



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

**UTILIZACIÓN DE TECNOLOGÍA ULTRASÓNICA PARA EL DISEÑO DE  
RUTAS DE MONITOREO POR CONDICIÓN PARA LOS RODOS DE SELLADO  
DE SOBRE Y BLÍSTER, EN LA PLANTA DE PRODUCCIÓN BAYER, S. A.**

**Ing. Diego Estuardo García Roldán**  
Asesorado por el MSc. Ing. Javier Quan Hidalgo

Guatemala, septiembre de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**UTILIZACIÓN DE TECNOLOGÍA ULTRASÓNICA PARA EL DISEÑO DE RUTAS DE  
MONITOREO POR CONDICIÓN PARA LOS RODOS DE SELLADO DE SOBRE Y  
BLÍSTER, EN LA PLANTA DE PRODUCCIÓN BAYER, S. A.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**ING. DIEGO ESTUARDO GARCÍA ROLDÁN**

ASESORADO POR EL MSC. ING. JAVIER QUAN HIDALGO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**MAESTRO EN ARTES DE INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Córdova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANA	Mtra. Inga. Aurelia Anabela Córdova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADORA	Mtra. Inga. Sandra Nineth Ramírez Flores
EXAMINADORA	Dra. Aura Marina Rodríguez Pérez
SECRETARIO	Mtro. 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:

**UTILIZACIÓN DE TECNOLOGÍA ULTRASÓNICA PARA EL DISEÑO DE RUTAS DE MONITOREO POR CONDICIÓN PARA LOS RODOS DE SELLADO DE SOBRE Y BLÍSTER, EN LA PLANTA DE PRODUCCIÓN BAYER, S.A.**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 11 agosto de 2015.

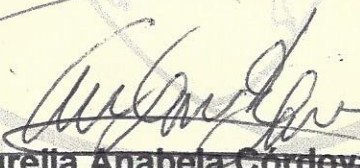
**Ing. Diego Estuardo García Roldán**

**EEPM-774-2019**

En mi calidad como 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 Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación de la Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento titulado: **“UTILIZACIÓN DE TECNOLOGÍA ULTRASÓNICA PARA EL DISEÑO DE RUTAS DE MONITOREO POR CONDICIÓN PARA LOS RODOS DE SELLADO DE SOBRE Y BLÍSTER, EN LA PLANTA DE PRODUCCIÓN BAYER, S.A.”** presentado por el Ingeniero Mecánico Industrial **Diego Estuardo García Roldán** quien se identifica con Carné **200511875**, procedo a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

*“Id y Enseñad a Todos”*

  
**Inga. Aurella Anabela Cordova Estrada**  
**Decana**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Universidad de San Carlos de Guatemala**



**Guatemala, septiembre de 2019**

**EPPFI-775-2019**

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado: **“UTILIZACIÓN DE TECNOLOGÍA ULTRASÓNICA PARA EL DISEÑO DE RUTAS DE MONITOREO POR CONDICIÓN PARA LOS RODOS DE SELLADO DE SOBRE Y BLÍSTER, EN LA PLANTA DE PRODUCCIÓN BAYER, S.A.”** presentado por el Ingeniero Mecánico Industrial **Diego Estuardo García Roldán** quien se identifica con Carné **200511875**, correspondiente al programa de Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

*“Id y Enseñad a Todos”*



**Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Coti**  
Director

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

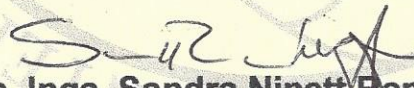


**Guatemala, septiembre de 2019**

Como Coordinador de la Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“UTILIZACIÓN DE TECNOLOGÍA ULTRASÓNICA PARA EL DISEÑO DE RUTAS DE MONITOREO POR CONDICIÓN PARA LOS RODOS DE SELLADO DE SOBRE Y BLÍSTER, EN LA PLANTA DE PRODUCCIÓN BAYER, S.A.”** presentado por el Ingeniero Mecánico Industrial **Diego Estuardo García Roldán** quien se identifica con Carné **200511875**.

Atentamente,

*“Id y Enseñad a Todos”*



**Mtra. Inga. Sandra Ninett Ramírez Flores**  
**Coordinadora de Maestría**  
**Escuela de Estudios de Postgrado**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Universidad de San Carlos de Guatemala**



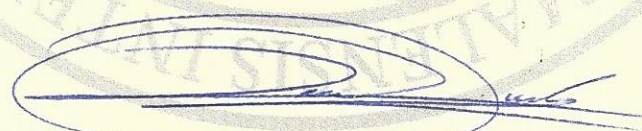
**Guatemala, septiembre de 2019**

**EEPFI-777-2019**

En mi calidad como Asesor del Ingeniero Mecánico Industrial **Diego Estuardo García Roldán** quien se identifica con Carné **200511875** procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“UTILIZACIÓN DE TECNOLOGÍA ULTRASÓNICA PARA EL DISEÑO DE RUTAS DE MONITOREO POR CONDICIÓN PARA LOS RODOS DE SELLADO DE SOBRE Y BLÍSTER, EN LA PLANTA DE PRODUCCIÓN BAYER, S.A.”** quien se encuentra en el programa de Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

*“Id y Enseñad a Todos”*



**Mtro. Ing. Javier Quan Hidalgo**  
Asesor

**Ing. Javier Quan**  
Colegiado No. 10939

**Guatemala, septiembre de 2019**



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por permitirme estar vivo y darme las fuerzas necesarias para cumplir esta meta.
- Mis padres** César Alberto García Moreira y Gloria Elisabet Roldán de García, por brindarme su apoyo y amor incondicional, y por inculcarme los valores y enseñanzas que me condujeron a lograr esta meta.
- Mis abuelos** César García, Adela Moreira, Rosa Mejía y Virgilio Roldán. Cada uno de ellos formó una parte importante en mi carrera, dándome lecciones de sabiduría, fortaleza y perseverancia.
- Mis hermanos** César y Ana García Roldán, por ser mi más grande inspiración, y por estar siempre a mi lado.
- Mis amigos** Que a lo largo de mis estudios añadieron muchas alegrías, así como estuvieron conmigo en los malos momentos, en especial a la familia Barrera Urquizú; quienes me permitieron estar al lado de dos personas maravillosas que compartieron conmigo momentos inolvidables en mi vida.

**Mi familia**

A mis tíos y primos más cercanos que siempre me brindaron su apoyo desinteresado en todo momento.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Universidad de San  
Carlos de Guatemala**

Por ser orgullosamente mi casa de estudios.

**Facultad de Ingeniería**

Por brindarme los conocimientos y enseñanzas  
a lo largo de mi carrera.

**A mi asesor**

Ing. Javier Quan, por la asesoría y el apoyo  
brindado en el desarrollo de este trabajo.

**Bayer, S. A.**

Por permitirme desarrollar este trabajo en sus  
líneas productivas.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN .....	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y DEFINICIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS .....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO .....	XIX
INTRODUCCIÓN .....	XXI
1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	1
1.1. Empresa farmacéutica.....	1
1.2. Planta de producción.....	2
1.2.1. Cuartos de producción para productos efervescentes .....	3
1.2.2. Cuartos de producción para productos estándar.....	3
1.3. Mantenimiento .....	4
1.4. Mantenimiento predictivo y monitoreo por condición.....	5
1.5. Selección del componente o equipo a monitorear .....	7
1.6. Selección de la tecnología adecuada. ....	7
1.7. Análisis de modos de falla, efecto y criticidad (AMEF). ....	8
1.8. Identificación de los modos de falla y sus efectos .....	9
1.9. El análisis de fallas como una técnica de mantenimiento preventivo .....	13
1.10. Modos de falla .....	14
1.11. Averías de rodamientos.....	14

1.11.1.	Desgaste: contaminación abrasiva .....	15
1.11.2.	Desgaste: corrosión por picaduras y abolladuras .....	15
1.11.3.	Desgaste: ranurado .....	16
1.11.4.	Corrosión .....	17
1.11.5.	Lubricación inadecuada.....	17
1.11.5.1	Nivel 1: decoloración .....	18
1.11.5.2	Nivel 2: rayado y descascarillado .....	19
1.11.5.3	Nivel 3: calor excesivo en el extremo del rodillo .....	19
1.11.5.4	Nivel 4: bloqueo total del rodamiento.....	19
1.12.	Conceptos básicos del sonido.....	20
1.12.1.	Frecuencias del sonido.....	21
1.13.	Ultrasonido propagado por aire .....	22
1.13.1.	Módulo de contacto .....	23
1.14.	Rutas de monitoreo por condición y modos de falla.....	24
1.15.	Diferencia entre ultrasonido propagado por aire y análisis de vibraciones .....	26
1.16.	Monitoreo por condición con ultrasonido para rodamientos de baja revolución .....	26
2.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	29
2.1.	Selección del componente a monitorear .....	29
2.2.	Análisis de modos de falla, efecto y criticidad (AMEF).....	31
3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS .....	35
3.1.	Aplicación de ultrasonido para rodos de sellado para selladora SIEBLER HM1E-500 en productos efervescentes .....	35
3.1.1.	Puntos de medición establecidos SIEBLER HM1E-500	37
3.2.	Aplicación de ultrasonido para rodos de sellado para blisteadora NOACK N921 en productos estándar.....	40

3.2.1.	Puntos de medición establecidos NOACK N921 .....	43
3.3.	Resultados de las mediciones de Ultrasonido en el 2018 selladora SIEBLER HM1E-500 para tabletas efervescentes.....	45
3.3.1.	Resultados rodamiento 1 en el 2018.....	46
3.3.2.	Resultados rodamiento 2 en el 2018.....	48
3.3.3.	Resultados rodamiento 3 en el 2018.....	49
3.3.4.	Resultados rodamiento 4 en el 2018.....	51
3.4.	Medición de Ultrasonido en el 2019 SIEBLER HM1E-500.....	52
3.5.	Resultado de las mediciones en el 2018 para blisteadora NOACK N921 .....	55
3.5.1.	Resultados rodamiento 1 en el 2018.....	56
3.5.2.	Resultados rodamiento 2 en el 2018.....	57
3.5.3.	Resultado en el 2019 para blisteadora Noack N921 .....	59
3.6.	Análisis de resultados de rodamientos de Selladora de sobre SIEBLER HM1E-500.....	61
3.7.	Análisis de resultados de rodamientos de Selladora de blíster NOACK N921 .....	65
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	67
	CONCLUSIONES .....	73
	RECOMENDACIONES.....	75
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
	ANEXOS.....	81



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Gráfico de condición versus tiempo de un elemento mecánico.....	6
2.	Relación entre función, modo de falla, causas potenciales y efectos.....	10
3.	Relación severidad y ocurrencia en un modo de falla .....	12
4.	Desgaste por partículas finas en rodamientos .....	15
5.	Desgaste por abolladuras por escaso mantenimiento.....	16
6.	Contaminación por partículas grandes incrustadas en la jaula .....	16
7.	Descascarillado por marcas de agua en la pista .....	17
8.	Descoloración de pista por altas temperaturas .....	18
9.	Descascarillado por insuficiente lubricación .....	19
10.	Flujo de metal avanzado por atoramiento de rodamiento.....	20
11.	Módulo de contacto (estetoscopio), Ultraprobe 10000 .....	23
12.	Análisis de modo y efecto de falla potencial aplicado a selladoras. ....	30
13.	Efecto potencial de falla: pérdida de hermeticidad por corte .....	32
14.	Modo de falla potencial: avería de rodo por desgaste .....	33
15.	Modo de falla potencial: superficie de sellado .....	34
16.	Estación de sellado de sobres para productos efervescentes.....	36
17.	Esquema de selladora Siebler HM1E-500.....	37
18.	Esquema de estación de sellado SIEBLER HM1E-500 .....	38
19.	Rodos de sellado de selladora SIEBLER HM1E-500 .....	39
20.	Puntos de medición selladora SIEBLER HM1E-500 .....	39
21.	Toma de muestra de ultrasonido con módulo de contacto .....	40
22.	Esquema de selladora Noack N921 .....	41
23.	Estación de sellado de blisteadora Noack N921 .....	42



24.	Esquema de estación de sellado NOACK N921 .....	43
25.	Medición en rodamiento 1 de blisteradora Noack N921.....	44
26.	Fragmento de la medición del día 10/03/2018 del rodamiento 1 .....	46
27.	Gráfico de tendencia de rodamiento 1 .....	47
28.	Gráfico de tendencia de rodamiento 2 .....	49
29.	Gráfico de tendencias de rodamiento 3 .....	50
30.	Fragmento de la medición del día 17/06/2018 del rodamiento 3 .....	51
31.	Gráfico de tendencias de rodamiento 4 .....	52
32.	Gráfico de tendencias de rodamientos selladora SIEBLER HM1E-500 en el 2019 .....	54
33.	Gráfico de tendencia de rodamiento 1 .....	57
34.	Gráfico de tendencia de rodamiento 2 .....	58
35.	Fragmento de la medición del 14/08/2018 del rodamiento 2 .....	59
36.	Gráfico de tendencia de Noack N921 en el 2019.....	60
37.	Efectos de la lubricación en rodamientos.....	62

## TABLAS

1.	Modos de falla de rodamientos de baja revolución .....	25
2.	Matriz de riesgo .....	31
3.	Resultados de la aplicación ultrasónica para rodos de sellado de SIEBLER HM1E-500 en el 2018 .....	45
4.	Muestra ultrasónica en 2018 – Rodamiento 1 .....	47
5.	Muestra ultrasónica en 2018 – Rodamiento 2 .....	48
6.	Muestra ultrasónica en 2018 – Rodamiento 3 .....	49
7.	Muestra ultrasónica en 2018 – Rodamiento 4 .....	51
8.	Resultados de la aplicación ultrasónica para rodos de sellado de SIEBLER HM1E-500 en el 2019 .....	53
9.	Muestra ultrasónica en 2019 de selladora 1 .....	53

10.	Resultados de la aplicación ultrasónica para rodos de sellado de Noack N921 en el 2018.....	55
11.	Muestra ultrasónica en 2018 – Rodamiento 1.....	56
12.	Muestra ultrasónica en 2018 – Rodamiento 2.....	57
13.	Muestra ultrasónica en 2019 Noack 921 .....	60
14.	Resumen de hallazgos selladora SIEBLER .....	61
15.	Modos de diagnóstico de falla rodamientos de SIEBLER HM1E-500 ....	64
16.	Resumen de hallazgos blisteadora NOACK.....	65
17.	Modos de diagnóstico de falla rodamientos de NOACK N921 .....	66



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>AMEF</b>	Método de modos de falla, efecto y criticidad
<b>bar</b>	Unidad de presión bar
<b>CpK</b>	Indica de capacidad
<b>dB</b>	Decibel
<b>dBmV</b>	Decibelio-milivatio
<b>END</b>	Ensayos no destructivos
<b>€</b>	Euro
<b>f</b>	Frecuencia
<b>°C</b>	Grados centígrados
<b>°F</b>	Grados Fahrenheit
<b>ft</b>	Pie
<b>Hz</b>	Hertz
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>kHz</b>	Kilohertz
<b>lbs</b>	Libras
<b>psi</b>	Libra por pulgada cuadrada
<b>MHz</b>	Megahertz
<b>m</b>	Metros
<b>MPH</b>	Millas por hora
<b>mm</b>	Milímetros
<b>ms</b>	Milisegundos
<b>mV</b>	Milivoltio
<b>NPR</b>	Número de prioridad de riesgo

<b>%</b>	Porcentaje
<b>Q</b>	Quetzal, moneda de Guatemala
<b>RPM</b>	Revoluciones por minuto
<b>SNR</b>	Relación señal/ruido
<b>TPEF</b>	Análisis de frecuencia de fallas
<b>VOSO</b>	Ver, oler, sentir, oír

## GLOSARIO

<b>Blíster</b>	Empaquetadura que consiste en un soporte de aluminio sobre el que va pegado una lámina de plástico transparente con cavidades en las que se alojan diferentes tipos de comprimidos o cápsulas.
<b>Confiabilidad</b>	Probabilidad de que un sistema o componente, pueda funcionar correctamente fuera de falla, por un tiempo específico.
<b>Disponibilidad</b>	Tasa de tiempo total que un equipo esté disponible para cumplir la función para la cual fue diseñado.
<b>Frecuencia</b>	Magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico
<b>Hermeticidad</b>	Calidad de un cerramiento de estar perfectamente cerrado o estanco al aire mediante fusión o sellado.
<b>Inspección</b>	Exploración física que se realiza, principalmente a través de la vista.
<b>Lubricación</b>	Acción de reducir el rozamiento y sus efectos en superficies adyacentes con movimientos que puedan ocasionar algún tipo de maquinado.

**Mantenibilidad**

Representa la cantidad de esfuerzo para que un sistema o equipo pueda conservar su funcionamiento normal o para restituirlo una vez se ha presentado en evento de falla.

**Rodamiento**

Cojinete que consta de dos cilindros concéntricos entre los que va colocado un juego de rodillos o bolas que pueden girar libremente.

**Sellado**

Cierre de algo de forma hermética.

## RESUMEN

Para producir un sobre o un blíster, las líneas de producción cuentan con varias etapas que esencialmente se componen por la formación de comprimidos, sellado con empaque tipo sobre o blíster, empaque en estuche y el empaque de estuches en cartón corrugado. Todas las etapas son importantes para manufacturar. Sin embargo, en la etapa de sellado se encuentra una de las estaciones más críticas, compuesta de rodos de sellado por temperatura, los cuales tienen características especiales, debido a que de ellos depende la hermeticidad del empaque de comprimidos. Esto los hace ser equipos caros y difíciles de intercambiar en caso de dañarse.

El mantenimiento basado en confiabilidad es una técnica que no sólo promueve el uso de nuevas tecnologías de mantenimiento, sino que está orientado a determinar qué actividades se deben realizar para un activo en específico en un tiempo puntual, tanto para incrementar su confiabilidad sino para también disminuir el esfuerzo de mantenibilidad de este. Una de estas tecnologías es la utilización de ultrasonido propagado por aire para la detección temprana de fallas.

Este trabajo de implementación tiene como propósito principal el diseño de rutas de monitoreo por condición utilizando esta técnica en la etapa de sellado de sobre y blíster en la planta de producción Bayer, S. A. para incrementar la confiabilidad de esta fase del proceso productivo.

La metodología utilizada para este trabajo fue de carácter descriptivo, debido a que los datos recolectados fueron establecidos en un período



determinado para crear parámetros en base a tendencias, por lo que el diseño de investigación es no experimental. La técnica utilizada fue por medio de la toma de muestras de ultrasonido, por medio de módulo de contacto, en los rodamientos de la etapa de sellado. Esta técnica se clasifica como monitoreo por condición, o también como mantenimiento predictivo, mediante el análisis de sonido para detectar variaciones en decibelímetros connotando un inicio de falla. Se realizaron muestras mensuales entre febrero y agosto 2018 como una primera fase de la medición, y en los primeros tres meses del 2019.

Los principales resultados obtenidos con la aplicación de esta técnica se enfocaron en el establecimiento de límites de alerta temprana en decibeles, y la propuesta de un modelo de diagnóstico de falla mediante la creación de una línea de tendencia de operación luego de la interpretación de los datos recopilados. Derivado de estos resultados se espera reducir el número de fallas y por consiguiente, el número de paros no planificados, prolongación de la vida útil de los rodamientos de la etapa de sellado considerando el esfuerzo que se requiere la sustitución de estos, y como principal resultado el incremento de la confiabilidad en esta etapa del sellado.

Con la aplicación de la tecnología, se determinó la confiabilidad de los equipos analizados, debido a que fue posible detectar de forma temprana los distintos modos de falla potenciales, donde se permitió tomar acciones preventivas de lubricación reduciendo los niveles de variación para regresar a parámetros de operación normales. De esta manera se evitaron paros de producción no programados. Se concluyó con el análisis de las muestras obtenidas, donde se puede conocer el estado de los componentes de sellado en operación, sin necesidad de ser desmontado y que esto genere un paro no programado.

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

## **Planteamiento del problema**

En la planta de producción Bayer, S.A., no se cuenta con un plan de mantenimiento basado en la condición de las máquinas, con lo cual no se puede detectar tempranamente los módulos de falla existentes en los componentes críticos de operación, ocasionando paros de producción no planificados con estos módulos de falla se suscitan.

