, el cual se tomará como guía para una rápida medición de los equipos. Esta área es la de preparación de la caña y cuenta con troceadoras, precuchillas, picadoras y defibradora, ubicados de distinta forma de acuerdo a cada tándem.

Figura 37. Ruta de medición patio de caña T. A.



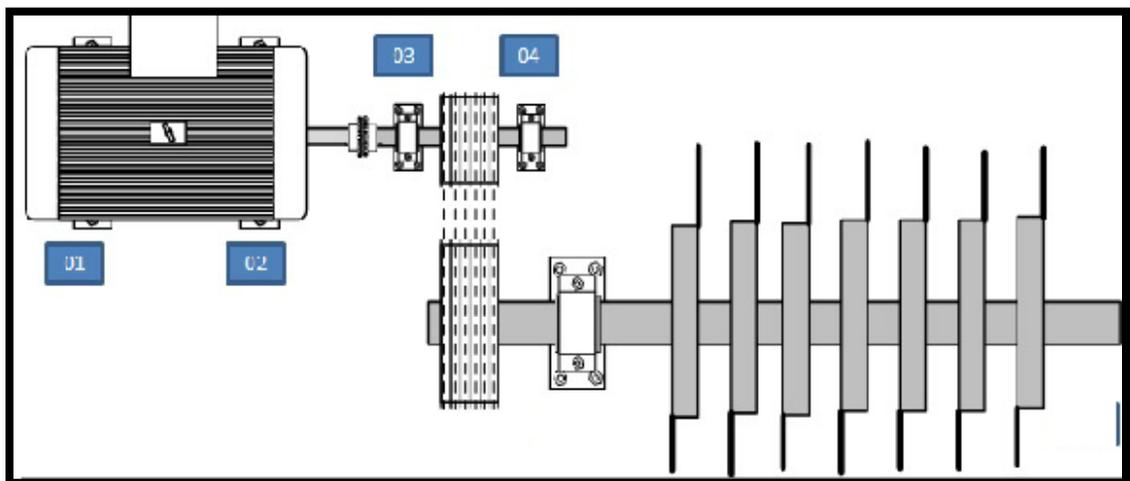
Fuente: elaboración propia.

Figura 38. Ruta de medición de patio de caña T. B.



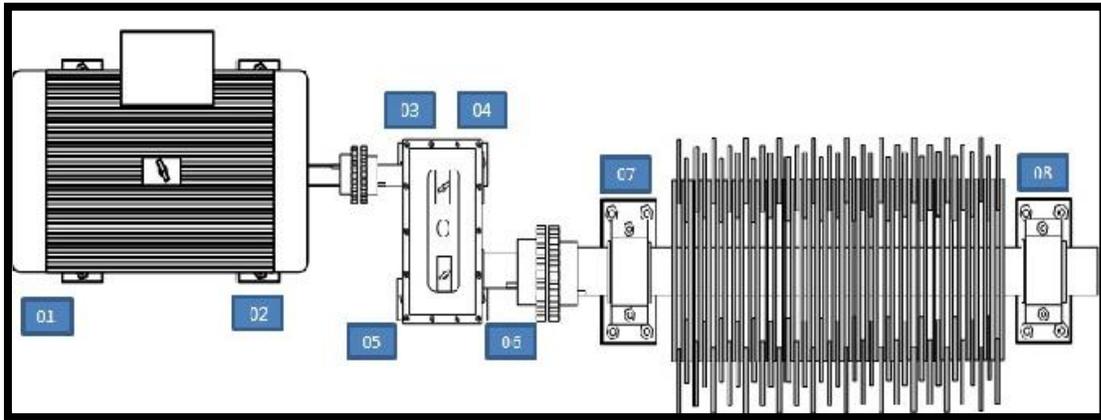
Fuente: elaboración propia.

Figura 39. Troceadora 1 y 2 T. A. y T. B.



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Figura 40. **Precuchilla, picadora y desfibradora T. A. y T. B.**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

El propósito de estos equipos de preparación de la caña es distinto. Sin embargo, para fines de análisis de los puntos de medición se utiliza el mismo diagrama, pues cuentan con la misma cantidad de puntos, así como del mismo tren de movimiento (motor-reductor).

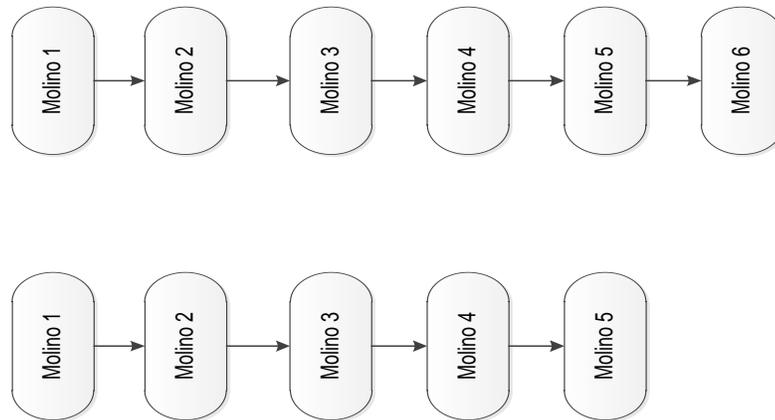
### 3.8.2. Área de Molinos

Posterior a la preparación de la caña en el patio, se encuentra el área de Molinos donde se realiza la extracción de jugo a la caña. Los molinos son equipos mecánicos que se encuentran formados por mazas colocadas de forma que se logre comprimir la caña de la mejor manera posible para obtener la máxima cantidad de jugo extraído. De esta área por lo tanto se obtiene no solo el jugo que se utilizará para la producción de azúcar sino también el bagazo de la caña utilizado como combustible para las calderas del Ingenio.

El área de Molinos, es también un área crítica debido sobre todo a lo costoso que suelen ser estos equipos, por lo que se debe llevar un monitoreo

mensual mientras se implementa el plan de mantenimiento predictivo. Está dividido en dos tándem, en donde el A cuenta con 6 molinos en tanto que el tándem B únicamente con 5, el tren de movimiento consta de motor-reductor de alta-reductor intermedio-reductor de baja velocidad, quedando las rutas de medición para ambos de la siguiente manera:

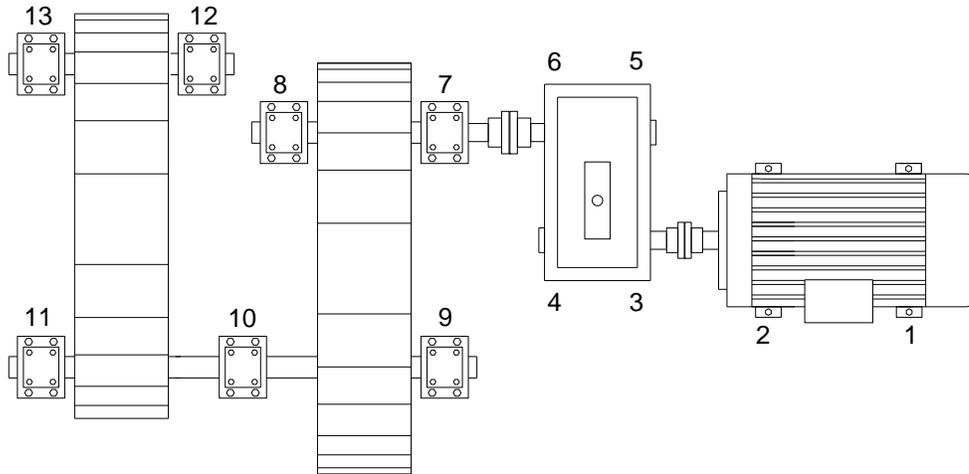
Figura 41. **Ruta de medición de molinos T. A. y T. B.**



Fuente: elaboración propia.

