



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

**IMPLEMENTACIÓN DE UN PROGRAMA DE INSPECCIÓN Y LUBRICACIÓN DE  
RODAMIENTOS EMPLEANDO ULTRASONIDO EN EQUIPOS CRÍTICOS DEL INGENIO  
SANTA ANA**

**Erwin Bernabé Pol Godoy**

Asesorado por el Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma

Guatemala, marzo de 2020



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**IMPLEMENTACIÓN DE UN PROGRAMA DE INSPECCIÓN Y LUBRICACIÓN DE  
RODAMIENTOS EMPLEANDO ULTRASONIDO EN EQUIPOS CRÍTICOS DEL INGENIO  
SANTA ANA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**ERWIN BERNABÉ POL GODOY**

ASESORADO POR EL ING. CARLOS ANÍBAL CHICOJAY COLOMA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, MARZO DE 2020



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martinez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Roberto Guzmán Ortiz
EXAMINADOR	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma
EXAMINADOR	Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda
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:

**IMPLEMENTACIÓN DE UN PROGRAMA DE INSPECCIÓN Y LUBRICACIÓN DE  
RODAMIENTOS EMPLEANDO ULTRASONIDO EN EQUIPOS CRÍTICOS DEL INGENIO  
SANTA ANA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica con fecha 25 de septiembre de 2017.

  
Erwin Bernabé Poi Godoy





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIDAD DE EPS

Guatemala, 26 de noviembre de 2019  
REF.EPS.DOC.829.11.19.

Ing. Oscar Argueta Hernández  
Director Unidad de EPS  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Estimado Ingeniero Argueta Hernández.


Por este medio atentamente le informo que como Asesor-Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), del estudiante universitario **Erwin Bernabé Pol Godoy** de la Carrera de Ingeniería Mecánica, con carné No. 201220147, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **IMPLEMENTACIÓN DE UN PROGRAMA DE INSPECCIÓN Y LUBRICACIÓN DE RODAMIENTOS EMPLEANDO ULTRASONIDO EN EQUIPOS CRÍTICOS DEL 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. Carlos Anibal Chicojay Coloma  
Asesor-Supervisor de EPS  
Área de Ingeniería Mecánica

c.c. Archivo  
CACC/ra





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIDAD DE EPS

Guatemala, 26 de noviembre de 2019  
REF.EPS.D.431.11.19

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

Estimado Ingeniero Guzmán Ortíz:

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado: **IMPLEMENTACIÓN DE UN PROGRAMA DE INSPECCIÓN Y LUBRICACIÓN DE RODAMIENTOS EMPLEANDO ULTRASONIDO EN EQUIPOS CRÍTICOS DEL INGENIO SANTA ANA**, que fue desarrollado por el estudiante universitario **Erwin Bernabé Pol Godoy** quien fue debidamente asesorado y supervisado por el Ingeniero Carlos Anibal Chicojay Coloma.

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. Oscar Argueta Hernández  
Director Unidad de EPS



OAH/ra



Ref.E.I.M.001.2020

El Revisor 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: **IMPLEMENTACIÓN DE UN PROGRAMA DE INSPECCIÓN Y LUBRICACIÓN DE RODAMIENTOS EMPLEANDO ULTRASONIDO EN EQUIPOS CRÍTICOS DEL INGENIO SANTA ANA** del estudiante **Erwin Bernabé Pol Godoy**, CUI 2240838210101, Reg. Académico No. 201220147 y habiendo realizado la revisión de Escuela, se autoriza para que continúe su trámite en la oficina de Lingüística, Unidad de Planificación.

*"Id y Enseñad a Todos"*



Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez  
Revisor  
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, enero de 2020  
/aej





**USAC**  
TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.070.2020

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: **IMPLEMENTACIÓN DE UN PROGRAMA DE INSPECCIÓN Y LUBRICACIÓN DE RODAMIENTOS EMPLEANDO ULTRASONIDO EN EQUIPOS CRÍTICOS DEL INGENIO SANTA ANA** del estudiante **Erwin Bernabé Pol Godoy**, CUI 2240838210101, Reg. Académico No. 201220147 y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

*"Id y Enseñad a Todos"*

Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza  
Director  
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, marzo 2020

/aej







Decanato  
Facultad de Ingeniería  
24189102 - 24189103

DTG. 100.2020

La Decana 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: **IMPLEMENTACIÓN DE UN PROGRAMA DE INSPECCIÓN Y LUBRICACIÓN DE RODAMIENTOS EMPLEANDO ULTRASONIDO EN EQUIPOS CRÍTICOS DEL INGENIO SANTA ANA**, presentado por el estudiante universitario: **Erwin Bernabé Pol Godoy**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Anabela Cordova Estrada  
Decana



Guatemala, marzo de 2020

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por darme la sabiduría y entendimiento necesario para alcanzar esta meta.
<b>Mi padre</b>	Erwin Pol, por todo el esfuerzo para darme la oportunidad de ser un profesional.
<b>Mi madre</b>	Amarilis Godoy, por todo su apoyo, esfuerzo, amor y dedicación a sus hijos y apoyarme para cumplir esta meta.
<b>Mi hermana</b>	Dayana Pol, por el cariño y ánimos para seguir adelante.
<b>Mi novia</b>	Yomira Mazariegos, por su amor y apoyo en esta etapa final de mi carrera.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Universidad de San Carlos  
de Guatemala**

Por haberme abierto sus puertas, por verme crecer y trascender a lo largo de la carrera.

**Facultad de Ingeniería**

Por darme las herramientas necesarias para construir mi futuro.

**Ingenio Santa Ana**

Por darme la oportunidad de realizar el Ejercicio Profesional Supervisado en sus instalaciones.

**Familia Santaneca**

Por su amistad y tiempo compartido.





1.3.5.	Técnicas de mantenimiento predictivo .....	14
1.3.5.1.	Técnica de análisis de vibraciones mecánicas .....	14
1.3.5.2.	Técnica de análisis por medio de termografía .....	15
1.3.5.3.	Técnica de análisis por medio de ultrasonido .....	16
1.3.5.3.1.	Aplicaciones de la técnica de ultrasonido .....	17
1.3.5.3.2.	Ultrasonido para monitoreo de rodamientos .....	20
1.3.5.3.3	El ultrasonido y el ahorro energético .....	21
1.4.	Lubricación de rodamientos .....	22
1.4.1.	Principios de lubricación .....	24
1.4.2.	Tipos de lubricantes .....	29
1.4.3.	Cantidad óptima de lubricante .....	32
1.4.4.	Lubricación basada en condición por ultrasonido...34	
1.4.4.1.	Procedimiento de lubricación por ultrasonido .....	37
1.4.4.2.	Beneficios de la lubricación por ultrasonido .....	38
1.5.	Costos evitados por la detección de fallas mecánicas en rodamientos .....	40



2.	FASE DE SERVICIO TÉCNICO PROFESIONAL .....	45
2.1.	Implementación de un programa de inspección y lubricación de rodamientos.....	45
2.1.1.	Medios físicos .....	46
2.1.1.1.	Instrumentos de medición de ultrasonido .....	47
2.1.2.	Selección de equipos a integrar al programa .....	49
2.1.2.1.	Definición de equipos críticos .....	49
2.1.2.1.1.	Clasificación de equipos críticos .....	50
2.1.2.2.	Periodos de monitoreo y lubricación....	51
2.1.2.3.	Descripción del proceso de análisis por ultrasonido .....	52
2.1.2.3.1.	Establecimiento de líneas base para rodamientos.....	54
2.1.2.3.2.	Gráficos de tendencia para valores puntuales .	55
2.1.2.3.3.	Niveles de intervención en rodamientos.....	58
2.1.2.3.4.	Análisis de señal.....	60
2.1.2.3.5.	Lubricación de rodamientos por medio de ultrasonido .....	64
2.1.2.3.6.	Softwares especializados .....	65
2.1.2.4.	Elaboración de rutas de inspección .....	69
2.1.2.5.	Rutas de inspección y lubricación.....	69
2.1.2.5.1.	Patio de caña.....	69

	2.1.2.5.2.	Molinos.....	71
	2.1.2.5.3.	Calderas.....	75
	2.1.2.5.4.	Cogeneración.....	79
	2.1.2.5.5.	Fábrica .....	85
3.	FASE DE DOCENCIA.....		89
3.1.	Capacitación del personal .....		89
3.1.1.	Uso adecuado de los equipos de ultrasonido.....		90
3.1.2.	Uso de software .....		91
3.1.3.	Propuesta para la certificación del personal.....		92
3.2.	Importancia de las buenas prácticas de lubricación.....		92
3.3.	Importancia de los historiales en el mantenimiento predictivo.....		93
CONCLUSIONES.....			95
RECOMENDACIONES .....			97
BIBLIOGRAFÍA.....			99

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Organigrama división industrial .....	5
2.	Mapa de ubicación de la empresa. ....	6
3.	Curva de evolución de fallas P-F .....	13
4.	Fricción versus velocidad .....	25
5.	Clase NLGI.....	27
6.	Selección de grasa lubricante .....	29
7.	Lubricación por tipo de lubricante .....	31
8.	Lubricación basada en condición con ultrasonido .....	35
9.	Longitud de onda de ultrasonido .....	37
10.	Monitoreo por ultrasonido.....	38
11.	Ultraprobe 10 000 y accesorios.....	48
12.	Ultraprobe 201 Grease Caddy .....	49
13.	Punto de toma de datos de ultrasonido.....	53
14.	Diagrama de proceso de análisis por ultrasonido .....	54
15.	Gráfico de tendencia rodamiento lado libre desfibradora patio TB.....	56
16.	Gráfico de tendencia rodamiento lado acople inducido 1 caldera 8 ...	57
17.	Falla causada por paso de corrientes parásitas .....	58
18.	Gráfico de tendencia rodamiento reductor desfibradora patio TA .....	62
19.	Espectro de sonido, rodamiento reductor desfibradora patio TA .....	62
20.	Carcaza del reductor de la desfibradora del patio de caña TA.....	63
21.	Rodamiento del reductor de la desfibradora patio de caña TA .....	63
22.	Falla en elementos rodantes .....	64
23.	Pantalla de consulta en programa SIGES.....	66

24.	Valores puntuales y gráficos de tendencia en programa SIGES .....	66
25.	Programa Ultratrend DMS .....	67
26.	Programa UE Spectralyzer .....	68
27.	Ruta de medición patio de caña tándem A .....	70
28.	Ruta de medición patio de caña tándem B .....	70
29.	Esquema de puntos de medición troceadoras 1 y 2 patio TA y patio TB .....	70
30.	Esquema de puntos de medición precuchilla, picadora y desfibradora patio A y B.....	71
31.	Esquema de puntos de medición banda de hule TA y TB .....	71
32.	Ruta de medición molinos TA .....	72
33.	Ruta de medición molinos TB .....	73
34.	Diagrama intermedios A y B .....	73
35.	Esquema de puntos de medición tren de molinos de caña.....	74
36.	Esquema de puntos de medición reductor planetario .....	74
37.	Esquema de puntos de medición conductores intermedios.....	75
38.	Ruta de medición ventiladores caldera 1 .....	76
39.	Ruta de medición ventiladores caldera 4 .....	76
40.	Ruta de medición ventiladores caldera 6 .....	76
41.	Ruta de medición ventiladores caldera 7 .....	77
42.	Ruta de medición bombas de alimentación de agua de calderas .....	77
43.	Esquema de puntos de medición ventiladores secundarios y <i>overfire</i> .....	78
44.	Esquema de puntos de medición ventiladores inducidos y forzados .	78
45.	Esquema de puntos de medición ventiladores forzados caldera 7 ....	79
46.	Esquema de puntos de medición bombas de alimentación de agua de calderas .....	79
47.	Ruta de medición ventiladores caldera 5 .....	80
48.	Ruta de medición ventiladores caldera 8 .....	81

49.	Ruta de medición torres de enfriamiento.....	81
50.	Esquema de puntos de medición ventiladores inducidos, forzados y secundarios caldera 8 .....	82
51.	Esquema de puntos de medición ventiladores inducidos y forzados caldera 5 .....	82
52.	Esquema de puntos de medición ventilador <i>overfire</i> y secundario caldera 5 .....	83
53.	Esquema de puntos de medición ventiladores torres de enfriamiento .....	83
54.	Esquema de puntos de medición bombas de enfriamiento.....	84
55.	Esquema de puntos de medición bombas de recirculación torres de enfriamiento fábrica.....	84
56.	Rutas de medición centrífugas.....	85
57.	Rutas de medición bombas fábrica .....	85
58.	Esquema de puntos de medición centrífugas continuas .....	86
59.	Esquema de puntos de medición centrífugas automáticas. ....	86
60.	Esquema de puntos de medición bombas de jugo precalentado y alcalizado .....	87
61.	Esquema de puntos de medición bombas de jugo claro.....	87
62.	Capacitación del personal .....	90

## TABLAS

I.	Rangos de sonido .....	17
II.	Frecuencias centrales para detectar fallos ultrasónicos.....	18
III.	Costos estimados por fugas de aire comprimido. ....	22
IV.	Clasificación de las grasas según el número de consistencia NLGI .....	27
V.	Datos de mediciones punto 4 desfibradora patio TA.....	41
VI.	Listado de equipos críticos.....	50

VII. Niveles de acción para rodamientos ..... 59

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>dB</b>	Decibel
<b>\$</b>	Dólar
<b>Hz</b>	Hertz
<b>PSI</b>	Libras por pulgada cuadrada
<b>MCF</b>	Mil pies cúbicos
<b>Q</b>	Quetzal
<b>RPM</b>	Revoluciones por minuto
<b>TA</b>	Tándem A
<b>TB</b>	Tándem B
<b>FFT</b>	Transformada Rápida de Fourier





## GLOSARIO

<b>Centrífuga</b>	Instrumento que pone en rotación una muestra para acelerar, mediante la fuerza centrífuga, la decantación o sedimentación de sus componentes o fases (normalmente una sólida y una líquida) en función de la densidad.
<b>Chumacera</b>	Pieza de metal o madera con una muesca en que descansa y gira cualquier eje de maquinaria.
<b>Decibel</b>	Medida de la intensidad del sonido.
<b>Frecuencia</b>	Se refiere al número de ciclos por unidad de tiempo.
<b>Hertz</b>	Hercio. Unidad de frecuencia del sistema internacional, de símbolo <i>Hz</i> , que equivale a la frecuencia de un fenómeno periódico cuyo período es 1 segundo.
<b>Heterodino</b>	Generar nuevas frecuencias mediante la mezcla de dos o más señales en un dispositivo no lineal, tal como un diodo, una válvula termoiónica o un transistor.
<b>Maza</b>	Elemento encargado de la extracción del jugo en un molino de caña.

<b>Obturación</b>	Tapar un conducto o una abertura.
<b>Tándem</b>	Se emplea para señalar elementos de un mismo tipo que se posicionan en serie, es decir, uno atrás de otro, y que cumplen la misma función en un mecanismo.
<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.
<b>Zafra</b>	Periodo de cosecha de la caña de azúcar.

## **RESUMEN**

El presente informe del Ejercicio Profesional Supervisado fue realizado en el Ingenio Santa Ana en el periodo comprendido del 11 de octubre de 2017 al 2 de mayo de 2018.

En la fase de investigación se describen los tipos de mantenimiento, haciendo énfasis en el mantenimiento predictivo aplicado a la industria, así como las distintas técnicas de inspección, centrándose en la técnica de inspección por medio de ultrasonido, las ventajas y su aplicación en el monitoreo de condición y lubricación de rodamientos por medio de ultrasonido.

En la fase técnico profesional se desarrollan las etapas para la implementación de un programa de monitoreo de condición y lubricación de rodamientos por medio de ultrasonido, se establece un listado de equipos a ser monitoreados, así como las rutas y diagramas de medición para la toma periódica de datos. La implementación de un programa de monitoreo de condición por ultrasonido implica el uso de software especializado que faciliten el almacenamiento y análisis de la información recolectada, para asegurar la eficiencia del programa establecido.

La última fase, corresponde a la docencia, se hace énfasis en la calificación y certificación del personal encargado del programa de monitoreo de condición. Se incluye la capacitación en sitio del personal encargado de la realización del trabajo de campo.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Implementar un programa para la inspección y lubricación de rodamientos empleando ultrasonido en equipos críticos del Ingenio Santa Ana.

### **Específicos**

1. Definir los equipos a integrar al programa para su inspección y lubricación por ultrasonido.
2. Diseñar rutas e intervalos regulares de medición y lubricación que faciliten el control sobre los equipos.
3. Establecer líneas bases y niveles de alarma en los equipos monitoreados para facilitar la detección temprana de fallas.
4. Determinar líneas de tendencia del comportamiento de cada equipo monitoreado para evaluar el deterioro periódico de los elementos rodantes en el tiempo.



## INTRODUCCIÓN

Los rodamientos son una de las piezas de maquinaria más utilizadas, son componentes de giro que soportan la fricción y minimizan el desgaste. La lubricación es un tema de gran importancia dentro del mantenimiento preventivo de los rodamientos, siendo una de sus funciones evitar el contacto entre superficies en movimiento, formando una película lubricante entre ellas, de esta manera se logra evitar el desgaste prematuro de estos componentes de máquina.

Una lubricación adecuada ayuda a mantener el buen estado de los rodamientos, sin embargo, como todo componente de máquina, pueden fallar, ya sea porque alcanzaron su tiempo de vida útil, por contaminantes, por defectos de fabricación, entre otras causas. El ultrasonido propagado en aire y estructuras permite detectar las fallas incipientes en un rodamiento que permite evitar fallas catastróficas, que son causantes de elevados costos de mantenimiento, pérdidas de producción e incluso pueden causar daños a personas e instalaciones.

Tomando en consideración lo anterior, en Ingenio Santa Ana, ubicado en el km. 64,5 carretera a Santa Lucía Cotzumalguapa interior finca Cerritos, Escuintla, Guatemala. Por medio del departamento de mantenimiento de confiabilidad, busca optimizar las actividades y recursos relacionados con la lubricación y junto con esto contar con un programa de inspección que permita detectar fallas incipientes en los rodamientos mediante el uso de ultrasonido.





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

## **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 o 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 instaladas es de 120 MW

Las operaciones de corte de caña, se iniciaron en el periodo de 1977 o 1978. Se empleaban 1 200 cortadores para cortar 1 000 toneladas de caña diarias, con machete convencional. Hace 13 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 equipos de alta tecnología, ello apoyado por un proyecto de automatización industrial único en Centro América, alcanzando en las últimas zafras producciones record de 7 000 000 de quintales de azúcar.

### **1.1.2. Visión**

Actualmente la visión del Ingenio Santa Ana es la siguiente:

“Ser una de las organizaciones líderes en la agroindustria azucarera, comprometida con la sociedad y el medio ambiente, cuya eficiencia operativa y

financiera genere bienestar para nuestros accionistas, colaboradores, clientes y proveedores”.<sup>1</sup>

### **1.1.3. Misión**

La misión de Ingenio Santa Ana es la siguiente.

“Producir y comercializar azúcar, melaza y energía eléctrica a través del uso eficiente de nuestros recursos, generando desarrollo para mantenernos como una empresa competitiva y rentable en el mercado nacional e internacional”.<sup>2</sup>

### **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 presentada por un organigrama tipo funcional dado que tiene una mejor representación administrativa, donde se observa el de la división industrial como se observa en la figura 1.

- Gerencia general

El gerente general es el responsable de dirigir, planificar, coordinar, supervisar, controlar y evaluar las actividades de gestión técnica y administrativa de las gerencias de división e impartir las instrucciones para la ejecución de las funciones correspondientes, además, definir e interpretar las políticas establecidas por la dirección. El correcto desempeño de estas

---

<sup>1</sup> Ingenio Santa Ana. Departamento de Recursos Humanos.