## **Descripción del problema**

En la planta de producción Bayer, S.A. se tienen paros de producción no planificados de forma recurrente, ya que a pesar que se cuentan con estrategias de mantenimiento como: un plan de mantenimiento diario y semanal y mantenimiento programado trimestral, no hay una estrategia de monitoreo por condición en los equipos que permita conocer el estado real del componente, sin necesidad de ser desmontado. El número de paros no planificados puede variar de acuerdo al productos fabricado, o bien las cargas cíclicas del equipo. Estratégicamente, en algunos casos se aplica el mantenimiento denominado a la falla, el cual consiste en realizar la sustitución de un componente o equipo hasta que este ha fallado o deja de realizar la función para la que fue diseñado; este tipo de mantenimiento se puede aplicar para repuestos que no representan un costo y esfuerzo alto de reparación y de esta manera se pueden evitar paros de producción. Sin embargo, este tipo de estrategia no es posible aplicarse en equipos críticos como lo son las estaciones de sellado de los distintos equipo, ya

que esto representaría un costo demasiado alto, además de provocar daños a otros componentes relacionados con el sistema.

En muchas ocasiones se realiza mantenimiento proactivo por medio de mejoras continuas reflejadas en modificaciones para mejorar la funcionabilidad de las líneas. La suma de las estrategias descritas anteriormente da como resultado la evaluación del rendimiento de la planta y la efectividad del departamento mecánico, por medio de indicadores, confiabilidad de los equipos y costos de mantenimiento.

Por lo que, la pregunta central para este trabajo sería:

- PREGUNTA CENTRAL

¿Cómo se puede incrementar la confiabilidad de los equipos en la etapa de sellado de la planta Bayer, S. A.?

- PREGUNTAS ESPECÍFICAS

1. ¿Qué se necesita para conocer el estado de condición de los rodamientos de sellado utilizando la técnica de ultrasonido en dos selladoras?
2. ¿Cuáles son los criterios de aceptación y parámetros de operación de los rodamientos de las estaciones de sellado?
3. ¿Qué beneficios tiene un sistema sostenible de rutas de inspección por condición?

## **OBJETIVOS**

### **General:**

Utilizar tecnología ultrasónica para el diseño de rutas de monitoreo por condición, para los rodos de sellado de sobre y blíster en la planta de producción Bayer, S. A. para mejorar la confiabilidad de los equipos.

### **Específicos:**

1. Identificar las rutas de monitoreo para los rodamientos de las estaciones de sellado de dos selladoras.
2. Determinar los criterios de aceptación y parámetros de operación de los rodamientos de las estaciones de sellado.
3. Determinar la confiabilidad de los equipos mediante un modelo de diagnóstico de falla, mediante límites de alerta temprana y línea base.



## RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

La investigación realizada es de enfoque cuantitativo y cualitativo, esta describe las acciones realizadas de forma preventiva de acuerdo con las interpretaciones realizadas. El tipo del diseño es no experimental, debido a que los datos obtenidos fueron analizados de forma cualitativa de acuerdo a la experiencia del operador certificado del detector, estableciendo de forma cuantitativa los parámetros de aceptación en decibelímetros de las muestras obtenidas.

La metodología utilizada para este trabajo de investigación se basó en dos fases principales; la fase I consistió definir la criticidad de los equipos del estudio por medio del método de modos de falla, efecto y criticidad (AMEF); también en esta fase se definieron los puntos de medición y la frecuencia de las muestras a obtenerse; la fase II consistió en la aplicación, interpretación y análisis de la información obtenida mediante la técnica de ultrasonido, para esto se utilizó el detector Ultraprobe 10000 con módulo de contacto.

Se diseñaron modelos de falla para el diagnóstico y fácil interpretación de las mediciones por medio de límites de alerta temprana y límites de paro. La aplicación de la técnica se realiza en condiciones y cargas de operación normales, para obtener un diagnóstico en tiempo real y revelar el estado de los rodamientos sin necesidad de desmontaje e inspección de estos. Las variables medibles se basan en la interpretación de pequeñas perturbaciones de ruido en un período de tiempo suficiente para detectar oscilación concurrente.

Las rutas de monitoreo e interpretación de datos se realizan desde febrero del 2018 hasta marzo del 2019, se tabulan y muestran mediante gráficos lineales con línea de tendencia para construir un récord histórico y tener la suficiente información para sustentar los límites de alerta establecidos y las características de los posibles fallos detectados.

A partir de la presente investigación, se dejaron las bases para la implementación del mantenimiento basado en condición para otros equipos críticos, estableciendo las características principales para la utilización de la tecnología ultrasónica en rodamientos de baja revolución. La propuesta quedó implementada por medio de un modelo de diagnóstico de falla por fatiga, que muestra los parámetros de operación esperados, y los límites de alerta temprana. De esta manera garantizar que la confiabilidad de los equipos se mantenga estable y en incremento constante.

## INTRODUCCIÓN

La necesidad de cumplir las normativas de salud y eficiencia operacional es sumamente importante en una industria farmacéutica, las líneas de producción deben ser altamente eficientes, y buscar constantemente adquirir nuevas tecnologías para lograr altos volúmenes de producción bajo el rendimiento óptimo, además de cumplir con las normativas de calidad, por tratarse de productos de precisión y con altos riesgos de contaminación.

El mantenimiento, en general, forma un papel muy importante para la conservación industrial de los equipos que componen la planta. El mantenimiento se compone por tres áreas: mecánico, eléctrico y áreas técnicas. La planta productiva se desglosa en dos áreas significativas: estándar y efervescentes. En ambas áreas se realizan procesos de sellado por medio de rodos con temperatura para la hermeticidad de la empaquetadura del producto, por lo que se ha determinado que la etapa de sellado presenta una alta criticidad y mantenibilidad de todas las líneas de producción.

El presente trabajo de implementación es importante, porque ha encontrado diferentes anomalías, mediante las variaciones detectadas durante las rutas de monitoreo de la condición de los rodamientos de la etapa de sellado de la blíster marca Noack modelo N921 y selladoras de sobre de tabletas efervescentes marca SIEBLER modelo HM1E-500, las cuales fueron detectadas tempranamente, siendo posible tomar acciones preventivas para mantener la producción en funcionamiento y evitar paros no planificados y problemas mecánicos mayores.



La información fue recopilada mediante la utilización de técnicas de mantenimiento predictivo, por medio detector ultrasónico marca Ultraprobe 10000 como principal herramienta. Esta tecnología permite grabar en pequeños períodos de tiempo las variaciones de sonido medido en decibeles, bajo una frecuencia entre 30 y 40 kHz, donde se utilizó un módulo de contacto.

Las rutas fueron establecidas bajo una propuesta preliminar con base a las primeras mediciones, las cuales fueron mostrando tendencias por las pequeñas variaciones detectadas, y se fueron realizadas en el mismo punto de contacto y bajo los mismos parámetros y condiciones, para obtener la información más confiable y certera.

Para la metodología implementada, el método del estudio es de tipo descriptivo, porque se eligió una cierta cantidad de datos en un período determinado en dos selladoras, por lo que el diseño de la investigación no es experimental.

En el primer capítulo, se encuentra la base conceptual de este estudio, la cual brinda un panorama general de la técnica utilizado para la recopilación de los datos del estudio, como: los módulos de falla de rodamientos de baja revolución, módulo de contacto de la herramienta utilizada, y conceptos básicos del ultrasonido.

En el segundo capítulo se muestra el desarrollo de la investigación, detallando la técnica de ultrasonido utilizada, así como el establecimiento de los puntos de medición.

En el tercer capítulo se muestra el resultado de todas las mediciones realizadas en el 2018 y 2019, los gráficos de tendencia, lectura e interpretaciones

de las mediciones y las algunas acciones preventivas tomadas. En este capítulo se muestran las tablas con las apreciaciones sobre las lecturas para el análisis de tendencias de la técnica utilizada. En este capítulo se definen las líneas de tendencia y los límites de alerta, así como el modelo de diagnóstico de falla.

En el cuarto capítulo, se muestra la discusión de los resultados obtenidos. También se discute si fue posible incrementar la confiabilidad de la etapa de sellado de las selladoras en estudio.



# 1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

## 1.1. Empresa farmacéutica

Actualmente, la industria farmacéutica en Guatemala produce alrededor de Q 2 964 000,00 anualmente, exporta más del 45 % de esta cantidad y se compone de 70 fabricantes locales aproximadamente. (López, La industria farmacéutica y su proyección en el sistema de salud de Guatemala, 2011, p. 6)

Bayer, como industria en Guatemala inició en 1962 con la fabricación y distribución de productos para la protección de cultivos y sanidad animal. Posteriormente en 1964, se fundó una segunda empresa, Bayer Farmacéutica Ltda., para la distribución de medicamentos con prescripción médica. En la actualidad, la empresa Bayer se compone de varias divisiones comerciales, pero entre una de las principales se encuentra la división de Consumer Health, que tiene como principal eje la planta de producción Product Supply, ubicada sobre la calzada Roosevelt en el km. 14.5.

Esta planta de producción se dedica a la formulación y empaque de medicamentos de venta libre (OTC), especialmente analgésicos, antigripales y medicamentos gastrointestinales. Estos productos son exportados a Centroamérica y países de El Caribe: Haití, Jamaica, Trinidad y Tobago, Aruba, Barbados, San Martín. Así también, como Canadá, Colombia y Ecuador.

La planta de producción Bayer *Product Supply* de la división *Consumer Health*, es la única planta ubicada en Centroamérica, siendo parte del conjunto

de plantas que componen la región latinoamericana, junto con las plantas de México y Argentina.

## **1.2. Planta de producción**

La planta de producción Bayer, es una planta que cuenta con los estándares internacionales de buenas prácticas de manufactura requeridos por los países a exportar, como Colombia y Canadá, así como los requerimientos por el Ministerio de Salud de Guatemala. Los equipos dentro del área de producción están fabricados principalmente de acero inoxidable, las partes en contacto con el producto son de acero inoxidable. Los equipos auxiliares como bandas transportadoras en contacto con el producto son de tipo sanitario, aprobados por FDA. Todo el equipo está construido con partes de fácil desmontaje y limpieza.

La estrategia de esta planta es la fabricación de pequeños volúmenes de distintas familias de productos analgésicos, antigripales y gastrointestinales en diferentes presentaciones. Estos productos se distribuyen libremente y no requieren prescripción médica. Por tratarse de productos medicinales, los estándares de limpieza de las áreas y equipos son estrictos y requieren de un control microbiológico bastante riguroso para garantizar la calidad de sus productos.

La planta de producción se encuentra dividido por secciones de acuerdo con su función:

- Área de formulación y centro de pesado
- Área de carbonatación y granulación
- Área de producción de tabletas y empaque primario
- Área de empaque secundario (acondicionamiento)

El área de formulación, pesado, carbonatación y área de tamizaje son áreas donde se lleva a cabo todas las tareas de dosificación y fabricación de las mezclas de los distintos componentes de materias primas de los productos que están siendo producidos. Todos los equipos en esta área se encuentran contruidos con acero inoxidable y las piezas son de fácil desmontaje y limpieza. Todas las mezclas realizadas en estas áreas posteriormente son dosificadas en alimentadores de polvo para ser tableteadas en las líneas de producción.

El área de producción de tabletas y empaque primario cuenta segmentada por dos tipos de productos principales: productos efervescentes y productos estándar. Además, cuenta con tableteadoras que funcionan en solitario, que comprimen tabletas a granel para posteriormente ser empacadas. Toda la área está acondicionada con aire con temperatura y humedad controlada, así como el cumplimiento de una cascada de presión diferencial.

#### **1.2.1. Cuartos de producción para productos efervescentes**

Se componen de líneas para empacar tabletas efervescentes con empaquetadura de sobre, que se componen de ambas caras de aluminio. Ambas líneas se componen de: una tableteadora para comprimir tabletas con una velocidad de producción muy alta, cuenta con dos detectores de metales integrados a transportadores de tabletas, y una selladora de foil marca Siebler de origen alemán. Además, cuenta con un apilador y contador de sobres (*Staker*), selladora de cartón corrugado y balanza de fardos.

#### **1.2.2. Cuartos de producción para productos estándar**

Se componen de líneas de producción para empacar tabletas estándar y cápsulas de gelatina blanda con empaquetadura de blíster, se componen de una

cara de aluminio y una cara de material termoformable, el cual este último forma el alveolo donde se aloja la tableta. Estas líneas se componen de: Alimentador de tabletas, Blisteadora Noack de origen alemán, la cual se encuentra conectada a una estuchadora que pliega y codifica cajas, y acondiciona los blíster en las mismas, manejando diversas presentaciones; también cuenta con una encartonadora que se encarga de acondicionar cada estuche en corrugados de cartón, los cuales son codificados en línea, también manejando varias presentaciones. Por último, la línea cuenta con una selladora de cartón corrugado y balanza de fardos.

### **1.3. Mantenimiento**

Las técnicas conocidas de mantenimiento más comunes (mantenimiento preventivo, correctivo y emergente) son estrategias que se aplican bajo un determinado período, en el caso del preventivo, o planificarse y programarse como el correctivo, o bien ejecutarse de manera efectiva y rápida como el mantenimiento emergente. Existe una infinidad de mantenimientos poco comunes, que también son aplicables, como el mantenimiento proactivo, cuando se realiza una acción en la que se rediseña el equipo, para mejorar la funcionalidad de este o para eliminar la probabilidad de una falla detectándola anticipadamente.

Asimismo, existen las técnicas de mantenimiento basados en la condición del equipo (mantenimiento predictivo y monitoreo por condición). Sin embargo, muchas veces tiende a no tenerse claro la diferencia entre estas dos estrategias. Si bien es cierto, se complementan entre sí, y tienen mucha similitud entre ellas, pero tienen enfoques diferentes.

#### 1.4. Mantenimiento predictivo y monitoreo por condición

En su investigación Altmann, C. (2007) define las técnicas las estrategias de mantenimiento predictivo:

- Mantenimiento predictivo: se enfoca a los síntomas de las fallas, y se basa en la utilización de herramientas predictivas: análisis de vibraciones, análisis de lubricantes, ensayos no destructivos y análisis de corriente en máquinas eléctricas.
- Monitoreo por condición: similar al mantenimiento predictivo, se enfoca hacia los síntomas de los efectos o síntomas de las fallas, utilizando herramientas para monitorear el desempeño de un equipo, comparando variables físicas para anticiparse a los modos de falla.

Altmann, C. (2007) afirma que los pilares son las técnicas de inspección por sentidos (VOSO), inspecciones a través de ensayos no destructivos (END), y monitoreo de las condiciones dinámicas de la maquinaria.

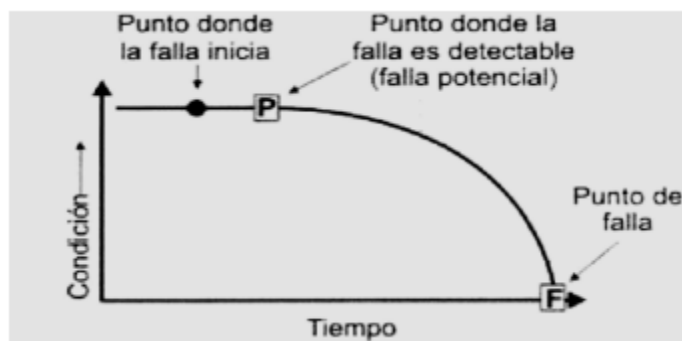
- Vibraciones
- Monitoreo de temperatura
- Inspección mediante termografía infrarroja
- Ultrasonido
- Monitoreo de la condición del lubricante
- Medición del desempeño de equipos:
  - ✓ Presión
  - ✓ Caudal
  - ✓ Potencia entregada
  - ✓ Consumo eléctrico
  - ✓ Consumo de combustible



En otra definición: “El monitoreo por condición es el chequeo del estado de salud del equipo, a través de la medición de una variable física, que se considere representativa del mismo, y su respectiva comparación con valores estándar o una norma que permita diagnosticar si el equipo está en óptimas condiciones o, si por el contrario su estado está deteriorado” (*Evaluation Of Machine Vibration by Measurements on non-rotating Parts*, DIN ISO 10816-3, p. 3)

El objetivo principal del monitoreo por condición es detectar la alerta temprana, de manera de poder programar y planificar la ejecución de la acción para disminuir la probabilidad existente de fallas catastróficas. Con el fin de aumentar la disponibilidad del equipo, disminuir costos de reparación y por consecuencia, los costos de oportunidad que conllevan detener un equipo para brindar un mantenimiento y en general, aumentar la confiabilidad del equipo (Altmann, 2007).

Figura 1. **Gráfico de condición versus tiempo de un elemento mecánico**



Fuente: Altmann, C. (2007), *Las técnicas de monitoreo de condición, como herramienta del mantenimiento proactivo*.

Según Altmann, C. (2007) existe un punto determinado entre el punto P y F, en el cual automáticamente se genera la probabilidad de una falla potencial, que va incrementándose con el paso del tiempo. El objetivo del monitoreo por

condición es determinar el intervalo de tiempo más cercano al punto donde inicia la falla, en el cual la vida útil del componente analizado es igual al período de tiempo establecido por los límites condenatorios, ya evaluados y analizados.

### **1.5. Selección del componente o equipo a monitorear**

El mantenimiento basado en confiabilidad deberá aplicarse a todos aquellos componentes del proceso productivo que afectan a cualquier de estos indicadores de mantenimiento:

- Confiabilidad
- Disponibilidad
- Costo
- Seguridad

Es importante mencionar que el costo de la aplicación de la tecnología juega un papel importante en el momento de tomar la decisión de la aplicación. Sin duda alguna, estos costos deben ofrecer un beneficio en la optimización del mantenimiento y conservación, de manera que dentro del análisis costo beneficio sea más costoso mantener la tecnología aplicada que los costos que se desea evitar al momento de un fallo.

### **1.6. Selección de la tecnología adecuada.**

Para seleccionar adecuadamente la tecnología para monitoreo por condición se deben considerar varios factores como: el tipo de equipo, el modo de fallo a diagnosticar y el costo de restauración.

Uno de los métodos más comúnmente aplicados para ser aplicado a estas tecnologías es el método de modos de falla, efecto y criticidad (AMEF). Otras herramientas utilizadas es el Mantenimiento centrado en confiabilidad, Análisis de causa raíz, análisis de Pareto y análisis de frecuencia de falla (TPEF).

El monitoreo por condición es importante, debido a que está enfocado en detectar la causa del problema e identificarse los indicios de esta.

Posterior a realizar el análisis de las causas de fallas críticas del equipo, es importante identificar que acciones de mantenimiento se requieren para eliminar, detectar y controlar las mismas. A partir de este momento, se puede establecer un programa de monitoreo, en donde se elige la tecnología o estrategia que pueda detectar tempranamente la falla encontrada en el análisis de causa raíz.

### **1.7. Análisis de modos de falla, efecto y criticidad (AMEF).**

En su investigación, Hernandez, D. (2005) define el análisis del modo de las fallas potenciales, AMEF, como un proceso sistemático para la identificación de las fallas potenciales del diseño de un producto o de un proceso antes que ocurran, esto con el fin de minimizar el riesgo de que ocurran o bien eliminarlas por completo.

Dentro de sus objetivos principales está:

- Identificar, definir, priorizar y eliminar fallas conocidas y/o potenciales de un sistema o proceso de manufactura, antes de que ocurran.
- Reconocer y evaluar los modos de falla potenciales y las causas asociadas con el diseño y manufactura de un producto.

- Determinar los efectos de las fallas potenciales en el desempeño del equipo.
- Identificar las acciones que podrán eliminar o reducir la oportunidad de que ocurra la falla potencial.
- Analizar la confiabilidad del equipo.
- Documentar el proceso.