Los molinos del tándem B tienen la particularidad de ser idénticos y contar con el mismo tren de movimiento, por lo que los puntos de medición estarán en la misma ubicación que el mostrado en la figura anterior. Los molinos del tándem A. Sin embargo, son distintos en cuanto a cantidad de puntos de medición (ver apéndice 2).

Figura 42. Diagrama de puntos de medición de molinos T. B.



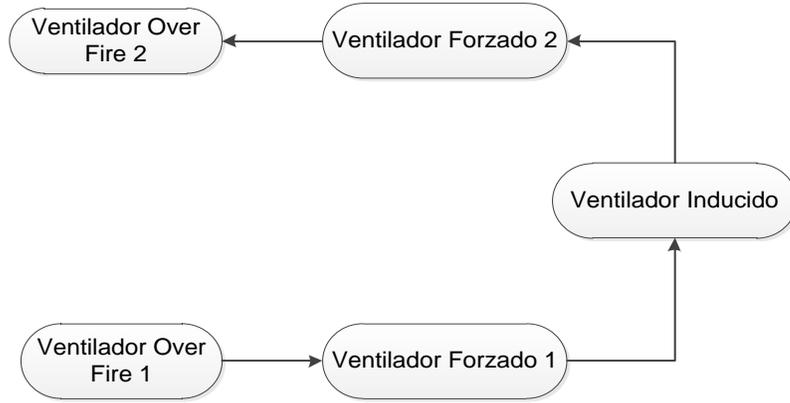
Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

### 3.8.3. Área de Calderas

En las calderas se ha establecido como equipos críticos tanto los ventiladores, como las bombas de alimentación, puesto que son equipos mecánicos altamente importantes para la generación del vapor, que se utiliza tanto para generación de energía eléctrica así como para el proceso de producción de azúcar.

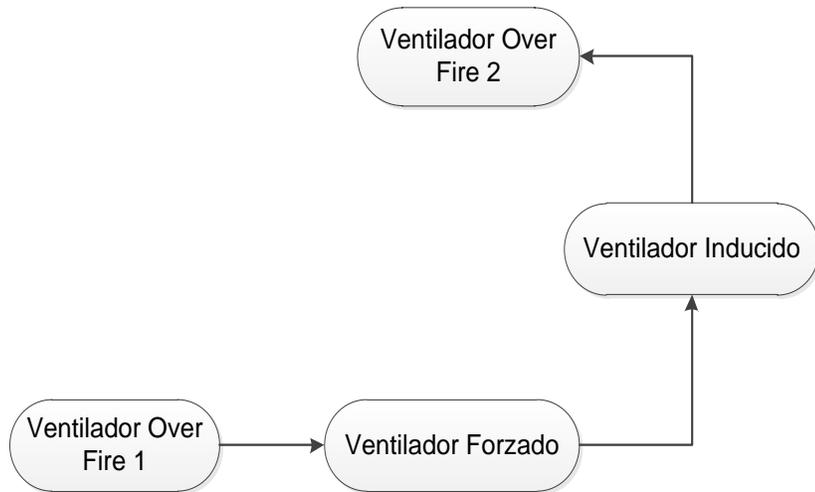
Para la implementación del plan predictivo, se ha tomado en cuenta las calderas 1, 4, 5, 6 y 7. Sin embargo, no todas tienen el mismo tipo de ventiladores por lo que resulta necesario establecer un diagrama de los equipos mecánicos donde se indique el nombre de cada uno, así como la ruta que eficiente la obtención de datos mediante diagramas de flujo.

Figura 43. Ruta de medición para ventiladores de caldera 1



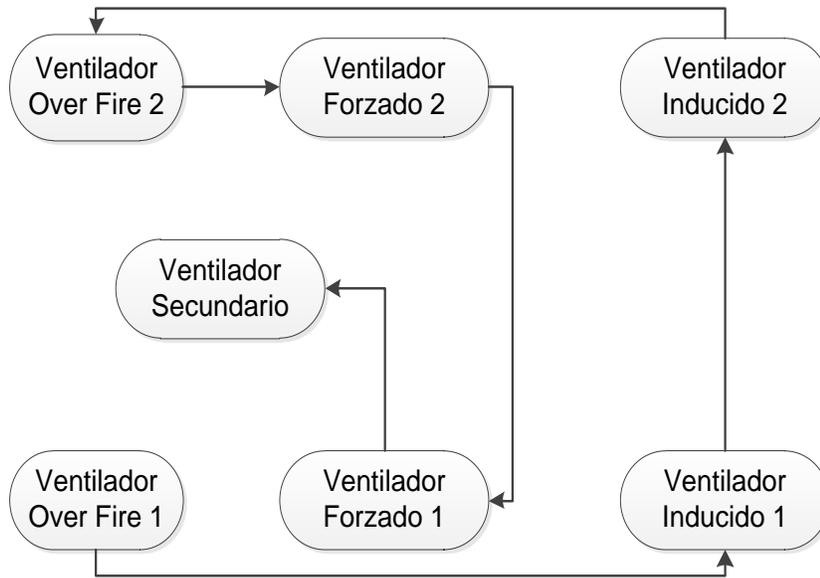
Fuente: elaboración propia.

Figura 44. Ruta de medición para ventiladores de caldera 4



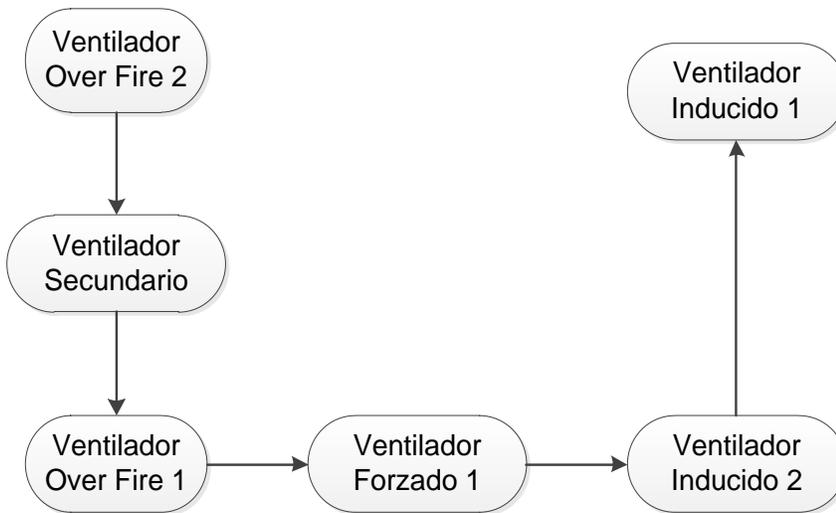
Fuente: elaboración propia.