<sup>2</sup> Ibid.

obligaciones requiere de un conocimiento funcional de todas las fases de operación de la empresa y una buena comunicación con sus subordinados.

- División de recursos humanos

Su misión es satisfacer en forma eficaz los requerimientos de 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.

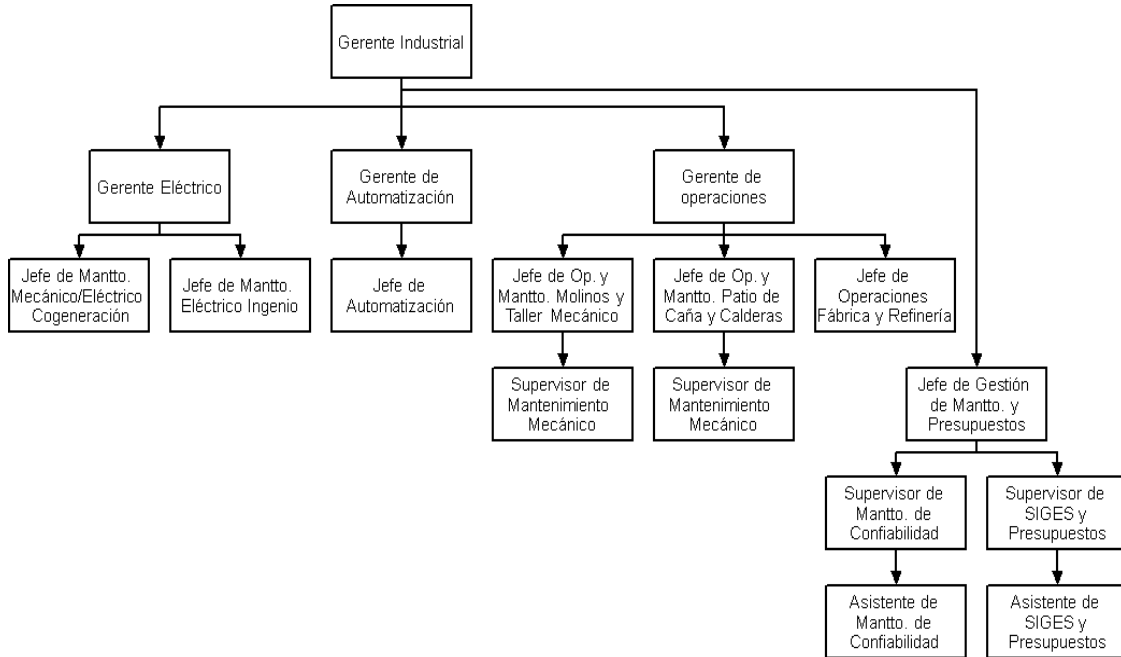
- División administrativa

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: Ingenio Santa Ana, S.A.

- 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

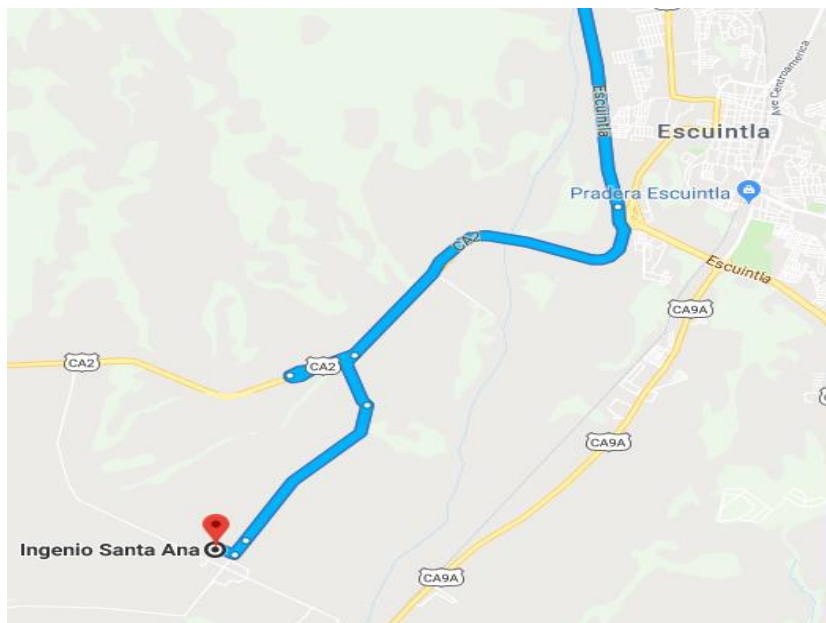
Se encarga de la adecuada administración de los recursos financieros, para la ejecución del proceso productivo, del funcionamiento e inversión,

generando información financiera confiable y oportuna, a través de desarrollo del recurso humano, de procedimientos y tecnología actualizada, para la adecuada toma de decisiones de la administración de 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 ubicación de la empresa**



Fuente: Ingenio Santa Ana, S.A.

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

El mantenimiento predictivo es poco utilizado en las empresas, debido al alto costo de adquisición de equipos y la necesidad de personal calificado. A la fecha Ingenio Santa Ana cuenta con distintos equipos para análisis de vibraciones mecánicas, termografía infrarroja, ultrasonido propagado en aire y estructuras, ultrasonido ecopulso. Ingenio Santa Ana también cuenta con ingenieros certificados en las distintas técnicas de mantenimiento predictivo, así como rutas programadas para la recolección de datos de vibraciones, por lo que se desea incorporar el ultrasonido propagado en aire y estructuras como técnica complementaria al análisis de vibraciones para la detección de fallas e incrementar la confiabilidad de los equipos.

## **1.3. Mantenimiento**

Se puede definir el mantenimiento como el conjunto de actividades necesarias para mantener equipos e instalaciones, en servicio durante el mayor tiempo posible, aumentando su disponibilidad con el máximo rendimiento y calidad.

El mantenimiento engloba las técnicas que permiten prever las averías, efectuar revisiones, engrases y revisiones eficaces, con el fin de alargar la vida útil de los equipos de forma rentable para el usuario.

Los objetivos del mantenimiento se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Evitar, reducir y reparar los fallos sobre los bienes
- Disminuir la gravedad de las fallas que no se logren evitar

- Evitar paros no programados
- Evitar incidentes y aumentar la seguridad de las personas
- Conservar los bienes productivos en condiciones seguras y preestablecidas de operación.
- Reducir costos.
- Alcanzar o prolongar la vida útil de los bienes.

El mantenimiento aplicado de una manera adecuada, prolonga la vida útil de los activos, reduce el número de fallas y ayuda a mantener un rendimiento adecuado de los mismos durante un mayor tiempo.

En la actualidad existen varios tipos de mantenimiento. Algunos de estos se enfocan no solamente en la corrección de fallas sino también en la detección y prevención de estas.

De acuerdo a la naturaleza y objetivos que se pretende alcanzar, el mantenimiento se puede clasificar en distintos tipos, entre los cuales se encuentran:

### **1.3.1. Mantenimiento correctivo**

Es el conjunto de actividades destinadas a la reparación y sustitución de elementos deteriorados al momento de aparecer la falla.

El inconveniente de este sistema es que la falla puede sobrevenir en cualquier momento, muchas veces, en el menos oportuno, debido a que en esos momentos se somete el bien a una mayor exigencia.



De igual manera, al producirse una falla no detectada a tiempo, las partes cuyo cambio hubiera resultado de bajos costos, pueden causar daños importantes en otros elementos que se encontraban en buen estado incrementando los costos de reparación, a esto se le suman los altos costos ocasionados por las paradas no programadas. Además, las fallas producidas de manera repentina pueden representar un riesgo para el personal que se encuentre cerca del equipo. Este tipo de mantenimiento representa los costos de operación más elevados.

#### **1.3.1.1. 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 con llevaría a pérdidas económicas mayores.

#### **1.3.1.2. 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.

### **1.3.2. Mantenimiento preventivo**

Tiene por misión mantener un nivel de servicio determinado en los equipos mediante la programación de actividades de inspección e intervención de sus puntos más vulnerables. Posee un carácter sistemático, es decir, se interviene aunque el equipo no haya presentado ningún indicio de falla.

El mantenimiento preventivo se realiza mediante un programa de actividades (revisiones y lubricaciones), previamente establecido, con el fin de anticiparse a la presencia de fallas en instalaciones y equipos. Para ello se debe conocer sistemáticamente el estado de los equipos, máquinas e instalaciones para programar en los momentos más oportunos y de menor impacto en la producción de las acciones que tratan de eliminar las averías que originan las interrupciones.

### **1.3.3. 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 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
  - 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
  - Aparamenta 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:

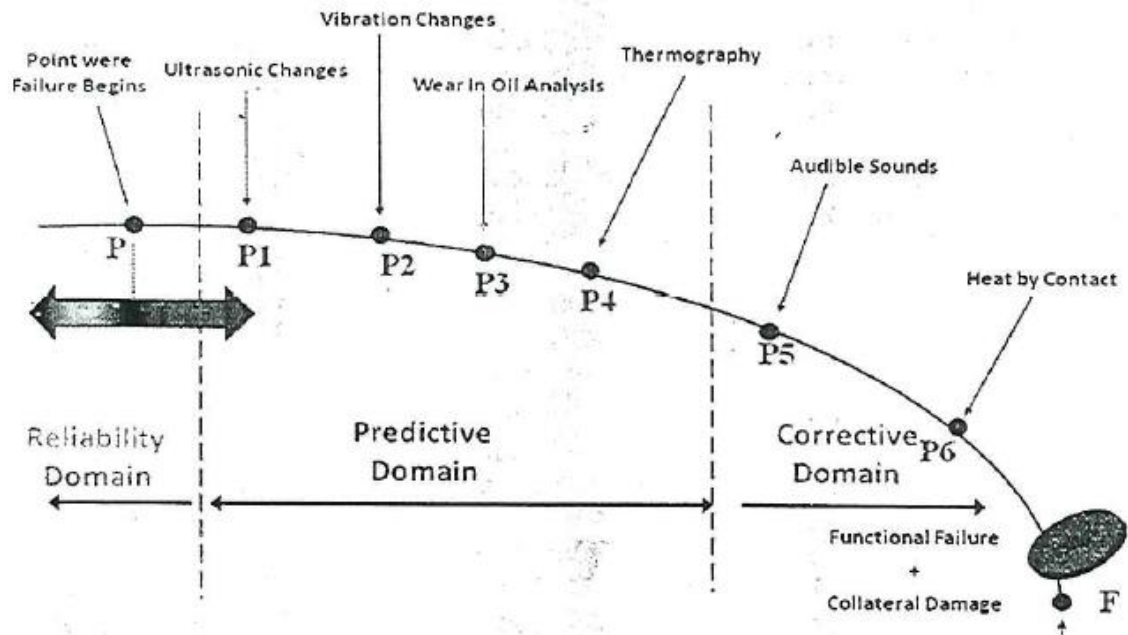
- Determinación de los equipos críticos
- Determinación de técnicas de inspección
- Definición de las rutinas predictivas y su frecuencia
- Capacitación del personal técnico
- Creación de historiales en sistemas computarizados
- Inicio y seguimiento de la ejecución y resultados de las rutinas.
- Medición 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, puede ser a través de la extrapolación o el resultado de la toma de datos por medio del monitoreo de diferentes variables.

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.

Figura 3. Curva de evolución de fallas P-F



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

### 1.3.4. Ventajas del mantenimiento predictivo

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.

### **1.3.5. Técnicas de mantenimiento predictivo**

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 aéreo estructural, análisis de vibraciones y termografía infrarroja.

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

Una máquina ideal no produciría vibraciones, porque 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 y 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.

#### **1.3.5.2. Técnica de análisis por medio de termografía**

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, 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 que registra la intensidad de la radiación y la convierte en una imagen visible.

### **1.3.5.3. 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 SYSTEMS. *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.

#### **1.3.5.3.1. 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 tabla II, 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 SYSTEMS. *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.

### **1.3.5.3.2. 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.

#### **1.3.5.3.3. El ultrasonido y el ahorro energético**

El ultrasonido propagado en aire y estructuras es una técnica que se ha convertido en una de las principales herramientas dentro del mantenimiento predictivo. El amplio rango de aplicaciones que tiene esta técnica además de contar con una curva de aprendizaje reducida en comparación con otras técnicas de diagnóstico, son sus principales ventajas.

El ultrasonido puede utilizarse no solamente para inspecciones mecánicas, también tiene una aplicación muy valiosa en la detección de fugas en sistemas de aire comprimido. Con una inspección de la línea sin necesidad de contacto con la tubería la técnica de ultrasonido permite detectar fugas que puedan impactar en el consumo de aire comprimido. Con ello se consigue un ahorro en el consumo eléctrico en el uso de compresores.

El departamento de energía de EU ha estimado que el 30 % de todo el aire comprimido en EUA se pierde mediante fugas. Los resultados de las inspecciones típicas de aire comprimido han demostrado ahorros en el rango de miles de dólares hasta los cientos de miles de dólares. Realizando la inspección y corrigiendo los problemas de una compañía se puede reducir el consumo de energía, incrementar la eficiencia, maximizar la productividad de aire, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero e incrementar la seguridad.

La tabla III describe los costos estimados de una fuga de aire comprimido dependiendo del diámetro de la fuga a una presión de 100 PSI y un costo de \$0,22/MCF:

Tabla III. **Costos estimados por fugas de aire comprimido**

Diametro de la fuga	Pies cúbicos /minuto	Pies cúbicos /día	Pérdida /día dólares	Pérdida / mes dólares	Pérdida / año dolares
1/64"	0.45	576	\$ 0.13	\$ 4.00	\$ 48.00
1/32"	1.60	2,304	\$ 0.51	\$ 15.50	\$ 168.00
3/64"	3.66	5,270	\$ 1.16	\$ 35.30	\$ 424.00
1/16"	6.45	9,288	\$ 2.04	\$ 62.00	\$ 744.00
3/32"	14.50	20,880	\$ 4.59	\$ 139.50	\$ 1,674.00
1/8"	25.80	37,157	\$ 8.17	\$ 248.40	\$ 2,981.00
3/16"	58.30	83,952	\$ 18.47	\$ 561.50	\$ 6,738.00
1/4"	103.00	148,320	\$ 32.63	\$ 992.00	\$11,904.00
5/16"	162.00	233,280	\$ 51.32	\$ 1,560.00	\$18,721.00
3/8"	234.00	336,960	\$ 74.13	\$ 2,253.60	\$27,036.00

Fuente: UE SYSTEMS. *Ultrasonido propagado en el aire y estructuras*. p. 71.

#### 1.4. **Lubricación de rodamientos**

La lubricación en los rodamientos tiene la función de evitar o de reducir el contacto metálico entre las superficies de rodadura y de deslizamiento, es decir, mantener bajos el rozamiento y el desgaste.

En los rodamientos el aceite es llevado a las zonas de contacto adhiriéndose a las superficies de las piezas que ruedan unas sobre otras. El aceite separa las superficies de contacto y evita así el contacto metálico (lubricación física).

En las superficies de contacto aparecen movimientos de deslizamiento aparte de los movimientos de rodadura, pero en un grado mucho menor que en los cojinetes de deslizamiento. En las zonas en las que en rodamientos aparecen movimientos puros de deslizamiento, como por ejemplo entre cuerpos rodantes y jaula o entre las superficies frontales de los rodillos y las superficies de los bordes, las presiones generalmente son mucho menores que en el campo de rodadura. Ya que los movimientos de deslizamiento en los rodamientos sólo desempeñan un papel secundario, la potencia pérdida y el desgaste de los rodamientos no rebasa ciertos límites, aún en el caso de una lubricación deficiente.

Así es posible lubricar rodamientos con grasas de diferente consistencia o con aceites de diferente viscosidad. Además, puede dominarse una amplia zona de revoluciones y también grandes cargas sin repercusión.

Muchas veces no se formará una película lubricante totalmente portante, con lo que por lo menos en algunas zonas la separación debida a la película lubricante estará interrumpida. También en estos casos es posible un servicio con poco desgaste si las temperaturas elevadas en los puntos en que aparecen originan reacciones químicas entre los aditivos contenidos en el lubricante y las superficies metálicas de los cuerpos rodantes o de los aros (capas de reacción tribológica), que conducen a productos de reacción con capacidad lubricante (lubricación química).

La lubricación se ve apoyada no sólo por estas reacciones de los aditivos sino también por los lubricantes sólidos contenidos en el aceite o en la grasa, en el caso de grasas quizá también por el espesante. En casos especiales es posible lubricar los rodamientos exclusivamente con lubricantes sólidos.

Otras funciones de las que debe encargarse el lubricante en el rodamiento es la protección contra la corrosión; la evacuación de calor de rozamiento en el rodamiento (lubricación con aceite) y el lavado de partículas abrasivas.

#### **1.4.1. Principios de lubricación**

Como se mencionó con anterioridad la función principal de la lubricación es la de evitar o reducir el contacto metal-metal entre las superficies mediante una película lubricante, con el fin de mantener bajos los niveles de rozamiento y desgaste.

El comportamiento respecto al rozamiento y al desgaste del rodamiento así como la duración que pueda alcanzar depende del régimen de lubricación. En los rodamientos aparecen principalmente los siguientes regímenes de lubricación:

- Lubricación total: las superficies de los cuerpos en movimiento relativo están separadas totalmente o casi totalmente por una película lubricante. Existe pues rozamiento líquido prácticamente puro. Este régimen de lubricación, denominado también lubricación líquida, es el que se debe pretender alcanzar.
- Lubricación parcial: debido a un espesor insuficiente de la película lubricante aparecen contactos metálicos en algunas zonas. Se origina rozamiento mixto.
- Lubricación límite: durante la lubricación parcial aparecen presiones y temperaturas muy elevadas en los puntos de contacto metálico. Si el lubricante contiene aditivos apropiados, se originan reacciones entre los

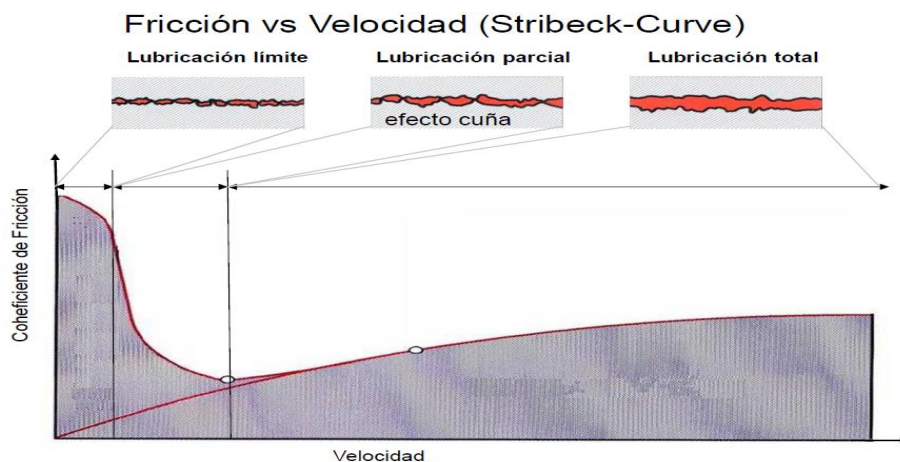


aditivos y las superficies metálicas. Así se forman productos de reacción con capacidad lubricante que originan la formación de una capa límite.

Estos regímenes de lubricación, lubricación total, parcial y límite, pueden aparecer tanto con una lubricación por aceite como con una con grasa. Qué película lubricante se formará en el caso de lubricación con grasa depende principalmente de la viscosidad del aceite básico. Un efecto lubricante adicional tiene también el espesante de la grasa. En la figura 4 se muestra la relación que tiene el tipo de película lubricante y el coeficiente de fricción.

