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

GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO CON LA TÉCNICA DE ENSAYO DE VIBRACIÓN MECÁNICA PARA DETECCIÓN DE FALLAS EN LA CAJA HORIZONTAL H7, UBICADA EN EL TREN DE LAMINACIÓN DE UNA INDUSTRIA SIDERÚRGICA GUATEMALTECA

Ing. Douglas Adolfo Rodas López
Asesorado por el MSc. Carlos Estuardo Caballeros

Guatemala, junio de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO CON LA TÉCNICA DE ENSAYO DE VIBRACIÓN MECÁNICA PARA DETECCIÓN DE FALLAS EN LA CAJA HORIZONTAL H7, UBICADA EN EL TREN DE LAMINACIÓN DE UNA INDUSTRIA SIDERÚRGICA GUATEMALTECA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA

FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ING. DOUGLAS ADOLFO RODAS LÓPEZ

ASESORADO POR EL MSc. CARLOS ESTUARDO CABALLEROS GARCÍA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

GUATEMALA, JUNIO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
DIRECTOR	Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADORA	Inga. Rocío Carolina Medina Galindo
EXAMINADOR	Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortiz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO CON LA TÉCNICA DE ENSAYO DE VIBRACIÓN MECÁNICA PARA DETECCIÓN DE FALLAS EN LA CAJA HORIZONTAL H7, UBICADA EN EL TREN DE LAMINACIÓN DE UNA INDUSTRIA SIDERÚRGICA GUATEMALTECA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, con fecha 04 de junio de 2019.

Ing. Douglas Adolfo Rodas López

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser la fuerza impulsora que le da razón y sentido a mi existencia.
Mis padres	Wilfredo Rodas y Thelma López de Rodas. Su amor estará siempre acompañándome.
Mi esposa	Karen Zamora, por ser parte de mi existencia y modeladora de vida.
Mis hijos	Pedro y Paola Rodas Zamora. Por ser los dos motores generadores de motivación; espero marquen amplia brecha superándome en todos los aspectos positivos de la vida.
Mi hermano	Wilfredo Rodas, por ser parte de mi origen y por estar siempre ahí sin importar la distancia que nos separa.
Mis amigos	Luis Ambrosio, Melvin Ventura y Boris Sacalxot, por ser compañeros y darnos apoyo durante el arduo camino.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por darme nuevamente la oportunidad de un impulso en mi vida.
Escuela de Estudios de Postgrado	Por brindarme nuevos conocimientos y herramientas de análisis que contribuyen a formar criterio racional y objetivo.
Facultad de Ingeniería	Por ser mi origen profesional, el lugar que marcó la diferencia.
Mi asesor	MSc. Carlos Estuardo Caballeros, por acompañarme y apoyarme en las diferentes etapas de mi vida, muchas gracias por todo.
Mis compañeros de trabajo	Ing. Byron Aroche y Lic. Carlos Patzán, por darme la oportunidad de seguir aprendiendo y ser parte del selecto equipo del Departamento de Mantenimiento.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES V
LISTA DE SÍMBOLOS IX
GLOSARIO XI
RESUMEN XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS XV
OBJETIVOS XIX
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO XXI
INTRODUCCIÓN XXV

1. MARCO TEÓRICO 1
   1.1. Industria siderúrgica 1
   1.2. Proceso de laminación 4
   1.3. Tren de laminación 6
   1.4. Mantenimiento 8
   1.5. Mantenimiento predictivo 9
   1.6. Técnica de vibración mecánica 10
      1.6.1. Diagnóstico de la condición 14
      1.6.2. Tabulación de datos 17
      1.6.3. Formulación de tendencias 18
   1.7. Método de solución de fallas diagnosticadas por la técnica 19
      1.7.1. Fallo por el sistema de lubricación 20
      1.7.2. Fallo por desalineamiento de ejes 23
   1.8. Normas internacionales 26