Figura 45. Ruta de medición para ventiladores de caldera 7



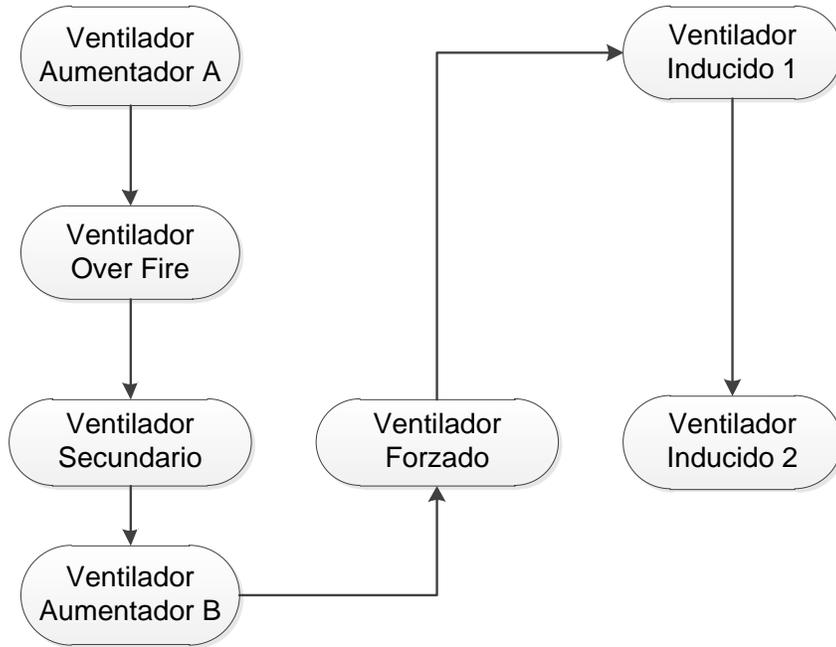
Fuente: elaboración propia.

Figura 46. Ruta de medición para ventiladores de caldera 6



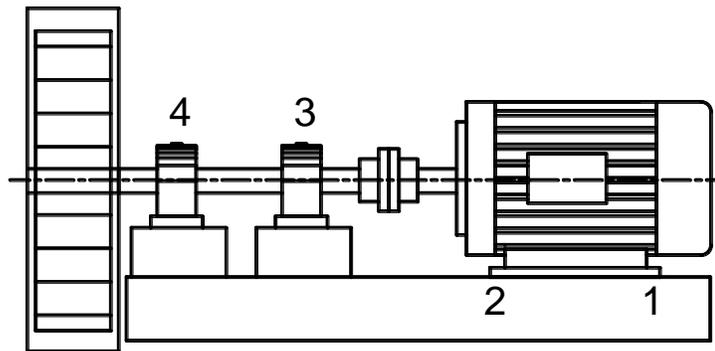
Fuente: elaboración propia.

Figura 47. **Ruta de medición para ventiladores de caldera 5**



Fuente: elaboración propia.

Figura 48. **Diagrama de puntos de medición ventilador Over Fire**

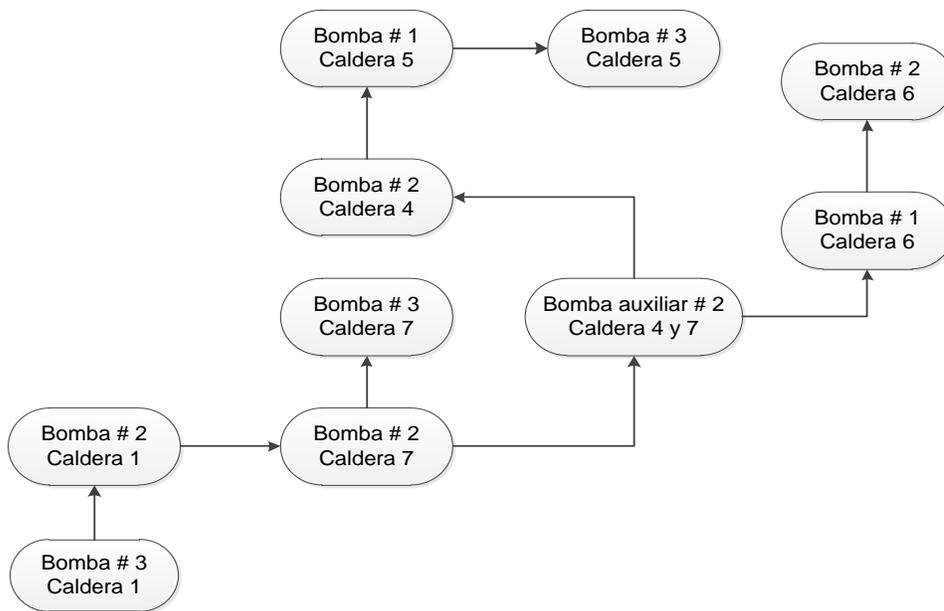


Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

En la figura anterior se observa uno de los diagramas de ventiladores que corresponde al Over Fire, el cual consiste únicamente de cuatro puntos de

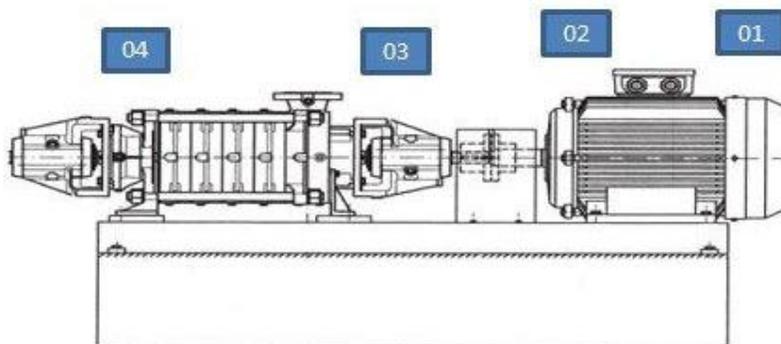
medición, dos que corresponden al motor eléctrico y dos ubicados en las chumacera que soportan el eje del ventilador que se encuentra en voladizo.

Figura 49. **Ruta de medición para bombas de inyección de agua**



Fuente: elaboración propia.

Figura 50. **Diagrama de medición general de bombas**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

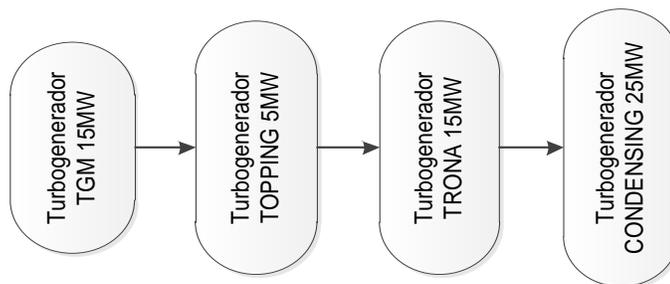
### 3.8.4. Área de Cogeneración

La cogeneración es el procedimiento de la obtención simultánea de energía térmica y energía eléctrica. En este caso la energía térmica se produce mediante las calderas con el bagazo de caña como combustible principal, luego se aprovecha el vapor para producir energía mecánica por medio de turbinas, para finalmente convertirla en energía eléctrica, mediante el acoplamiento de estos últimos equipos a generadores eléctricos de distintas capacidades.

Los turbogeneradores por lo tanto son también equipos de consideración crítica debido sobre todo al alto costo de los mismos. Sin embargo, como se estableció en las técnicas a implementar en cada equipo, se hará énfasis en análisis mediante vibraciones mecánicas, ya que aún siendo equipos rotativos estos no cuentan con rodamiento en los apoyos, sino que el eje se mantiene cargado mediante chumaceras con tejas de *babbitt*, por lo que el análisis mediante ultrasonido no resulta muy relevante.