Las grasas se distinguen ante todo por sus componentes principales: espesante y aceite básico. Como espesantes se usan generalmente jabones normales de base metálica, pero también jabones complejos como bentonita, poliurea, PTFE o FEP. Como aceites básicos se emplean aceites minerales o sintéticos. La viscosidad del aceite básico determina conjuntamente con la parte porcentual del espesante la consistencia de la grasa y la formación de la película lubricante.

Figura 4. **Fricción versus velocidad**



Fuente: FAG. *Seminario lubricación de rodamientos.* p. 20.

Igual que los aceites lubricantes, las grasas contienen además activadores (aditivos) para mejorar sus propiedades químicas o físicas, como la estabilidad antioxidante, la protección contra corrosión o la protección contra el desgaste bajo altas cargas (aditivos EP).

La mayoría de las grasas indicadas se fabrican con diferentes grados de penetración. Con ayuda de la tabla IV es posible una primera orientación.

En la lubricación con grasa sólo una pequeña parte del lubricante toma parte activamente en el proceso de lubricación. Las grasas de consistencia normal son desplazadas en gran parte del rodamiento y se deposita a los lados o abandona el alojamiento a través de la obturación. La grasa que queda en las superficies de rodadura y dentro o inmediatamente al lado del rodamiento va cediendo constantemente la cantidad mínima necesaria de aceite para lubricar las superficies funcionales. La cantidad de lubricante eficaz entre las superficies de rodadura es pues suficiente, bajo cargas moderadas, durante un tiempo relativamente largo.

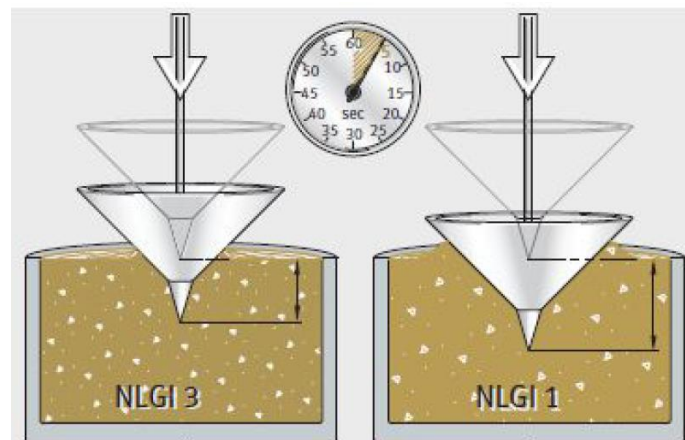
Tabla IV. **Clasificación de las grasas según el número de consistencia NLGI**

Número NLGI	Penetración en funcionamiento ASTM ( $10^{-1}$ mm)	Aspecto a temperatura ambiente
000	445-475	muy fluida
00	400-430	fluida
0	355-385	semifluida
1	310-340	muy blanda
2	265-295	blanda
3	220-250	semidura
4	175-205	dura
5	130-160	muy dura
6	85-115	extremadamente dura

Fuente: SKF Group. *Cómo comprender los datos técnicos de las grasas*. www.skf.com.

Consulta: febrero de 2019.

Figura 5. **Clase NLGI**



Fuente: FAG. *Catálogo de rodamientos*. p. 86.

La cesión de aceite depende del tipo de grasa, de la viscosidad del aceite básico, de la magnitud de la superficie que lo cede, de la temperatura y de la sollicitación mecánica de la grasa.

La eficacia del espesante de la grasa se reconoce al medir el espesor de la película lubricante en función del tiempo de funcionamiento. Al arrancar el rodamiento se origina en dependencia del tipo de espesante, un espesor de la película en la zona de contacto, considerablemente mayor que el correspondiente al aceite básico. La variación de la grasa y el desplazamiento de la misma dan lugar a una rápida disminución del espesor de la película lubricante.

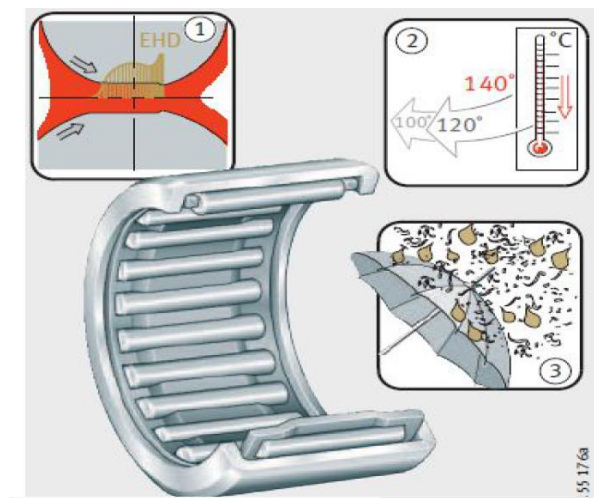
A pesar de una película lubricante posiblemente reducida, la eficacia de la lubricación es suficiente durante el periodo de relubricación. El espesante y los activadores en la grasa apoyan decisivamente la lubricación, con lo que no cabe esperar una disminución de la duración de vida. Para alcanzar largos periodos de reengrase, es favorable si la grasa cede precisamente tanto aceite como sea necesario para la lubricación del rodamiento. Así la cesión de aceite es constante durante un periodo de tiempo largo. Las grasas con un aceite básico altamente viscoso ceden el aceite en un tiempo relativamente corto. Por ello sólo puede conseguirse un buen estado de lubricación llenando suficientemente el rodamiento y el alojamiento con grasa o con periodos de reengrase cortos.

La eficacia lubricante del espesante en el servicio de los rodamientos se demuestra principalmente en la zona de rozamiento mixto.

Para seleccionar adecuadamente una grasa lubricante se debe tomar en consideración los siguientes factores:

- Temperatura
- Carga del rodamiento
- Velocidad de giro
- Humedad y otros contaminantes

Figura 6. **Selección de grasa lubricante**



Fuente: FAG. *Catalogo de rodamientos*. p. 89.

### 1.4.2. Tipos de lubricantes

Los rodamientos son partes seguras de máquinas con larga vida de servicio. La causa más común de fallo es una lubricación insuficiente o incorrecta. Cerca del 90 % de todos los rodamientos están lubricados con grasa, sin embargo, existen otros tipos de lubricación, las cuales son mencionadas a continuación:

- Lubricación con grasa

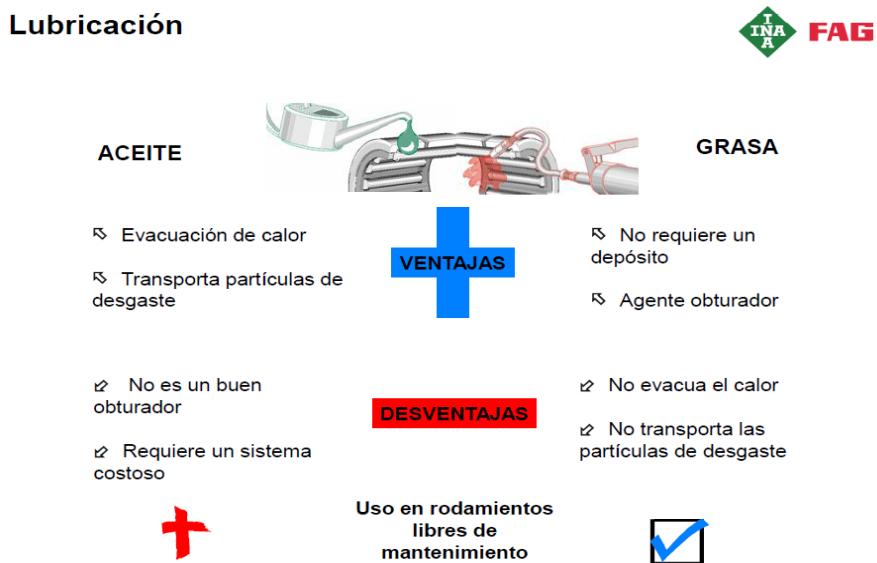
La lubricación con grasa se usa en un 90 % de todas las aplicaciones de rodamientos. Las ventajas esenciales de una lubricación con grasa son:

- Construcciones muy sencillas
- Mayor eficacia de la obturación debido a la grasa
- Elevada duración de servicio mediante una lubricación sin mantenimiento y sin aparatos de lubricación.
- Apropiaada para factores de velocidad de hasta  $1,8 \times 10^6$  mm/min.
- Periodo más largo hasta el fallo en el caso de fallar la lubricación después de alcanzarse la duración de servicio de la grasa si los factores de velocidad son moderados.
- Par de rozamiento bajo.

Bajo condiciones normales de servicio y de medio ambiente, la lubricación por grasa puede realizarse muchas veces como lubricación a vida (*for-life*).

En el caso de elevadas exigencias (número de revoluciones, temperatura, carga) debe preverse una relubricación con periodos de reengrase adecuados. En el caso de tiempos de reengrase cortos hay que prever una bomba para inyección de la grasa, canales de alimentación de la grasa, eventualmente un disco regulador de la grasa y un recinto colector para la grasa usada.

Figura 7. Lubricación por tipo de lubricante



Fuente: FAG. *Catálogo de rodamientos*. p. 90.

- Lubricación con aceite

Un sistema de lubricación con aceite resulta adecuado si los elementos de máquina próximos deben lubricarse con aceite o cuando sea necesario evacuar calor mediante el lubricante. La evacuación de calor puede ser necesaria en el caso de elevadas velocidades de giro, altas cargas o si la aplicación de rodamientos está sometida a calor desde afuera.

En la lubricación con aceite por pequeñas cantidades (lubricación con cantidades mínimas), como por ejemplo, lubricación por goteo, por neblina de aceite o por aceite y aire es posible dosificar la cantidad de aceite exactamente.

Esto ofrece la ventaja de que el rozamiento por chapoteo se evita y el rozamiento del rodamiento puede mantenerse bajo. Al usar aire como medio

portante de la lubricación puede conseguirse una alimentación dirigida y una corriente favorable para la obturación.

La lubricación por inyección de aceite con grandes cantidades facilita la alimentación precisa de todos los puntos de contacto en rodamientos altamente revolucionados y una buena refrigeración.

- **Lubricación sólida**

La lubricación sólida es una lubricación a vida, si existe una unión fuerte del lubricante con las superficies funcionales, por ejemplo, en el caso de lacas lubricantes y, en el caso de funcionar bajo condiciones de servicio, que originen un desgaste reducido de la capa. Si se usan lubricantes sólidos en forma de pastas o polvo es posible una relubricación. Sin embargo, un exceso de lubricante conduce a perturbaciones en el giro.

Un abastecimiento eficaz de lubricante sólido se consigue mediante la lubricación transfer. Este tipo de abastecimiento consiste en el rellenando del espacio interior del rodamiento con un compuesto de lubricantes sólidos, que después de endurecerse gira conjuntamente con la jaula, los cuerpos rodantes, al rozar con él, reciben siempre de nuevo algo de lubricante. Esta relubricación constante conduce a una larga duración de servicio, mucho más larga que al lubricar una vez con un relleno de pasta o una capa de laca.

### **1.4.3. Cantidad optima de lubricante**

La cantidad de lubricante necesaria en un rodamiento es en extremo pequeña. Sin embargo, por razones de seguridad en la práctica es común dosificar una cantidad más abundante de la necesaria.



Para el engrase inicial de rodamientos abiertos con grasa se debe considerar que las concavidades del rodamiento deben rellenarse completamente. La cantidad de grasa que aplicará en los alojamientos a ambos lados del rodamiento depende del factor de velocidad de este. El factor de velocidad del rodamiento está dado por la relación:

$$A = n \cdot dm$$

Donde:

A = factor de velocidad [mm/min]

n = velocidad angular [rpm]

dm = diámetro medio del rodamiento [mm]

$$= 0,5 (d + D)$$

- Para rodamientos con un factor de velocidad  $n \cdot dm < 50\,000$  mm/min. Los soportes deben llenarse completamente con grasa.
- Para rodamientos con un factor de velocidad  $n \cdot dm = 50\,000$  mm/min hasta  $500\,000$  mm/min. Los soportes deben llenarse en un 60 % con grasa.
- Para rodamientos con un factor de velocidad  $n \cdot dm > 500\,000$  mm/min. Los soportes deben llenarse de un 20 % a 30 % con grasa.

Con lo anteriormente mencionado se busca rellenar el espacio del alojamiento al lado del rodamiento sólo hasta tal punto que la grasa evacuada del rodamiento tenga suficiente espacio. Así se evita una participación excesiva de la grasa en el giro. Si al lado del rodamiento se encuentra un espacio de alojamiento vacío y relativamente grande, la grasa que sale del rodamiento no se acumula al lado del mismo, con lo que se pierde el efecto de apoyo lubricante para el rodamiento.

La cantidad de grasa adecuada para relubricar los rodamientos puede calcularse mediante la siguiente fórmula:

$$G_p = 0,0015 \cdot D \cdot B$$

Donde:

$G_p$  = cantidad de grasa [g]

$D$  = diámetro exterior del rodamiento [mm]

$B$  = ancho del rodamiento en [mm]

La grasa debe aplicarse lentamente mediante los orificios de lubricación del aro exterior y mientras el rodamiento gira.

#### **1.4.4. Lubricación basada en condición por ultrasonido**

El propósito de establecer un programa de relubricación está enfocado en un simple objetivo: mantener el rodamiento corriendo óptimamente previniendo una condición de resequedad que pueda causar un daño catastrófico. Sin embargo, existe un balance que debe cumplirse entre prevenir la falta de lubricación y el otro extremo, es decir, la sobrelubricación que es igualmente dañina como la falta de lubricante, es un problema mucho más común que la falta de lubricación y causa una mayor cantidad de fallas en rodamientos que la falta de lubricante.

Tradicionalmente, la programación de la lubricación ha sido basada en el tiempo. Los proveedores de equipos regularmente recomiendan que la programación de la lubricación se lleve a cabo basado en las horas de operación. Adicionalmente, proveen instrucciones sobre la cantidad de

lubricación que se tiene que aplicar durante estos procedimientos de mantenimiento programado.

El problema radica en que no se sabe si todos los rodamientos tienen que ser lubricados cuando se cumple el programa de relubricación. O si necesitan ser lubricados, es posible que no necesiten que se agregue la cantidad de lubricante establecida en el programa.

Mediante una estrategia de lubricación basada en condición. Simplemente, la condición del rodamiento determina cuando hay que lubricar. Si el rodamiento está trabajando correctamente y no muestra ningún cambio que pudiera hacer pensar en relubricar, ese rodamiento debería de quedarse de la misma manera. Si las condiciones cambian y el rodamiento demuestra un aumento de fricción, entonces debemos de re lubricar.

Figura 8. **Lubricación basada en condición con ultrasonido**



Fuente: UE Systems. *Guía de lubricación UE Systems*. p. 101.

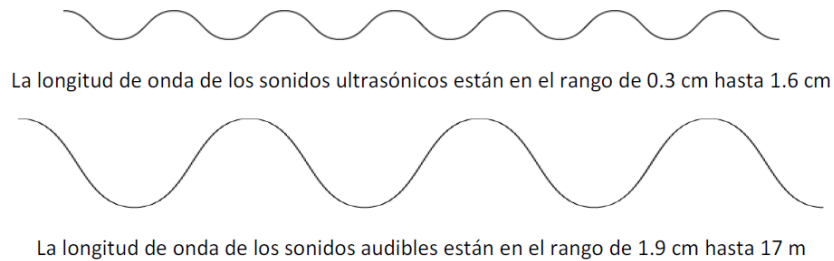
Para entender como los instrumentos de ultrasonido pueden trabajar en ambientes ruidosos de una planta típica, se debe comprender el funcionamiento de la tecnología de ultrasonido.

El rango de la audición humana cubre frecuencias desde 20 ciclos por segundo hasta 20 KHz. Sin embargo, en promedio el humano escucha hasta 16,5 KHz y no más. La tecnología de ultrasonido se basa en el censado de sonidos de alta frecuencia. Es decir, sonidos que inician a una frecuencia superior a los 20 KHz. Este es considerado el rango de alta frecuencia a la cual la audición humana no es capaz de alcanzar. Muchos de los instrumentos ultrasónicos empleados para monitorear equipos censarán desde 20 KHz hasta 100 KHz.

Estas comparaciones de frecuencias son importantes debido a que existen diferencias en como viajan las ondas de baja frecuencia con respecto a las de alta frecuencia, lo que ayudará a entender por qué el ultrasonido puede ser instituido efectivamente en un monitoreo de rodamientos y en los programas de lubricación.

Existe una substancial diferencia en la longitud de onda de un sonido de baja frecuencia (sonidos audibles) en relación un sonido de alta frecuencia (ultrasonido). La longitud de onda del sonido audible está en el rango de 1,9 cm hasta 17 m, mientras que las longitudes de onda del ultrasonido están en un rango de 0,3 cm hasta un máximo de 1,6 cm. Los sonidos de baja frecuencia, al poseer una longitud de onda mayor, pueden vibrar en superficies sólidas y hacer que paredes y objetos grandes parezcan transparentes. Por otro lado los sonidos de alta frecuencia, al poseer una longitud de onda corta no tienen la capacidad de penetrar sólidos y por lo tanto se desviarán de los mismos.

**Figura 9. Longitud de onda de ultrasonido**



Fuente: UE Systems. *Longitud de onda, centro de aprendizaje.* [www.uesystems.com](http://www.uesystems.com). Consulta: abril de 2019.

Se les llama traductores ultrasónicos a los instrumentos basados en la tecnología de ultrasonido propagado en aire/estructuras. Ellos reciben los sonidos inaudibles de alta frecuencia y los traducen electrónicamente a la baja frecuencia audible a través de un proceso denominado heterodino. El método heterodino provee una traducción exacta del ultrasonido producido por un equipo en operación y habilita la capacidad de los usuarios de identificar los sonidos de cada componente. La mayoría de los traductores ultrasónicos proveen retroalimentación de dos maneras: a través de los audífonos y en un medidor donde se puede ver la amplitud de estos sonidos ya sea como intensidad o como decibeles.

#### **1.4.4.1 Procedimiento de lubricación por ultrasonido**

Los instrumentos ultrasónicos detectan cambios relacionados con la fricción. Un rodamiento correctamente lubricado tendrá muy poca fricción. Mientras el rodamiento gire, produce un sonido reconocible similar al de una cascada de agua, a este sonido se le conoce como ruido blanco. Incluye todos

los sonidos, de baja y alta frecuencia. Las ondas de alta frecuencia generadas por este ruido blanco son más localizables que las de baja frecuencia. Utilizando un traductor ultrasónico, estas señales pueden ser detectadas con poca o ninguna interferencia de otros sonidos mecánicos generados por otros componentes, como ejes u otros rodamientos cercanos.

Mientras el nivel de lubricación en un rodamiento disminuye o se deteriora, el potencial de fricción se incrementa. Habrá un incremento correspondiente en el nivel de amplitudes ultrasónicas que pueden ser escuchados y tendenciados. El método para determinar cuándo lubricar y cuando dejar de hacerlo con un instrumento ultrasónico es tan simple como: determinar una línea base, establecer el tiempo entre las inspecciones y monitorear mientras lubrica.

Figura 10. **Monitoreo por ultrasonido**



Fuente: UE Systems. *Longitud de onda, centro de aprendizaje*. [www.uesystems.com](http://www.uesystems.com). Consulta: marzo de 2019.

#### **1.4.4.2. Beneficios de la lubricación por ultrasonido**

Los defectos en máquinas rotativas producen un amplio espectro de sonidos. Pero sólo problemas específicos como la fricción producen ondas acústicas de impulsos de choque en alta frecuencia.

Por otra parte, el uso de sensores ultrasónicos resonantes actúa como un amplificador mecánico de la alta frecuencia. Como resultado, el espectro de ultrasonido es una técnica muy selectiva:

- Destaca los fenómenos de alta frecuencia y revela así la condición de la lubricación.
- Minimiza totalmente la baja frecuencia, no deseada en esta función, pues podría enmascarar la condición de la lubricación.