1.8.1. Norma ISO 10816-3 26
1.8.2. Norma ASTM 943-D 30

2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN 33

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS 37
3.1. Objetivo 1: identificar fallas mayormente recurrentes en el punto de apoyo del cojinete de lado acople de la caja reductor H7, utilizando la técnica del análisis de vibración mecánica 37
3.1.1. Caja reductora H7 37
3.1.2. Puntos de inspección de caja reductora H7 41
3.1.3. Tabulación de datos e inspección preliminar 44
3.1.4. Formulación de diagrama de Pareto 46
3.1.5. Formulación de tendencias 52
3.2. Objetivo 2: analizar las técnicas de solución correctiva aplicadas a los fallos recurrentes, encontradas con vibración mecánica para el reductor H7, fallo contaminación de aceite y desalineamiento de ejes 62
3.2.1. Confirmación de fallo en el lubricante 62
3.2.2. Descripción del método de mejora en el lubricante 67
3.2.3. Confirmación de fallo en linealidad de eje 72
3.2.4. Descripción del método para alinear ejes y reporte posterior al mejoramiento 78
3.3. Objetivo 3: describir los beneficios por implementación de la técnica de análisis de la vibración mecánica reduciendo el aparecimiento de fallas y tabulando recurrencia promedio de valores de amplitud y formulación de tendencias 83

3.3.1. Tabulación de datos posterior a la aplicación de los métodos 83
3.3.2. Formulación de tendencias, posterior al mejoramiento 84
3.4. Objetivo general: proponer una gestión de mantenimiento preventivo con la técnica de análisis de vibración mecánica para determinar fallas en la caja reductora H7 de una industria siderúrgica 86
3.4.1. Análisis de resultados de la propuesta 87
3.4.2. Crear una cultura para control y sostenibilidad del muestreo de aceite e inspecciones de alineación láser 91
3.4.3. Determinar consecuencias e impactos de tiempos improductivos en el proceso de laminación de barra corrugada 91
3.4.4. Propuesta para presentar la gestión de mantenimiento preventivo como modelo para otros modelos preventivos 93

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS 95
4.1. Localización 95
4.2. Variables 97

CONCLUSIONES 101
RECOMENDACIONES 103
REFERENCIAS 105

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Configuración de un tren de laminación…… 5
2. Relación amplitud-frecuencia de la vibración.....8
3. Análisis de vibración 11
4. Instrumento vibrotest 80.....12
5. Puntos propuestos para el análisis de vibración 13
6. Espectro de problemas de desbalance.....14
7. Modelo básico de espectro de desalineación de ejes.....15
8. Modelo básico de daño en rodamiento por fallo de lubricación 16
9. Ondas de vibración conteniendo información de fallas.....19
10. Rodillos laminadores como fuente de vibración.....20
11. Central oleodinámica UL2, lubricación caja H7.....22
12. Sistema de filtración de aceite 23
13. Desalineamiento de ejes y generación de fuerza centrífuga.....24
14. Kit de componentes de instrumento alineador láser 25
15. Efecto de viscosidad e índice de oxidación según horas uso 31
16. Carcasa de reductor H7 39
17. Componentes mecánicos de caja reductora H7…….....40
18. Daño histórico de rodamiento de expulsión de elemento cilíndrico 42
19. Puntos para inspección de vibración mecánica, reductor H7.....43
20. Diagrama de Pareto con espectros de vibración mecánica 51
21. Media muestral de intervalos de confianza, distribución normal 52
22. Distribución normal área sin sombrear correspondiente a "Z"…… 53
23. Distribución normal y ecuaciones de intervalos de confianza 54

24. Secuencia para instalación de herramientas de análisis de datos 55
25. Función de análisis de datos, opción estadística descriptiva 57
26. Campos obligatorios de análisis de estadística descriptiva..... 58
27. Cálculo de intervalos de confianza..... 60
28. Tendencia preliminar modelo de vibración de fallo lubricante…… 61
29. Tendencia preliminar modelo de desalineamiento de ejes..... 62
30. Kit necesario para muestreo de aceite 64
31. Comportamiento de viscosidad y paquete de aditivos 68
32. Contaminantes de partículas metálicas..... 69
33. Acople de reductor H7 entre motor eléctrico y caja reductora..... 73
34. Elemento elastómero dañado de reductor H7 74
35. Reporte preliminar de linealidad de reductor H7 76
36. Interpretación de tolerancias y rangos del instrumento 79
37. Reporte posterior al procedimiento de alineación láser..... 82
38. Tendencia posterior al mejoramiento de fallo en lubricación…… 85
39. Tendencia posterior al mejoramiento de modelo de desalineamiento de ejes..... 86
40. Asignación porcentual de daño en el lubricante 87
41. Correderas de bancada para motor eléctrico 90
42. Daño de pista de rodadura interna 94