### **1.8. Identificación de los modos de falla y sus efectos**

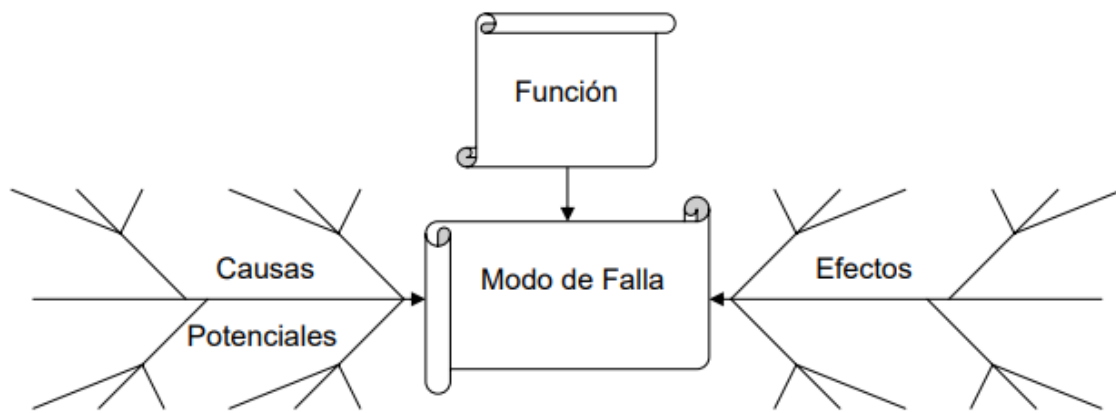
Según Hernández, D. (2005), un modo de falla potencial se define como la manera en la cual un componente podrá potencialmente fallar en cumplir o entregar la función deseada. Existen cuatro tipos de modos de falla, los primeros dos se aplican con frecuencia, siendo los más comunes. El tercero y el cuarto generalmente son disminuidos cuando se aplica el AMEF.

- No funciona: El equipo es totalmente disfuncional o no operativo.
- Función parcial: Significa que tiene un desempeño disminuido, es decir que no cumple con algunas funciones, pero no cumple completamente con los atributos o características. Esta categoría incluye función en demasía y función degradada con el tiempo.
- Función intermitente: significa que cumple con su función, pero llega a ser disfuncional frecuentemente, debido a factores externos, como la temperatura, humedad, o medio ambiente, entre otros.
- Función no deseada: Esto significa que la interacción de varios elementos, cuyo desempeño independiente es adecuado, pero afecta de manera adversa al producto o proceso cuando existe sinergia.

Muchas veces se comete el error de interpretar una causa por sí misma tiene un efecto, y cualquier efecto por sí mismo consecuentemente sea un modo

de falla. Si bien es cierto, en aplicaciones reales una causa puede tener múltiples efectos y una combinación de causas puede permitir múltiples efectos. Sin embargo, existe una relación entre la función de un equipo, modo de falla, causas potenciales y efectos, como se muestra en la figura 2.

Figura 2. **Relación entre función, modo de falla, causas potenciales y efectos**



Fuente: Hernández D. (2005), Análisis del modo y efecto de las fallas potenciales aplicado a un caso de estudio.

Según Hernández, D. (2005), el modo de falla potencial está definido como la manera en la cual un componente pudiera potencialmente fallar en el cumplimiento de los requerimientos de desempeño que intenta el diseño del equipo. Es decir, qué cosas pudieran ir mal, entonces se define un pronóstico del suceso.

El primera paso para identificar un modo y efecto de falla, es definir la severidad para cuantificar el riesgo que ocurra el efecto, estos valores son evaluados en una escala del 1 al 10 donde 10 es el valor del efecto más severo.

El segundo paso posterior al establecimiento de los efectos y severidad, son las causas de los modos de falla. Las causas son evaluadas en términos de

ocurrencia, esta se define como la probabilidad de que una causa ocurre durante la vida esperada del componente o equipo. De igual manera que la severidad, la ponderación de este valor es de 0 a 10, siendo 10 el valor que representa la mayor recurrencia en la falla analizada. En caso de obtener valores intermedios se asume el superior inmediato. Si se desconociera totalmente la probabilidad de falla se debe asumir un valor de ocurrencia igual a 10.

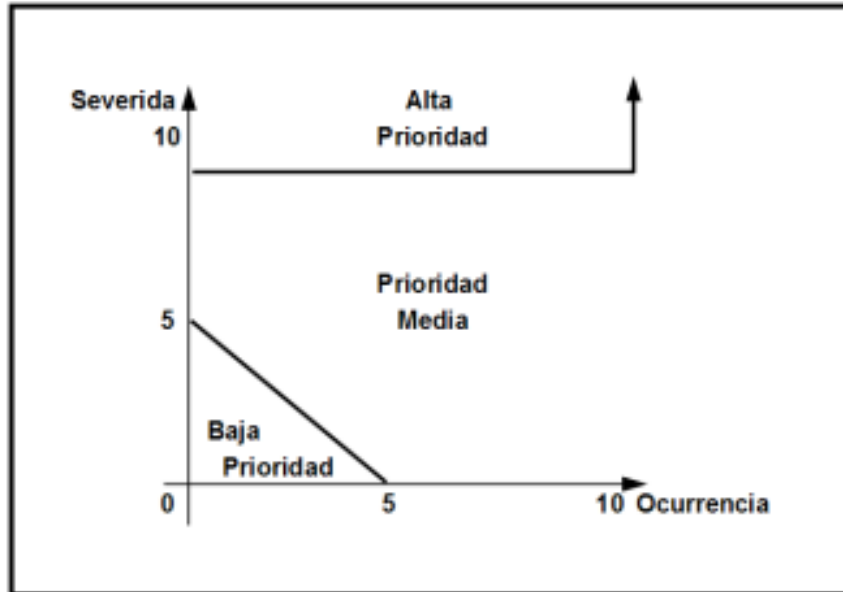
La probabilidad de ocurrencia puede ser calculada mediante los siguientes métodos:

- Índice de falla en tiempo de vida diseñado del componente.
- El “Cpk”, que denota a capacidad estadística de un proceso para fabricar productos dentro de los requerimientos.
- Un método alternativo, es el uso del mejor criterio del equipo AMEF, es decir, cuántos casos se han presentado del total que sea vistos.

En la estimación de la ocurrencia también debe tomar factores importantes como: Longevidad del proceso, cambios ambientales, récord de servicios, entre otros.

En su investigación Hernández, D. (2005), menciona dos enfoques de construcción de un AMEF. El primero es cuando toma un rumbo cuantitativo, análisis generalmente utilizado por la ingeniería de fiabilidad. Este método requiere de datos de coeficientes de falla específicos para cada componente. El segundo enfoque funcional es de manera cualitativa, y se emplea para evaluar cada elemento de un diseño en términos de su capacidad anticipada del desempeño. En enfoque cualitativo resalta en el valor de la severidad, seguridad y en la perdurabilidad del diseño.

Figura 3. Relación severidad y ocurrencia en un modo de falla



Fuente: Hernández, D. (2005), Análisis del modo y efecto de las fallas potenciales aplicado a un caso de estudio.

Tal y como muestra la figura 3, la relación entre la severidad y la ocurrencia define la criticidad, o el número de prioridad de riesgo. Para esto se deben utilizar los siguientes criterios:

- Primer criterio: Si la severidad es  $9 \leq S \leq 10$ , es necesario tomar acciones, debido al gran impacto sobre el equipo.
- Segundo criterio: Si la severidad es  $5 \leq S \leq 8$  y la ocurrencia es  $4 \leq S \leq 10$ ; se deben tomar acciones debido a que se analiza, según la prioridad de riesgo o su criticidad; donde la ocurrencia es el producto de  $S \times O$ . (figura 3).
- Tercer criterio: Es utilizando el número de prioridad de riesgo (NPR) donde "S" es la severidad, "O" la ocurrencia y la detección "D". Por lo que,  $NPR = S \times O \times D$ .

El NPR, se emplea para identificar los riesgos más serios y buscar acciones correctivas. Cuando los modos de falla han sido ordenados por el NPR, las acciones correctivas deberán de ejecutarse de primero a los riesgos de mayor grado y de mayor criticidad. El objetivo de cualquier acción será de reducir la severidad y la ocurrencia.

Por último, se deberán establecer las principales acciones para optimizar el proceso, a través del ciclo de mejora. El objetivo principal de estas acciones es reducir el riesgo, es decir, la velocidad de ocurrencia e incrementar la satisfacción del cliente con la mejora del proceso.

### **1.9. El análisis de fallas como una técnica de mantenimiento preventivo**

En su artículo Vélez, J. (2003), menciona que la aplicación apropiada de las técnicas de análisis de fallas puede proporcionar valiosa retroalimentación de información para la solución de problemas de diseño y el conocimiento de las limitaciones de los componentes. Las razones económicas para el análisis de fallas son igualmente importantes. Los factores relacionados con una falla o acortamiento de la vida útil de partes de servicio son clasificadas en siete grupos:

- Diseño
- Selección de materiales
- Tratamientos térmicos
- Procesos de fabricación
- Maquinados y ensambles
- Condiciones de transporte, almacenamiento y operación
- Calidad del mantenimiento



Una falla puede derivarse de uno o más de estos factores actuando en conjunto y la causa exacta generalmente es difícil de determinar con exactitud, para esto se requiere una intensa investigación

### **1.10. Modos de falla**

Un modo de falla es una causa de falla o una posible manera en la que un sistema puede fallar. Se dice que un sistema tiene múltiples modos de falla, cuando tiene muchas maneras posibles de fallar. Mientras más completos es un sistema o equipo el número de fallas incrementa. Generalmente los componentes mecánicos o siguen un modelo de causa-efecto, pues una sola causa puede tener múltiples efectos y una combinación de causas puede tener un solo efecto o múltiples efectos. En muchas ocasiones, es difícil diferenciar entre una causa, un efecto o una modo de falla.

Existen múltiples modos de falla y pueden presentarse tanto en el análisis del diseño como en el análisis del proceso. Un efecto de falla puede considerarse como el impacto en el cliente o en el proceso siguiente, cuando el modo de falla se materializa. Es decir, que la falla es la forma en que un proceso/componente puede afectar el cumplimiento de las especificaciones, afectado al producto, o el proceso siguiente.

### **1.11. Averías de rodamientos**

Muchas condiciones de funcionamiento pueden ocasionar daños en rodamientos. Los fallos dependerán de muchos factores, incluyendo el tipo de rodamiento que sea y la aplicación que se le da al mismo. En general, las averías de rodamientos se describen a continuación:

### 1.11.1. Desgaste: contaminación abrasiva

Ocasionada por partículas extrañas; como arena, metal fino producto del pulido o del maquinado, y el metal o carburos finos de los engranajes.

Figura 4. **Desgaste por partículas finas en rodamientos**



Fuente: Timken (2015), Análisis de daños en los rodamientos Timken y guía de referencia de lubricación.

### 1.11.2. Desgaste: corrosión por picaduras y abolladuras

Ocasionado por las virutas metálicas o partículas de suciedad que quedan en los alojamientos que no se han limpiado correctamente. Las causas típicas de estos contaminantes provienen de engranajes, ranuras, sellos, embragues, frenos, juntas, entre otros. Estas partículas duras se trasladan con la lubricación a través del rodamiento y, en algún momento, abollan las superficies. El desprendimiento del metal alrededor de las abolladuras eleva la tensión entre las superficies y provocan descascarado prematuro y reducción de la vida útil del rodamiento.

Figura 5. **Desgaste por abolladuras por escaso mantenimiento**

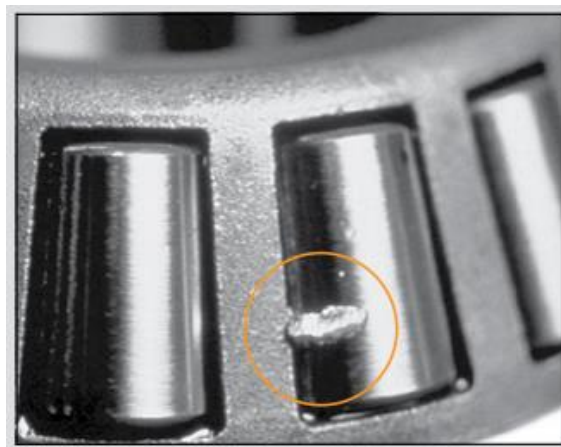


Fuente: Timken (2015), Análisis de daños en los rodamientos Timken y guía de referencia de lubricación.

### 1.11.3. **Desgaste: ranurado**

Ocasionado por el desgaste extremo por virutas o partículas de metal. Estos contaminantes se atascan en el material blando de la jaula y ocasionan estrías en los elementos rodantes

Figura 6. **Contaminación por partículas grandes incrustadas en la jaula**



Fuente: Timken (2015), Análisis de daños en los rodamientos Timken y guía de referencia de lubricación.

#### 1.11.4. Corrosión

Suele originarse por una acumulación de condensado en el alojamiento del rodamiento, debido a cambios de temperatura. La humedad o el agua pueden filtrarse, a través de sellos desgastados, dañados o inadecuados. Otro motivo, es cuando se realizan inspecciones no se lavan y secan correctamente. Es recomendable que cuando los rodamientos estén limpios y secos, se aplique una capa de aceite protector.

Figura 7. **Descascarillado por marcas de agua en la pista**



Fuente: Timken (2015), Análisis de daños en los rodamientos Timken y guía de referencia de lubricación.

#### 1.11.5. Lubricación inadecuada

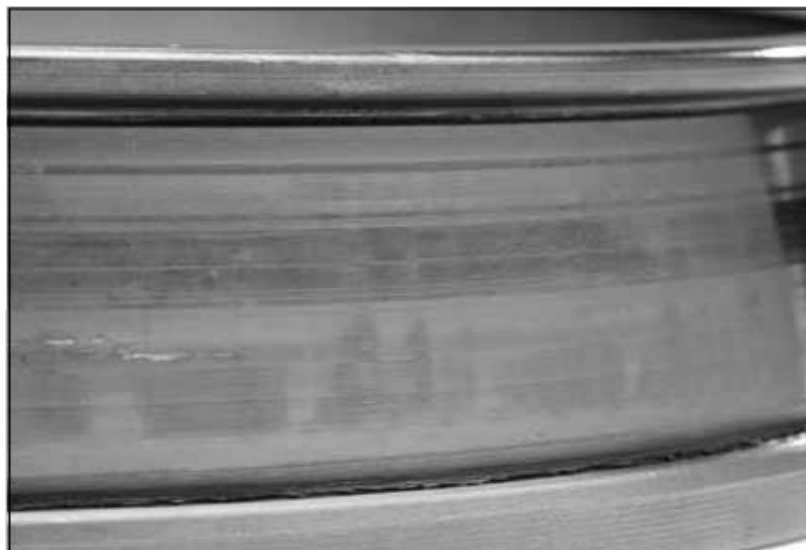
La lubricación inadecuada puede ocasionar múltiples daños. El daño se presenta cuando no existe la cantidad correcta de lubricante en el rodamiento para separar las superficies de contacto rodantes y deslizantes durante el funcionamiento.

Es importante mencionar que este tipo de avería puede ocasionarse por la aplicación de un lubricante inadecuado, aunque la cantidad sea la correcta, por lo que se debe considerar el tipo, el grado, la viscosidad y los aditivos de este. Generalmente, el lubricante para aplicar viene dado por el fabricante del componente. Existen diferentes niveles de averías por lubricación inadecuada dependiendo de la severidad del daño ocasionado.

#### **1.11.5.1 Nivel 1: decoloración**

El contacto del metal con metal provoca una temperatura excesiva del rodamiento. Las altas temperaturas ocasionan la decoloración de las pistas y rodillos.

Figura 8. **Descoloración de pista por altas temperaturas**



Fuente: Timken (2015), Análisis de daños en los rodamientos Timken y guía de referencia de lubricación.

#### **1.11.5.2 Nivel 2: rayado y descascarillado**

Ocurre con la insuficiente o total ausencia de lubricante, o tipo de lubricante incorrecto. Ocurren fuertes cambios de temperatura y cambios repentinos de funcionamiento.

Figura 9. **Descascarillado por insuficiente lubricación**



Fuente: Timken (2015), Análisis de daños en los rodamientos Timken y guía de referencia de lubricación.

#### **1.11.5.3 Nivel 3: calor excesivo en el extremo del rodillo**

Ocasionada por la pobre lubricación, provocando muescas en los extremos grandes de los rodillos por las altas temperaturas ocasionadas.

#### **1.11.5.4 Nivel 4: bloqueo total del rodamiento**

El alto calor ocasionado produce un flujo de metal en los rodamientos que altera la geometría original y el material de estos. Provocando deslizamiento de

los rodillos, destrucción de la jaula, transferencia de meta y atascamiento del rodamiento.

Figura 10. **Flujo de metal avanzado por atoramiento de rodamiento**



Fuente: Timken (2015), Análisis de daños en los rodamientos Timken y guía de referencia de lubricación.

### 1.12. Conceptos básicos del sonido

- UE Systems (1997): “El sonido tiene como su fuente alguna propiedad vibratoria. Viaja a través de un medio y es percibido por el receptor como un “sonido”” (p.10).
- UE Systems (1997), baja frecuencia, alta frecuencia: “Las ondas de baja frecuencia harán vibrar las superficies sólidas varias longitudes de onda y harán que los muros y grandes objetos parezcan transparentes. Las ondas de alta frecuencia son cortas y débiles, por lo que no pueden penetrar objetos sólidos” (p.15).

- UE Systems (1997), un decibel: “Expresión logarítmica de una relación de dos amplitudes o intensidades de energía acústica. El decibel es la unidad práctica para los niveles de intensidad relativa de sonidos audibles. En general, mayor la intensidad, más fuerte el tono escuchado” (p.17).
- UE Systems (1997), amplitud: “La amplitud de una onda de sonido puede ser ilustrado por la oscilación de una péndulo, en el cual la distancia desde el punto de reposo al punto máximo de oscilación es la amplitud. Amplitud de una onda de sonido no depende de la frecuencia de la onda” (p.17).
- Rimoldi, C. (2006), propagación del sonido: “El sonido, como se le conoce habitualmente, se propaga en forma de ondas. Una diferencia de importancia de estas ondas, producidas por medios elásticos, y las llamadas electromagnéticas (luz, rayos X, Gamma, entre otros) es que las ondas sonoras necesitan de un medio para transportarse (sea sólido, líquido o gaseoso), mientras que las últimas no” (p. 8).

### **1.12.1. Frecuencias del sonido**

Referente a las frecuencias del sonido, Rimoldi, C. (2006), afirma que, más allá de todas las divisiones que puedan ser hechas, se sabe que no todo el rango de frecuencias es audible para el oído del ser humano. Solamente es un cierto rango, el cual puede diferir entre individuos y que puede variar con la edad. El límite inferior de audibilidad se halla alrededor de 16 Hz y el superior alrededor de 20 KHz. Los rangos de interés son:

- Subsónico:  $f < 16\text{Hz}$ : en este rango no se escucha ningún tono, solo se notará presión.
- Sónico:  $16\text{Hz} \leq f \leq 20\text{KHz}$ , rango audible por el ser humano.



- Ultrasonico:  $f > 20\text{KHz}$ .

Las frecuencias utilizadas en los ensayos ultrasónicos se encuentran en el rango de 0,5 a 25 MHz

### **1.13. Ultrasonido propagado por aire**

En su investigación Olarte & Botero (2011), define: “La detección de ultrasonido es una técnica empleada en el mantenimiento industrial, basada en el estudio de las ondas sonoras de alta frecuencia que se producen en los equipos cuando algo anormal está sucediendo.” (p. 231).

Olarte & Botero (2011), afirma que, para detectar el ultrasonido, se utiliza un instrumento llamado detector de ultrasonidos, el cual está diseñado para capturar ondas ultrasónicas y convertirlas en señales con frecuencias dentro del rango de audición humana. Este dispositivo cuenta con la tecnología necesaria para que una vez convertidas las ondas de ultrasonido puedan escucharse a través de audífonos o visualizarse en un display por medio de un aumento de su intensidad. (p. 231).

En su definición de ultrasonido propagado por aire (UE Training Systems, 1997), menciona en su guía de certificación que el ultrasonido es una extensión de nuestra percepción auditiva, 20 KHz a 100 kHz. La percepción auditiva humana es de 20 Hz a 20 kHz. El equipo muestra una imagen visual de un sonido como la amplitud y los componentes frecuenciales del mismo en tiempo y amplitud.

El equipo puede ser aplicado para la localización de fugas de aire comprimido u otros flujos gaseosos. Inspección en elementos mecánicos

rotativos, como motores, bombas, ventiladores, rodamientos. Inspecciones mecánicas estacionarias, como: válvulas, trampas de vapor, tuberías, intercambiadores de calor, e inspecciones eléctricas, como transformadores, motores eléctricos, líneas de transmisión, entre otros.

### 1.13.1. Módulo de contacto

De acuerdo con su definición UE Training Systems (1997), El módulo de estetoscopio es un sensor aislado enchufable con protección RF: punta de acero inoxidable de 4 ½" de largo, de forma cónica para contacto uniforme en superficie. La punta es intercambiable con un juego de extensión. Este consiste de 3 piezas: varillas de metal, segmentadas para incrementar el rango de contacto del estetoscopio 20" y 31".