Otra cuestión importante es que los ultrasonidos son un método sencillo, fácil de usar por cualquier técnico de lubricación. La comprobación del estado de la lubricación es simple, inmediato y no requiere un análisis posterior que complique el proceso.

Aquellos que no utilizan ultrasonidos para optimizar el engrase normalmente añaden más grasa de la necesaria en las operaciones de relubricación. La sobrelubricación implica un aumento de la temperatura, dilatación de las obturaciones, contaminación interna y en consecuencia un desgaste prematuro de los rodamientos.

Por último, los ultrasonidos responden a los tres problemas fundamentales que encuentran los técnicos de lubricación con las operaciones de engrase:

- Si el rodamiento necesita ser engrasado o no
- Si necesita grasa, qué cantidad de grasa agregar
- Cuál será el siguiente intervalo de relubricación

## **1.5. Costos evitados por la detección de fallas mecánicas en rodamientos**

El ultrasonido es una técnica muy útil para la detección de fallas incipientes en equipos rotativos. A continuación se presenta un breve análisis demostrando lo rentable de la técnica de inspección ultrasónica aplicada por personal del ingenio.

El equipo a ser analizado es el reductor de la desfibradora de caña del patio tándem A. Con la finalidad de detectar fallas incipientes en el equipo se procedió a realizar un monitoreo mensual del mismo, recolectando datos de dB y muestras de audio, tomando como línea base el valor obtenido en la primera medición del reductor.

El punto de medición de mayor relevancia para este caso es el punto 4 que corresponde al lado libre del eje de entrada del reductor. A continuación se presenta la tabla V que contiene los valores puntuales obtenidos durante el monitoreo del punto en cuestión.

En la tabla V se puede observar un resumen de las mediciones realizadas al punto 4 del reductor de la desfibradora del patio A. La fecha del 15 de noviembre corresponde a la primera medición realizada a inicios de zafra, para el 1 de enero se observa un incremento de 30 dB sobre la línea base indicando un claro problema. Durante una parada programada del tándem se realizó una inspección al equipo encontrando indicios de rozamiento entre el alojamiento del rodamiento y la pista externa, indicando falta de ajuste entre ambas partes, el día 18 de enero se realizó el cambio del eje de entrada y rodamientos, se observa una disminución de los valores ultrasónicos hasta rangos aceptables de operación.



El día 7 de febrero se detectó un nuevo incremento en los valores ultrasónicos (33 dB) alcanzando un valor máximo el 21 de febrero (67 dB). Al realizar una inspección del equipo se encontraron estrías en uno de los elementos rodantes del cojinete del punto 4, sin embargo, en esta ocasión no se contaba con repuestos para realizar la reparación del equipo. En este caso fue de vital importancia la detección temprana de la falla en el reductor de la desfibradora ya que la parada de este equipo implica la parada del tren completo de preparación y molienda.

Tabla V. **Datos de mediciones punto 4 desfibradora patio TA**

Fecha	Valor en dB
15/11/2017	15
18/11/2017	19
1/01/2018	45
7/01/2018	47
12/01/2018	41
18/01/2018	17
1/02/2018	22
7/02/2018	33
13/02/2018	67
21/02/2018	50
3/03/2018	50
13/03/2018	20

Fuente: elaboración propia.

El tándem A tiene una capacidad de molienda de 437,5 toneladas por hora, el rendimiento promedio es de 2,2 quintales de azúcar por tonelada de caña y considerando una parada no programada de 8 horas por falla en los rodamientos del reductor, asumiendo que se cuenta con repuestos en el almacén. De haber existido una falla catastrófica del equipo las pérdidas de producción habrían sido las siguientes:

Capacidad de molienda = 437,5 T/h

Rendimiento promedio = 2,2 qq/T

Tiempo de paro = 8 horas

Pérdidas de producción = capacidad de molienda \* tiempo de paro \* rendimiento  
promedio

Pérdidas de producción = 437,5 T/h \* 8 h \* 2.2 qq/T

Pérdidas de producción = 7 700 qq

A inicios del año 2018 el precio del quintal de azúcar estaba alrededor de \$15,00, tomando en cuenta que el costo estimado de operación del Tándem A es de \$541,66 por hora, entonces las pérdidas económicas por una falla catastrófica del reductor son:

Precio del quintal = \$15,00/qq

Pérdidas de producción = 7 700 qq

Costo de operación del tándem A = \$541,66/h

Costo de operación del tándem A = \$541,66/h \* 8 h

Costo de operación del tándem A = \$4 333,28

Pérdidas económicas = pérdidas de producción \* precio del quintal – costo de  
operación del tándem A

Pérdidas económicas = 7 700 qq \* \$15,00/qq - \$4 333,28

Pérdidas económicas = \$ 111 166,72

En cuanto al costo de la detección de la falla mediante ultrasonido y la intervención del equipo por parte de personal interno se tiene lo siguiente:

- Costo de las inspecciones por ultrasonido: Q 426,00 aproximadamente. Se realizaron un total de 64 inspecciones a lo largo de toda la zafa para monitorear la evolución de la falla. Cada inspección dura 20 minutos en promedio y es realizada por un mecánico especializado de confiabilidad.
- Costo de mano de obra: Q 320,00 aproximadamente. Trabajando 5 personas, 1 mecánico especializado, 1 soldador, 2 ayudantes y 1 operador de maquinaria durante 4 horas.
- Costo del rodamiento nuevo: Q 50 000,00.

De lo anterior se tiene que los costos de la detección y de la intervención programada del equipo son las siguientes:

Costo de inspección: Q426,00

Costo de mano de obra: Q320,00

Costo del rodamiento nuevo: Q50 000,00

Costo de mantenimiento programado = costo de inspección + costo de mano de obra + costo del rodamiento nuevo

Costo de mantenimiento programado = Q426,00 + Q320,00 + Q50 000,00

Costo de mantenimiento programado = Q50 746,00

Tomando un tipo de cambio de \$1,00 = Q 7,65

Costo de mantenimiento programado = Q 50 746,00 / Q 7,65/\$

Costo de mantenimiento programado = \$ 6 633,46

Con los resultados obtenidos se procede a realizar un análisis de retorno de inversión (ROI), como se muestra a continuación:

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

$$\text{ROI} = (\$ 111\ 166,72 - \$ 6\ 633,46) / (\$ 6\ 633,46) = \$ 15,75$$

Los resultados obtenidos por costos de mantenimiento, sin tomar en cuenta las pérdidas causadas por una menor generación eléctrica a causa de una menor cantidad de bagazo, demuestran que por cada \$ 1,00 invertido en la inspección ultrasónica de reductor de la desfibradora, se obtiene \$ 15,75. Se utilizaron costos promedios para la determinación del ROI.

## **2. FASE DE SERVICIO TÉCNICO PROFESIONAL**

### **2.1. Implementación de un programa de inspección y lubricación de rodamientos**

Para llevar a cabo un programa de inspección y lubricación de rodamientos por ultrasonido, es necesario el monitoreo periódico de diferentes variables de estado, esto implica el manejo de grandes cantidades de datos, y es necesario contar con medios para la recolección, almacenamiento y análisis de los mismos, que son:

Medios físicos: abarcan los instrumentos de medición, necesarios para la recolección de datos en campo, y el hardware necesario para el almacenamiento y análisis de estos.

Medios de gestión: se refieren a los softwares necesarios para el almacenamiento y manejo de la información recolectada, además de la elaboración de informes y gráficos de tendencia.

Medios humanos: son el personal encargado de llevar a cabo las mediciones rutinarias, el análisis de datos y la creación de informes. El personal debe tener conocimientos específicos sobre el manejo de equipos de alta tecnología.

Para la implementación es necesario completar los siguientes pasos:

- Preparación

- Durante esta fase se realizan los preparativos iniciales para la realización del proyecto, para ello es necesario cumplir los siguientes pasos:
  - Definir las características de las máquinas
  - Seleccionar los equipos que pueden ser integrados al programa de inspección y lubricación por ultrasonido
  - Crear rutas de inspección
  - Establecer frecuencias de medición
  - Inducción del personal operativo
  
- Implementación

Al completar la fase de preparación del proyecto se procede a la fase de implementación, la cual consiste en la serie de mediciones periódicas establecidas durante la preparación, para ello es necesario contemplar los siguientes aspectos:

- Establecer líneas bases para cada equipo
- Recolección y análisis de datos en sistema de gestión y software especializado.
- Establecer niveles de alarma.
- Revisión periódica del historial para la detección de anomalías.
- Creación de reportes.

### **2.1.1. Medios físicos**

Para implementar un programa de inspección y lubricación de rodamientos por medio de ultrasonido es necesario contar con los equipos de

medición necesarios para esta tarea. A continuación se describirán los instrumentos utilizados dentro del programa de inspección.

#### **2.1.1.1. Instrumentos de medición de ultrasonido**

La empresa cuenta con dos equipos de medición de ultrasonido, Ultraprobe 10 000 y Ultraprobe 201 grease caddy.

- Ultraprobe 10 000: es un instrumento versátil que cuenta con varias aplicaciones que van desde la detección de fugas hasta inspecciones eléctricas, entre las características del equipo se pueden mencionar:
  - Medición en tiempo real
  - Grabación de sonido
  - Carga y descarga de información en software especializado
  - Inspecciones eléctricas
  - Detección de fugas
  - Inspección de trampas de vapor
  - Inspecciones mecánicas

A continuación se muestra el instrumento de medición con sus respectivos accesorios, este será utilizado para controlar la tendencia de los equipos incluidos dentro de la ruta de inspección.

Figura 11. **Ultraprobe 10000 y accesorios**



Fuente: Ingenio Santa Ana.

- Ultraprobe 201 Grease Caddy: el Ultraprobe 201 es un instrumento específicamente diseñado para la lubricación de rodamientos, permite detectar el aumento de los niveles de fricción en un rodamiento. Este instrumento será empleado para realizar las rutas de lubricación en los equipos seleccionados.



Figura 12. **Ultraprobe 201 Grease Caddy**



Fuente: Ingenio Santa Ana.

### **2.1.2. Selección de equipos a integrar al programa**

Dentro de un ingenio azucarero existe una gran cantidad de equipos, cada uno con diversas aplicaciones y distintos grados de importancia dentro de la operación. Por lo tanto, para seleccionar los equipos que serán integrados al programa de inspección y lubricación por ultrasonido es necesario evaluar el grado de criticidad de los mismos, además de que los equipos cumplan con las características necesarias para ser integrados dentro del programa.

#### **2.1.2.1. Definición de equipos críticos**

Por norma general, un equipo es considerado crítico mientras menos puede ser obviado dentro del proceso. Para establecer el grado de criticidad de

un equipo es necesario considerar varios criterios como: La complejidad y costo de reparación, su importancia dentro del proceso, el costo del equipo, el daño potencial a otros equipos del proceso y el daño potencial al personal o al medio ambiente.

### 2.1.2.1.1. Clasificación de equipos críticos

En el proceso de producción de azúcar, melaza, cachaza y generación de energía intervienen una gran cantidad de equipos, cada uno con distintos grados de criticidad. Por lo tanto, es necesario realizar una selección de equipos a los cuales se les dará seguimiento periódicamente mediante la toma de mediciones de ultrasonido.

Tabla VI. Listado de equipos críticos

Área	Equipo	Criticidad
<b>Patio de caña</b>	Troceadoras	4
	Precuchillas	4
	Picadoras	4
	Desfibradoras	5
	Bandas de hule	5
<b>Molinos</b>	Molinos	4
	Conductores intermedios	5
	Transmisiones asistidas	4
<b>Calderas</b>	Ventiladores Over fire	4
	Ventiladores forzados	5
	Ventiladores inducidos	5

Continuación de la tabla VI.

	Bombas de alimentación	<b>4</b>
<b>Fábrica</b>	Centrífugas automáticas G-8	<b>4</b>
	Centrífugas automáticas G-16	<b>4</b>
	Centrífugas continuas de 2da. Y 3ra.	<b>4</b>
	Centrífugas de refinería	<b>4</b>
	Bombas de jugo alcalizado	<b>4</b>
	Bombas de jugo claro	<b>4</b>
	Bombas de jugo precalentado	<b>4</b>
<b>Torres de enfriamiento</b>	Ventiladores	<b>5</b>
	Bombas de recirculación y enfriamiento	<b>5</b>

Fuente: Ingenio Santa Ana.

En la tabla VI se presenta una lista de los equipos críticos clasificados en una escala del 1 al 5 siendo este el grado más alto y el 1 el más bajo, esta clasificación se realizó tomando en cuenta la importancia del equipo dentro del proceso, costos de mantenimiento y el daño potencial al medio ambiente, otros equipos del proceso y al personal.

#### **2.1.2.2. Periodos de monitoreo y lubricación**

Los intervalos de tiempo entre cada medición dependen de varios factores, como horas de operación del equipo, las condiciones bajo las que opera (temperatura, humedad, carga, contaminación), las características propias de cada equipo como la velocidad de operación y su sistema de lubricación.

Tomando en cuenta lo anterior mencionado se establecieron las siguientes frecuencias de inspección:

- Semanal: se evalúa la condición de la lubricación de los equipos lubricados con grasa mediante ultrasonido, debido a las condiciones de contaminación y altas temperaturas.
- Mensual: se establece un periodo de monitoreo mensual para todos los equipos críticos que se encuentren en condiciones normales de operación.

Estos periodos de monitoreo se mantendrán siempre y cuando no exista algún indicio de falla en los equipos, de lo contrario se procederá a reducir el intervalo de monitoreo del equipo que se encuentre en etapa de falla a un periodo ya sea quincenal o semanal, esto dependiendo del grado de criticidad de la falla.

### **2.1.2.3. Descripción del proceso de análisis por ultrasonido**

La base para un programa de inspección de rodamientos por ultrasonido es la preservación de registros y la consistencia en los datos recolectados. Para realizar un análisis confiable de la condición de un equipo es necesario evitar la variabilidad al momento de la toma de mediciones, por lo tanto, previo a iniciar la recolección de datos es necesario realizar los siguientes pasos:

- Seleccionar los puntos de medición
- Remover la pintura y la suciedad de la superficie donde se colocará el sensor.
- Marcar los puntos de medición.

- Establecer una velocidad para la toma de mediciones (para los equipos con variador).
- Utilizar un sensor magnético.
- Ajustar la frecuencia a 30 KHz (recomendado para inspecciones mecánicas).
- Ajustar la sensibilidad del instrumento hasta obtener un sonido claro
- Grabar los resultados.

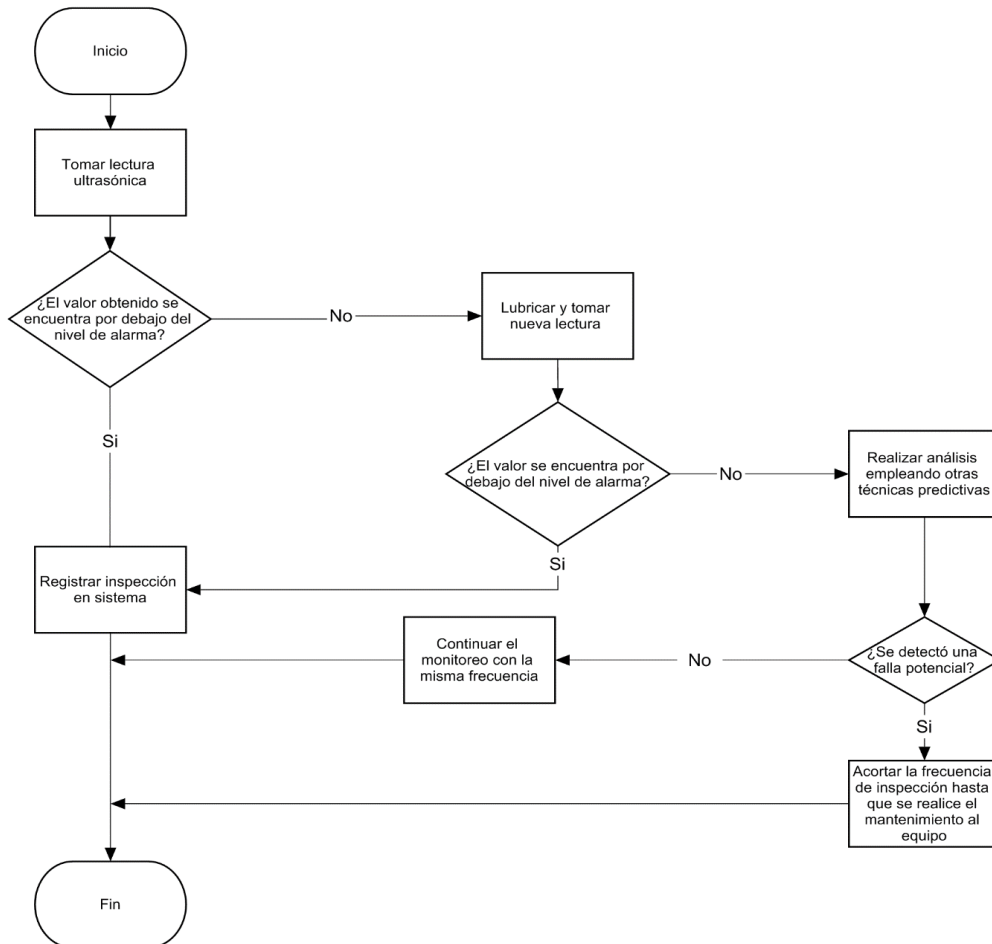
Esto se realiza con el propósito de estandarizar los puntos y el proceso de medición, de esta manera se logra disminuir la inconsistencia en los valores obtenidos durante las mediciones. Para la toma de mediciones a los equipos críticos se empleará la pistola de ultrasonido Ultraprobe 10 000 con un sensor magnético. Para las rutas de lubricación se empleará un equipo Ultraprobe 201 grease caddy con un sensor magnético. En la figura 14 se muestra un diagrama de flujo con los pasos a seguir al momento de realizar el análisis de un equipo por medio de ultrasonido.

Figura 13. **Punto de toma de datos de ultrasonido**



Fuente: Ingenio Santa Ana.

Figura 14. Diagrama de proceso de análisis por ultrasonido



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio 2016.

### 2.1.2.3.1. Establecimiento de líneas base para rodamientos

La línea base en un rodamiento es un valor en decibeles que indica el nivel al que está operando bajo condiciones normales de operación, sin defectos observables y condiciones de adecuada lubricación.

Para establecer la línea base a los equipos a inspeccionar se pueden emplear tres métodos.

- **Histórico:** consiste en la recolección de datos de ultrasonido durante un periodo de tiempo a fin de obtener datos consistentes, de no existir mayor variación entre los datos (menos de 8 dB) se establecen estos valores como línea base. Este método es utilizado para establecer valores de líneas bases en motores eléctricos y rodamientos lubricados con aceite.
- **Durante la lubricación:** consiste en la medición de los valores de ultrasonido en tiempo real durante la lubricación, se aplica lubricante hasta que el ultrasonido alcance su nivel más bajo, al alcanzar ese nivel no se debe aplicar más lubricante y el valor en dB se toma como línea base. Este método es empleado para establecer valores de líneas bases en rodamientos lubricados con grasa.
- **Comparación:** es posible emplear este método cuando existen dos equipos similares operando bajo las mismas condiciones de carga y velocidad, tomando las lecturas en el mismo punto y comparando los valores obtenidos, de no existir diferencias significativas entre las mediciones se establece el valor obtenido como línea base. Este método es útil al momento de inspeccionar un equipo del que no se tienen datos históricos y se necesite hacer una evaluación del estado del rodamiento.