TABLAS

I. Operativización de variables XXIII
II. Registro de recurrencia y amplitud de espectros 17
III. Clasificación de zonas de severidad vibratoria, grupo 3 28
IV. Clasificación de severidad y grupos norma ISO 10816-3..... 29
V. Lista desplegable de catálogo de expertos…….....45
VI. Recurrencia de modelos de espectro, etapa preliminar 48
VII. Promedio de amplitud de onda vibratoria, reductor H7…… 49

VIII. Desarrollo del análisis de Pareto…… 50
IX. Modelos de vibración de valores promedio mensual 56
X. Cálculos de función de análisis de datos, ambos espectros 59
XI. Tabulación preliminar que incluye límites 61
XII. Reporte preliminar de severidad del aceite y recomendaciones 65
XIII. Niveles de contaminación del aceite reductor H7 66
XIV. Conteo de partículas contaminantes 69
XV. Mejora en la calidad del lubricante 71
XVI. Mejora en el registro y conteo de partículas 71
XVII. Intervalo de tolerancia del instrumento alineador láser 75
XVIII. Comparativo de espectros entre capas 84
XIX. Cálculo de tiempo improductivo 92

LISTA DE SIMBOLOS

Símbolos	Significado
Cu	Cobre
σ	Desviación estándar
ºF	Grado Fahrenheit
Fe	Hierro
x̄	Media muestral
Mn	Micrómetro
mm	Milímetro
mm/s	Milímetros por segundo
%	Porcentaje
“	Pulgadas

GLOSARIO

Anomalía	Cambio o desviación respecto de lo que se considera normal, regular o permisible.
Desplazamiento RMS	Es la medición desde el centro de referencia o punto de reposo hasta la posición de máximo desplazamiento en doble sentido o pico a pico.
Esfuerzo mecánico	Fuerzas a las que se somete un componente de un mecanismo.
Fuerza centrífuga	Fuerza que tiende a alejarse del centro del eje de rotación.
Grado de carbono	En los aceros es un factor que eleva su resistencia a la tracción e incrementa el índice de fragilidad.
Laminación	Deformación plástica de un material que circula en una dirección que origina fuerzas de compresión: esta puede aplicarse tanto en caliente como en frío.
Palanquilla	Barra de acero crudo, cuya utilidad consiste en la factibilidad de transporte para su procesamiento.

Reductor H7	Sistema de engranajes cuya configuración logra reducir la velocidad de un motor eléctrico, aumentando la fuerza en la salida.

RESUMEN

El propósito de este estudio es describir el proceso de mantenimiento basado en condición, utilizando la técnica de análisis de vibración mecánica como método de detección de fallas que puedan interrumpir el proceso de laminación de barra en una industria siderúrgica, y el análisis de los resultados alcanzados.

El problema principal que se identificó fue la imposibilidad de pronosticar fallas que provoquen paros de producción de barra, daños colaterales en otros equipos, e incumplimiento de fechas de entrega de la barra corrugada. El enfoque de la investigación es de tipo mixto, con diseño no experimental, de alcance y descriptivo.

Por lo tanto, el objetivo general de la investigación fue proponer una gestión de mantenimiento preventivo con la técnica de ensayo de vibración mecánica para detección de fallas en la caja horizontal H7, ubicada en el tren de laminación de una industria siderúrgica guatemalteca. La metodología propuesta fue realizar un plan de muestreo preliminar, luego una delimitación de fallas utilizando el método de Pareto, que permita mostrar la condición en el que se encuentra el equipo mediante formulación de tendencias, la aplicación de métodos de mejoramiento, lo que da paso al muestreo posterior a la mejora y la presentación de las nuevas tendencias.

Los resultados de la aplicación de la técnica de vibración mecánica y el registro de modelos de espectro demostró ser una forma ordenada de mejorar el control del estado de la condición del equipo en relación con su lubricación y alineación de ejes, reduciendo la onda vibratoria, el proceso estandarizado de

implementación reduce la probabilidad de falla total en el rodamiento del lado del acople en el reductor H7.

En conclusión, uno de los beneficios al aplicar la metodología fue reducir el aparecimiento del modelo de fallo por lubricante en un 34 % con un intervalo de amplitud de 1.8 y 2.49 mm/s y en de falta de paralelismo 63 %, con valores entre 1.8 y 2 mm/s amplitud vibración.