Según UE Systems (1997), debido a que el ultrasonido no viaja efectivamente por más de un medio, es necesario utilizar el módulo estetoscopio (o contacto). Este sensor metálico es estimulado por ultrasonidos y actúa como una guía de ondas cuando se toca la superficie. La guía de onda es conectada al transductor piezoeléctrico donde la energía acústica conducida por la guía de ondas es convertida en energía eléctrica.

Figura 11. **Módulo de contacto (estetoscopio), Ultraprobe 10000**



Fuente: *Manual de instrucciones Ultraprobe 10000*, (2008), p. 2.

#### **1.14. Rutas de monitoreo por condición y modos de falla**

Es necesario basar un programa de rutas de monitoreo por condición en un sistema de modos de falla, en donde sea posible identificar con líneas de referencia cuándo una falla está próxima por ocurrir.

Altmann, C. (2007), define modo de falla como: “Un evento que causa una falla funcional o pérdida de función. Los modos de falla toman acción cuando ocurre un efecto o consecuencia en el equipo, impidiendo que este realice la función para la cual fue diseñado. Un análisis de consecuencias consiste en determinar las acciones que se deben tomar para anticipar, prevenir, corregir o detectar la falla, o en algunas situaciones qué acciones se deberán tomar para modificar el equipo para que el modo de falla no ocurra”.

Muchas veces, definir estas acciones es más complicado cuando varios efectos resultan de una misma causa, por lo que deben realizarse análisis más profundos. Es conveniente agrupar los modos de falla de la siguiente manera:

- Desgaste y deterioro
- Errores humanos en la ejecución, en operación o en mantenimiento
- Problemas de diseño

Cabe resaltar que los modos de falla no son aplicables para componentes eléctricos y electrónicos, debido a que la falla se presenta, en su mayoría de veces sin oportunidad de detectarlo de forma anticipada, y, por lo tanto, las estrategias de mantenimiento preventivo, predictivo y proactivo no pueden llevarse a cabo en estos casos.

Respecto al análisis de tendencias y el establecimiento de la línea de referencia en decibeles para rodamientos de baja revolución obtenida por las mediciones ultrasónicas, Fuentes, E. (2010), indica que: “El diagnóstico de falla para rodamientos de baja revolución debe darse conforme la tendencia de las mediciones vaya marcando los límites de referencia normales, es decir, los decibeles en que estos funcionan normalmente”. (p.11).

Cuando esta línea de referencia está establecida pueden existir alertas de referencia como muestra la tabla I.

Tabla I. **Modos de falla de rodamientos de baja revolución**

<b>Modo de falla del rodamiento</b>	<b>Decibeles sobre la referencia</b>	<b>Acción recomendada</b>
Prefalla o falta de lubricación	8 – 10 db	Lubricar y retomar las lecturas
Primeros síntomas o comienzo de la falla	10 – 12 db	Vigilar en el tiempo
Falla	16 db	Programar su reemplazo (próximo período conveniente)
Falla catastrófica	35 – 50 db	Remover y reemplazar de inmediato

Fuente: Fuentes E. (2010), *Ultrasonido: una técnica predictiva muy versátil en el mantenimiento*.

Claramente, estas recomendaciones dependerán y podrán variar respecto a las mejores prácticas desempeñadas de los rodamientos analizados, y se relacionarán directamente con la línea de referencia que se establecerá.

### **1.15. Diferencia entre ultrasonido propagado por aire y análisis de vibraciones**

El ultrasonido extiende la habilidad de escuchar ondas sonoras que están por encima de la capacidad auditiva. El análisis de vibraciones aumenta el sentido del tacto para capturar pequeños movimientos.

Esto quiere decir, que el ultrasonido actúa como una extensión al oído para determinar el inicio de una falla; sin embargo, no indica la causa específica del cambio. Por lo tanto, bajo situaciones específicas donde se requiera obtener más información sobre lo acontecido con la falla que ya se conoce, se deberá intervenir con análisis de vibraciones. Este detectará el origen del impacto que afecta al rodamiento.

### **1.16. Monitoreo por condición con ultrasonido para rodamientos de baja revolución**

Monitoreo de los rodamientos de baja velocidad es posible con la tecnología de ultrasonido. La mayoría de los instrumentos de ultrasonido tendrán una amplia gama de sensibilidad y algunos tendrán sintonización de frecuencia. Con estas características es muy posible escuchar a la acústica la calidad de los rodamientos. En los cojinetes extremadamente lentos (menos 25 RPM), a menudo es necesario hacer caso omiso de la pantalla del medidor y escuchar el sonido del rodamiento.

En estas situaciones extremas, los cojinetes suelen ser grandes (1/2" o más) y engrasados con aceite de alta viscosidad. Muy a menudo no se escuchará ningún sonido, ya que la grasa va a absorber la mayor parte de la energía

acústica. Si se oye un sonido, por lo general un crepitante sonido, hay algunos indicios de deformidad ocurriendo.

En la mayoría de otros rodamientos de baja velocidad es posible establecer una línea de base y el monitor como se describe anteriormente.



## **2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN**

El objetivo de estudio del presente trabajo de graduación es el diseño de rutas de monitoreo por condición de los rodamientos de las estaciones de sellado de la selladora de sobre de tabletas efervescentes marca SIEBLER modelo HM1E-500 y blisteadora para tabletas estándar marca NOACK N921, mediante la aplicación de tecnología ultrasónica, por lo que se realizó un recabado de datos de muestras obtenidas e interpretadas desde febrero 2018 hasta marzo 2019. Las acciones establecidas fueron determinadas de acuerdo con la criticidad de la variación determinada.

### **2.1. Selección del componente a monitorear**

El estudio se enfocó en la estación de sellado de ambos equipos, debido a que esta etapa del proceso de sellado representa el mayor riesgo de paro, en relación al valor económico de sustitución y el tiempo de recambio de los componentes dañados. Esta etapa también representa uno de los mayores riesgos hacia la calidad del producto, debido que, si la estación de sellado sufriera un desajuste, consecuentemente esto podría representar la pérdida de la hermeticidad en el sello, y el producto (la tableta) no alcanzaría su ciclo de vida completa poniendo en riesgo la salud del consumidor final.



Figura 12. **Análisis de modo y efecto de falla potencial aplicado a selladoras**

<b>ANÁLISIS DE MODO Y EFECTO DE FALLA POTENCIAL</b>											
<b>(AMEF de Proceso)</b>											
<b>Parte:</b> ESTACIÓN DE SELLADO				<b>Responsable de proceso:</b> Mantenimiento mecánico				<b>Número de AMEF:</b> 1			
<b>Cuarto de Producción:</b> Selladora de sobres efervescentes				<b>Preparado por:</b> DIEGO GARCÍA							
<b>Equipo:</b> SIEBLER HM1E-500											
No.	Etapa / Función del proceso / requerimientos	Modo de Falla Potencial	Efectos potenciales de la falla	Severidad	Causas potenciales de la falla	Controles preventivos	Ocurrencia	Controles de detección	Detección	NPR	Acciones recomendadas
1	SELLADO POR CALOR	Falta de presión de aire en cilindros neumáticos	Falta de hermeticidad por falta de sello	2	Insuficiente presión de sellado	No hay controles preventivos	1	Manómetros de presión de aire en cilindros neumáticos	1	4	No es necesario acción correctiva.
2	SELLADO POR CALOR	Sobrepresión en rodos de sellado	Falta de hermeticidad por cavidad (de presión)	2	Mala parametrización de presión de sellado	Pericia y experiencia del operador	2	Muestras de hermeticidad cada 30 minutos	1	8	No es necesario acción correctiva.
3	SELLADO POR CALOR	Disfunción de resistencias eléctricas	Falta de hermeticidad por arruga	2	Falta o exceso de temperatura de sellado	Alarma en pantalla	2	Medidor de temperatura	1	8	No es necesario acción correctiva.
		Disfunción de controladores de temperatura		2		Alarma en pantalla	2	Medidor externo	1	1	No es necesario acción correctiva.
4	SELLADO POR CALOR	Desajuste o desalineamiento de rodos de sellado	Falta de hermeticidad en el sellado por corte y daño de los rodos de sellado.	3	Desajuste de tornillos micrométricos	No hay controles preventivos	1	Medidor Vernier, Escala de tornillo micrométrico	1	9	Verificación periódica
		Falla por desgaste de rodamientos de sellado.		3	Falta de lubricación	Lubricación semanal	2	No hay controles de detección	3	54	Implementar monitoreo por condición.
5	SELLADO POR CALOR	Material inadecuado	Falta de hermeticidad en el sellado	2	Material no cumple con las especificaciones	Análisis de material	1	Análisis posterior	1	4	No es necesario acción correctiva.

Fuente: elaboración propia.

## 2.2. Análisis de modos de falla, efecto y criticidad (AMEF)

De acuerdo con el análisis AMEF realizado para detectar el nivel de prioridad de riesgo en la etapa de sellado de ambos equipos, se establece que el modo de falla por fatiga de los rodamientos de sellado es el más crítico con una ponderación de 54, que de acuerdo con la matriz de riesgo se debe realizar una acción correctiva.

De acuerdo con la matriz de riesgo mostrada en la figura 12, muestra como no aceptable la ponderación de riesgo con un valor de 54 del modo de falla número 4 del AMEF realizado. Resultado de multiplicar la severidad al cuadrado multiplicado por la ocurrencia multiplicado por la detectabilidad ( $S^2 \times O \times D = NPR$ ).

A pesar que la ocurrencia tiene un valor de 2, es decir, como un evento aislado, se espera que este fallo ocurra ocasionalmente si no se realizan las acción preventivas. La severidad del modo de falla es alta, por tratarse de un alto impacto en la calidad del producto y un esfuerzo económico alto de sustitución, además del tiempo prolongado de no disponibilidad del equipo. Además, la detectabilidad también se valoró con un valor alto, al no tener controles de detección definidos.

Tabla II. **Matriz de riesgo**

O*D	Severidad		
	S=1 (S <sup>2</sup> =1)	S=2 (S <sup>2</sup> =4)	S=3 (S <sup>2</sup> =9)
3*3	Aceptable (9)	No aceptable (36)	No aceptable (81)
3*2 = 2*3	Aceptable (6)	No aceptable (24)	No aceptable (54)
2*2	Aceptable (4)	No aceptable (16)	No aceptable (36)
3*1 = 1*3	Aceptable (3)	No aceptable (12)	No aceptable (27)
2*1 =1*2	Aceptable (2)	Aceptable (8)	No aceptable (18)
1*1	Aceptable (1)	Aceptable (4)	Aceptable (9)

Fuente: elaboración propia.

En la figura 13, se muestra el efecto potencial de la falla en el producto, el cual es la pérdida de la hermeticidad por corte. Esto ocurre debido a un corte milimétrico entre la cavidad y el sello. Para detectar este efecto se somete a presión de vacío una muestra de producto cada 30 minutos, de la cual si esta no cumple deberá ajustarse el equipo hasta alcanzar nuevamente la hermeticidad.

Figura 13. Efecto potencial de falla: pérdida de hermeticidad por corte



Fuente: elaboración propia.

En la figura 14, se logra apreciar el modo de falla potencial por lubricación inadecuada con desgaste tipo rayado y descascarillado ocasionado por la pobre lubricación del rodamiento de rodillos cilíndricos utilizado en la etapa de sellado. En este se logra apreciar la superficie del eje con rayaduras por el incremento de la temperatura en la superficie, ocasionando desprendimiento de metal, y consecuentemente ocasionando las rayaduras mostradas.

Figura 14. **Modo de falla potencial: avería de rodo por desgaste**

Fig 14. (a)



Fig 14. (b)



Fuente: elaboración propia.

En la figura 15, se logra apreciar un efecto de falla producido por desajuste en los rodamientos de sellado. Este defecto daña la estructura piramidal de la superficie del rodo al ocasionarse un desfase entre el rodo izquierdo y derecho de sellado. Este daño en la estructura puede ocasionar falta de hermeticidad en el sobre del producto.

La reparación de este tipo de daño en la superficie del rodo es muy difícil de realizar debido a que las formas piramidales son demasiado pequeñas. Por lo que este tipo de defectos repercute en la sustitución del rodo completo si este iniciara que tener efectos en la hermeticidad de la empaquetadura durante el sello.

Figura 15. **Modo de falla potencial: superficie de sellado**



Fuente: elaboración propia.

### **3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS**

Para alcanzar el objetivo 1: Identificar las rutas de monitoreo para los rodamientos de las estaciones de sellado de dos selladoras, se describen los siguientes incisos.

#### **3.1. Aplicación de ultrasonido para rodos de sellado para selladora SIEBLER HM1E-500 en productos efervescentes**

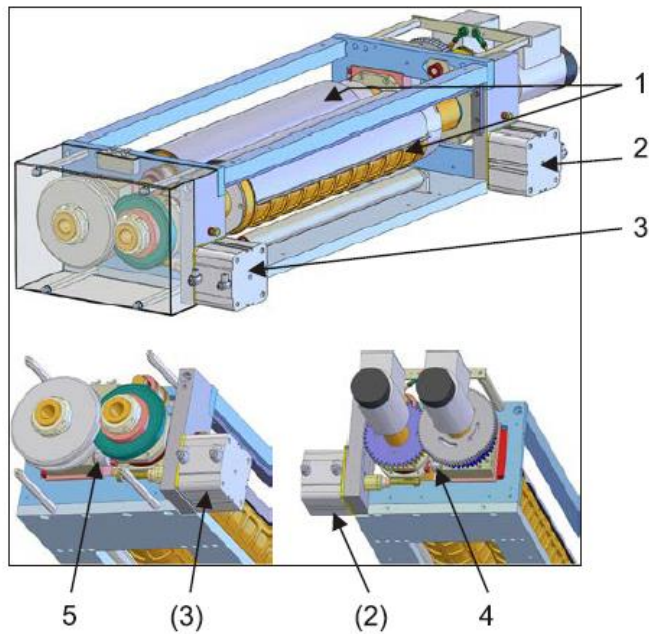
Contexto: Rodos de sellado pertenecientes a selladora marca SIEBLER HM1E-500 de la fábrica alemana Romaco, año de construcción en el 2016. Esta selladora tiene como función el sellado de sobres para productos efervescentes. Su funcionamiento es a través de calor y presión entre los rodos para realizar el sello por medio de fusión entre dos cintas de foil de aluminio, la temperatura de operación de los rodos de sellado oscila entre 100 a 140 °C dependiente de la velocidad del equipo y el producto a empacarse, la velocidad promedio de 200 a 220 rev/min. El accionamiento es por medio de un servomotor eléctrico con transmisión mecánica, mediante una caja reductora con acople de varias ruedas dentadas.

El correcto sellado depende del ajuste de los siguientes factores: (1) Distancia entre todos de sellado (2) presión de rodos de sellado (3) temperatura de sellado (4) Duración del sellado (5) Piezas del formato.

La estación de sellado se compone de los siguientes elementos:

(1) Rodos de sellados (2) Cilindro neumático de presión trasero (3) Cilindro neumático de presión delantero (4) Tornillo de ajuste trasero (5) Tornillo de ajuste delantero.

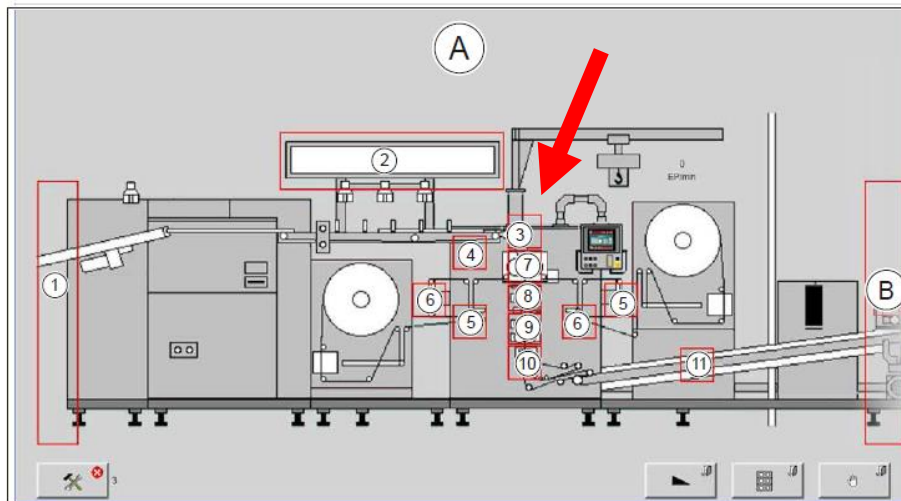
Figura 16. **Estación de sellado de sobres para productos efervescentes**



Fuente: Manual de selladora SIEBLER HM1E-500.

La estación de sellado es solo una etapa de funcionamiento de la selladora, la estación de sellado se encuentra ubicada en etapa número 7 mostrado en la figura 17.

Figura 17. **Esquema de selladora Siebler HM1E-500**



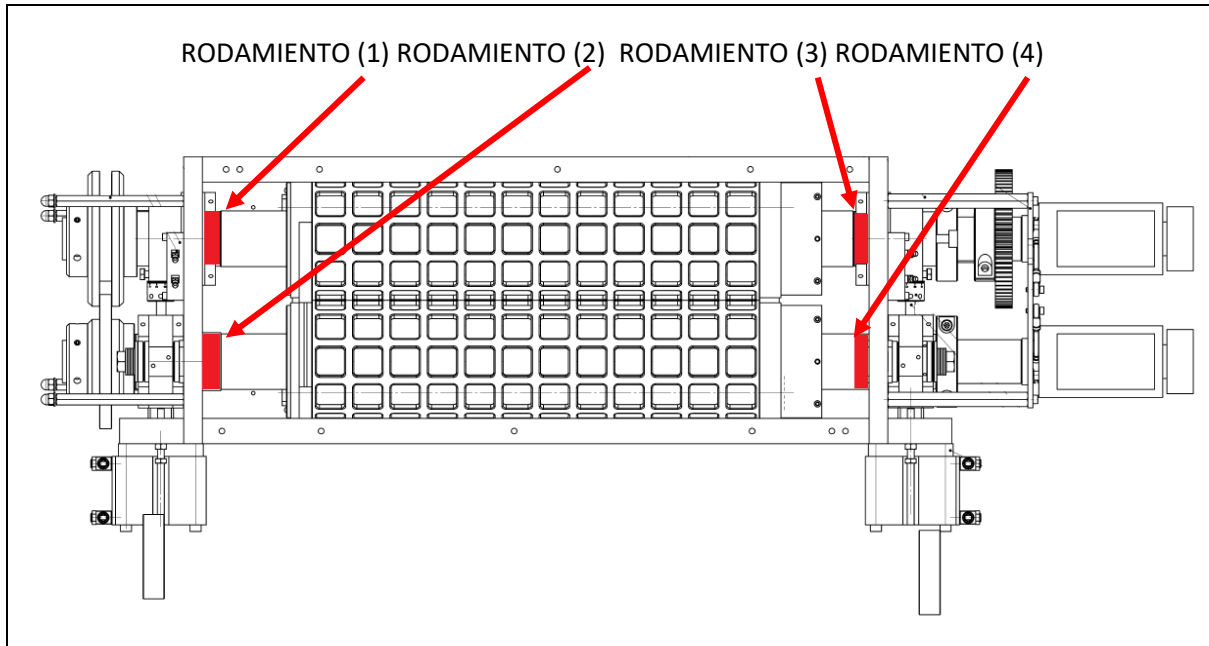
Fuente: Manual de selladora SIEBLER HM1E-500.

### 3.1.1. Puntos de medición establecidos SIEBLER HM1E-500

Cada rodo de sellado cuenta con dos rodamientos cada uno, para esta estación de sellado se obtuvieron datos de 4 rodamientos. Por practicidad de las mediciones se enumeró del 1 al 4 como muestra la Figura 18. Los puntos de medición son equivalentes al número de rodamientos.