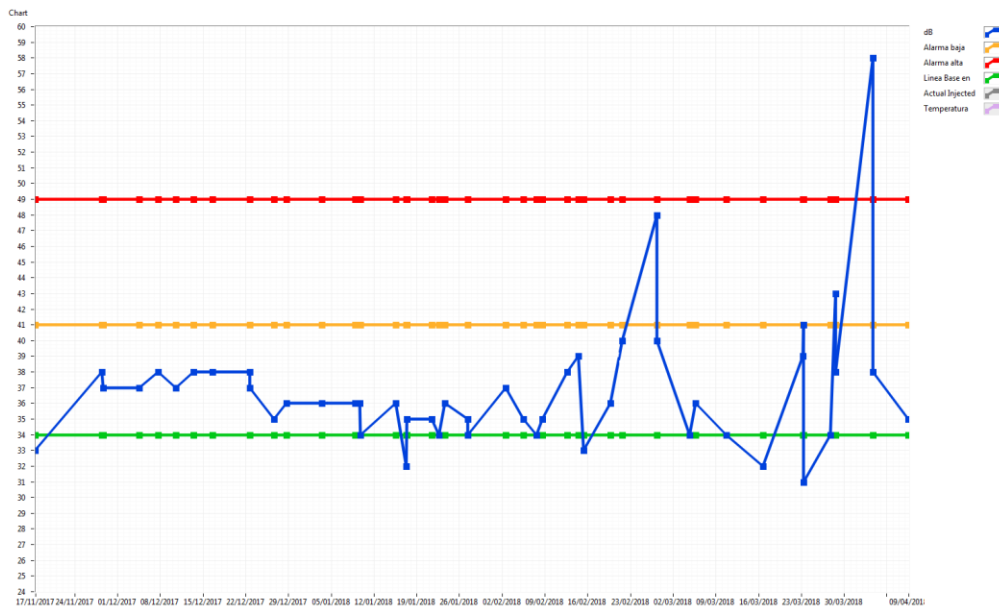
#### **2.1.2.3.2. Gráficos de tendencia para valores puntuales**

Para contar con un buen programa de inspección de rodamientos por ultrasonido, es de vital importancia contar con historiales de cada equipo

inspeccionado, obtenido mediante la recolección periódica de datos. El objetivo del análisis de tendencia histórica, es detectar los cambios significativos en los valores ultrasónicos, con el fin de detectar fallas incipientes en los equipos y así decidir el momento de intervenir los mismos.

Mediante el establecimiento de una línea base, niveles de alarma y un monitoreo constante, es posible detectar los cambios que indiquen el momento en que un rodamiento necesita ser lubricado. En la figura 15 se muestra la tendencia durante toda la zafra del rodamiento del lado libre de la desfibradora del patio de caña tándem B, es posible apreciar los incrementos de los valores ultrasónicos sobre la alarma de 8 dB, además de un incremento sobre la alarma de 16 dB, los cuales fueron mitigados mediante la aplicación de lubricante.

Figura 15. **Gráfico de tendencia rodamiento lado libre desfibradora patio TB**

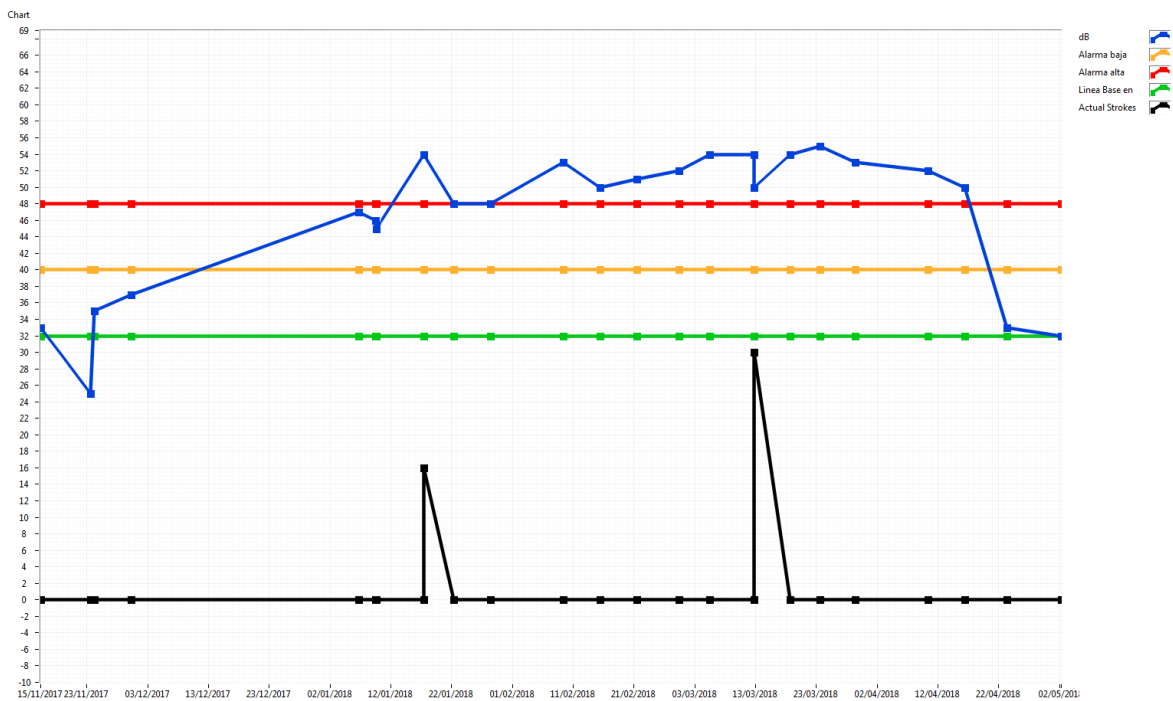


Fuente: elaboración propia.



El monitoreo por medio de ultrasonido permite la detección temprana de fallas en rodamientos, la figura 16 presenta la tendencia del rodamiento del lado acople del motor del ventilador inducido de la caldera 8. En ella se puede apreciar el incremento de los valores ultrasónicos por encima de la alarma de 16 dB, este incremento trato de ser evitado por medio de lubricación, sin embargo, no se observó una disminución significativa, hasta el cambio de rodamiento. Luego de realizar un análisis de causa raíz se identificó que la falla fue causada por el paso de corrientes parásitas a través del rodamiento como se observa en la figura 16.

Figura 16. **Gráfico de tendencia rodamiento lado acople Inducido 1 caldera 8**



Fuente: elaboración propia.

### 2.1.2.3.3 Niveles de intervención en rodamientos

El propósito de un programa de inspección ultrasónica es la detección de fallas, y determinar cuándo se debe tomar la decisión de realizar una acción correctiva. Con el fin de saber el estado de un rodamiento se emplean niveles de alarma, con estos se puede determinar si un rodamiento se encuentra en buen estado, necesita lubricación o se encuentra en estado de falla.

Figura 17. **Falla causada por paso de corrientes parásitas**



Fuente: Ingenio Santa Ana.

Los niveles de alarma se establecen a partir de la línea base del rodamiento. Al haber establecido los valores de línea base para cada rodamiento, se puede analizar el incremento de los valores obtenidos a lo largo del tiempo, para determinar la severidad del problema se deben considerar los

niveles de alarma, que son niveles de referencia, por lo tanto, al detectar un incremento en los valores de ultrasonido se debe estudiar por separado para tomar un curso de acción adecuado.

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 SYSTEMS. *Ultrasonido propagado en el aire y estructuras*. p. 147.

Al superar la línea base por 8dB es necesario aplicar lubricante hasta que el valor medido regrese a la lectura de línea base.

Al superar los 16dB puede existir una falla incipiente en el rodamiento, podrían presentar defectos visibles al ojo humano, a partir de este punto los valores de ultrasonido incrementan conforme la falla progresa, además, empiezan a aparecer frecuencias de falla, en esta etapa se debe realizar un monitoreo más frecuente añadiendo otra tecnología predictiva complementaria.

Cuando la línea base es superada por 35 dB, se produce un deterioro acelerado del rodamiento, el sonido puede llegar a ser audible, se presenta un incremento en la temperatura del rodamiento. Al aumentar la severidad del problema puede producirse una disminución de los valores de alta frecuencia, debido a la existencia de espacios libres, se pierden las tolerancias y el eje obtiene un mayor movimiento.

#### **2.1.2.3.4. Análisis de señal**

Mediante el monitoreo a través de ultrasonido además de la obtención de valores puntuales, empleados para análisis de tendencia histórica, también permite la grabación de muestras de sonido, de esta manera permite un análisis más profundo de la condición de los equipos.

La recolección de muestras de sonido permite evaluar la calidad de audio de un rodamiento además de comparar las grabaciones recolectadas a través de las rutas de monitoreo, con el fin de detectar la aparición de sonidos extraños, o bien, el deterioro en el tiempo de la calidad sonora de un rodamiento. Adicional, UE Systems provee el software Spectralyzer con el cual es posible visualizar la onda de tiempo y la FFT de una grabación de audio realizada con los instrumentos Ultraprobe.

Mediante la visualización de la onda de tiempo es posible observar los impulsos de choque producidos por defectos en el rodamiento y si la señal es lo suficientemente limpia, calcular la frecuencia de los mismos, por otro lado, mediante el análisis de la FFT es posible detectar frecuencias producidas por la aparición de defectos en los distintos elementos que componen los rodamientos de una manera similar al análisis de vibraciones mecánicas, para facilitar esta tarea el software cuenta con una calculadora de frecuencias de falla de rodamientos, para ello es necesario indicar el número de elementos rodantes del cojinete que está siendo analizado y la velocidad del mismo, de esta manera el usuario puede evaluar las coincidencias entre las frecuencias mostradas en la FFT y las frecuencias de falla calculadas para determinar si la falla se encuentra en la pista externa, la pista interna, los elementos rodantes o el tren fundamental del rodamiento.

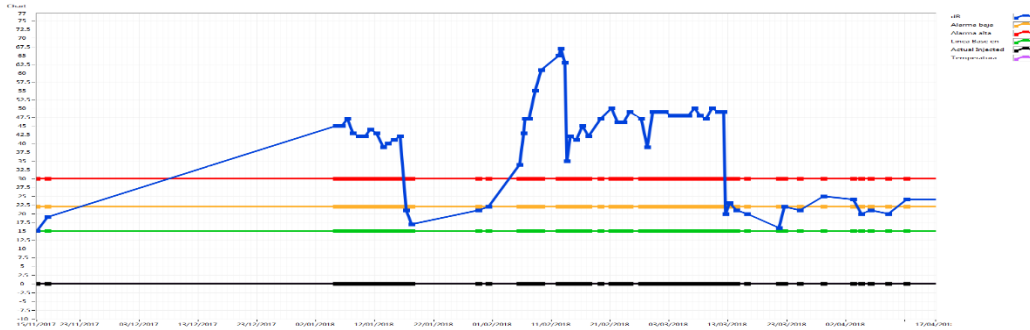
Para ejemplificar lo mencionado anteriormente se presenta el siguiente caso de estudio. Las figuras de la 18 a la 22 corresponden a las mediciones realizadas al rodamiento del lado libre del eje de alta del reductor de la desfibradora del patio de caña tándem A en el transcurso de la zafra.

En la figura 18 se observa un incremento de los valores de ultrasonido por arriba de la alarma de los 16 dB, indicando la falla del rodamiento en ese punto, debido a la criticidad del equipo y que además es un equipo nuevo, se procedió a monitorear diariamente hasta la corrección del problema. Al intervenir el equipo se pudo observar la presencia de marcas que indicaban roce entre la carcasa y la pista externa del rodamiento que se observa en las figuras 20 y 21, se procedió a cambiar el eje de alta junto con sus rodamientos. Tras la intervención se puede observar la disminución de los valores de ultrasonido a un rango normal de operación.

Sin embargo, se observa un nuevo aumento en los valores de ultrasonido indicando una nueva falla en el mismo punto, por lo que se procede a monitorear diariamente el equipo hasta su corrección, volviendo los valores de ultrasonido a un rango aceptable de operación.

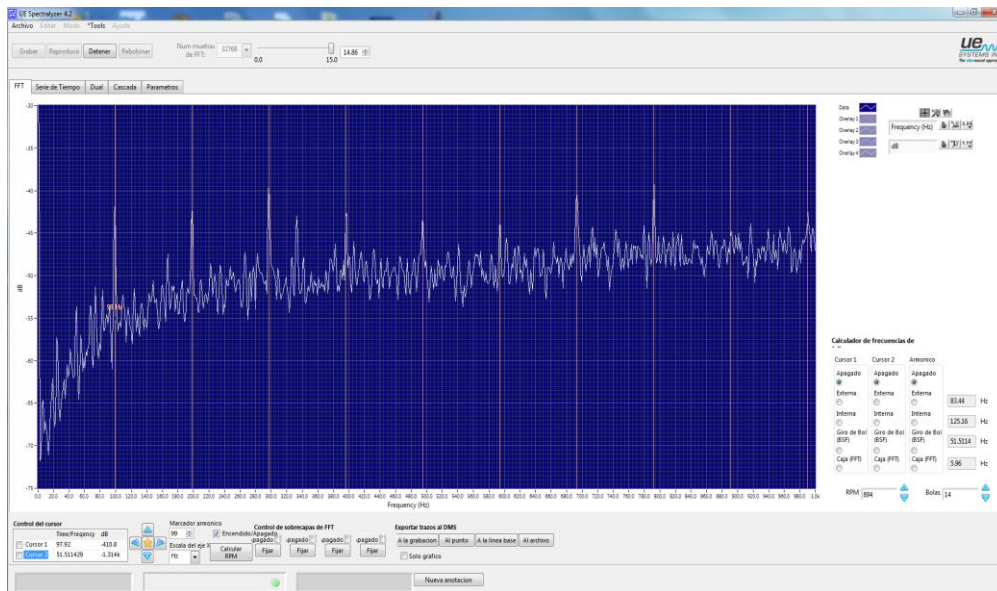
En la figura 19 se observa el espectro de sonido del punto en cuestión tras entrar nuevamente en etapa de falla. Con el programa Spectralyzer mediante el análisis de la FFT es posible detectar una frecuencia de falla a 99 Hz y múltiples armónicos de la misma. En este caso particular las frecuencias de falla de rodamientos calculas en el programa no coinciden con la frecuencia de 99 Hz. Sin embargo al intervenir nuevamente el equipo para realizar el cambio de los componentes dañados se puede observar en la figura 22 estrías en los elementos rodantes.

Figura 18. Gráfico de tendencia rodamiento reductor desfibrodora patio TA



Fuente: elaboración propia.

Figura 19. Espectro de sonido, rodamiento reductor desfibrodora patio TA



Fuente: elaboración propia, empleando Spectralyzer.

Figura 20. **Carcaza del reductor de la desfibradora del patio de caña TA**



Fuente: Ingenio Santa Ana.

Figura 21. **Rodamiento del reductor de la desfibradora patio de caña TA**



Fuente: Ingenio Santa Ana.



Figura 22. **Falla en elementos rodantes**



Fuente: Ingenio Santa Ana.

#### **2.1.2.3.5. Lubricación de rodamientos por medio de ultrasonido**

Cuando un rodamiento no se encuentra lubricado de una manera apropiada, la fricción puede llegar a causar daños y representar una amenaza para los procesos. Sin embargo, por medio de un equipo de ultrasonido pueden ser detectados los incrementos de fricción, de esta manera se puede detectar la falta o exceso de lubricación en un rodamiento.

Para este fin se establece una línea base para cada rodamiento y se utiliza el nivel de acción de 8dB sobre la línea base, para saber el momento apropiado de lubricar el elemento. Por lo tanto, para evitar la lubricación inadecuada, se plantean los siguientes pasos:



- Detectar el aumento de 8 dB sobre la línea base mediante monitoreo por ultrasonido, ya que a medida que la película lubricante se reduce, aumenta la fricción dentro del rodamiento.
- Lubricar el rodamiento hasta que el valor regrese a su línea base o a un valor cercano a esta.
- Esperar un tiempo prudente para evaluar el resultado de la lubricación (5 min).

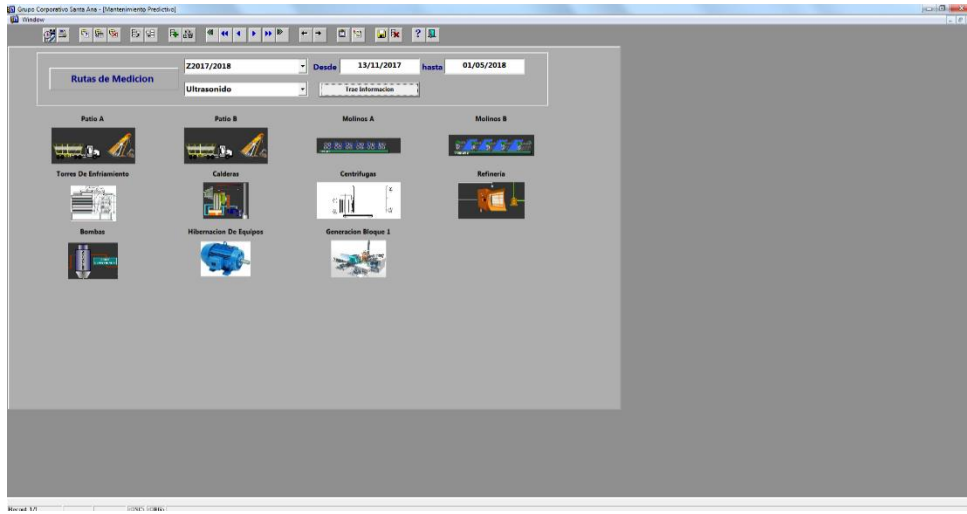
#### **2.1.2.3.6. Softwares especializados**

El ultrasonido como una técnica de mantenimiento predictivo se basa en historiales de mantenimiento y el monitoreo constante de la condición de los equipos, esto implica el manejo de una gran cantidad de información, por esta razón, el uso de softwares especializados en el manejo de esta información es fundamental.

Por lo tanto, para la gestión del programa de inspección y lubricación se emplearán los softwares descritos a continuación:

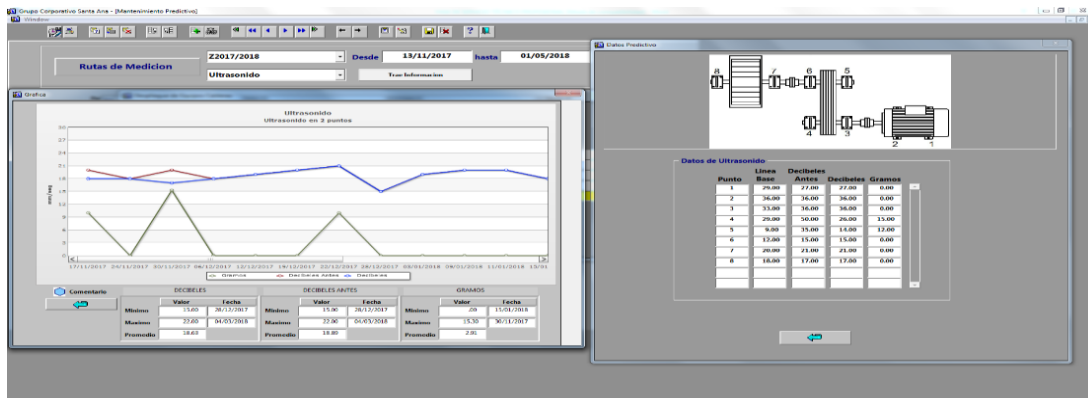
- Sistema integrado de gestión de empresas (SIGES): el ingenio cuenta con un sistema de gestión de mantenimiento, mediante el cual se controlan las acciones de mantenimiento tanto correctivas como preventivas de los equipos.

Figura 23. Pantalla de consulta en programa SIGES



Fuente: Ingenio Santa Ana.

Figura 24. Valores puntuales y gráficos de tendencia en programa SIGES



Fuente: Ingenio Santa Ana.