La ruta principal, que toma en cuenta todos los turbogeneradores queda de la siguiente forma:

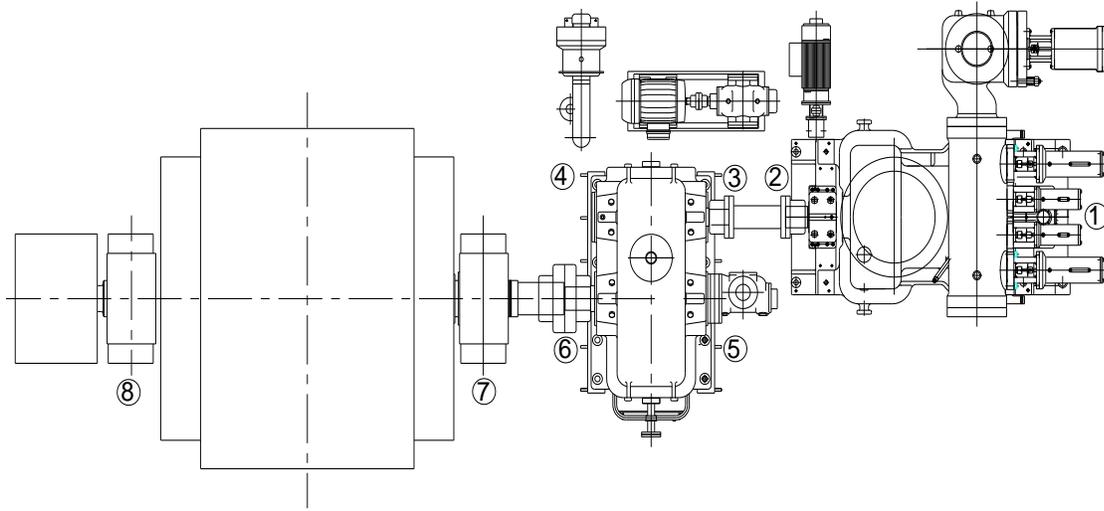
Figura 51. Ruta de medición para turbogeneradores



Fuente: elaboración propia.

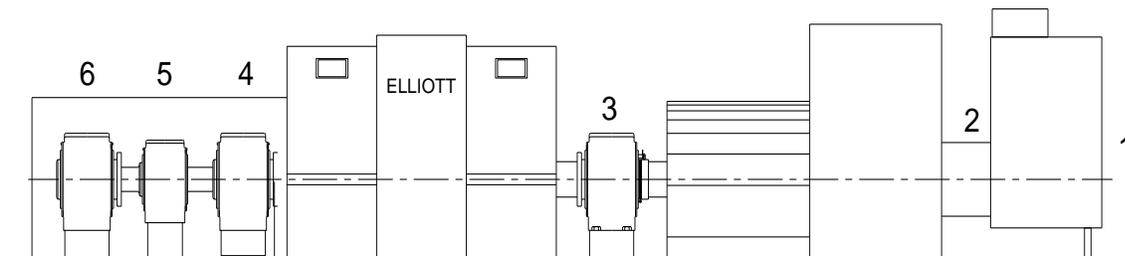
Los diagramas de equipos de medición son los siguientes:

Figura 52. **Diagrama de puntos de medición de turbogenerador TGM**



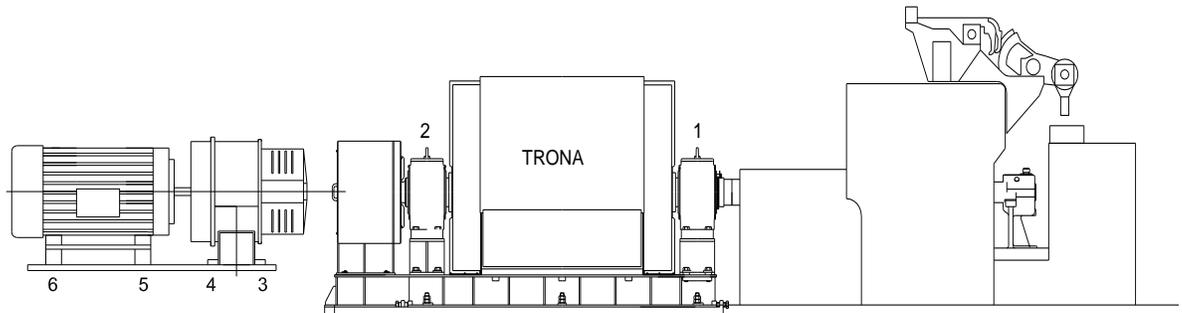
Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Figura 53. **Diagrama de puntos de medición de turbogenerador Topping**



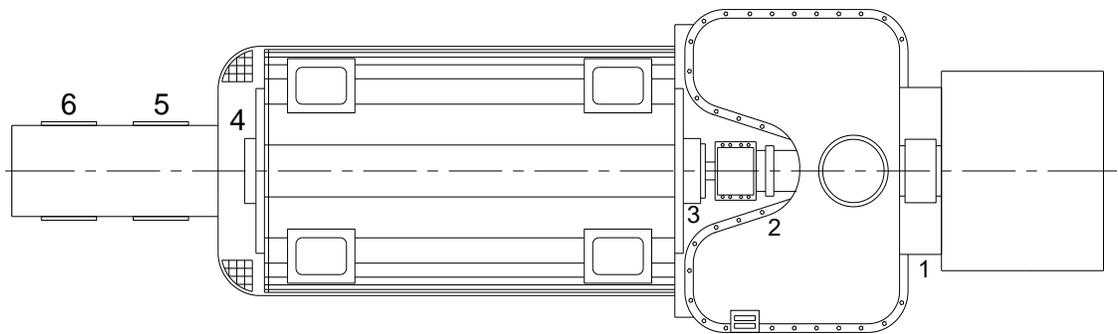
Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Figura 54. **Diagrama de puntos de medición de turbogenerador Trona**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Figura 55. **Diagrama de puntos de medición de turbogenerador Condensing**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

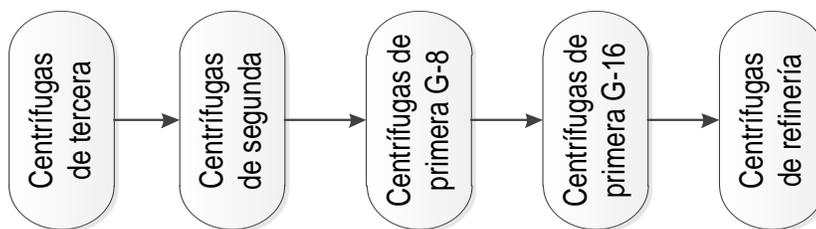
### 3.8.5. Área de Centrífugas

El área de Centrífugas se encuentra compuesta por equipos mecánicos del mismo nombre, los hay de primera masa (G-8 y G-16), de segunda masa, de tercera masa y centrífugas de refinería. Estos equipos son los encargados de separar los cristales de azúcar por medio de la fuerza centrífuga que ocurre en el interior.

Su reconstrucción o reparación resulta difícil, por tal razón se incluye dentro de los equipos críticos a ser monitoreados, puesto que su disponibilidad debe ser la mejor posible, evitando así la mayor cantidad de paros inesperados.

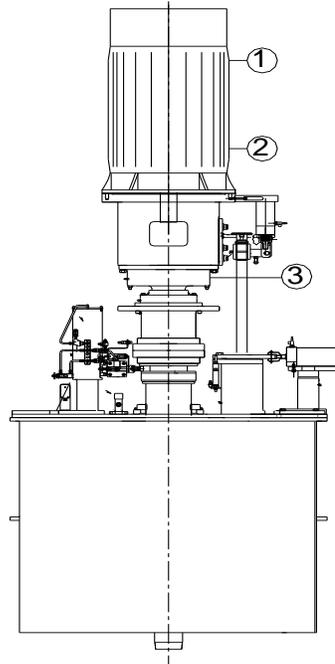
Las centrífugas de primera así como las de refinería funcionan de forma automática, realizando cargas y descargas de producto en tiempos estipulados, en tanto que las centrífugas de segunda y tercera funcionan de forma continua. Estos equipos son colocados en serie y están fabricados de forma idéntica.