Figura 18. **Esquema de estación de sellado SIEBLER HM1E-500**

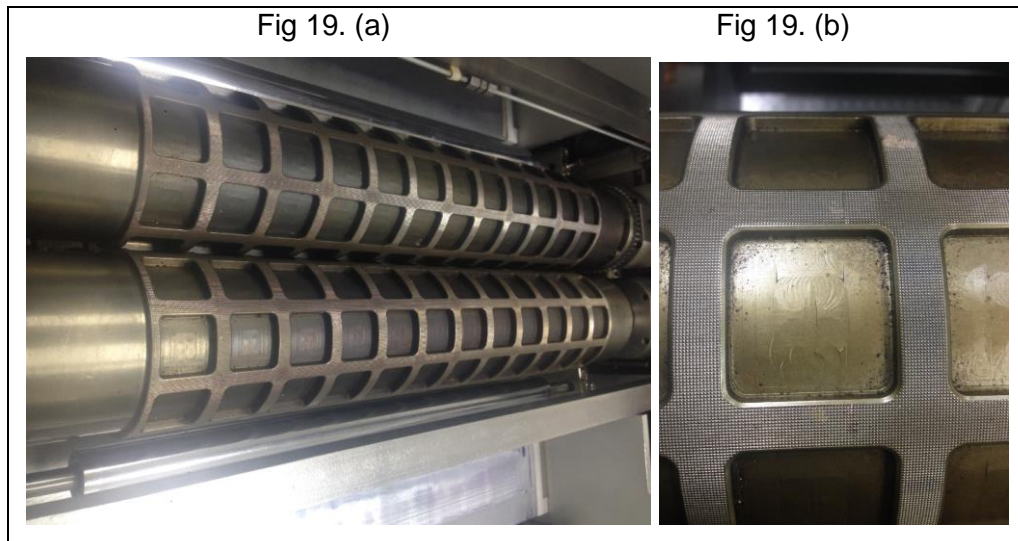


Fuente: Manual de selladora SIEBLER HM1E-500

La figura 19 (a) muestra los rodos de sellado como objetivo del estudio, en la cual se puede apreciar el conjunto de dos rodos construidos para soportar altas temperaturas.

En la figura 19 (b) también se muestra la estructura micrométrica en forma piramidal, la cual realiza el sello a presión y temperatura de las dos caras del foil, junto con las cavidades cuadrulares, las cuales sirven como guía para albergar el sobre con la tableta dentro durante el sellado.

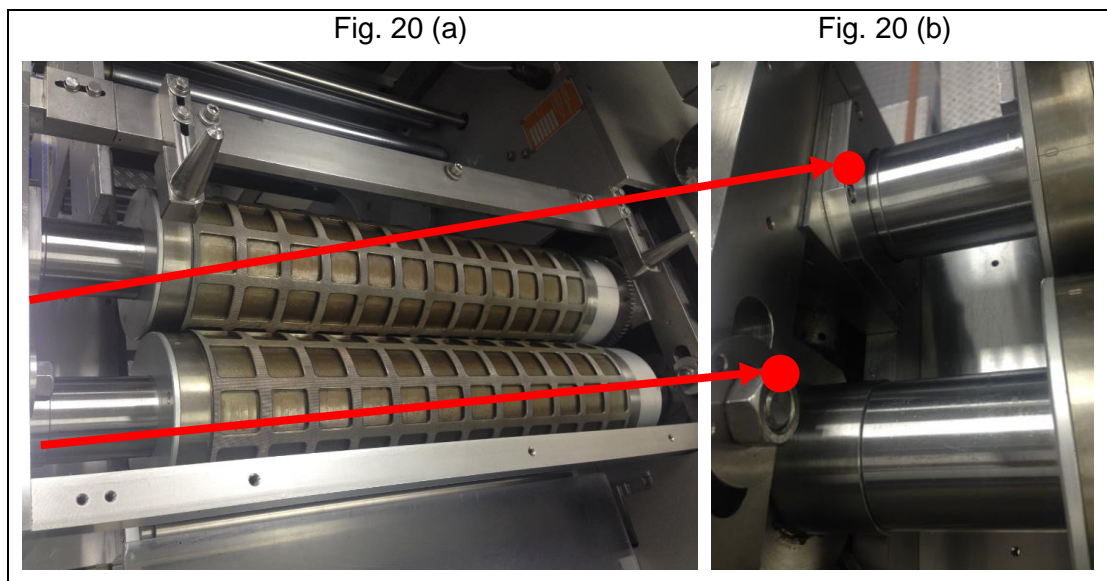
Figura 19. Rodos de sellado de selladora SIEBLER HM1E-500



Fuente: elaboración propia.

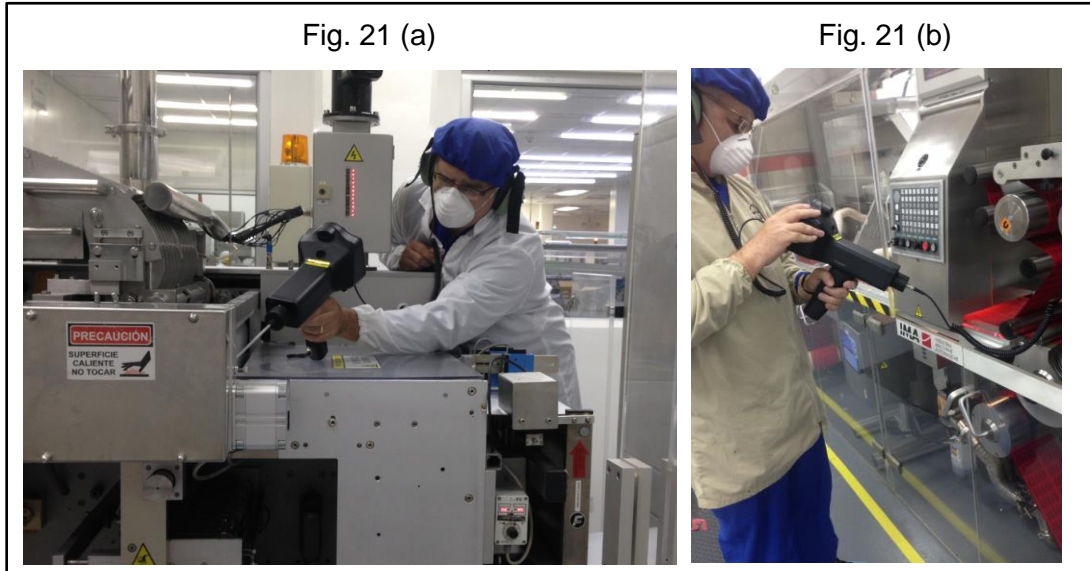
Las mediciones se realizaron en el mismo punto, mediante el módulo de contacto en el *housing*, donde se encuentran los rodamientos. En conjunto, la selladora utiliza 4 rodamientos por sistema.

Figura 20. Puntos de medición Selladora SIEBLER HM1E-500



Fuente: elaboración propia.

Figura 21. Toma de muestra de ultrasonido con módulo de contacto



Fuente: elaboración propia.

En la figura 21, se muestra el metodología utilizada para la toma de muestras, utilizando el detector ultrasónico Ultraprobe 10000 con un módulo de contacto. En la figura 21 (a), se utiliza un módulo de contacto tipo estetoscopio de varilla, para llegar a puntos fuera de alcance.

En la figura 21 (b), se muestra un módulo de contacto tipo magnético, útil para superficies lisas y de fácil acceso. Las mediciones fueron realizadas en el mismo punto en cada una de las ubicaciones correspondientes de cada rodamiento.

### **3.2. Aplicación de ultrasonido para rodos de sellado para blisteadora NOACK N921 en productos estándar**

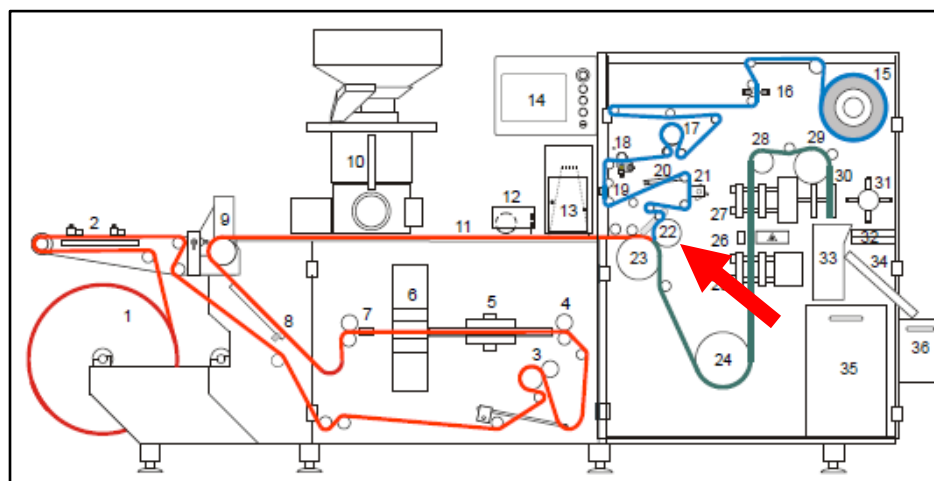
Contexto: Rodos de sellado pertenecientes a selladora marca Noack N921 de la fábrica alemana Romaco, año de construcción en el 2016. Esta selladora

tiene como función el sellado de blíster para productos estándar. Su funcionamiento es a través de calor y presión entre los rodos para realizar el sello, por medio de fusión entre dos cintas, una cinta de foil de aluminio y otra de material termo formable. La temperatura de operación de los rodos de sellado oscila entre 100 a 140 °C dependiente de la velocidad del equipo y el producto a empacarse, la velocidad promedio de 100 a 130 rev/min. El accionamiento es por medio de un servomotor eléctrico con transmisión mecánica mediante una caja reductora con acople de varias ruedas dentadas.

El correcto sellado depende del ajuste de los siguientes factores: (1) Distancia entre todos de sellado (2) presión de rodos de sellado (3) temperatura de sellado (4) Duración del sellado (5) Piezas del formato.

La estación de sellado es solo una etapa de funcionamiento de la selladora, la estación de sellado se encuentra ubicada en el componente número 22 mostrado en la figura 22. A diferencia de la selladora SIEBLER HM1E-500, la estación de sellado de esta blisteadora se compone únicamente de un solo rodo de sellado que ejerce presión sobre un rodillo de aluminio llamado rodillo guía de sellado.

Figura 22. **Esquema de selladora Noack N921**



Fuente: Manual Blisteadora Noack N921.

La estación de sellado de la blisteadora Noack N921 se compone de los siguientes elementos (ver figura 23).

- (1) Rodillo guía
- (2) Rodo de sellado
- (3) Cilindro neumático de presión

Figura 23. **Estación de sellado de blisteadora Noack N921**



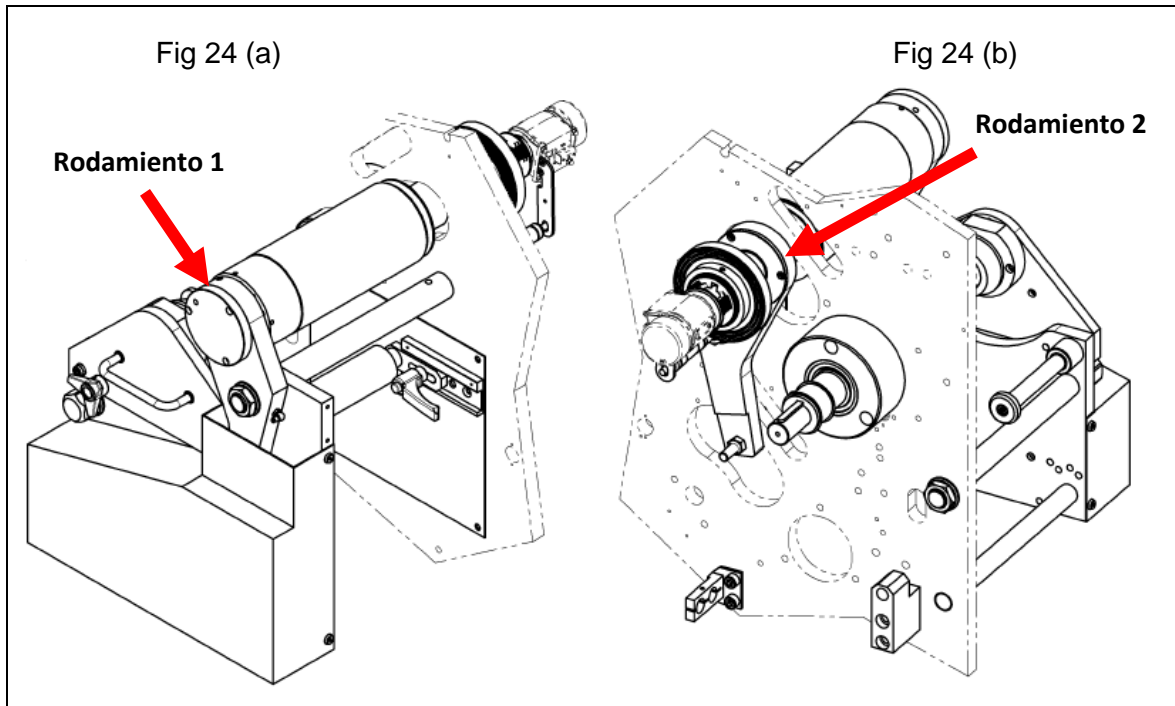
Fuente: manual Noack N921.

### 3.2.1. Puntos de medición establecidos NOACK N921

La estación de sellado cuenta un solo rodo de sellado con dos rodamientos en cada extremo. Por practicidad de las mediciones se enumeraron los rodamientos como número 1 el rodamiento del lado del operador y número 2 como el rodamiento trasero como muestra la figura 24. Los puntos de medición son equivalentes al número de rodamientos.

En la figura 24 (a), en una vista frontal de la estación de sellado se aprecia el rodamiento 1 y por consiguiente, el punto de medición número 1 y en la figura 24 (b) en una vista posterior se logra apreciar el rodamiento 2 y como tal el punto de medición número 2.

Figura 24. Esquema de estación de sellado NOACK N921



Fuente: Manual de selladora Noack N921.

En la figura 25, se aprecia la forma de medición con módulo de contacto magnético para el rodamiento del lado operador (o rodamiento 1) para esta blisteadora.

Figura 25. **Medición en rodamiento 1 de blisteadora Noack N921**



Fuente: elaboración propia.

Las mediciones se realizaron en el mismo punto, mediante el módulo de contacto en el *housing* donde se encuentran los rodamientos. En conjunto la selladora utiliza 2 rodamientos en la estación de sellado, por lo que se realiza una medición por cada muestra del equipo.

Para alcanzar el objetivo 2: Determinar los criterios de aceptación y parámetros de operación de los rodamientos de las estaciones de sellado, se describen los siguientes incisos:

### 3.3. Resultados de las mediciones de Ultrasonido en el 2018 selladora SIEBLER HM1E-500 para tabletas efervescentes

A continuación, se muestran los datos obtenidos por medición ultrasónica realizados en el año 2018 entre los meses de febrero a agosto. Las mediciones realizadas fueron tomadas cuando el equipo se encontraba a 200 ciclos por minutos. Los límites están establecidos de acuerdo con la pericia del técnico certificado en base a la interpretación de los audios, de acuerdo con las variaciones de sonido en los fragmentos escuchados.

Tabla III. Resultados de la aplicación ultrasónica para rodos de sellado de SIEBLER HM1E-500 en el 2018

	Fecha de muestra	09-feb	10-mar	16-abr	13-may	17-jun	16-jul	14-ago
Selladora de sobre	Decibeles	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB
Rodos lado Operador	Rodamiento 1	10	18	17	12	5	7	23
	Rodamiento 2	14	17	18	11	5	8	27
Rodos Posteriores	Rodamiento 3	28	27	28	25	13	17	21
	Rodamiento 4	29	30	28		7	19	18

	Alcanzo la alarma amarilla
	Alcanzo la alarma roja

Fuente: elaboración propia.

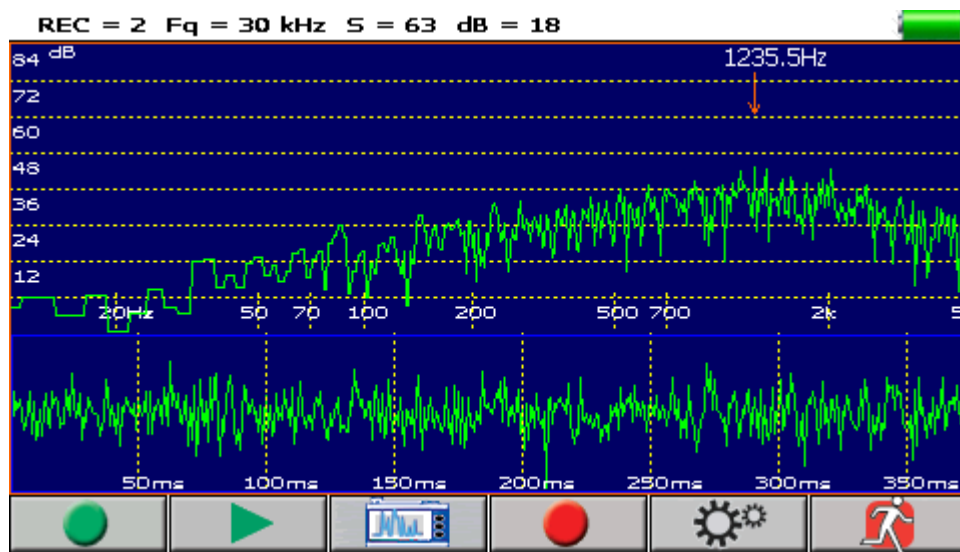
La tabla III muestra los resultados de las mediciones ultrasónicas que iniciaron en el año 2018 de los 4 rodamientos de la selladora SIEBLER HM1E-



500 en donde se pueden empezar a notar las anomalías mostradas marcadas en color rojo y valores en alarma baja marcados en color amarillo.

En la figura 27, se muestra un fragmento de la medición con el instrumento Ultraprobe 10000, en la cual se muestra en dB un valor de 18 como el nivel medio. La frecuencia utilizada para esta medición fue de 30 kHz. Para esta medición se utilizó un módulo de contacto tipo estetoscopio y la operación se encontraba en condiciones normales.

Figura 26. Fragmento de la medición del día 10/03/2018 del rodamiento 1



Fuente: Ultraprobe 10000.

### 3.3.1. Resultados rodamiento 1 en el 2018

En la tabla IV, se muestra la tendencia de rodamiento 1 en el año 2018. De acuerdo con esta tendencia, se establece como base la alarma amarilla (o alarma baja) en 17 dB y 25 dB la alarma roja (ó alarma Alta) y una línea base en 10 dB, tal y como muestra la Figura 28. También se puede que al llegar a los límites de alerta de 18 dB se aplica lubricación en el rodamiento para nuevamente

alcanzar los parámetros normales de operación. El mismo caso se presentó para el día 16 de agosto con un valor en alerta alta de 27 dB, donde nuevamente se aplica lubricación para alcanzar la línea base determinada.

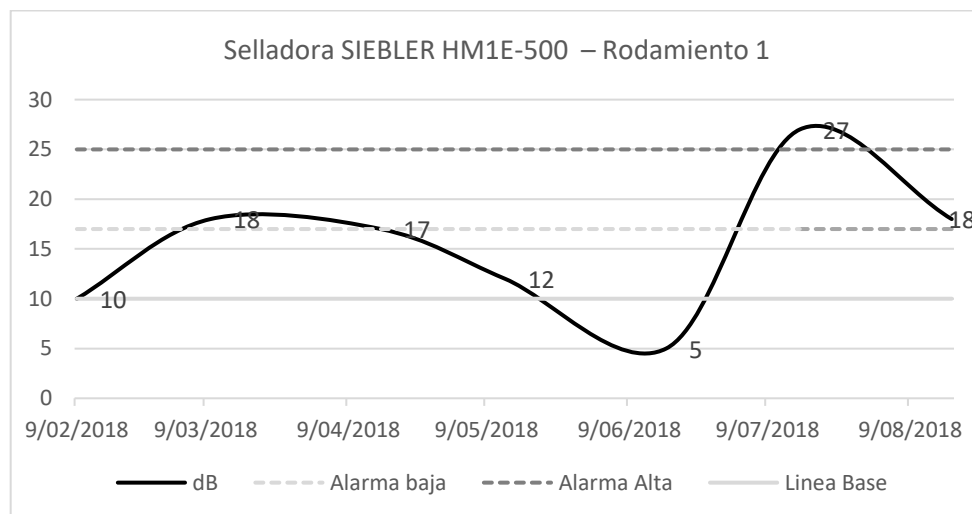
Tabla IV. **Muestra ultrasónica en 2018 – Rodamiento 1**

Selladora SIEBLER HM1E-500 – Rodamiento 1					
Fecha/hora	dB	Alarma baja	Alarma Alta	Línea Base	Acción preventiva
9/02/2018	10	17	25	10	Ninguna
10/03/2018	18	17	25	10	Ninguna
16/04/2018	17	17	25	10	<b>Lubricación</b>
13/05/2018	12	17	25	10	Ninguna
17/06/2018	5	17	25	10	Ninguna
16/07/2018	27	17	25	10	<b>Lubricación</b>
18/08/2018	18	17	25	10	<b>Lubricación</b>

Fuente: elaboración propia.