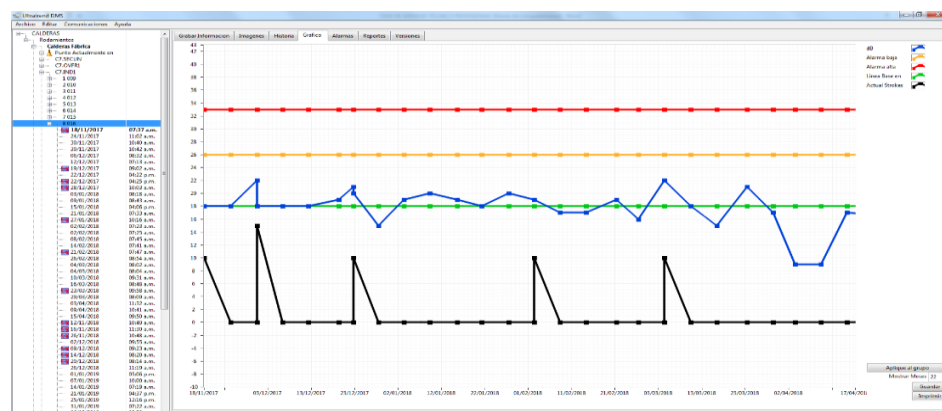
Este sistema permite la consulta de los datos históricos divididos por periodo y ubicación de cada equipo, esto facilita la consulta de la

información por parte de los encargados de cada área sin la necesidad de realizar informes para cada equipo.

- **Ultratrend DMS:** es un software especializado en la organización, creación y mantenimiento de bases de datos de las distintas aplicaciones de los equipos Ultraprobe. Al momento de la creación de una base de datos el software permite seleccionar el tipo de aplicación; genéricos, rodamientos, fugas, válvulas, vapor y aplicaciones eléctricas. El sistema permite almacenar y organizar registros, elaborar informes, generar gráficos y establecer niveles de alarmas. Además, permite la carga y descarga de información entre el equipo Ultraprobe y la computadora por medio de una tarjeta de memoria.

El software Ultratrend presenta los datos en un formato jerárquico de la siguiente manera: plata, aplicación, grupo, locación/máquina y grabación histórica. Cada grabación histórica contiene campos con datos básicos de inspección.

Figura 25. Programa Ultratrend DMS

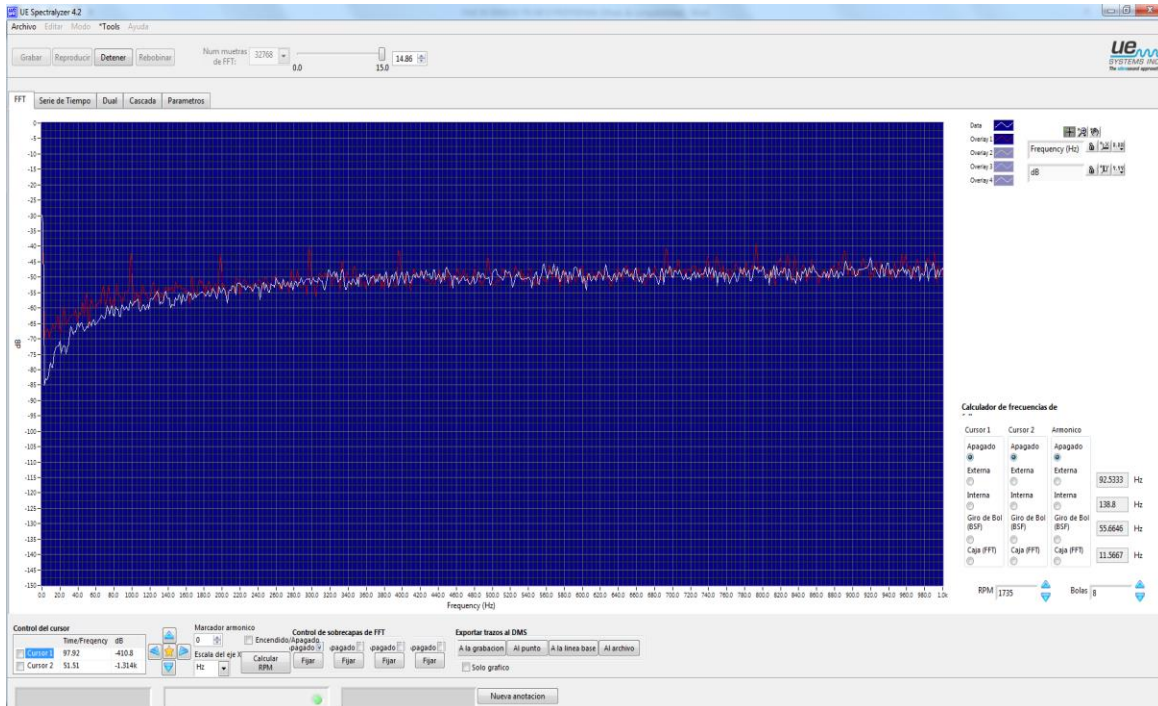


Fuente: Ingenio Santa Ana.

- UE Spectralyzer: es un analizador de espectro, este crea una imagen visual del sonido, mostrando las componentes de amplitud y frecuencia de un sonido grabado. El Spectralyzer le brinda al usuario distintas herramientas para realizar un análisis espectral mediante imágenes de las señales sonoras. El software proporciona una muestra del espectro de sonido (FFT), ondas de tiempo, dual (FFT y onda de tiempo), cascada (vista 3D) e información paramétrica en pestañas individuales.

Además permite la comparación de señales sonoras en la pestaña FFT, cursores de selección de frecuencia y un módulo que permite la detección de frecuencias de falla de rodamientos.

Figura 26. Programa UE Spectralyzer



Fuente: Ingenio Santa Ana.

#### **2.1.2.4. Elaboración de rutas de inspección**

Con la elaboración de rutas de inspección se busca estandarizar cada punto de medición para los equipos críticos, adicional, se traza un recorrido predeterminado para el personal encargado de realizar las rutas de medición, agilizando el proceso de recolección de datos.

Para realizar la estandarización de los puntos de medición, el punto inicial se tomará siempre el que este al comienzo del tren de movimiento, ya que representa la fuente de potencia de todo el conjunto. Para facilitar este proceso, se cuentan con diagramas de referencia de los trenes de máquinas indicando los puntos de toma de datos, adicional a esto, físicamente se marcan los puntos de toma de datos en los equipos de cada ruta.

#### **2.1.2.5. Rutas de inspección y lubricación**

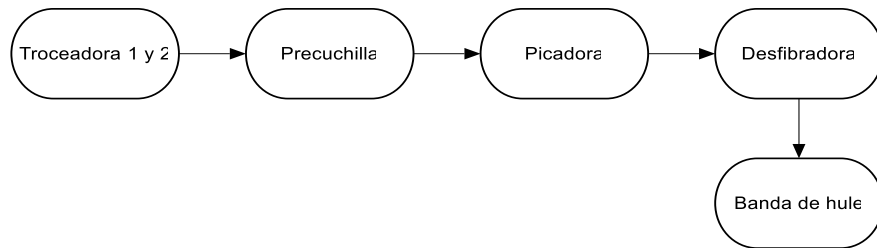
En los incisos siguientes se presentan los diagramas de flujo para las rutas de inspección y lubricación. También se incluyen diagramas de los equipos críticos indicando los puntos de toma de datos a lo largo de todo el tren de máquina.

##### **2.1.2.5.1. Patio de caña**

A continuación se presentan los diagramas de flujo que corresponden a las rutas de inspección y lubricación por ultrasonido para los equipos que conforman el área de preparación de caña, conformada por conductores, troceadoras, picadoras y desfibradoras. Cabe mencionar que las rutas lubricación se realizarán de manera semanal y las rutas de inspección se

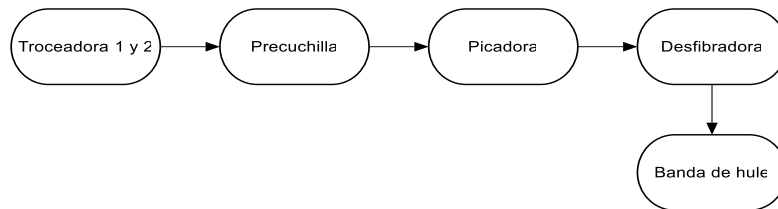
programaran cada quince días, a causa del mantenimiento programado de los equipos, para evaluar las condiciones pre y post mantenimiento.

Figura 27. **Ruta de medición patio de caña tándem A**



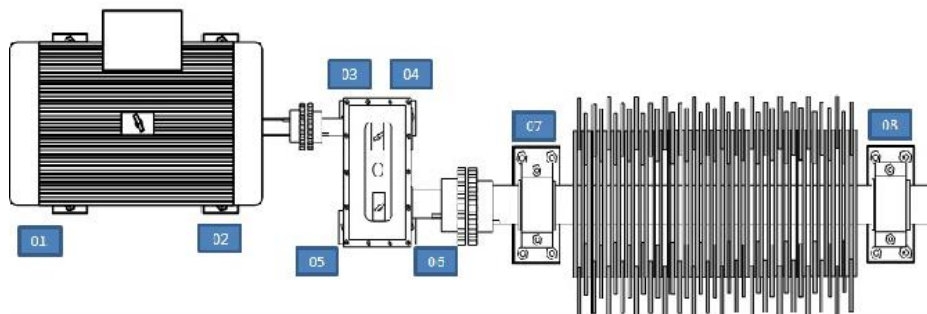
Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Ruta de medición patio de caña Tándem B**



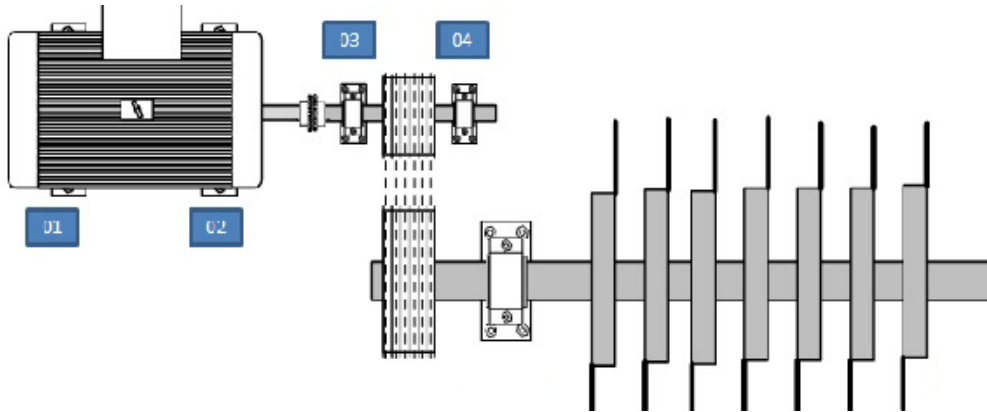
Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Esquema de puntos de medición troceadoras 1 y 2 patio TA y patio TB**



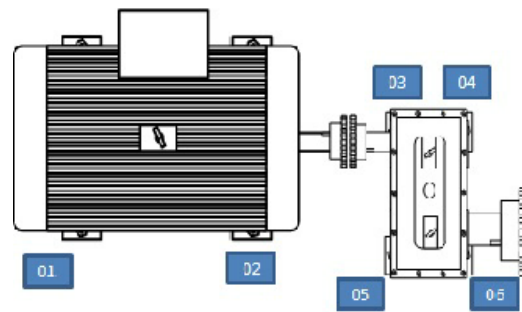
Fuente: Ingenio Santa Ana. *Sistema de Gestión de Mantenimiento*. p. 25.

Figura 30. **Esquema de puntos de medición precuchilla, picadora y desfibradora patio A y patio B**



Fuente: Ingenio Santa Ana. *Sistema de Gestión de Mantenimiento*. p. 25.

Figura 31. **Esquema de puntos de medición banda de hule TA y TB**



Fuente: Ingenio Santa Ana. *Sistema de Gestión de Mantenimiento*. p. 25.

#### 2.1.2.5.2. Molinos

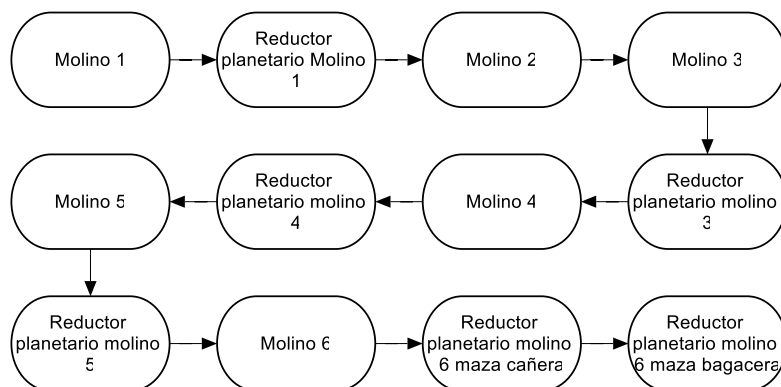
Los molinos de caña se encuentran conformados por cuatro mazas colocadas de manera que logren comprimir la caña proveniente de los patios para extraer la mayor cantidad de jugo posible. El jugo extraído es usado para

la producción de azúcar y el bagazo es transportado por medio de conductores al área de calderas donde será utilizado como combustible para estas.

El área de molinos está conformada por dos tandems, el tandem A cuenta con 6 molinos mientras que el tandem B cuenta con 5. Cada molino cuenta con un tren de movimiento conformado por un motor eléctrico, reductor de alta, transmisión intermedia y transmisión de baja, a excepción del molino 6 del tandem A, el cual consta únicamente de un motor eléctrico y un reductor planetario.

Con el fin de mejorar el proceso de extracción los molinos cuentan con transmisiones asistidas para las mazas cañeras (a excepción del molino 6 que cuenta con una transmisión adicional para la maza bagacera). Estas transmisiones están conformadas por un sistema hägglund (molinos 2 tandem A y B) y un tren conformado por un motor eléctrico y un reductor planetario para el resto de molinos.

Figura 32. Ruta de medición Molinos TA

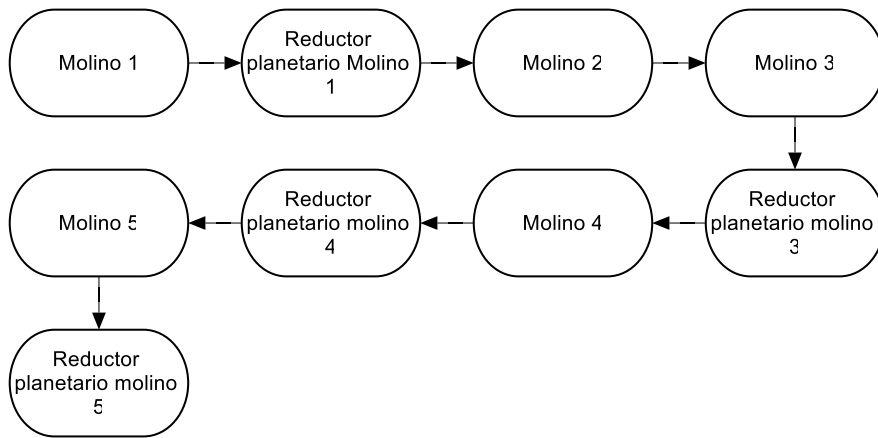


Fuente: elaboración propia.



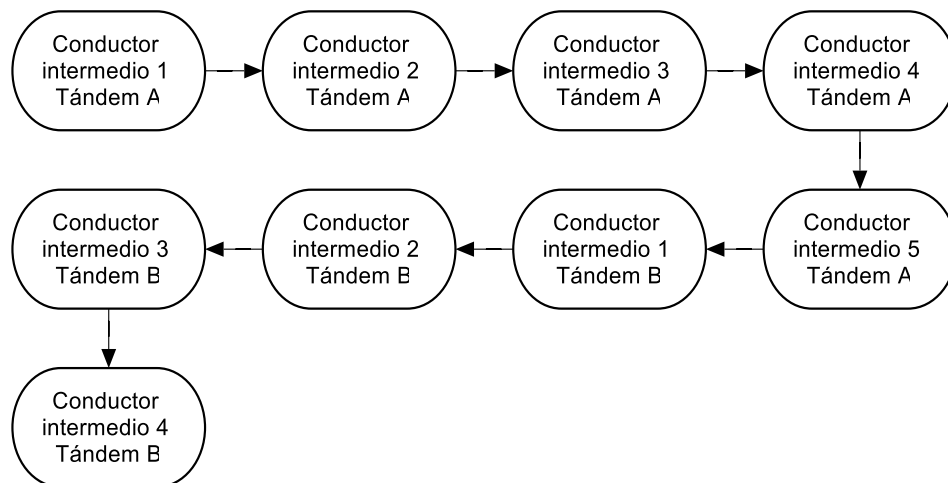
Dentro del área de molinos también se toman en cuenta los equipos encargados de colar el jugo extraído por los molinos y los conductores intermedios, encargados de trasladar la caña desde la salida de un molino a la alimentación del siguiente. Las figuras 32 y 33 muestran las rutas de inspección por ultrasonido para el área de Molinos.

**Figura 33. Ruta de medición Molinos TB**



Fuente: elaboración propia.

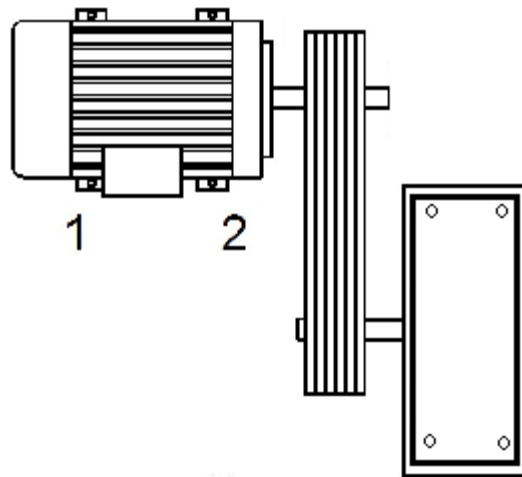
**Figura 34. Diagrama intermedios A y B**



Fuente: Ingenio Santa Ana.



Figura 37. **Esquema de puntos de medición conductores intermedios**



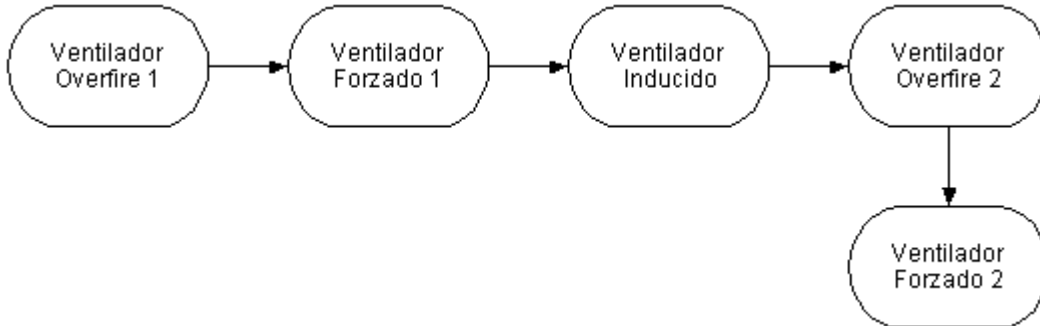
Fuente: Ingenio Santa Ana. *Sistema de Gestión de Mantenimiento*. p. 29.

### 2.1.2.5.3. Calderas

El área de calderas es la encargada de producir el vapor empleado para el proceso de producción de azúcar y de generación eléctrica. Para la implementación del programa de inspección por ultrasonido se toman en cuenta los ventiladores y bombas de alimentación de las calderas 1, 4, 6 y 7. Ya que son equipos muy importantes para la generación de vapor.