Se recomienda establecer un plan con inspecciones trimestrales como acompañamiento para el presente estudio, así como la posibilidad de ampliarlo a otras cajas reductoras del mismo tren de laminado para lograr reducir fallos y paros no deseados o quiebras de ritmo.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PREGUNTAS ORIENTADORAS

- Planteamiento del problema

Una planta de laminación de barras es un proceso en línea desde el horno de recalentamiento hasta la cama de enfriamiento, implica que todos los equipos tienen que estar disponibles para el recorrido del acero, en el caso de la caja reductora H7 la falta de comprensión de las causas que generan fallas, así como un método que permita anticiparlas es un problema que acompaña el modelo de gestión de mantenimiento actual.

- Descripción del problema

La configuración mecánica del equipo analizado en el presente trabajo es compleja se compone de acoples, cojinetes y engranes, el registro de fallas demuestra que el rodamiento del lado del acople con el motor eléctrico ha fallado a lo largo del tiempo se ha identificado como causa la falla recurrente por lo que el análisis del presente trabajo se centra únicamente en dicho punto sin tomar en cuenta el resto de los dispositivos de la caja reductora.

Debido a que la caja reductora opera durante todo el tiempo asignado para producción, laminando barra corrugada que va desde 10 mm. Hasta 29 mm. El registro confirma el acompañamiento de la falla para todos los diámetros manifestada con ruido excesivo, alto niveles de vibración y temperatura, disparo

de las protecciones del motor eléctrico hasta llegar a detener la máquina totalmente por daño en el cojinete.

Es posible mencionar algunas consecuencias de interrumpir el proceso por una falla inesperada en planta, cuando una caja de laminación se detiene abruptamente dispara el resto del tren ocasionando atascamiento dentro de los rodillos, para poder liberar y preparar el paso del acero nuevamente es necesario utilizar soldadura de oxicorte cortando los diferentes tramos incrustados.

Debido al tiempo consumido en la actividad anterior provoca que las palanquillas que se encuentran dentro de la recamara del horno se fundan unas con otras, formando un bloque compacto para desatascar operación de mucho riesgo ya que puede causar daño en el ladrillo refractario de la estructura y peligro para el personal asignado para la realización de la tarea.

La vibración mecánica para la caja reductora se gestiona como servicio tercerizado en forma trimestral siguiendo la instrucción del diseño del equipo y las recomendaciones desde el montaje, los reportes de la inspección son generados basado en la norma internacional ISO 10816-3 con cuatro niveles de calificación para el estado de la condición normal, aceptable, ligeramente aceptable y severo, los informes presenta recomendaciones para mejorar la condición las cuales en su mayoría no son tomadas en cuenta.

Como se ha mencionado el tiempo para el mantenimiento únicamente se reduce a unas cuantas horas a la semana por lo que se toman en consideración únicamente las recomendaciones con carácter de severo algunas acciones pueden realizarse durante el trimestre y otras vuelven a aparecer en los informes posteriores sin cambiar el estado de la condición.

- Formulación del problema

Para plantear un modelo de mantenimiento preventivo para la caja reductora H7 es necesario dar respuesta a algunas preguntas. De la descripción de los problemas anteriores emana la pregunta general.

¿Cómo la técnica de ensayo de análisis de vibración mecánica como mantenimiento preventivo mejorará el rendimiento de la caja reductora H7 del tren de laminación en una industria siderúrgica guatemalteca?

- Las preguntas de investigación son:

    - ¿Qué fallas son las mayormente recurrentes en el rodamiento del punto de apoyo del acople en la caja reductora H7, utilizando el análisis de vibración mecánica?

    - ¿Qué técnicas de solución correctiva se pueden aplicar a las fallas encontradas en el análisis de vibración mecánica de la caja reductora H7, problemas de lubricación y alineación de ejes?

    - ¿Qué beneficios tiene la aplicación de la técnica de análisis de vibración para mejorar la compresión de la operación de la caja reductora H7?

OBJETIVOS

General

Proponer una gestión de mantenimiento preventivo con la técnica de ensayo de vibración mecánica para detección de fallas en la caja horizontal H7, ubicada en el tren de laminación de una industria siderúrgica guatemalteca

Específicos

- Identificar las fallas mayormente recurrentes en el rodamiento del punto de apoyo del acople en la caja reductora H7, utilizando el análisis de vibración mecánica.