Figura 56. **Ruta de medición para centrífugas**



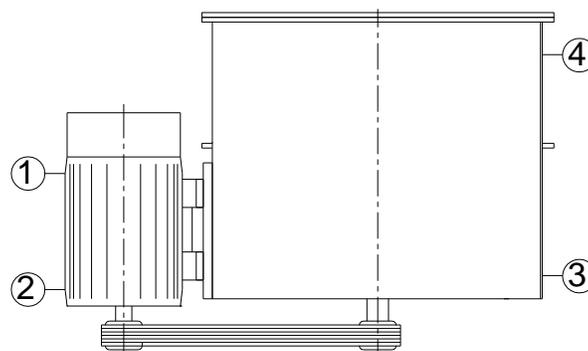
Fuente: elaboración propia.

Figura 57. **Diagrama de puntos de medición de centrifugas automáticas de primera y refinería**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Figura 58. **Diagrama de puntos de medición de centrifugas continuas de segunda y tercera**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

### 3.9. Creación del Departamento de Confiabilidad

Para realizar un nuevo proyecto se debe estar seguro que este es rentable y que será de beneficio para la empresa. De esta manera se realiza un análisis económico en el que se demuestra la rentabilidad de la creación del Departamento de Confiabilidad, utilizando para ello ciertos criterios comúnmente aplicados.

#### 3.9.1. Recuperación de la inversión

El tiempo para la recuperación de la inversión es un factor muy importante a tomar en cuenta para la creación de un nuevo departamento, para ello se utilizará como base, el ahorro que se tendrá al evitar el pago por tercerización de análisis predictivo a la empresa M&M Labtest.

La inversión inicial incluye la compra de instrumentos de análisis, la mano de obra; que implica contratación de nuevo personal, capacitación para contar con personal calificado y, mantenimiento o calibración de los instrumentos de medición, todo esto durante un tiempo de cinco años.

Tabla XII. **Costos de inversión inicial y anual**

EGRESOS	Primer Año	Segundo Año	Tercer Año	Cuarto Año	Quinto Año	Total
Equipos	Q 538 546	Q 0	Q 0	Q 0	Q 0	Q 538 546
Mano de Obra	Q 396 000	Q 415 800	Q 436 590	Q 458 420	Q 481 340	Q 2 188 150
Capacitación	Q 327 120	Q 236 880	Q 0	Q 0	Q 0	Q 564 000
Mantenimiento	Q 0	Q 15 600	Q 15 600	Q 15 600	Q 15 600	Q 62 400
<b>Total</b>	<b>Q 1 261 666</b>	<b>Q 668 280</b>	<b>Q 452 190</b>	<b>Q 474 020</b>	<b>Q 496 940</b>	<b>Q 3 353 096</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Ahorro promedio anual**

Historial de costo de Servicios M&M Labtest por año				
2011	2012	2013	Total	Promedio
Q 1 005 695	Q 872 837	Q 767 923	Q 2 646 455	Q 882 152

Fuente: elaboración propia.

Para obtener el tiempo de recuperación de la inversión en años, se divide el costo total durante cinco años y el promedio del ahorro anual:

- Recuperación de inversión (años):

$$\frac{\text{Costo total}}{\text{Ahorro anual}} = \frac{Q 3 353 096}{882 152 \text{ Q/ã}} = 3,8 \text{ años}$$

Por lo tanto el tiempo en recuperar la inversión será de 3 años y 10 meses.

### 3.9.2. Retorno sobre la inversión

Con los valores mostrados en las tablas XII y XIII, es posible determinar el retorno sobre la inversión (ROI) = (ahorros – inversión) / (inversión) = (Q 4 410 760 – Q 3 353 096) / (Q 3 353 096) = 0,31.

Retorno sobre la inversión (ROI) = 31 %

El resultado obtenido es un 31 %, que indica la rentabilidad al invertir dinero en el proyecto, pues se recuperará un 31 % más del capital invertido. En

este caso la recuperación se realiza mediante el ahorro, al no tercerizar los análisis previamente vistos.

### **3.9.3. Relación beneficio-costo**

El análisis de beneficio costo es un método que proporciona una medida de cuán rentable es un proyecto mediante la comparación de los costos previstos, con los beneficios esperados en la realización de este.

$$\text{Beneficio-costo} = \text{beneficios} / \text{costos} = \text{Q } 4\,410\,760 / \text{Q } 3\,353\,096 = 1,32.$$

Una relación arriba de 1 indica una solución factible. En este caso el índice de beneficio costo es 1,32, una muy buena calificación del proyecto, por lo que desde este punto de vista el proyecto es factible.

## **4. FASE DE DOCENCIA (IMPLEMENTACIÓN DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO)**

Para la implementación del mantenimiento predictivo, que implica técnicas de inspección no destructivas, resulta de suma importancia un cambio de mentalidad en todo el personal, sobre todo el operativo, que le cuesta mucho o no quiere adaptarse a cambios.

Los jefes de cada área deben por lo tanto, inculcar en su personal a cargo los nuevos métodos para maximizar la vida útil de los equipos, explicándoles el por qué es bueno, no solamente para la empresa sino también para ellos mismos.

### **4.1. Importancia que implica la implementación del mantenimiento predictivo en la maximización de la vida útil de equipos mecánicos en la industria azucarera**

Muchos equipos fallan debido a que no se lleva un control suficiente sobre estos. Asimismo, hay elementos mecánicos que se cambian sin saber exactamente si es necesario hacerlo, como es el caso de rodamientos, que en muchos equipos se cambian cada zafra sin la determinación exacta de que este ha cumplido con su vida útil.

En el Ingenio Santa Ana la época de zafra dura aproximadamente 180 días, durante los cuales los equipos deben de trabajar de forma continua, para no provocar pérdidas por paros inesperados.

Es aquí donde el análisis predictivo es de suma importancia para la maximización de la vida útil de los equipos. Esto no significa que dure un mayor tiempo de lo que el fabricante indica, sino que cumpla la mayor parte del tiempo posible en buenas condiciones.

#### **4.2. Importancia de los historiales en el mantenimiento predictivo**

El método de analizar equipos resulta muy eficiente cuando se puede analizar el comportamiento o tendencia de estos en el tiempo. Para cumplir con este objetivo es necesario contar con mediciones periódicas que coadyuven a la determinación del estado de los equipos.

Los historiales entonces, que son mediciones que se han realizado a las máquinas a través del período de zafra o período de funcionamiento de las mismas, son muy importantes al momento de querer implementar un plan de mantenimiento predictivo, pues es acá donde se puede observar como se ha comportado determinado equipo y, lo más importante, saber en qué momento se presentará una falla, para poder realizar la acción pertinente antes que ocurra un problema que sea causante de daño grave.

#### **4.3. Capacitación**

Contar con personal calificado para el uso de los equipos y para analizar los datos obtenidos es imprescindible si se quiere obtener los mejores resultados en la implementación del mantenimiento predictivo.