En el gráfico 28, para el rodamiento 1, se aprecia de mejor manera cómo los valores van oscilando hasta alcanzar la línea base nuevamente después de haber llegado a límites de alerta.

Figura 27. **Gráfico de tendencia de rodamiento 1**



Fuente: elaboración propia.

### 3.3.2. Resultados rodamiento 2 en el 2018

En la tabla V se muestran las mediciones para el Rodamiento 2, de acuerdo a la tendencia mostrada en el gráfico de la figura 29, se ha establecido una alarma baja en 21 dB, una alarma alta en 29 dB y una línea base de 14 dB. En este caso, al igual que el rodamiento 1, se alcanzaron dos límites de alerta, una baja y una alta, en las cuales se lubricó el rodamiento 2 para alcanzar la línea base estipulada.

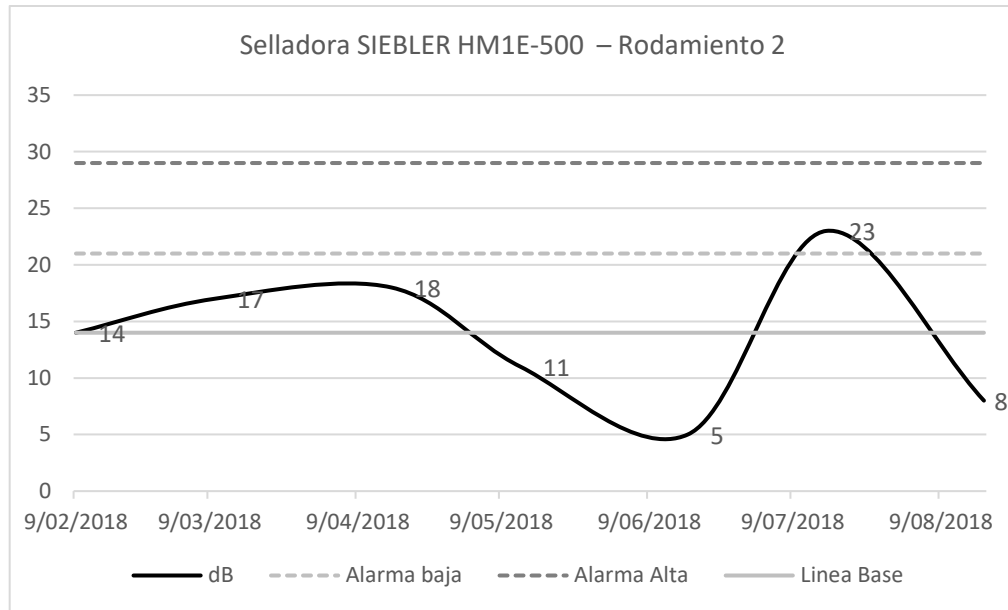
Tabla V. **Muestra ultrasónica en 2018 – Rodamiento 2**

Selladora SIEBLER HM1E-500 - Rodamiento 2					
Fecha/hora	dB	Alarma baja	Alarma Alta	Línea Base	Acción preventiva
9/02/2018	14	21	29	14	Ninguna
10/03/2018	17	21	29	14	Ninguna
16/04/2018	18	21	29	14	<b>Lubricación</b>
13/05/2018	11	21	29	14	Ninguna
17/06/2018	5	21	29	14	Ninguna
16/07/2018	23	21	29	14	<b>Lubricación</b>
18/08/2018	8	21	29	14	<b>Lubricación</b>

Fuente: elaboración propia.

En el gráfico 29 del rodamiento 2, se aprecia los valores oscilantes hasta llegar a los valores normales de operación establecidos. El valor alcanzado de 23 dB ha sido detectado tempranamente lo que ha ocasionado una alerta alta.

Figura 28. **Gráfico de tendencia de rodamiento 2**



Fuente: elaboración propia.

### 3.3.3. Resultados rodamiento 3 en el 2018

En la tabla VI, se muestra el recopilado de las mediciones para el rodamiento 3, de acuerdo con la tendencia mostrada en el gráfico de la figura 30, se ha establecido una alarma baja en 35 dB, una alarma alta en 43 dB y una línea base de 28 dB. En este caso, no se han detectado alarmas, por lo que no se ha requerido una acción preventiva.

Tabla VI. **Muestra ultrasónica en 2018 – Rodamiento 3**

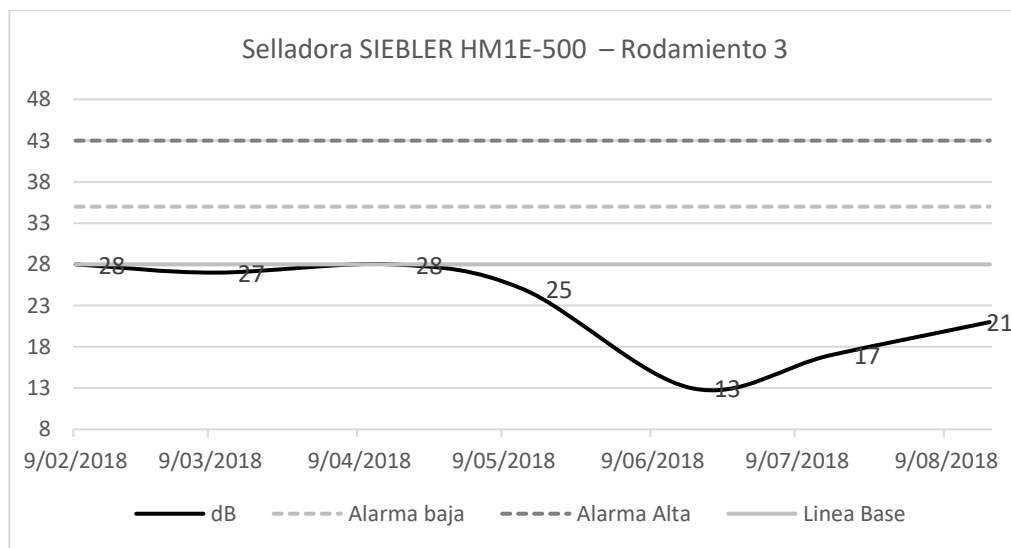
Selladora SIEBLER HM1E-500 - Rodamiento 3					
Fecha/hora	dB	Alarma baja	Alarma Alta	Línea Base	Acción preventiva
9/02/2018	28	35	43	28	Ninguna
10/03/2018	27	35	43	28	Ninguna
16/03/2018	28	35	43	28	Ninguna
13/05/2018	25	35	43	28	Ninguna
17/06/2018	13	35	43	28	Ninguna

Selladora SIEBLER HM1E-500 - Rodamiento 3					
Fecha/hora	dB	Alarma baja	Alarma Alta	Línea Base	Acción preventiva
16/07/2018	17	35	43	28	Ninguna
18/08/2018	21	35	43	28	Ninguna

Fuente: elaboración propia.

En la figura 30, se puede apreciar un fragmento de la medición realizada el día 17/06/2018, donde se establece un valor en dB de 13 como un valor medio, el valor más bajo registrado en el 2018.

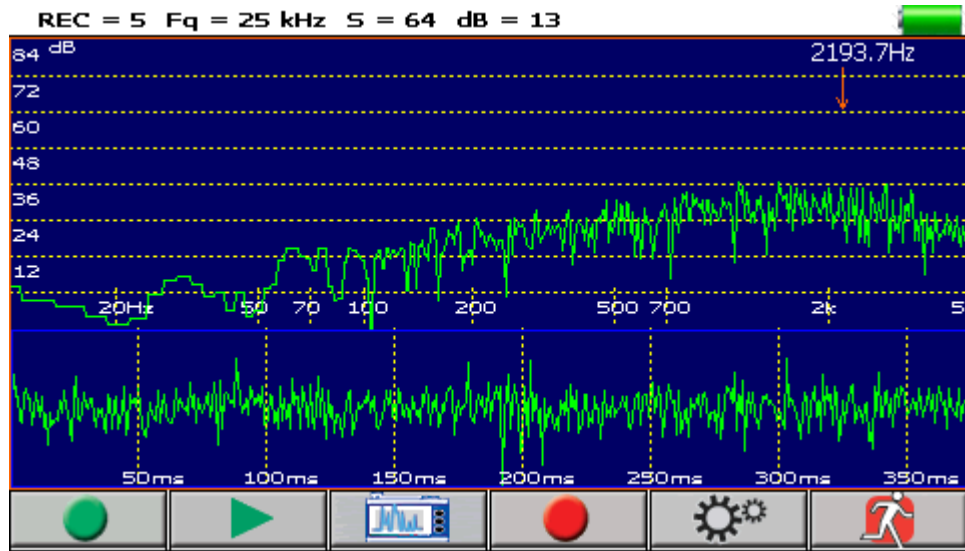
Figura 29. **Gráfico de tendencias de rodamiento 3**



Fuente: elaboración propia.

Se logra apreciar en el gráfico representado en la figura 31, la homogeneidad del sonido, lo que indican que no hay variaciones que representen una alerta en el rodamiento. Para esta medición se utilizó un módulo de contacto tipo estetoscopio y se utilizó una frecuencia de medición de 25kHz.

Figura 30. Fragmento de la medición del día 17/06/2018 del rodamiento 3



Fuente: Ultraprobe 10000.

### 3.3.4. Resultados rodamiento 4 en el 2018

En la tabla VII, se muestran las mediciones realizadas en el rodamiento 4 de la selladora 1, en este caso la tendencia se ha establecido en una línea base de 29 dB, una alarma baja de 36 dB y una alarma alta de 44 dB.

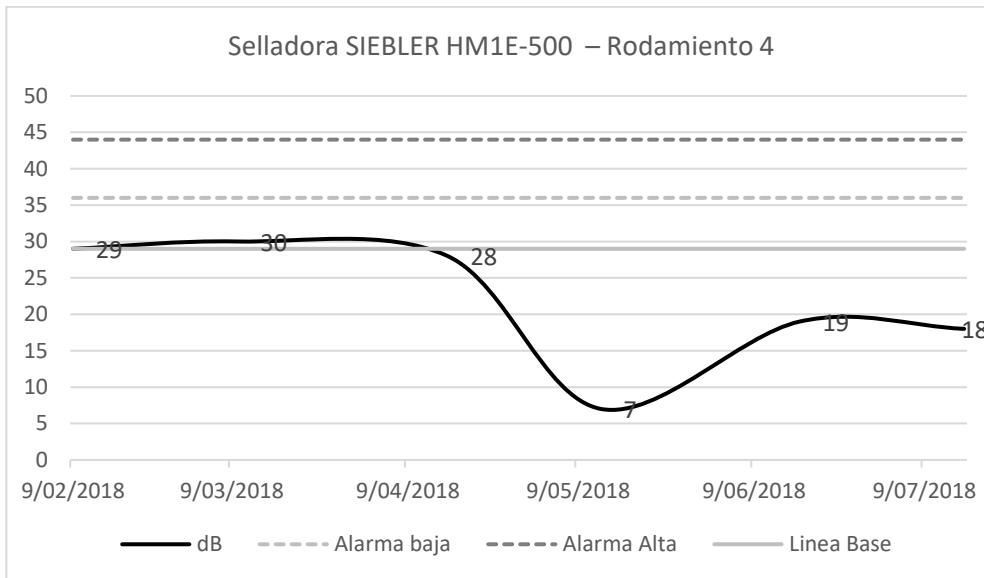
Tabla VII. Muestra ultrasónica en 2018 – Rodamiento 4

Selladora SIEBLER HM1E-500 - Rodamiento 4					
Fecha/hora	dB	Alarma baja	Alarma Alta	Línea Base	Acción preventiva
9/02/2018	29	36	44	29	Ninguna
10/03/2018	30	36	44	29	Ninguna
16/03/2018	28	36	44	29	Ninguna
17/06/2018	7	36	44	29	Ninguna
16/07/2018	19	36	44	29	Ninguna
18/08/2018	18	36	44	29	Ninguna

Fuente: elaboración propia.

En el gráfico de la figura 32, se logra apreciar la tendencia del rodamiento en el año 2018. En este caso, al igual que el rodamiento 3 no se han detectado alertas, por lo que no es necesario ninguna acción.

Figura 31. **Gráfico de tendencias de rodamiento 4**



Fuente: elaboración propia.

### 3.4. Medición de ultrasonido en el 2019 SIEBLER HM1E-500

A continuación, se muestran los datos obtenidos por medición ultrasónica realizados en el año 2019, para esta muestra se ha continuado la frecuencia de manera mensual. Los límites están establecidos de acuerdo con la pericia del técnico con base a la interpretación de los audios, de acuerdo con las variaciones de sonido en los fragmentos escuchados.

Tabla VIII. **Resultados de la aplicación ultrasónica para rodos de sellado de SIEBLER HM1E-500 en el 2019**

Fecha de muestra		22/01/2019	23/02/2019	15/03/2019
Selladora SIEBLER HM1E-500	Decibeles	dB	dB	dB
Rodos lado Operador	Rodo delantero	21	29	23
	Rodo trasero	19	26	20
Rodos Posteriores	Rodo delantero	22	25	22
	Rodo trasero	22	18	23

	Alcanzo la alarma amarilla (7 dB arriba de la línea base)
	Alcanzo la alarma roja (15 dB arriba de la línea base)

Fuente: elaboración propia.

La tabla VIII, muestra los resultados de las mediciones ultrasónicas del primer trimestre del año 2019 de los 4 rodamientos de la selladora de sobre en donde se pueden apreciar que los valores se encuentran en estado aceptable de funcionamiento. Además, se han definido de mejor forma los límites establecidos de alarma baja (7 dB arriba de la línea base y alarma alta 15 dB arriba de la línea base).

Tabla IX. **Muestra ultrasónica en 2019 de selladora 1**

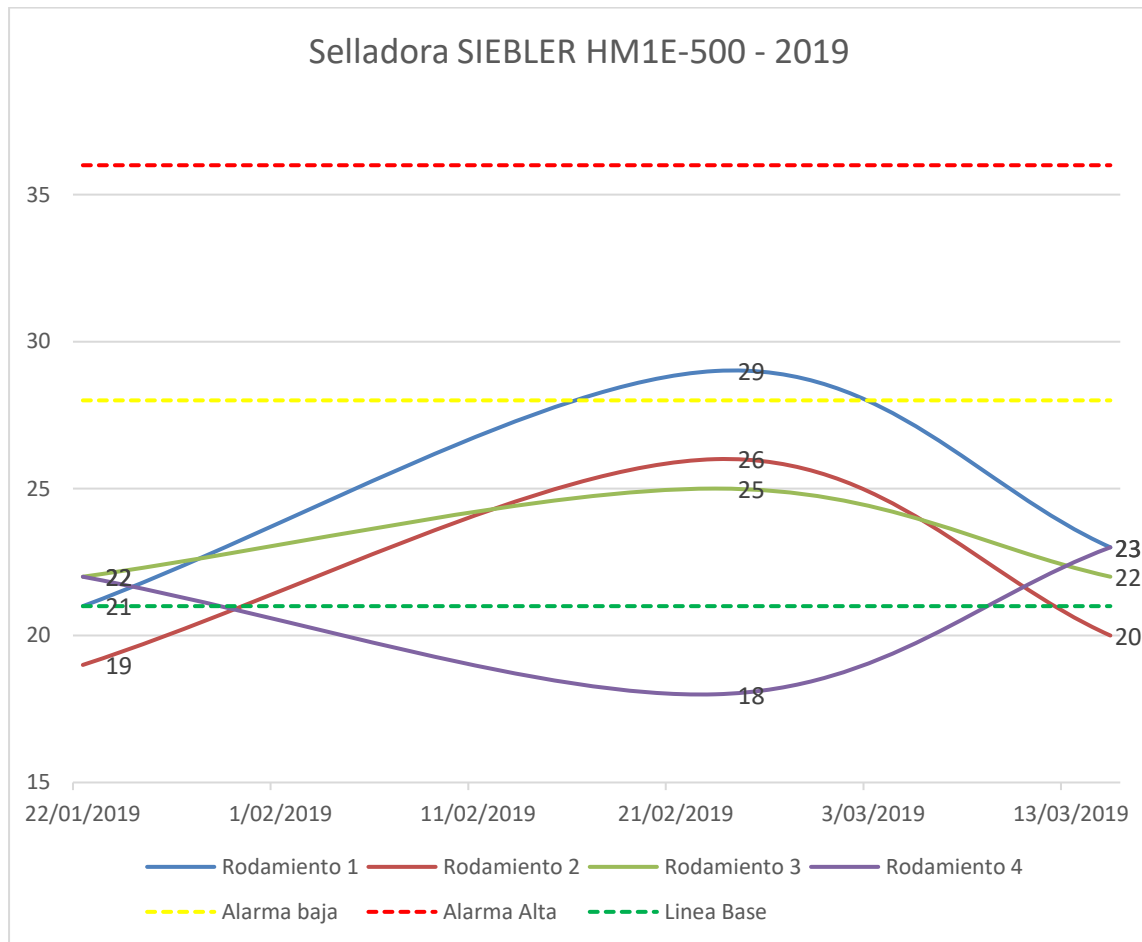
Selladora SIEBLER HM1E-500 - 2019								
Fecha/hora	Rodamiento 1	Rodamiento 2	Rodamiento 3	Rodamiento 4	Alarma baja	Alarma Alta	Línea Base	Acción preventiva
22/01/2019	21	19	22	22	28	36	21	Ninguna
23/02/2019	29	26	25	18	28	36	21	Lubricación
15/03/2019	23	20	22	23	28	36	21	Ninguna

Fuente: elaboración propia.



La tabla IX muestra el resultado de las mediciones de acuerdo con los límites establecidos (Alarma baja, alarma alta y línea base). Claramente se puede apreciar que los valores en decibels de los 4 rodamientos se han mantenido en un rango aceptable de funcionamiento. Sin embargo, en algunos casos llegó a un valor de alerta, como el valor encontrado en el 23 de febrero del rodamiento 1 que llegó a un valor de 29 dB. En este caso fue necesaria la lubricación en los rodamientos 1 y 2 para alcanzar la línea base establecida de 21 dB.

Figura 32. **Gráfico de tendencias de rodamientos selladora SIEBLER HM1E-500 en el 2019**



Fuente: elaboración propia.

En el gráfico de la figura 33, se logra apreciar el comportamiento de los 4 rodamientos dentro de los límites establecidos.

### 3.5. Resultado de las mediciones en el 2018 para blisteadora NOACK N921

A continuación, se muestran los datos obtenidos por medición ultrasónica realizados en el año 2018 entre los meses de marzo a agosto. Las mediciones realizadas fueron tomadas cuando el equipo se encontraba entre 60 a 74 ciclos por minuto. Los límites están establecidos de acuerdo con la pericia del técnico con base a la interpretación de los audios, de acuerdo con las variaciones de sonido en los fragmentos escuchados.

Tabla X. **Resultados de la aplicación ultrasónica para rodos de sellado de Noack N921 en el 2018**

Fecha de muestra	10/03/2018	13/05/2018	17/06/2018	23/09/2018	14/08/2018
Decibeles	dB	dB	dB	dB	dB
Rodo lado operador (1)	38	12	15	16	23
Rodo lado trasero (2)	44	11	10	6	11

	Alcanzo la alarma amarilla
	Alcanzo la alarma roja

Fuente: elaboración propia.

La tabla X muestra los resultados de las mediciones ultrasónicas que iniciaron en el año 2018 de los 2 rodamientos de la blisteadora NOACK N921.

### 3.5.1. Resultados rodamiento 1 en el 2018

En la tabla XI se muestra el recopilado de las mediciones para el rodamiento 1, de acuerdo con la tendencia mostrada en el gráfico de la figura 34, se ha establecido una alarma baja en 38 dB, una alarma alta en 46 dB y una línea base de 31 dB.