- Analizar las técnicas de solución correctiva que se pueden aplicar a las fallas encontradas en el análisis de vibración mecánica de la caja reductora H7, problemas de lubricación y alineación de ejes.

- Describir los beneficios que conlleva la implementación de la técnica de análisis de vibración mecánica. reduciendo el aparecimiento de fallas, tabulando su recuento y promedio en la amplitud, y formulando tendencias con limite central que permitan evidenciar valores fuera de rango.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

El presente trabajo de investigación se sustenta en un estudio de tipo no experimental con un enfoque mixto, lo que permite establecer una propuesta para el desarrollo de un modelo de análisis de vibración mecánica, el cual ayudará a la organización a mejorar el entendimiento sobre el estado de la condición de su caja reductora H7, relaciona variables cuantitativas y cualitativas que surgen de los distintos procesos de manufactura de barra corrugada, los cuales son laminados por el equipo. Por medio de un estudio descriptivo correlacional se busca demostrar las características de un modelo de gestión de mantenimiento predictivo basado en la obtención de modelos de onda que corresponden a determinado tipo de falla, con lo que se busca obtener los resultados esperados mediante la relación de las variables en estudio.

Para desarrollar el presente trabajo investigativo se hizo uso de herramientas propuestas en el entorno ingenieril como estadísticas de instrumentación predictiva, análisis de aceite y de Office, las cuales buscan evidenciar los modelos de fallas con mayor probabilidad de impacto en la producción, técnicas de inspección de vibración y de alineación de ejes, uso de laboratorio para evaluación de la calidad del aceite, y la utilización de herramientas computacionales que establezcan cálculos de la manera más exacta y ordenada. Los resultados buscan evidenciar la condición inicial de la máquina y desde allí realizar el punto para proponer los métodos que permitan mejorar el estado del equipo.

Los beneficiarios del presente proyecto son los propietarios y empleados en dos áreas: los gestores de mantenimiento, quienes son los responsables de

mantener en condiciones operativas el equipo y el personal del departamento de producción, quienes podrán operar un tren de laminación estable con un proceso más continuo; esto conlleva a un mejoramiento en los beneficios económicos para la organización.

Se toma para el estudio toda la población debido a que se analizaron e incluyeron a los empleados involucrados en las inspecciones responsables del sostenimiento de la parte técnica.

Las variables utilizadas fueron las actividades involucradas y la reducción en el aparecimiento de los modelos de espectro de ondas en el escenario anterior a los métodos de mejora y posterior a ellos, así como la disminución de los valores de amplitud vibratoria. El resumen y detalle de las variables y los indicadores utilizados se muestran en la siguiente tabla.

La gestión de mantenimiento preventivo se origina en el departamento de mantenimiento central de la planta de laminaciòn, el cual planifica, programa y ejecuta tareas que permiten mantener la operatividad del proceso de laminaciòn; la propuesta es alcanzar los cuatro pilares del mantenimiento autónomo durante el periodo 2019 – 2024 y proponer el concepto en todas las plantas del parque industrial.

Busca reducir costos por paros no programados, asì como quiebras de ritmo, los cuales impactan directamente en los costos de producciòn, reduciendo los márgenes de utiidad anual, evidenciando una muy buena oportunidad de mejora dentro del proceso industrial.

Tabla I. **Operativización de variables**

OBJETIVO	VARIABLE	TIPOS DE VARIABLES	INDICADOR	TÉCNICAS	PLAN DE TABULACIÓN
Identificar las fallas mayormente recurrentes en el rodamiento del punto de apoyo del acople en la caja reductora H7, utilizando el an{alisis de vibración mecánica	Recuento de modelos de fallas	Cuantificativa, discreta e independiente	Número de espectros de vibración	Observación directa, medición, instrumentación, reporte software, instrumentos	Observación directa
Analizar las técnicas de solución correctiva que se pueden aplicar a las fallas encontradas en la revisión de la vibración mecánica de la caja reductora H7, problemas de lubricación y alineación de ejes.	Técnicas y métodos correctivos	Cuantitativa, continua e independiente	Amplitud de onda vibratoria mm/s	Valor medido por instrumentación	Organización y tabulación de datos
Evaluar los beneficios que trae la implementacion de la técnica de análisis de vibración, para mejorar la comprensión de la operación de la caja reductora H7	Tiempo útil lubricante y rodamiento y elementos elastómero acople	Cuantitativa, continua e independiente	Reducción de aparecimiento de modelos de onda vibratoria	Gráficos de tendencia de los promedios	Tabulación de datos y gráficas

Fuente: elaboración propia.