Actualmente en el Ingenio Santa Ana laboran ingenieros que poseen certificaciones en análisis de vibraciones, análisis de ultrasonido aéreo y estructural, así como análisis mediante termografía infrarroja. Sin embargo,

estas personas son jefes de áreas dentro del Ingenio por lo que no pueden hacerse cargo directamente del mantenimiento predictivo, pues esto implicaría más tiempo invertido y les saturaría el trabajo a realizar.

La capacitación que se propone realizar entonces es la certificación del personal a cargo del departamento, dicha certificación será para niveles I y II en análisis de vibraciones, análisis de ultrasonido y termografía infrarroja.

Asimismo, la capacitación al personal operativo que se hará cargo de recolectar los datos es imperativa, se les debe explicar la forma de utilizar los equipos de alta tecnología para las diferentes técnicas de inspección.

#### **4.3.1. Tema de la capacitación: uso adecuado de equipos de alta tecnología para técnicas de análisis predictivo**

Esta capacitación está dirigida al personal que se hará cargo de recolectar los datos para los historiales. Se ofrece explicaciones sobre el uso correcto de los analizadores de vibraciones, la pistola de ultrasonido y la cámara termográfica, así como definiciones básicas de cada técnica predictiva empleada que ayuden a identificar fallas potenciales.

##### **4.3.1.1. Contenido del tema**

- Introducción al mantenimiento predictivo en un ingenio azucarero.
- Técnicas no destructivas utilizadas para el análisis predictivo.
- Forma correcta de utilizar los analizadores de vibraciones mecánicas.
- Forma correcta de utilizar instrumento de medición de ultrasonido.
- Utilización adecuada de cámara de termografía infrarroja.
- Planos de medición en equipos rotativos.

- Explicación sobre Norma ISO 10816 sobre severidad de vibraciones mecánicas.
- Explicación sobre Norma NETA para sistemas eléctricos.
- Lubricación mediante ultrasonido.
- Análisis de termograma.
- Ejemplos de mediciones con las 3 técnicas de inspección.
- Conclusiones.

#### **4.3.1.2. Programación**

Se tiene programado una duración una semana para cada técnica de inspección. Este tiempo deberá ser suficiente para resolver dudas acerca del contenido, caso contrario se extenderá lo necesario para dejar el contenido lo más claro posible.

## CONCLUSIONES

1. El mantenimiento predictivo considera a cada máquina por separado, sustituyendo revisiones periódicas por mediciones periódicas que pueden seguir en detalle el desarrollo del estado de funcionamiento de cada máquina en específico.
2. Las técnicas de inspección más adecuadas a implementar para el análisis predictivo en equipos críticos del Ingenio Santa Ana son: análisis de vibraciones mecánicas, análisis de ultrasonido y análisis por medio de termografía infrarroja.
3. Basados en criterios como costo e importancia dentro del proceso se define que los equipos críticos del Ingenio son: troceadoras, precuchillas, picadoras, desfibradora, molinos, ventiladores de calderas, bombas de inyección de agua de calderas, centrífugas y turbogeneradores.
4. Mediante los diagramas de los equipos críticos, y diagramas de flujo de rutas de inspección, resulta de mucha facilidad la toma y recolección de datos, que sirven para crear historiales de los equipos y mostrar la tendencia en el tiempo.
5. El organigrama interno del Departamento de Confiabilidad queda conformado por 2 ingenieros, que son los encargados del análisis y administración del mantenimiento predictivo, así como 3 mecánicos especializados que se encargan de la recolección de datos.

6. La creación del Departamento de Confiabilidad resulta factible según el análisis económico realizado.

## RECOMENDACIONES

1. A la Gerencia de la División Industrial: autorizar la creación del Departamento de Confiabilidad de forma independiente, para que se haga cargo de los instrumentos de análisis no destructivos y pueda planear y planificar de mejor manera, el plan de mantenimiento predictivo, pues este ayuda a evitar gastos en tercerización.
2. A los jefes de las diferentes áreas: inculcar en el personal a cargo el proyecto de confiabilidad, ya que esto debe ser un tema que incluya a todos y cada uno de los integrantes del Ingenio Santa Ana, y no únicamente de las personas que conformen el Departamento de Confiabilidad.
3. A los integrantes del Departamento de Confiabilidad: tener en cuenta que la capacitación constante es base fundamental para el buen desempeño del departamento, por lo que obtener la certificación en las diferentes técnicas de inspección es primordial, para luego capacitar de forma correcta al personal que se hará cargo de la recolección de datos.
4. Al personal a cargo de la recolección de datos, su capacitación es muy importante para la correcta toma de datos, por lo que deben ser proactivos y meticulosos al momento de realizar las mediciones correspondientes.



## BIBLIOGRAFÍA

1. GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, Javier. *Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado*. 2a ed. Madrid: Fundación Confemetal, 2005. 569 p. ISBN: 84-96169-49-9.
2. MELGOSA REVILLAS, Sergio. *Guía de la termografía infrarroja: aplicaciones en ahorro y eficiencia energética*. Madrid: Gráficas Arias Montano, 2011. 187 p.
3. MIRANDA, Juan Carlos. *Análisis de vibraciones nivel 1*. Guatemala: NILS PIRA, 2013. 154 p.
4. ROSA PÉREZ, Manuel Alexander. *Manual de aplicaciones de herramientas y técnicas del mantenimiento predictivo*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Universidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, 2009. 581 p.
5. RUIZ ACEVEDO, Adriana María. *Modelo para la implementación de mantenimiento predictivo en las facilidades de producción de petróleo*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingeniería Físico Mecánica, 2012. 127 p.
6. TARQUIN, Anthony. *Ingeniería económica*. 6a ed. México: Litográfica Ingramex, 2006. 772 p. ISBN: 970-10-5608-6.

7. The Snell Group. *Aplicaciones de la termografía infrarroja*. USA: The Snell Group, 2011. 197 p.
8. UE Systems, División de Entrenamiento. *Ultrasonido propagado en el aire y estructuras*. USA: UE SYSTEM, 2013. 173 p.

## APÉNDICES

### Apéndice 1.

<b>DESGLOSE DE EQUIPOS CRÍTICOS DEL INGENIO SANTA ANA</b>	
<b>ÁREA</b>	<b>EQUIPO</b>
<b>Patio de caña TA</b>	Troceadora 1
	Troceadora 2
	Precuchilla
	Picadora 1
	Picadora 2
	Picadora 3
<b>Patio de caña TB</b>	Troceadora 1
	Troceadora 2
	Precuchilla
	Picadora 1 (A y B)
	Desfibradora
<b>Molinos TA</b>	Molino 1
	Molino 2
	Molino 3
	Molino 4
	Molino 5
	Molino 6
<b>Molinos TB</b>	Molino 1
	Molino 2
	Molino 3
	Molino 4
	Molino 5
<b>Caldera 1</b>	Ventilador Forzado 1
	Ventilador Forzado 2
	Ventilador Overfire 1
	Ventilador Overfire 2
	Ventilador Inducido 1

Continuación del apéndice 1.