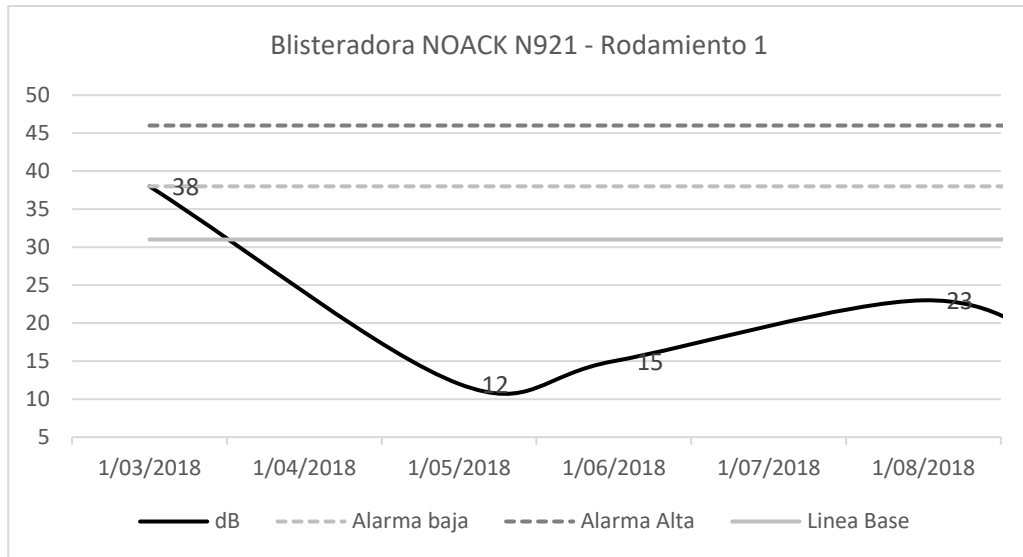
Tabla XI. **Muestra ultrasónica en 2018 – Rodamiento 1**

Blisteadora NOACK N921 – Rodamiento 1					
Fecha/hora	dB	Alarma baja	Alarma Alta	Línea Base	Acción preventiva
10/03/2018	38	38	46	31	<b>Lubricación</b>
13/05/2018	12	38	46	31	Ninguna
17/06/2018	15	38	46	31	Ninguna
23/09/2018	16	38	46	31	Ninguna
14/08/2018	23	38	46	31	Ninguna

Fuente: elaboración propia.

En este caso fue necesaria la lubricación, a partir de la primera medición que tuvo un valor de 38 dB; en la segunda medición se logra apreciar un valor de 12 dB, el cual se encuentra por debajo de la línea base. En el gráfico 34, se puede apreciar claramente el comportamiento del rodamiento 1, en cual tuvo su valor máximo desde la primera medición, se aplicó lubricación para alcanzar la línea base de 31 dB, y posteriormente se mantuvo dentro de niveles bajos.

Figura 33. **Gráfico de tendencia de rodamiento 1**



Fuente: elaboración propia.

### 3.5.2. Resultados rodamiento 2 en el 2018

En la tabla XII se muestra el recopilado de las mediciones para el rodamiento 2. Se observa un valor alto de 44 dB en la primera medición, donde la acción preventiva fue la lubricación y un valor de 11 dB, como un valor bajo por debajo de lo normal. De acuerdo con la tendencia mostrada en el gráfico de la figura 35, se ha establecido una alarma baja en 50 dB, una alarma alta en 60 dB y una línea base de 45 dB.

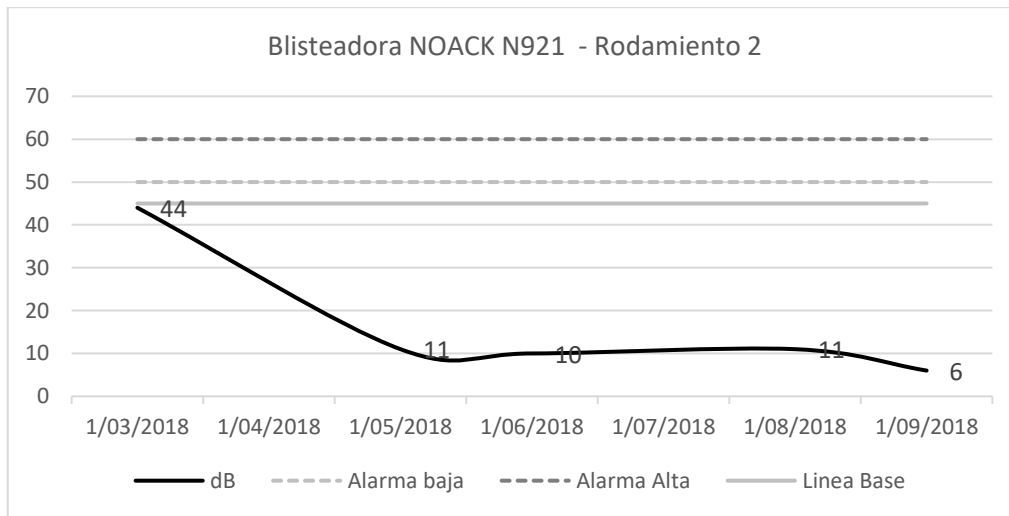
Tabla XII. **Muestra ultrasónica en 2018 – Rodamiento 2**

Blisteradora NOACK N921 – Rodamiento 2					
Fecha/hora	dB	Alarma baja	Alarma Alta	Línea Base	Acción preventiva
10/03/2018	44	50	60	45	<b>Lubricación</b>
13/05/2018	11	50	60	45	Ninguna
17/06/2018	10	50	60	45	Ninguna
23/09/2018	6	50	60	45	Ninguna
14/08/2018	11	50	60	45	Ninguna

Fuente: elaboración propia.

Al igual que el rodamiento 1, este tuvo una alerta baja en la primera medición, por lo que fue necesaria la aplicación de lubricación.

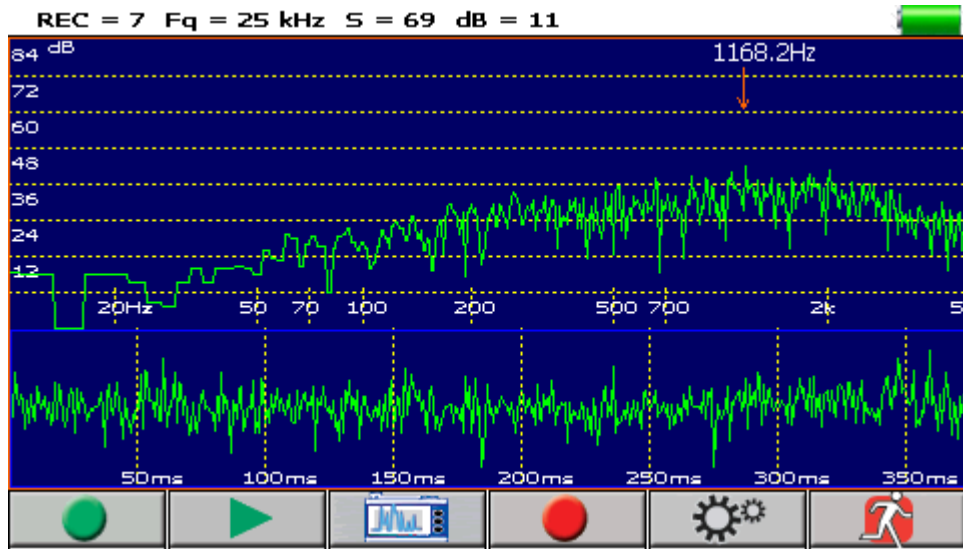
Figura 34. **Gráfico de tendencia de rodamiento 2**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 36, fragmento de la última medición en el 2018 del rodamiento 2, se logra apreciar una pequeña oscilación en el comportamiento del sonido, sin embargo, no representa una variación considerable por lo que se establece como un parámetro normal de operación. Para este caso se utilizó un módulo de contacto magnético y una frecuencia de medición de 25 kHz.

Figura 35. Fragmento de la medición del 14/08/2018 del rodamiento 2



Fuente: Instrumento Ultraprobe 10000.

### 3.5.3. Resultado en el 2019 para blisteadora Noack N921

A continuación, se muestran los datos obtenidos por medición ultrasónica realizados en el año 2019 para la blisteadora Noack N921, para esta muestra se ha continuado la frecuencia de manera mensual. Los límites están establecidos de acuerdo con la pericia del técnico con base a la interpretación de los audios, de acuerdo con las variaciones de sonido en los fragmentos escuchados.

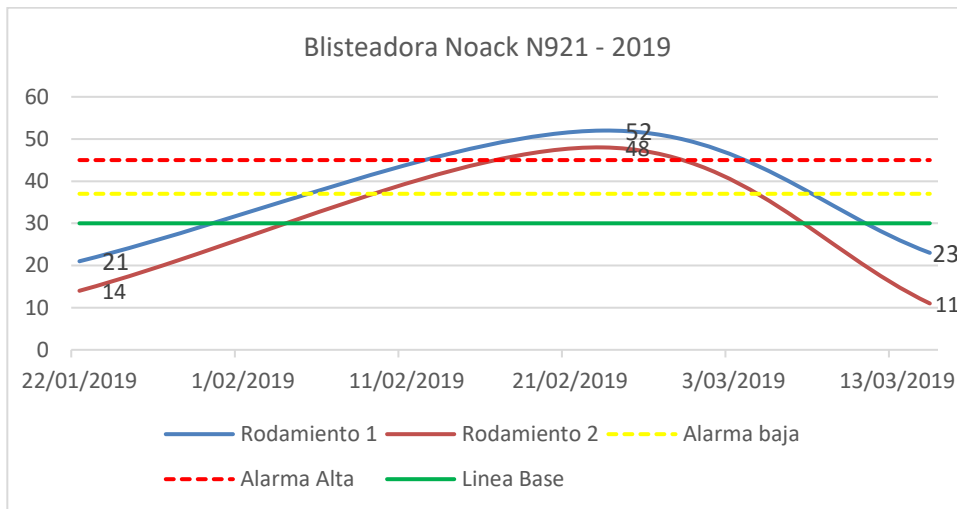
La tabla XIII muestra el resultado de las mediciones de acuerdo con los límites establecidos (Alarma baja, alarma alta y línea base). Claramente se puede apreciar que los valores en decibels de los 2 rodamientos se han mantenido en un rango aceptable de funcionamiento; sin embargo, en algunos casos llegó a un valor de alerta, como el valor encontrado en el 23 de febrero del rodamiento 1 y 2 que llegó a un valor de riesgo de 52 y 48 dB correspondientemente, por lo que se accionó preventivamente con un tarea de lubricación. Este comportamiento también se muestra en la figura 37.

Tabla XIII. **Muestra ultrasónica en 2019 Noack 921**

Blisteadora Noack N921 - 2019						
Fecha/hora	Rodamiento 1	Rodamiento 2	Alarma baja	Alarma Alta	Línea Base	Acción preventiva
22/01/2019	21	14	37	45	30	Ninguna
23/02/2019	52	48	37	45	30	Lubricación
15/03/2019	23	11	37	45	30	Ninguna

Fuente: elaboración propia.

Figura 36. **Gráfico de tendencia de Noack N921 en el 2019**



Fuente: elaboración propia.

Para alcanzar el objetivo 3. Determinar la confiabilidad de los equipos mediante un modelo de diagnóstico de falla mediante límites de alerta temprana y línea base, se describen a continuación los siguientes incisos.

### 3.6. Análisis de resultados de rodamientos de Selladora de sobre SIEBLER HM1E-500

Tabla XIV. Resumen de hallazgos selladora SIEBLER

Selladora SIEBLER HM1E-500								
Muestra	Rodamiento 1	Rodamiento 2	Rodamiento 3	Rodamiento 4	Alarma baja	Alarma Alta	Línea Base	Comentario
9/02/2018	10	14	28	29	28	36	21	
10/03/2018	18	17	27	30	28	36	21	Se lubricó rodamiento 1 y se notó el regreso a parámetros aceptables
16/04/2018	17	18	28	28	28	36	21	Se lubricó rodamiento 1 y se notó el regreso a parámetros aceptables
13/05/2018	12	11	25	7	28	36	21	
17/06/2018	5	5	13	19	28	36	21	Se notaron valores muy por debajo de la línea base, se recomendó repetir la medición
16/07/2018	27	23	17	18	28	36	21	Se lubricó rodamiento 1 y 2 hasta sobrelubricar, se monitorea nuevamente hasta notar mejoras
18/08/2018	18	8	21		28	36	21	
22/01/2019	21	19	22	22	28	36	21	
23/02/2019	29	26	25	18	28	36	21	Se lubricó rodamiento 1 y 2 se notó el regreso a parámetros aceptables.
15/03/2019	23	20	22	23	28	36	21	

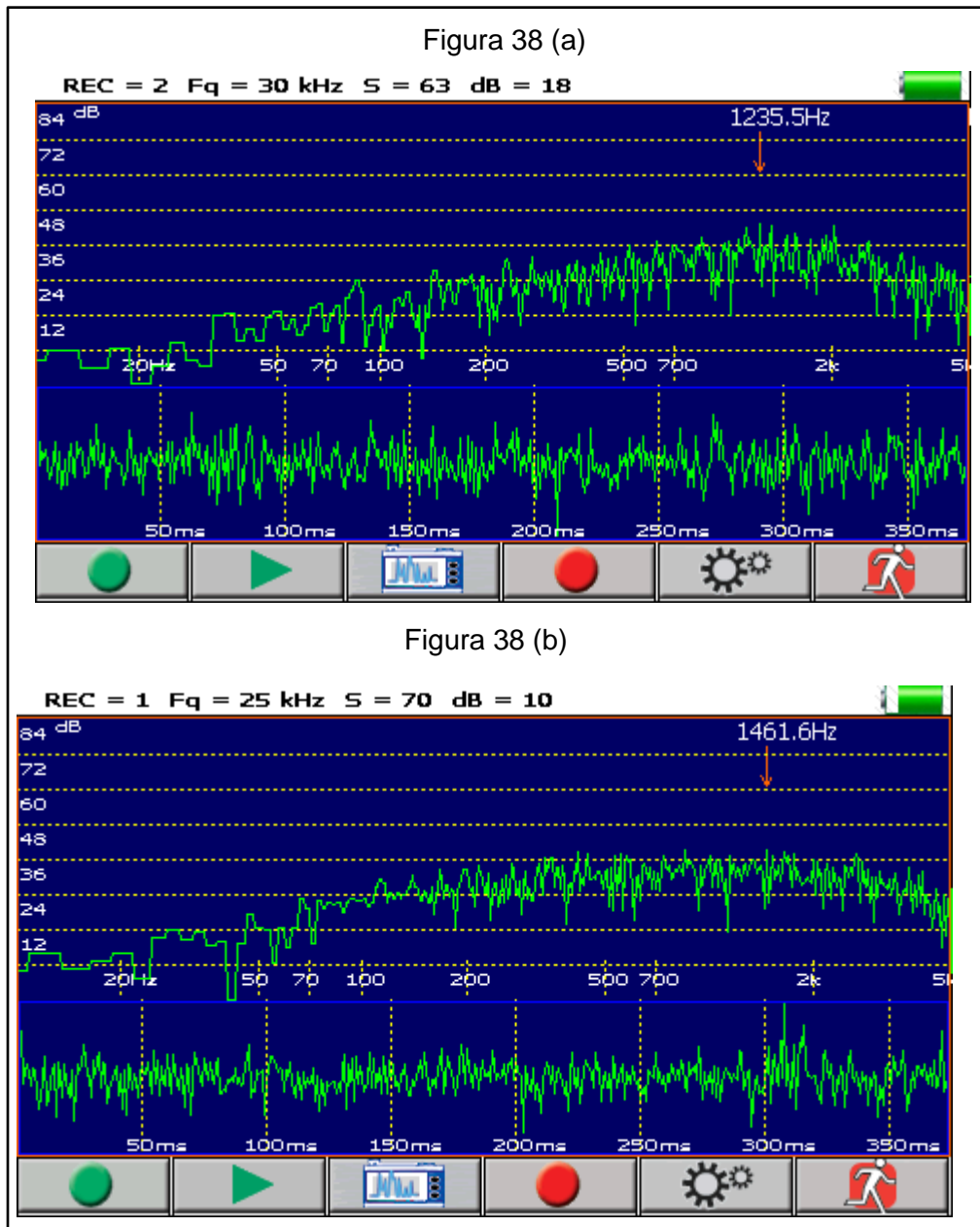
Fuente: elaboración propia.

La tabla XIV muestra la tabulación de anomalías encontradas en las muestras realizadas en el 2018 y 2019 para la selladora SIEBLER, así como las acciones realizadas en su momento. De acuerdo con el análisis realizado por el técnico certificado en ultrasonido, se lograron detectar un mayor número de anomalías en los rodamientos 1 y 2, que a diferencia de los rodamientos 3 y 4, estos se encuentran más cerca de los mecanismos de tracción del equipos, lo que puede ocasionar una variación de sonido en algunos casos.



Se logró evidenciar que al sobrepasar el umbral de alerta baja inicia una pequeña alteración teniendo una mayor oscilación en el espectro de ultrasonido.

Figura 37. Efectos de la lubricación en rodamientos



Fuente: elaboración propia, por medio del instrumento Ultraprobe 10000.

En la figura 38 (a), se logra apreciar el efecto de falta de lubricación en el rodamiento 1 durante la muestra tomada el día 10/03/2018, donde claramente se nota una oscilación mayor evidencias pequeñas variaciones, y una posible falla si no se toman acciones preventivas.

En la figura 38 (b), se logra apreciar el efecto positivo de la lubricación realizada posteriormente, evidenciando una mejor oscilación en el espectro, y por consiguiente, un valor disminuido en decibles de 18 a 10 dB.

En el caso de los valores obtenidos en los rodamientos 1 y 2 el día 17/06/2018, se observa claramente lecturas por debajo de la línea base; sin embargo, esto puede suceder por varios factores, como variación en las revoluciones del rodo de sellado en el momento de la medición, otra puede ser alguna falla o problema durante la medición.

Por lo tanto, en este caso se sugiere repetir la muestra para descartar que exista una sobrelubricación, que pueda ocasionar un efecto contraproducente.

Los valores obtenidos para futuras mediciones, es posible que se puedan interpretar por medio modos de falla sugeridos en la tabla XV, tomando como base los límites de alerta y los resultados obtenidos en este estudio.

Tabla XV. **Modos de diagnóstico de falla rodamientos de SIEBLER HM1E-500**

<b>Modo de falla del rodamiento</b>	<b>Decibeles sobre la referencia</b>	<b>Acción recomendada</b>	<b>Modo de falla potencial</b>
Prefalla o falta de lubricación	21 – 28 db	Lubricar y retomar las lecturas	
Primeros síntomas o comienzo de la falla	28 – 36 db	Vigilar en el tiempo	
Falla	36 - 48 db	Programar su reemplazo si persiste a pesar a aplicar lubricación (próximo período conveniente)	Falta de hermeticidad de sellado, desajuste de la estación de sellado.
Falla catastrófica	48 – 60 db	Remover y reemplazar de inmediato	Avería de rodamientos por desgaste tipo rayado y/o descascarillado

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con los resultados de este estudio se sugiere que la lubricación en todos los rodamientos pueda ser realizada de manera mensual hasta llegar al tope del nivel. La grasa y forma de lubricación deberá ser la recomendada por el fabricante y que se encuentra descrito en el manual de operación del equipo.

### 3.7. Análisis de resultados de rodamientos de Selladora de blíster NOACK N921

Tabla XVI. Resumen de hallazgos blisteadora NOACK

Blisteadora Noack N921						
Muestra	Rodamiento 1	Rodamiento 2	Alarma baja	Alarma Alta	Línea Base	Comentario
10/03/2018	38	44	37	45	30	Se lubricó rodamiento 1 y 2 se notó el regreso a parámetros aceptables
13/05/2018	12	11	37	45	30	Se notaron valores muy por debajo de la línea base, se recomendó repetir la medición
17/06/2018	15	10	37	45	30	
23/09/2018	16	6	37	45	30	Se notaron valores muy por debajo de la línea base, se recomendó repetir la medición
14/08/2018	23	11	37	45	30	
22/01/2019	21	14	37	45	30	
23/02/2019	52	48	37	45	30	Se lubricó rodamiento 1 y 2 hasta sobrelubricar, se monitorea nuevamente hasta notar mejoras
15/03/2019	23	11	37	45	30	

Fuente: elaboración propia.

La tabla XVI muestra la tabulación de anomalías encontradas en las muestras realizadas en el 2018 y 2019 para la blisteadora Noack, así como las acciones realizadas en su momento. De acuerdo con el análisis realizado por el técnico certificado en ultrasonido, las anomalías son detectadas en ambos rodamientos en el mismo número de muestras tomadas. Es decir, que no existe mucha diferencia entre el rodamiento del lado del operador y el rodamiento trasero.