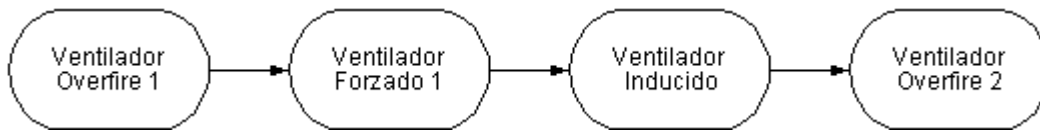
En la figura 38 se presentan las rutas de medición para los equipos del área de calderas así como los diagramas correspondientes a los distintos tipos de ventiladores y bombas de alimentación.

Figura 38. **Ruta de medición ventiladores caldera 1**



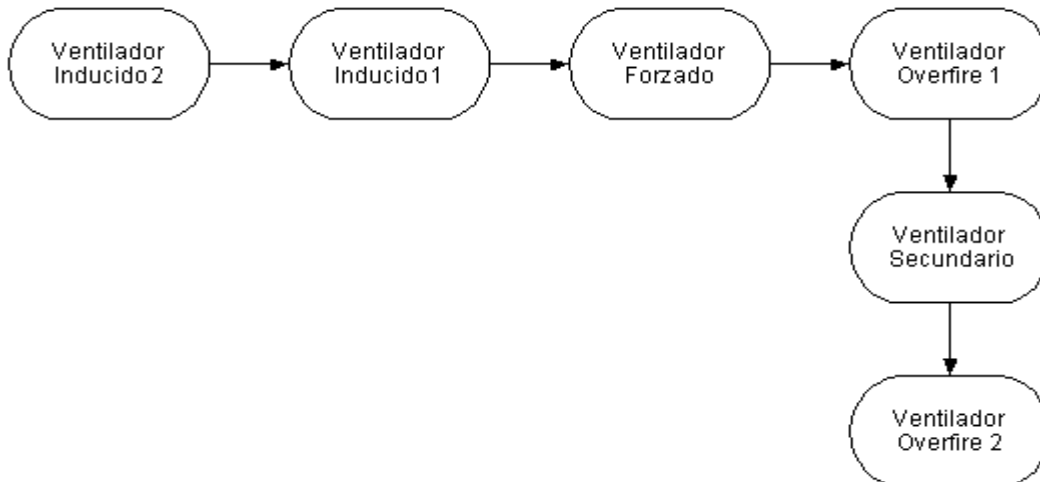
Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Ruta de medición ventiladores caldera 4**



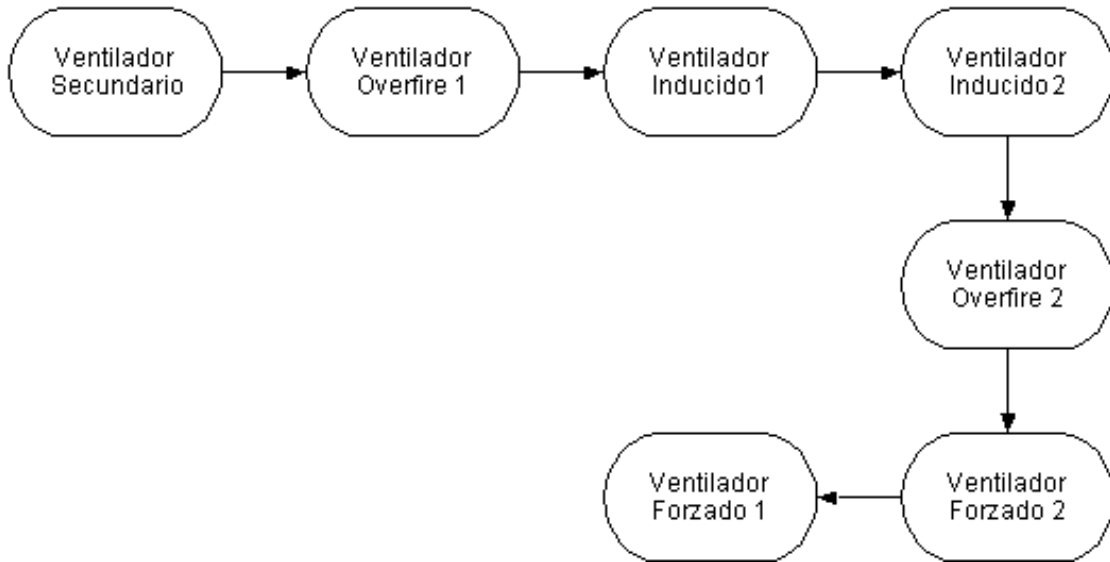
Fuente: elaboración propia.

Figura 40. **Ruta de medición ventiladores caldera 6**



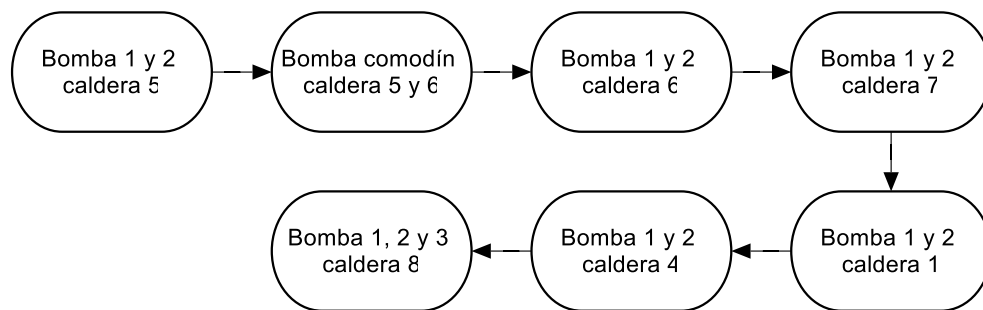
Fuente: elaboración propia.

Figura 41. Ruta de medición ventiladores caldera 7



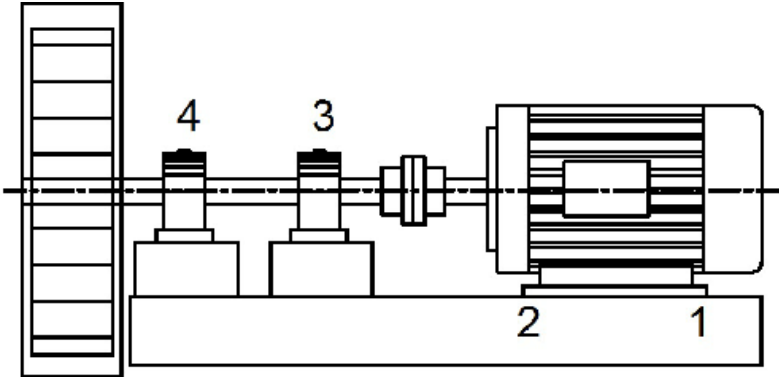
Fuente: elaboración propia.

Figura 42. Ruta de medición bombas de alimentación de agua de calderas



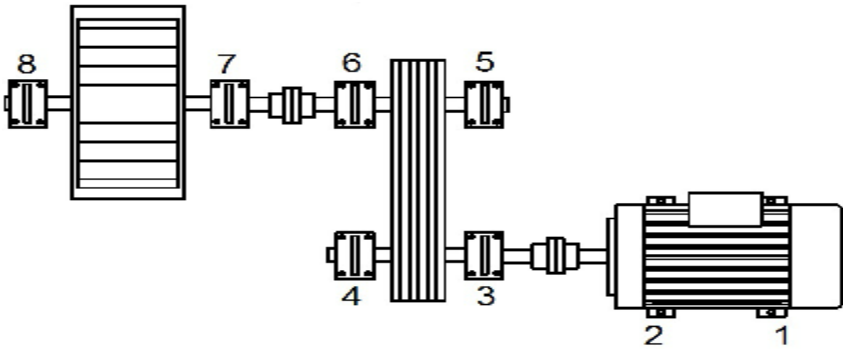
Fuente: elaboración propia.

Figura 43. **Esquema de puntos de medición ventiladores secundarios y overfire**



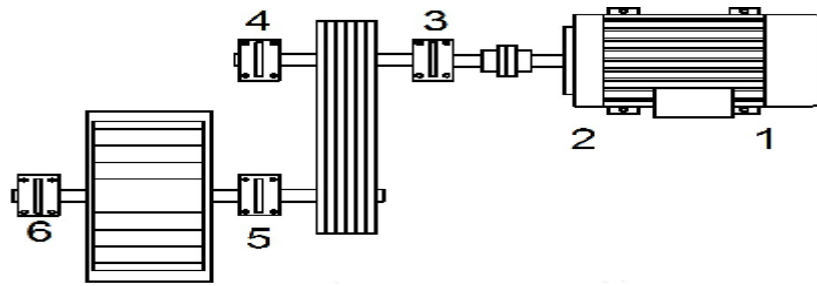
Fuente: Ingenio Santa Ana. *Sistema de Gestión de Mantenimiento*. p. 29.

Figura 44. **Esquema de puntos de medición ventiladores inducidos y forzados**



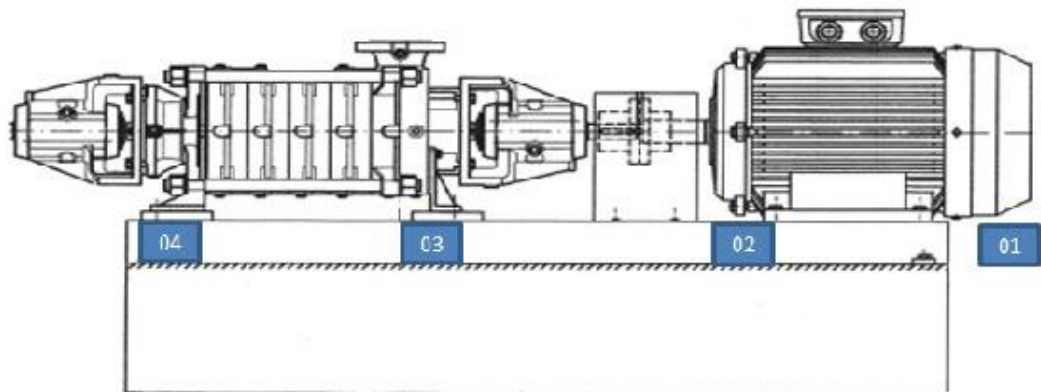
Fuente: Ingenio Santa Ana. *Sistema de Gestión de Mantenimiento*. p. 29.

Figura 45. **Esquema de puntos de medición ventiladores forzados caldera 7**



Fuente: Ingenio Santa Ana. *Sistema de Gestión de Mantenimiento*. p. 31.

Figura 46. **Esquema de puntos de medición bombas de alimentación de agua de calderas**



Fuente: Ingenio Santa Ana. *Sistema de Gestión de Mantenimiento*. p. 31.

#### 2.1.2.5.4. Cogeneración

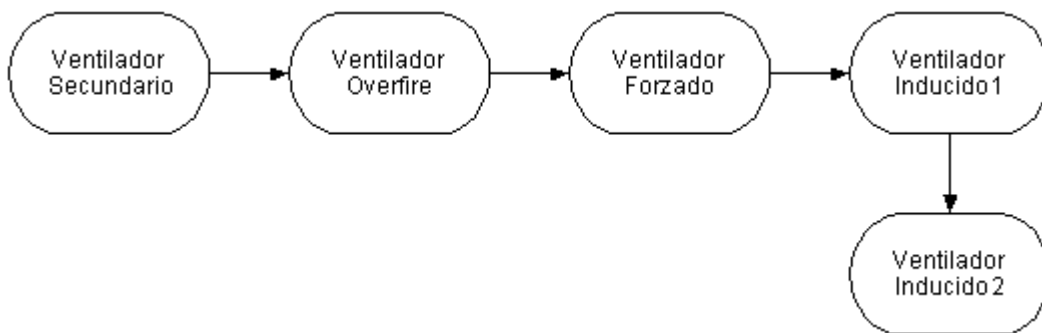
El área de cogeneración se encarga de la producción de energía eléctrica mediante el aprovechamiento del vapor producido en las calderas empleando el bagazo de caña como combustible principal. Serán incluidos dentro del

programa de inspección por ultrasonido los ventiladores y bombas de alimentación de las calderas 5 y 8 y las bombas y ventiladores de las torres de enfriamiento del bloque 1 y bloque 2.

Los turbogeneradores aun siendo parte fundamental del proceso de cogeneración no serán incluidos en las rutas de inspección debido a que el eje se mantiene soportado mediante chumaceras con tejas de babbit y no por medio de rodamientos, por lo tanto, el análisis por medio de ultrasonido no es relevante.

Las rutas para el área de cogeneración quedan conformadas de la siguiente manera:

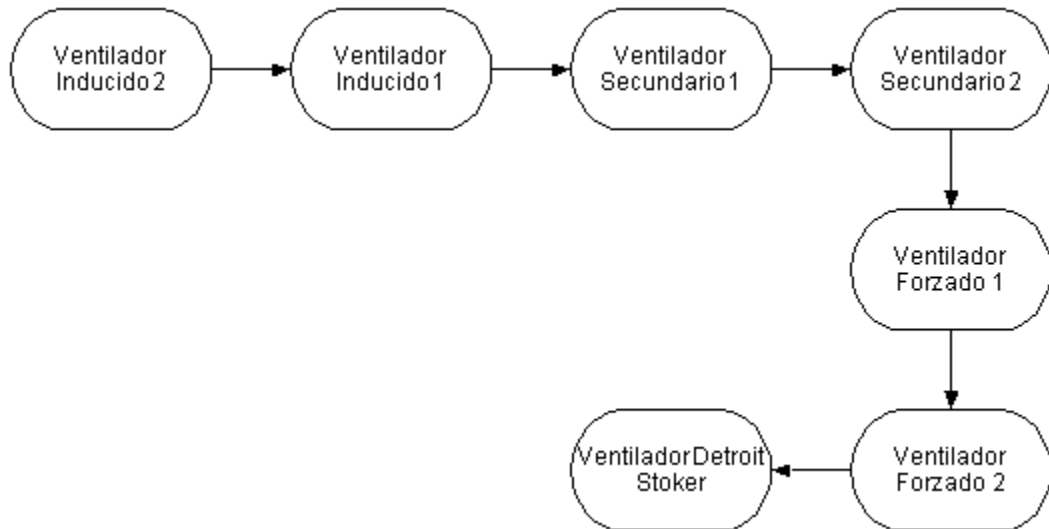
Figura 47. **Ruta de medición ventiladores caldera 5**



Fuente: elaboración propia.

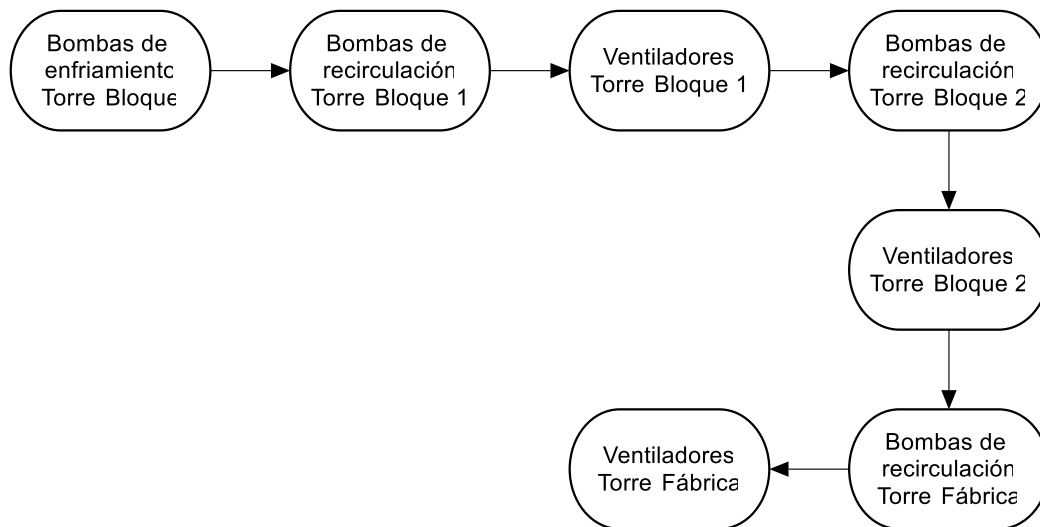


Figura 48. Ruta de medición ventiladores caldera 8



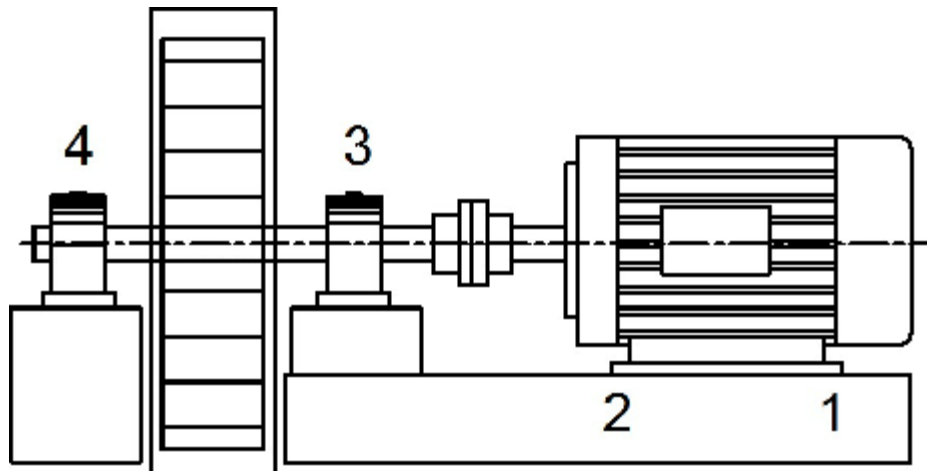
Fuente: elaboración propia.

Figura 49. Ruta de medición torres de enfriamiento



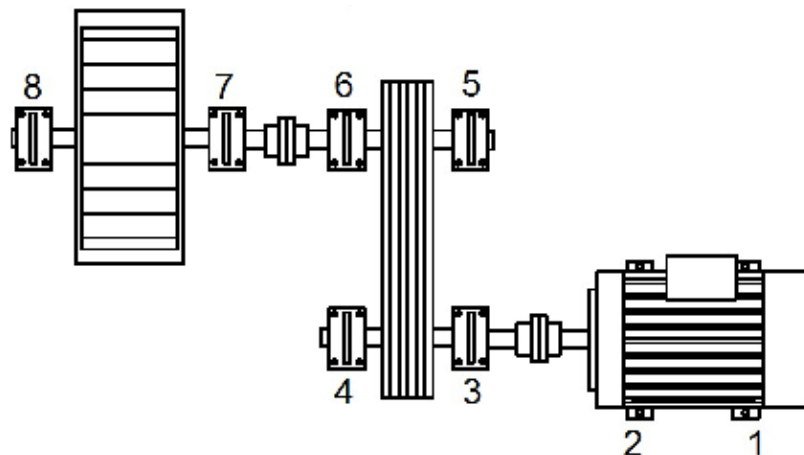
Fuente: elaboración propia.

Figura 50. **Esquema de puntos de medición ventiladores inducidos, forzados y secundarios caldera 8**



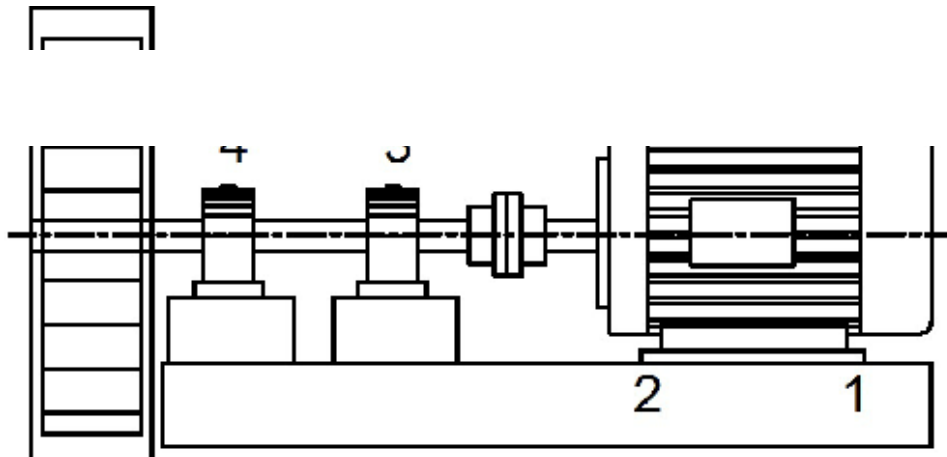
Fuente: Ingenio Santa Ana. *Sistema de Gestión de Mantenimiento*. p. 33.