<b>Caldera 4</b>	Ventilador Forzado 1
	Ventilador Overfire 1
	Ventilador Overfire 2
	Ventilador Inducido 1
<b>Caldera 6</b>	Ventilador Forzado
	Ventilador Overfire 1
	Ventilador Overfire 2
	Ventilador Inducido 1
	Ventilador Inducido 2
<b>Caldera 7</b>	Ventilador Forzado 1
	Ventilador Forzado 2
	Ventilador Overfire 1
	Ventilador Overfire 2
	Ventilador Inducido 1
	Ventilador Inducido 2
	Ventilador Secundario
<b>Caldera 5</b>	Ventilador Forzado 1
	Ventilador Overfire 1
	Ventilador Inducido 1
	Ventilador Inducido 2
	Ventilador Aumentador A
	Ventilador Aumentador B
<b>Bombas de Alimentación de Calderas</b>	Bomba de alimentación 2 caldera 1
	Bomba de alimentación 3 caldera 1
	Bomba de alimentación 2 caldera 4
	Bomba de alimentación 1 caldera 6
	Bomba de alimentación 2 caldera 6
	Bomba Auxiliar 2 alimentación caldera 4 y caldera 7
	Bomba de alimentación 2 caldera 7
	Bomba de alimentación 3 caldera 7
	Bomba de alimentación 1 caldera 5
	Bomba de alimentación 3 caldera 5

Continuación del apéndice 1.

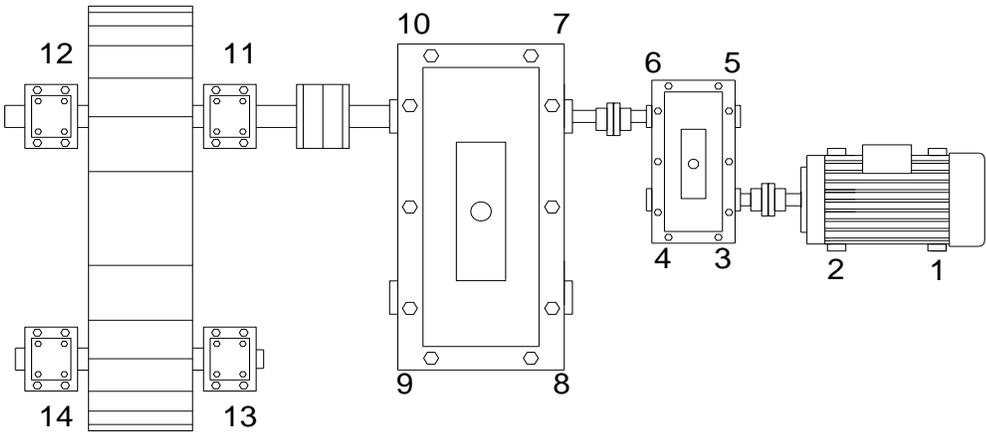
<b>Centrífugas</b>	Centrífuga de primera automática G-8 núm.1
	Centrífuga de primera automática G-8 núm.2
	Centrífuga de primera automática G-8 núm.3
	Centrífuga de primera automática G-8 núm.4
	Centrífuga de primera automática G-8 núm.5
	Centrífuga de primera automática G-8 núm.6
	Centrífuga de primera automática G-8 núm.7
	Centrífuga de primera automática G-8 núm.8
	Centrífuga de primera automática G-8 núm.9
	Centrífuga de primera automática G-16 núm.1
	Centrífuga de primera automática G-16 núm.2
	Centrífuga de primera automática G-16 núm.3
	Centrífuga de primera automática G-16 núm.4
	Centrífuga de primera automática G-16 núm.5
	Centrífuga de segunda continua núm. 1
	Centrífuga de segunda continua núm. 2
	Centrífuga de segunda continua núm. 3
	Centrífuga de segunda continua núm. 4
	Centrífuga de segunda continua núm. 5
	Centrífuga de segunda continua núm. 6
	Centrífuga de segunda continua núm. 7
	Centrífuga de segunda continua núm. 8
	Centrífuga de Tercera continua núm. 1
	Centrífuga de Tercera continua núm. 2
	Centrífuga de Tercera continua núm. 3
	Centrífuga de Tercera continua núm. 4
	Centrífuga de Tercera continua núm. 5
	Centrífuga de Tercera continua núm. 6
	Centrífuga de Tercera continua núm. 7
	Centrífuga de refinería núm. 1
	Centrífuga de refinería núm. 2
	Centrífuga de refinería núm. 3
	Centrífuga de refinería núm. 4
	Centrífuga de refinería núm. 5
	Centrífuga de refinería núm. 6
Centrífuga de refinería núm. 7	

Continuación del apéndice 1.

<b>Turbo - generadores</b>	Turbogenerador TGM
	Turbogenerador Topping
	Turbogenerador Trona
	Turbogenerador Condensing de 25 MW
	Turbogenerador de 4 MW

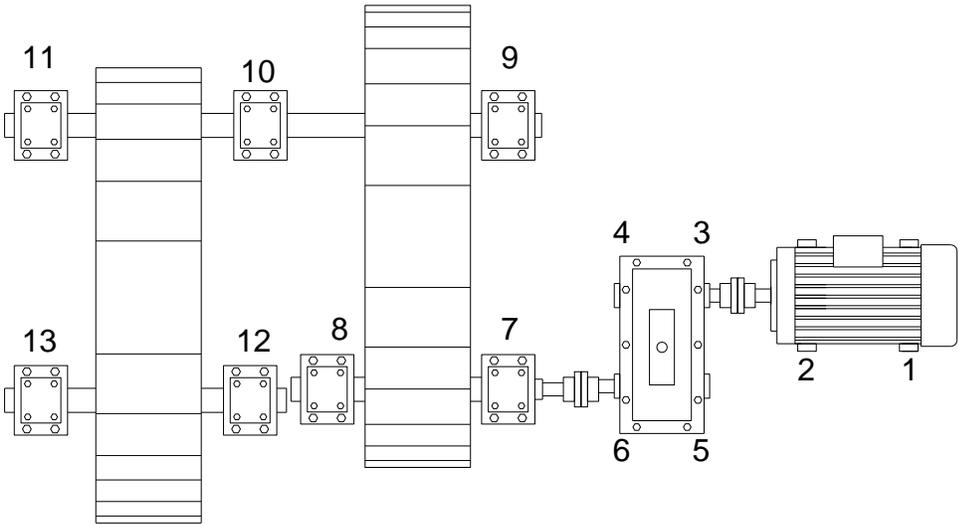
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Diagrama de puntos de medición Molino 1 T. A.



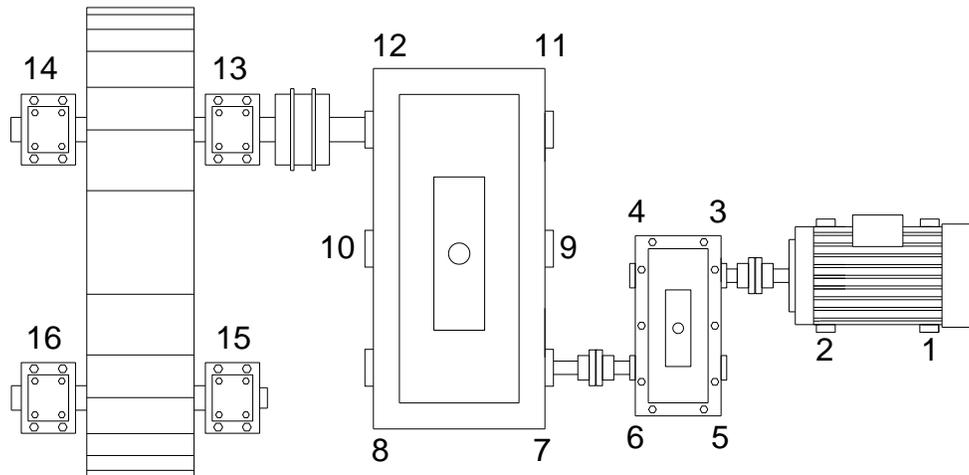
Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Apéndice 3. Diagrama de puntos de medición Molino 2 y 3 T. A.