A diferencia de la selladora Siebler, los rodamientos de Noack tienen un mayor rango aceptable en cuanto a decibles, esto es posible debido a que la

velocidad de este equipos tiene una revolución más baja, por lo que sus límites de alerta tienden a ser más amplios.

Igual que la selladora anterior, en este caso también se logró evidenciar que al sobrepasar el umbral de alerta baja inicia una pequeña alteración teniendo una mayor oscilación en el espectro de ultrasonido. Por lo que se sugiere utilizar el siguiente modo de falla descrito en la tabla XVII, como guía de diagnóstico utilizando como base los resultados obtenidos en este estudio.

Tabla XVII. **Modos de diagnóstico de falla rodamientos de NOACK N921**

<b>Modo de falla del rodamiento</b>	<b>Decibeles sobre la referencia</b>	<b>Acción recomendada</b>	<b>Modo de falla potencial</b>
Prefalla o falta de lubricación	30 – 37 db	Lubricar y retomar las lecturas	
Primeros síntomas o comienzo de la falla	37 – 45 db	Vigilar en el tiempo	
Falla	45 - 57 db	Programar su reemplazo si persiste a pesar a aplicar lubricación (próximo período conveniente)	Carencia de sellado, desajuste de la estación de sellado.
Falla catastrófica	57 – 70 db	Remover y reemplazar de inmediato	Avería de rodamientos por desgaste tipo rayado y/o descascarillado

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con los resultados de este estudio, se sugiere que la lubricación en todos los rodamientos pueda ser realizada de manera mensual hasta llegar al tope del nivel. La grasa y forma de lubricación deberá ser la recomendada por el fabricante descrito en el manual de operación del equipo.

## 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El desarrollo de este trabajo tuvo como principal logro, la implementación de un sistema de rutas de monitoreo por condición en la etapa de sellado de dos selladoras. Como parte del planteamiento del problema, se determinó que no existía anteriormente un plan de mantenimiento que contemplara la verificación periódica de los rodamientos de sellado, con el fin de conocer su condición en tiempo real, y sin necesidad de realizar un desmontaje de los componentes para comprobar su estado. Este trabajo de innovación al área de mantenimiento mecánico determina cuáles son los criterios de aceptación y parámetros de operación de los elementos analizados.

El alcance de este trabajo se enfocó en el desarrollo de inspecciones para dos selladoras, una selladora de blíster marca NOACK modelo N921 y selladora de empaque de sobre marca SIEBLER modelo HM1E-500, donde se recolectaron datos para su posterior análisis. Los componentes analizados fueron específicamente los rodamientos de los rodillos de sellado de ambos equipos. No se tomaron en cuenta dentro del desarrollo de este trabajo otros equipos y componentes analizados, excepto los mencionados anteriormente.

Durante el desarrollo del trabajo se tuvieron algunas complicaciones por tratarse de un trabajo de implementación, debido a que no existen antecedentes y parámetros de comparación con base a históricos, y no se obtuvo la información suficiente para establecer parámetros preliminares. Sin embargo, se optó por tomar los datos iniciales resultantes de las primeras inspecciones como una línea base para establecer tendencias y posteriormente determinar los límites de alerta baja y alerta alta.

Se determinó que durante la etapa de sellado se constituye la parte más importante del sellado del producto en su empaquetadura final, en donde la hermeticidad es un factor importante para mantener el ciclo de vida de la tableta empacada. Los distintos modos de falla fueron mencionados en el análisis AMEF realizado durante el desarrollo de la investigación, considerando con un valor crítico el modo de falla por desgaste de rodos de sellado, por falta de lubricación. Esto representa un efecto potencial en la falta de hermeticidad por corte del material y en el daño temporal o permanente de los rodos de sellado.

Al utilizar un detector ultrasónico, como herramienta de monitoreo por condición, es posible para el inspector determinar la condición del equipo sujeto a las cargas de trabajo, y permite tomar acciones correctivas para prolongar la vida útil del equipo. Es importante mencionar que este diseño de trabajo contempla rutas de monitoreo por condición establecidas de acuerdo con las condiciones de trabajo cuando se obtuvieron las muestras, y los rangos sugeridos pueden variar si se cambiaran parámetros como la velocidad del equipo, condiciones ambientales e incluso el tipo de producto. Es importante, como lo menciona UE Systems (1997), que el inspector cuente con la información precisa y suficiente para dar una descripción detallada del ambiente en medición. La información presentada tiene que ser suficientemente clara para que la inspección pueda ser repetible y los resultados similares.

Es importante mencionar fue selecciona la tecnología ultrasónica por tratarse de rodamientos de baja revolución, que permite tener una mejor detectabilidad utilizando frecuencias entre un rango de 30 a 40 kHz. Esta técnica no es recomendable para aplicar en motores o cajas reductoras de alto desempeño y revolución, ya que se estarían obteniendo lecturas no certeras. De acuerdo Emmanuele, J. (2014), la débil señal proporcionada por un rodamiento

de baja revolución requiere un rango dinámico y un ruido de fondo apropiados. Se requiere frecuentemente una amplificación de 90 dB.

El desarrollo de este trabajo, se basó en conocer dos aspectos importantes para la aplicación de la tecnología ultrasónica, como lo menciona UE Systems (1997): (1) el comienzo de falla por fatiga (2) carencia o exceso de lubricante. A lo largo del desarrollo y presentación de resultados, se detectó en varias ocasiones indicios de falla por falta de lubricación, evidenciando variaciones considerables que pudieran haber resultado en los distintos modos de falla mencionados anteriormente, en lo cual fue posible establecer la acción preventiva de manera temprana aplicando la lubricación correspondiente. Si bien es cierto, no se puede prevenir el 100 % de las fallas originas de la etapa de sellado, definitivamente el modo de diagnóstico de falla mostrado en las tablas XVI y XVII, sirven de guía para establecer los rangos de operación operativos para garantizar que se puedan detectar los distintos modos de falla del sistema de sellado. En muchas ocasiones será necesario repetir las muestras para cerciorar que los niveles en dB obtenidos sean correctos.

Debido a que no se tiene un récord histórico de las fallas ocasionas por falta de lubricación; además de estimados de disponibilidad, tiempo medio entre fallas y tiempo medio de reparación; es difícil conocer el valor de confiabilidad de la estación de sellado antes y después de los resultados obtenidos en este trabajo. Sin embargo, es evidente que se lograron detectar en varias ocasiones alertas tempranas de indicios de falla donde se permitió la aplicación de lubricación para prevenir dichas fallas También se logró apreciar claramente dentro de los fragmentos de sonido, el efecto positivo que posterior a la lubricación aplicada en tiempo, en donde la oscilación se redujo, manteniendo de forma más homogéneo los niveles de sonido que representan las pequeñas



tensiones en las superficies de contacto por rugosidad por carencia de lubricante. Este efecto se muestra en la figura 36.

Es importante mencionar que la sobrelubricación de los rodamientos también puede ocasionar un efecto negativo. Esto puede ocasionar una presión demasiado alta y por consiguiente un incremento en la temperatura de operación, y/o daños en los componentes del rodamiento, como la jaula o los propios rodillos. Esto también puede ocasionar rotura o fatiga en los sellos, repercutiendo en fugas de lubricante. Por esto mismo, se sugiere utilizar el modelo de diagnóstico de falla propuesto en las tablas XVI y XVII para determinar la condición real del equipo previo a la lubricación. Rivera y Palacio (2008), lo menciona claramente: “Cuando un rodamiento esta sobrelubricado, y los sellos no son “soplado”, ahí puede haber una presión alta y esto lleva a un aumento de la temperatura, que causa una avería del lubricante. Si un sello se rompe, el lubricante puede llenar la cavidad del motor o la bomba. Esto puede causar otros fracasos” (p.34).

Finalmente, González. B (2015) concluye en su trabajo titulado: “Comparación de la efectividad de las técnicas de ultrasonido pasivo y análisis de vibraciones en la detección de fallas incipientes en rodamiento”; mediante el análisis de los datos obtenidos, concluye que la técnica de ultrasonido pasivo es más efectiva en la detección de fallas incipientes en rodamientos que la técnica de análisis de vibraciones, aun así la técnica de vibraciones permite ver su espectro la evolución de la falla con mayor claridad, no así la técnica de ultrasonido. Es decir, que la técnica de ultrasonido brinda mejores resultados de análisis en cuanto a la detección temprana de fallas para rodamientos de baja revolución, lo cual tiene una mejor efectividad para la detección de averías en rodamientos, de manera que establece un mejor panorama sobre el estado real del elemento en análisis.

Analizando el modelo de diagnóstico propuesto en este trabajo, se puede establecer una línea base en decibeles que brinda una guía para la alerta temprana de prevenir los distintos modos de falla mencionados. Como falta en la hermeticidad en la empaquetadura o una falla asociada por fatiga por rayado y/o descascarillado en el propio rodamiento, estos efectos son provocados por una lubricación inadecuada. Tal y como menciona Rivera (2008), referente a las fallas falta de lubricante: “Las cargas normales de rodamientos causan deformación elástica de los elementos en el área de contacto que dan una suave distribución elíptica. Pero las superficies de los rodamientos no son perfectamente suaves. Por este motivo, la distribución de la tensión actual en el área de contacto se ve afectado por rugosidad arbitraria a la superficie. En la presencia de una película de lubricante en la superficie del rodamiento, hay un método de amortiguamiento en la distribución de tensión y la energía acústica producida se baja”. (p.33)



## CONCLUSIONES

1. Se implementó un sistema de rutas de monitoreo por condición aplicando la tecnología ultrasónica basado en la detección temprana de distintos modos de falla potencial en la estación de sellado de la selladoras SIEBLER HM1E-500 y NOACK N921.
2. Se identificaron rutas de monitoreo por condición, determinando la criticidad de los distintos modos de falla de la estación de sellado de la selladora SIEBLER HM1E-500 y NOACK N921, obteniendo con esto los puntos de medición, la herramienta a utilizar, las frecuencias de medición y los posibles efectos de las fallas.
3. Se determinaron los criterios de aceptación y parámetros de operación, de acuerdo con el análisis de los resultados, estableciendo una línea base definida para la selladora SIEBLER HM1E-500: fue de 21 dB; para la blisteadora NOACK N921: fue de 30 dB.
4. Se determinó la confiabilidad de esta etapa del proceso de sellado para ambos equipos, mediante la detección temprana de anomalías utilizando el modelo de diagnóstico de falla propuesto.



## RECOMENDACIONES

1. Para la implementación de la tecnología ultrasónica para el diseño de rutas de monitoreo por condición, es necesario tomar en cuenta que los sistemas deben ser de baja revolución, con frecuencias de operación entre 25 a 40 kHz. Las rutas deben identificarse y diseñarse en condiciones de operación normal.
2. Previo a la identificación de rutas de monitoreo por condición en un sistema, es necesario considerar la realización de un análisis de criticidad basado de modo de falla, para establecer prioridades en la implementación de la tecnología ultrasónica.
3. La determinación de los criterios de aceptación y parámetros de operación brinda una guía para realizar acciones de lubricación preventivas, así reducir la probabilidad de falla. Sin embargo, estos dependerán de los factores externos a los que está sometido el equipo, como velocidad del equipo, presión de sellado y temperatura.
4. Debe aplicarse el modelo de diagnóstico propuesto en los demás sistemas y equipos críticos para incrementar la confiabilidad de estos, considerar la identificación y diseño de las rutas de monitoreo derivados de los límites de alerta temprana detectados con la aplicación de la tecnología ultrasónica.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Acevedo, A. (2012). *Modelo para la implementación de mantenimiento predictivo en las facilidades de producción de petróleo*. Santander, España. Universidad Industrial de Santander.
2. Altmann, C. (2007). *Las técnicas de monitoreo de condición, como herramienta del mantenimiento proactivo*. Buenos Aires, Argentina. Adine.
3. Amendola, L. (2001). *Indicadores de confiabilidad propulsores en la gestión del mantenimiento*. Valencia, España. Universidad Politécnica Valencia España.
4. Autar, R. (2008). *An Alternative and (More) Effective Methodology for Idler Condition Monitoring to Enhance*. Hay St. Subaico, Australia.
5. Bernal, W. (2013). *Determinación de la rutina de mantenimiento predictivo como resultado del análisis de muestras de aceite usado para un motor de combustión interna marca John Deere modelo 6081*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de ingeniería.
6. Emmanuele, J. y Murphy, T. (2014). *Monitorización de rodamientos a baja velocidad*. Cobourg, Ontario. Preditécnico.



7. Fuentes, F. (2010). *Ultrasonido: una técnica predictiva muy versátil en el mantenimiento*. Talca, Chile. Universidad de Talca.
8. García, L. (2004). *Manual de operación, diseño y propuesta de implementación del programa de monitoreo por condición en la planta San Miguel de Cementos Progreso, S. A.* Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de ingeniería.
9. González, B. y Quispe, R. (2015). *Comporación de la efectividad de las técnicas de ultrasonido pasivo y análisis de vibraciones en la detección de fallas incipientes en rodamientos*.
10. Goodman, M. (2008). *Ultrasonic tips on monitoring bearings for proper lubrication and wear*. Elmsford, NY. UE Systems, Inc.
11. Hernández, D. (2005) *Análisis del modo y efecto de las fallas potenciales aplicado a un caso de estudio*. México D.F. Universidad Nacional Autónoma de México.
12. Jiménez, D. (2017). *Implementación del método de análisis de falla en componentes mecánicos*. Bogotá, Colombia. Fundación Universitaria Los Libertadores.
13. Pereira (2011). La detección de ultrasonido: *Una técnica empleada en el mantenimiento predictivo*. Scientia et Technica Año XVII, No 47, Colombia. Universidad Tecnológica de Pereira.

14. López, E. (2011). *La industria farmacéutica y su proyección en el sistema de salud en Guatemala. Programa de formación de auditores en buenas prácticas de manufactura farmacéutica*. Ciudad de Guatemala. Universidad del Valle de Guatemala.
15. Messer, A. (2011). *Using ultrasound to improve lubrication practices*. Elmsford, NY. UE Systems.
16. Murphy, T. (2015). *Using Ultrasound for Effective Inspection of Slow Speed Bearings*. [en línea] Reliabilityweb.com.
17. Olarte, W. y Botero, M. (2011). *La detección de ultrasonido: Una técnica empleada en el mantenimiento predictivo*. Scientia et Technica año XVII, No 47. Pereira, Colombia. Universidad Tecnológica de Pereira.
18. Pedrouzo, J. y Quintero, N. (2009). *La aplicación del ultrasonido como tecnología complementaria en un plan de mantenimiento predictivo*. Sevilla, España. Universidad de Sevilla.
19. Rimoldi, C. y Mundo, L. (2012). *Ensayo no destructivo por método de ultrasonido*. Sevilla, España. Facultad de Ingeniería, Departamento de Aeronáutica.
20. Rivera, J. y Palacio, J. (2008). *Implementación de programa de mantenimiento predictivo mediante la técnica de ultrasonido de la cooperativa colanta Ltda*. Antioquia, Colombia. Universidad de Antioquia.

21. Rosales, G. (2012). *Estudio de ultrasonido propagado en aire en área de cuda*. Querétaro, México. Universidad Tecnológica Querétaro.
22. The Timken Company. (2015). Análisis de daños en los rodamientos Timken y guía de referencia de lubricación.
23. UE Training Systems. (1997). Airborne ultrasound Level I. Elmsford, NY. UE Systems, Inc.
24. Vélez, J. (2003). El análisis de fallas como una técnica de mantenimiento preventivo. Medellín. INDISA Online.

## ANEXOS

Tabla XVIII. **Matriz de coherencia**

	Preguntas de investigación	Objetivo	Presentación de resultados	Conclusiones	Recomendaciones
CENTRAL	¿Cómo se puede incrementar la confiabilidad de los equipos en la etapa de sellado de la planta Bayer, S. A.?	Utilizar tecnología ultrasónica para el diseño de rutas de monitoreo por condición, para los rodos de sellado de sobre y blíster en la planta de producción Bayer, S. A. para mejorar la confiabilidad de los equipos.	Durante el desarrollo de la investigación se utilizó la tecnología ultrasónica y se interpretaron los resultados de las mediciones realizadas desde febrero de 2018 hasta marzo 2019, se observó que existieron anomalías en el funcionamiento de los rodamientos de sellado, donde se pudo identificar las variaciones que indican posibles fallas por desgaste, esto permitió poder tomar acciones preventivas para conservar el correcto funcionamiento de los equipos analizados e incrementar la confiabilidad de estos.	Se implementó un sistema de rutas de monitoreo por condición aplicación la tecnología ultrasónica basado en la detección temprana los distintos modos de falla potencial en la estación de sellado de la selladoras SIEBLER HM1E-500 y NOACK N921.	Para la implementación de la tecnología ultrasónica para el diseño de rutas de monitoreo por condición, es necesario tomar en cuenta que los sistemas deben ser de baja revolución, con frecuencias de operación entre 25 a 40 kHz. Las rutas deben identificarse y diseñarse en condiciones de operación normal.
1	¿Qué se necesita para conocer el estado de condición de los rodamientos de sellado utilizando la técnica de ultrasonido en dos selladoras?	Identificar las rutas de monitoreo para los rodamientos de las estaciones de sellado de dos selladoras.	Para la identificación de rutas de monitoreo por condición, primero se realizó un análisis de criticidad para identificar los modos de falla en las estaciones de sellado. Se utilizó un detector ultrasónico para realizar mediciones por medio de módulo de contacto fueron realizadas con un rango de frecuencia de entre 25 a 40 kHz en los puntos de contacto establecidos. La línea base para la selladora SIEBLER HM1E-500 fue de 21 dB, y para la blisteadora Noack N921 fue de 30 dB	Se identificaron rutas de monitoreo por condición determinando la criticidad de los distintos modos de falla de la estación de sellado de la selladora SIEBLER HM1E-500 y NOACK N921, obteniendo con esto los puntos de medición, la herramienta a utilizar, las frecuencias de medición y los posibles efectos de las fallas.	Previo a la identificación de rutas de monitoreo por condición en un sistema, es necesario considerar la realización de un análisis de criticidad basado de modos de falla, de manera de poder establecer prioridades en la implementación de la tecnología ultrasónica.

	Preguntas de investigación	Objetivo	Presentación de resultados	Conclusiones	Recomendaciones
2	¿Cuáles son los criterios de aceptación y parámetros de operación de los rodamientos de las estaciones de sellado?	Determinar los criterios de aceptación y parámetros de operación de los rodamientos de las estaciones de sellado.	Para la determinación de los criterios de aceptación y parámetros de operación se tomó como base el historial de mediciones realizadas a lo largo de un año para establecer la línea base de operación y las acciones preventivas necesarias para regresar los puntos críticos encontrados a valores aceptables. Los límites de alarma baja y alarma alta fueron de 28 y 36 dB para la selladora SIEBLER HM1E-500 correspondientemente y 37 y 45 dB para la blisteadora NOACK N921	Se determinaron los criterios de aceptación y parámetros de operación de acuerdo con el análisis de los resultados, estableciendo una línea base definida para la selladora SIEBLER HM1E-500: fue de 21 dB; para la blisteadora NOACK N921: fue de 30 dB.	La determinación de los criterios de aceptación y parámetros de operación brinda una guía para realizar acciones de lubricación preventivas y reducir la probabilidad de falla. Sin embargo, debe tomarse en cuenta que estos criterios dependerán de los factores externos al cual el equipo está sometido, como velocidad del equipo, presión de sellado y temperatura. Se debe realizar una segunda verificación para garantizar que los parámetros sean certeros, y las acciones sean efectivas.
3	¿Qué beneficios tiene un sistema sostenible de rutas de inspección por condición?	Evaluar la confiabilidad de los equipos mediante un modelo de diagnóstico de falla, mediante límites de alerta temprana y línea base.	Para definir el modelo de diagnóstico, se analizaron las anomalías detectadas durante las mediciones para determinar los inicios de falla. De esta manera, se establecieron las acciones de lubricación preventivas para regresar las lecturas en dB a parámetros normales de operación.	Se evalúa la confiabilidad de esta etapa del proceso de sellado para ambos equipos, mediante la detección temprana de anomalías utilizando el modelo de diagnóstico de falla propuesto.	Debe aplicarse el modelo de diagnóstico propuesto en los demás sistemas y equipos críticos para incrementar la confiabilidad de estos, considerar la identificación y diseño de las rutas de monitoreo derivados de los límites de alerta temprana detectados con la aplicación de la tecnología ultrasónica.

Fuente: elaboración propia.