Figura 51. **Esquema de puntos de medición ventiladores inducidos y forzados caldera 5**



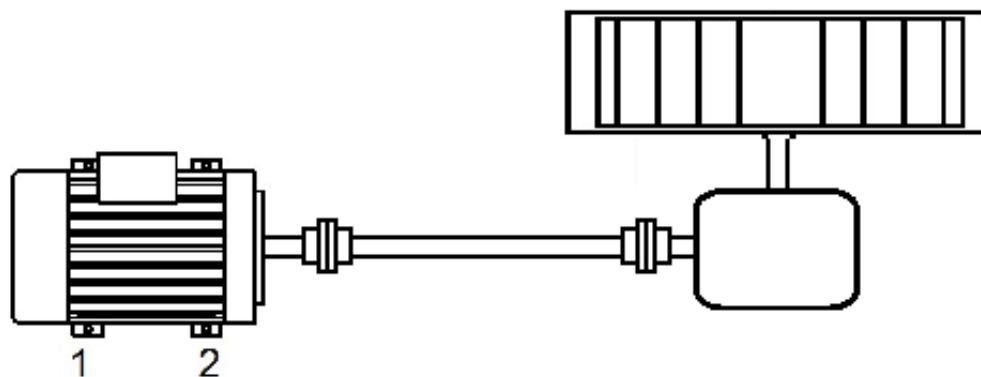
Fuente: Ingenio Santa Ana. *Sistema de Gestión de Mantenimiento*. p. 33.

Figura 52. **Esquema de puntos de medición ventilador overfire y secundario caldera 5**



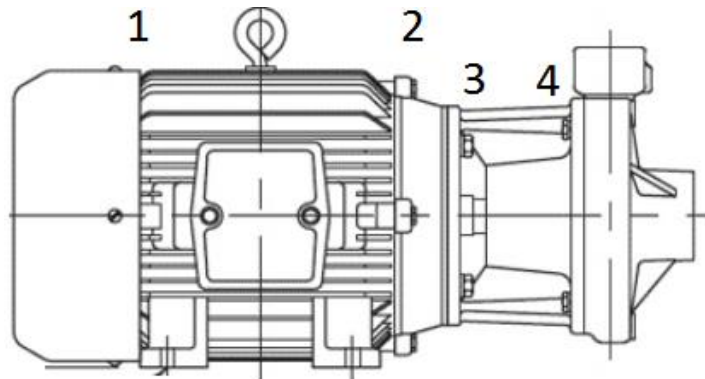
Fuente: Ingenio Santa Ana. *Sistema de Gestión de Mantenimiento*. p. 33.

Figura 53. **Esquema de puntos de medición ventiladores torres de enfriamiento**



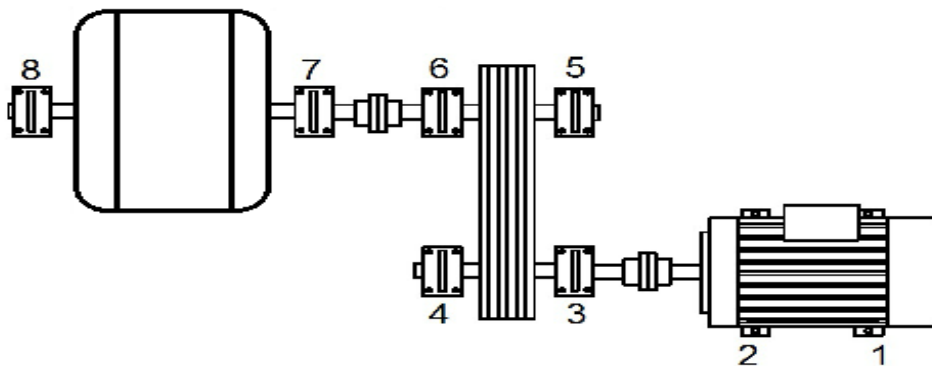
Fuente: Ingenio Santa Ana. *Sistema de Gestión de Mantenimiento*. p. 35.

Figura 54. **Esquema de puntos de medición bombas de enfriamiento**



Fuente: Ingenio Santa Ana. *Sistema de Gestión de Mantenimiento*. p. 35.

Figura 55. **Esquema de puntos de medición bombas de recirculación torres de enfriamiento fábrica**



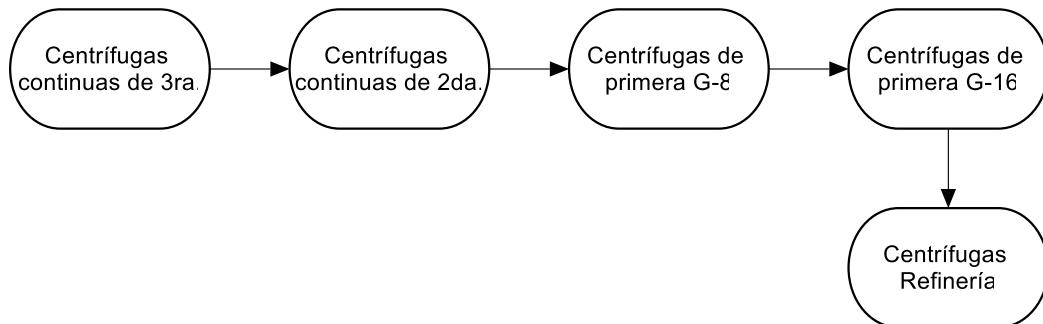
Fuente: Ingenio Santa Ana. *Sistema de Gestión de Mantenimiento*. p. 35.

### 2.1.2.5.5. Fábrica

Dentro del área de fabricación serán tomados en cuenta para el programa de inspección por ultrasonido las centrífugas continuas de segunda y tercera, centrífugas automáticas G-8, G-16 y refinería y las bombas y ventiladores de la torre de enfriamiento de fábrica.

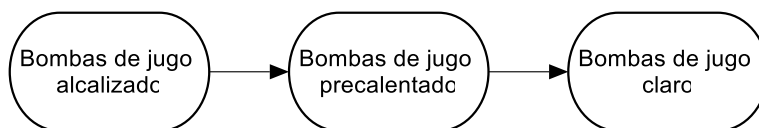
Las rutas de inspección por ultrasonido quedan distribuidas de la siguiente forma:

Figura 56. **Rutas de medición centrífugas**



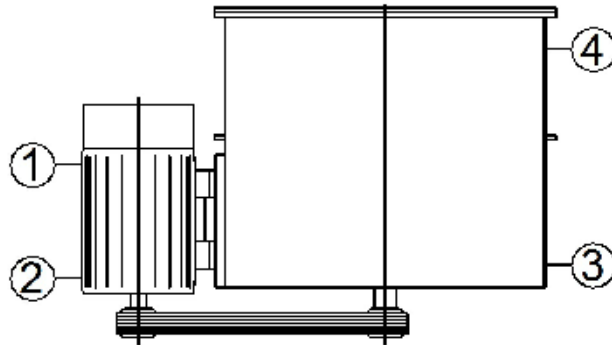
Fuente: elaboración propia.

Figura 57. **Rutas de medición bombas fábrica**



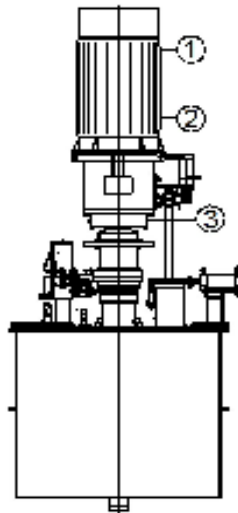
Fuente: Ingenio Santa Ana.

Figura 58. **Esquema de puntos de medición centrífugas continuas**



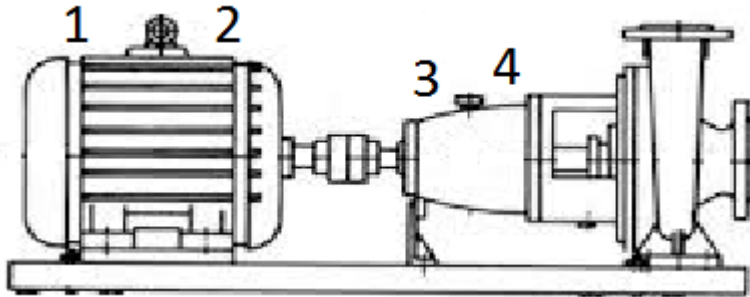
Fuente: Ingenio Santa Ana. *Sistema de Gestión de Mantenimiento*. p. 39.

Figura 59. **Esquema de puntos de medición centrífugas automáticas**



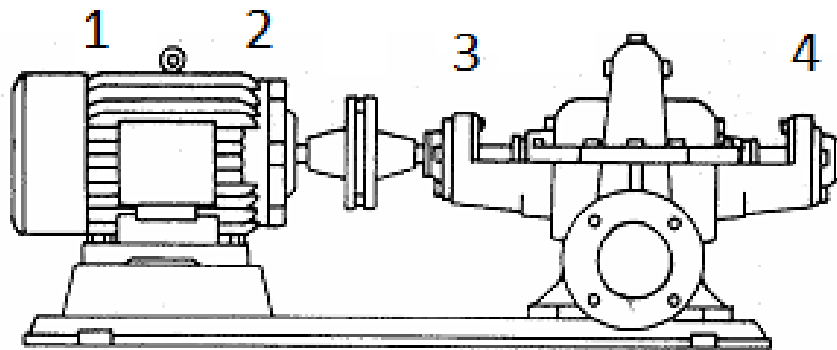
Fuente: Ingenio Santa Ana. *Sistema de Gestión de Mantenimiento*. p. 39.

Figura 60. **Esquema de puntos de medición bombas de jugo precalentado y alcalizado**



Fuente: Ingenio Santa Ana. *Sistema de Gestión de Mantenimiento*. p. 45.

Figura 61. **Esquema de puntos de medición bombas de jugo claro**



Fuente: Ingenio Santa Ana. *Sistema de Gestión de Mantenimiento*. p. 45.





### **3. FASE DE DOCENCIA**

Para la implementación de un programa de inspección por medio de ultrasonido es muy importante que el personal encargado de la realización de este sea debidamente capacitado en los fundamentos de la técnica, el manejo de los instrumentos de ultrasonido y el manejo de los softwares especializados para poder realizar un buen análisis de los datos recolectados.

De igual manera, como con cualquier otra técnica de mantenimiento predictivo los jefes de cada área deben inculcar a su personal a cargo los nuevos métodos a implementar a fin de maximizar la vida útil de los equipos, haciéndoles saber los beneficios que implican para la empresa y para ellos mismos.

#### **3.1. Capacitación del personal**

Si se desean obtener los mejores resultados en la implementación de la inspección de rodamientos por medio de ultrasonido es de suma importancia contar con personal calificado para el uso de los equipos de medición y el análisis de datos.

En la actualidad el departamento de confiabilidad cuenta con un ingeniero certificado nivel I en inspección por ultrasonido aéreo y estructural, este puede ser un buen punto de partida, sin embargo, es necesario que el personal encargado de la recolección de los datos en campo tenga los conocimientos necesarios para realizar las inspecciones de manera adecuada.

Con este propósito, se capacitó al personal de manera interna en el uso de los equipos de medición de ultrasonido, sus características, los parámetros a tener en cuenta y el ajuste de los mismos durante las mediciones, el almacenamiento de los datos medidos, la carga y descarga de información y el análisis de la información recolectada.

**Figura 62. Capacitación del personal**



Fuente: Ingenio Santa Ana.

### **3.1.1. Uso adecuado de los equipos de ultrasonido**

Esta capacitación fue dirigida principalmente al personal que se hará cargo de recolectar los datos de campo, ya que ellos hacen uso constante de los equipos de medición. Los temas tratados durante la capacitación fueron:

- Características de los equipos de ultrasonido
- Manejo adecuado de los equipos de medición
- Selección de módulo de medición
- Manejo adecuado de los módulos de enfoque y largo alcance
- Manejo adecuado de los transductores magnéticos
- Ajuste de frecuencia
- Ajuste de sensibilidad
- Grabación de valores puntuales
- Grabación de una muestra de sonido
- Selección del tiempo de grabación
- Activar/Desactivar alarmas del instrumento

### **3.1.2. Uso de software**

Esta capacitación fue dirigida al personal a cargo del departamento y al personal encargado del trabajo de campo, a fin de poder aprovechar al máximo las características de los programas ofrecidos por UE Systems. Los temas tratados durante la capacitación fueron impartidos como se muestra a continuación:

- Ultratrend DMS
  - Creación de una nueva ruta de medición
  - Carga y descarga de información
  - Ingreso manual de grabaciones históricas
  - Ingreso de los parámetros de medición
  - Adición de imágenes a grabaciones históricas
  - Gráficos de tendencia
  - Configuración de niveles de alarma
  - Creación de reportes

- UE Spectralyzer
  - Selección de configuración
  - Consulta de muestras de audio
  - Selección del número de muestras
  - Características de las pestañas FFT, serie de tiempo, dual, cascada y parámetros.
  - Ajuste de escalas (frecuencia y DB) en la pestaña FFT.
  - Uso del marcador armónico.
  - Uso de la calculadora de frecuencia de rodamientos.
  - Control de sobrecapas de FFT.

### **3.1.3. Propuesta para la certificación del personal**

Como se ha mencionado en varias ocasiones, para aprovechar al máximo los beneficios que ofrece una tecnología como el ultrasonido propagado en aire y estructuras, es imperativo contar con personal calificado para realizar la recolección, análisis y diagnóstico del estado de los equipos mediante esta técnica.

Por esta razón se propone la certificación de los ingenieros a cargo del departamento, las certificaciones propuestas son para nivel I y II en inspección por ultrasonido. Asimismo, se propone la certificación de nivel I en inspección por ultrasonido para el personal encargado de realizar las inspecciones de campo.

### **3.2. Importancia de las buenas prácticas de lubricación**

La causa más común de fallo en los rodamientos es una lubricación ineficiente o incorrecta, se sabe que cerca del 90 % de todos los rodamientos

están lubricados por grasa. Por esta razón es de vital importancia que dentro de la planta se cuenten con buenas prácticas de lubricación a fin de maximizar la vida útil de los rodamientos.

Una lubricación defectuosa es causada por una alimentación demasiado escasa o excesiva de lubricante o bien, por la mezcla o uso de lubricantes inadecuados. Además, durante el proceso de almacenamiento, transporte y aplicación del lubricante existe un riesgo de contaminación del mismo y como consecuencia ingresen partículas que puedan ser destructivas para el rodamiento. Por esta razón es importante hacerle saber al personal encargado de la lubricación la importancia de mantener limpios e identificados los depósitos de lubricante y los instrumentos empleados para las tareas de lubricación a fin de evitar la mezcla de lubricantes y la contaminación de los mismos.

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

Para realizar un buen análisis y diagnóstico del estado de los equipos se debe contar con una tendencia del comportamiento de estos en el tiempo. Con la finalidad de lograr este objetivo es necesaria la elaboración de rutas para la recolección periódica de las condiciones de operación de los equipos.

Los historiales son las mediciones que se realizan a cada equipo a lo largo de todo el periodo de zafra, estos permiten la elaboración de líneas de tendencia que muestren el comportamiento de los equipos durante su operación a fin de detectar el momento en que aparece una falla generalmente manifestada mediante el incremento de los valores medidos (vibración, ultrasonido o temperatura). Además, el contar con un buen historial de los equipos permite establecer niveles de alarma para determinar la severidad de la

falla presente en el equipo y por lo tanto realizar la acción pertinente antes de que cause un daño grave.

## CONCLUSIONES

1. Se implementó un programa de inspección y lubricación de rodamientos para los equipos críticos del Ingenio Santa Ana, distribuyéndose en distintas rutas clasificadas por área a fin de facilitar la recolección y el análisis de los datos recolectados durante su operación en zafra.
2. Se integraron distintos equipos del patio de caña, molinos, fábrica, generación eléctrica y calderas, tomando en cuenta sus costos de mantenimiento e importancia dentro del proceso, así como sus características y parámetros de operación, para ser monitoreados y lubricados de manera periódica.
3. Se crearon diversas rutas de inspección para los equipos de las distintas áreas de la planta de manera que se pueda llevar un control adecuado sobre la información recolectada. Adicionalmente se establecieron intervalos de medición mensual para los equipos críticos lubricados con aceite y semanal para los equipos críticos lubricados con grasa.
4. Se establecieron líneas bases y niveles de alarma para los equipos críticos tomando mediciones ultrasónicas al inicio de la zafra y en equipos lubricados con grasa, justo después de lubricar, con el propósito de detectar cualquier falla incipiente en los equipos mediante incremento de los valores ultrasónicos por encima de los niveles de alarma establecidos.
5. Se crearon líneas de tendencia mediante los datos recolectados durante el período de operación normal de los equipos, que permiten evaluar las

condiciones de lubricación de los rodamientos, la calidad sonora y los niveles normales de sonido de los mismos.



## RECOMENDACIONES

1. La gerencia de la división industrial debe proporcionar los recursos necesarios para la calificación y certificación del personal a cargo de los análisis en el departamento de confiabilidad, ya que esto es de vital importancia para el buen desempeño del departamento.
2. Los jefes de cada área deben inculcar en el personal a cargo los beneficios del ultrasonido, así como las buenas prácticas de lubricación y mantenimiento de los equipos a fin de maximizar su vida útil.
3. Los integrantes del departamento de confiabilidad para implementar un programa de monitoreo por ultrasonido de manera efectiva, deberán ser proactivos y meticulosos al momento de realizar las mediciones correspondientes a fin de obtener datos confiables para los análisis pertinentes.



## BIBLIOGRAFÍA

1. FAG Sales Europe Iberia-España. *Lubricación de rodamientos*. Publ.-No. WL 81 115/4 SB. 70 p.
2. Investing. *Resumen futuros azúcar Nº 11*. [en línea]. <es.investing.com/commodities/us-sugar-no11>. [Consulta: marzo de 2019]
3. Grupo SKF. *Catálogo de rodamientos*. PUB BU/P1 10000/. España: Grupo SKF, 2015. 1382 p.
4. SANZOL IRIBARREN, Lorenzo. *Implantación de plan de mantenimiento TPM en planta de cogeneración*. Trabajo de graduación de Ing. Técnica Industrial Mecánica. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, Universidad de Navarra, España, 2010. 107 p.
5. SDT Ultrasound Solutions. *Libro del Estudiante Nivel Uno, Entrenamiento con Certificación*. USA: SDT Ultrasound Solutions, 2015. 89 p.
6. UE Systems. *Administración del sistema Ultratrend DMS 5.0*. USA: UE SYSTEMS, 2015. 33 p.
7. ———. División de entrenamiento. *Ultrasonido propagado en el aire y estructuras*. USA: UE SYSTEMS, 2013. 173 p.

8. ———. *UE Spectralyzer V4.2 Manual de Instrucción*. USA: UE SYSTEMS, 28p.
9. YAÑEZ, Medardo; PERDOMO, José L; GOMEZ DE LA VEGA, Hernando. *Ingeniería de Confiabilidad; Pilar Fundamental del Mantenimiento*. Reliability and Risk Management S.A. Reino Unido: Chapman and Hall, Oxford, 1993. 17p.