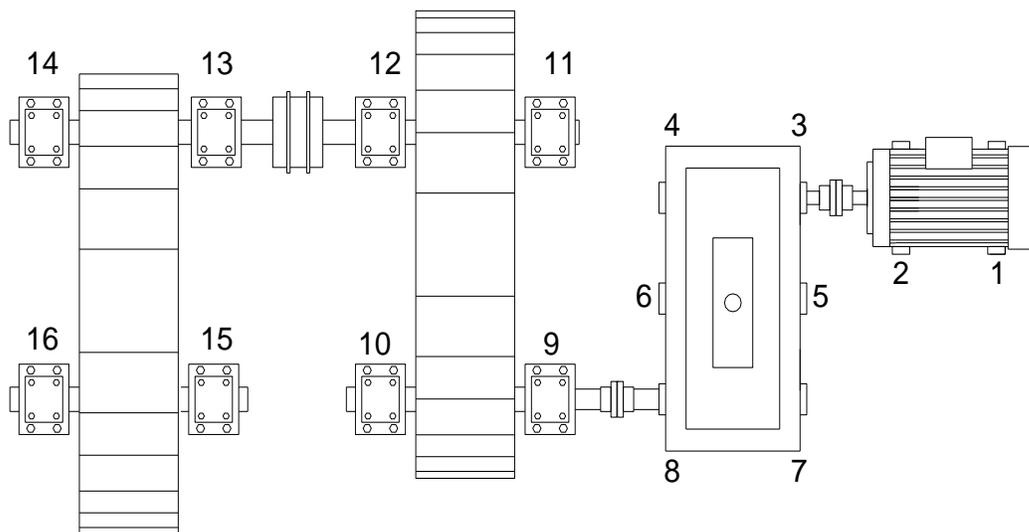
Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Apéndice 4. Diagrama de puntos de medición Molino 4 T. A.



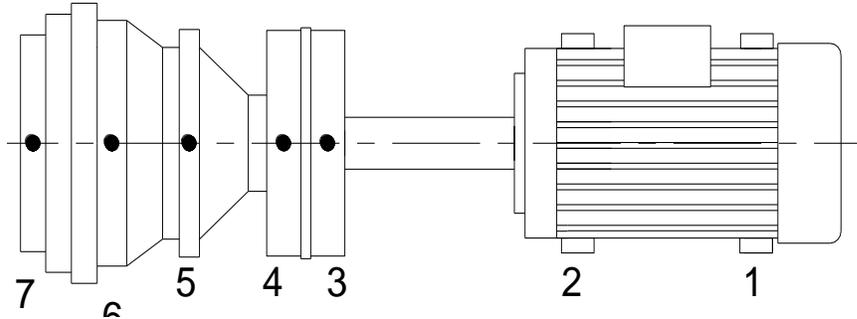
Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Apéndice 5. Diagrama de puntos de medición Molino 5 T. A.



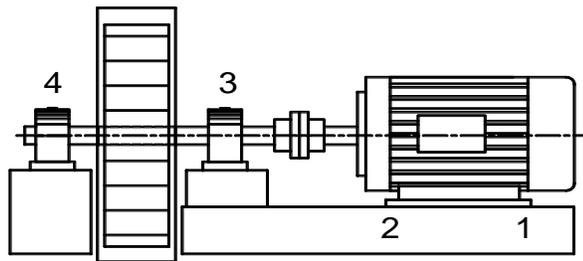
Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Apéndice 6. Diagrama de puntos de medición Molino 6 T. A.



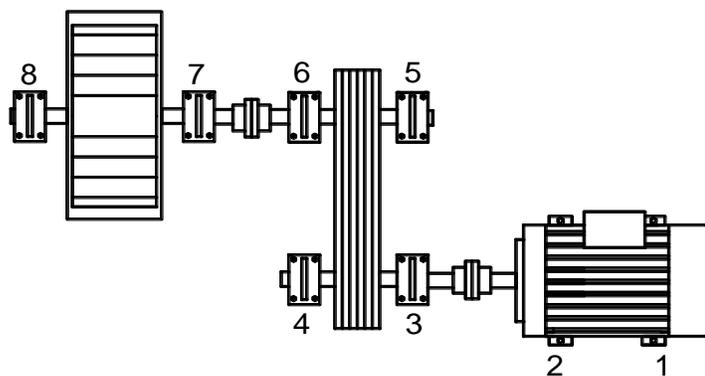
Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Apéndice 7. Diagrama de puntos de medición ventilador Forzado calderas 1, 4 y 5



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

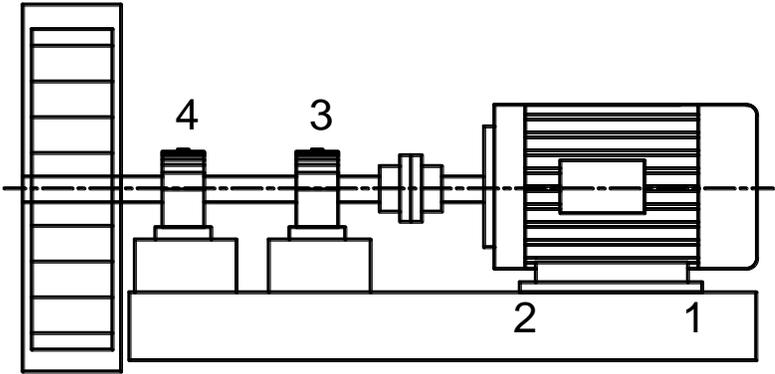
Apéndice 8. Diagrama de puntos de medición ventilador Forzado caldera 6



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

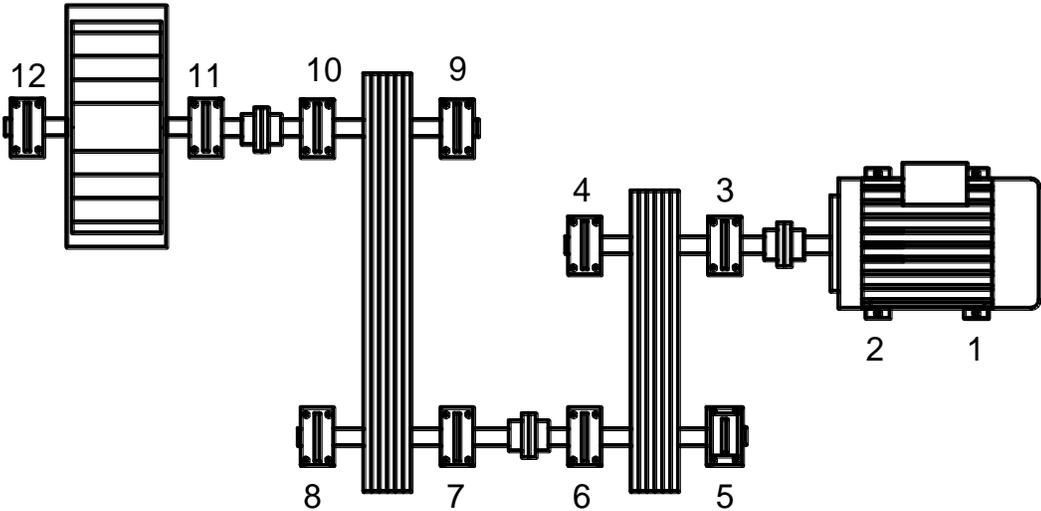


Apéndice 11. Diagrama de puntos de medición ventilador Secundario calderas 5, 6 y 7



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Apéndice 12. Diagrama de puntos de medición ventilador Inducido caldera 4



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