Las fases que se ejecutaron fueron cuatro: en la primera se realizó la revisión documental; en la segunda, la evaluación del estado situacional del procedimiento de cambio de los modelos de espectro de vibración mecánica; en la tercera, los métodos de corrección y en la cuarta, se tabularon y mostraron los beneficios obtenidos por la implementación de la metodología.

El trabajo investigativo no se enfoca en la media muestral debido a que considera el total de la población de datos obtenidos en las dos inspecciones, tanto en la preliminar como la posterior al método de mejora; se apoya para el

análisis en la herramienta estadística del diagrama de Pareto; adicionalmente se complementa con observación y entrevistas.

Modelo análisis de vibración mecánica:

El modelo propuesto que se desarrolla en la presente investigación se establece mediante inspección preliminar, análisis de vibración mecánica que permite la tabulación de datos (recurrencia de espectros y amplitud de onda) los cuales originan la formulación del diagrama Pareto - tendencias adicional y reportes de confirmación para su posterior tratamiento de corrección de fallos (falta linealidad y contaminación ferrosa) luego desarrollar una etapa posterior de inspecciones de análisis de vibración mecánica reportería y formulación de tendencias finales.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación expone la sistematización de un mantenimiento basado en condición utilizando la técnica del análisis de vibración mecánica para el reductor H7 del departamento de laminación. La investigación propone captura y tabula datos utilizando instrumentación que dé lugar a herramientas estadísticas como Pareto y formulación de tendencias y métodos de mejoramiento. El procedimiento se complementa con reportes de laboratorio de control de lubricantes y del software del instrumento alineador dando paso a la descripción de los métodos de mejora, con la realización de una segunda inspección, reportería y formulación de tendencias, buscando crear un método para reducir el aparecimiento de fallas catastróficas que provoquen tiempos muertos en el proceso de laminado de barra.

El problema que se resuelve en la presente investigación se deriva de dar solución al entorno de un mercado siderúrgico que cuenta con plazos de entrega muy cerrados, específicamente cuando se atienden proyectos de obra civil de gran envergadura; este factor obliga al cumplimiento de órdenes de producción con la calidad esperada en el menor tiempo posible; se presenta la necesidad de reducir y prevenir fallas del tipo catastrófico que detengan el proceso; por lo tanto, resulta importante mejorar la metodología de detección para optimizar el momento correcto de intervención, siendo este uno de los principales beneficios y aportes de la investigación.

Los resultados surgen del procedimiento coherente de detección fallas que muestra el nivel de deterioro en el reductor H7 o mejor aún, anticipan fallos incipientes que permiten el mejoramiento y control de la gestión de

mantenimiento, reduciendo la incertidumbre y la probabilidad de paro total en el proceso de laminado de barra, beneficiando los indicadores claves de desempeño global.

El esquema de solución se ensayó para la discusión de resultados e identificación de fallas de mayor peso evidenciadas por medio de un diagrama de Pareto, proponiendo métodos de corrección que son de importancia para un mantenimiento basado en condición, con la técnica del análisis de vibración mecánica; esto permite alcanzar un procedimiento estandarizado para lograr el mejoramiento del equipo reductor H7 confirmado por medio de una segunda inspección, reportes de laboratorio, software especializado y la formulación de tendencias.

El aporte del presente trabajo de investigación consistió en la aplicación de la técnica de análisis de vibración mecánica, con lo que se estableció un procedimiento adecuado para implementar los métodos de mejoramiento que permitieron la reducción de los efectos negativos de la vibración mecánica. El diseño de estudio es no experimental, debido a que no se realizaron pruebas de laboratorio ni experimentos.

La metodología de la investigación se planteó con un enfoque mixto, es decir, cualitativo y cuantitativo; el alcance y el tipo de la investigación fue de tipo descriptivo, se dejó estandarizado y documentado el proceso de cambio de aparecimientos de espectros de vibración mecánica y de sus niveles de amplitud; en el reductor de velocidad H7 se registraron los resultados.

En el primer capítulo se describe el marco teórico, el cual incluye temas como Industria siderúrgica, tren de laminación, mantenimiento preventivo y predictivo, análisis de vibración mecánica y normas ISO. En el segundo se

presenta el desarrollo de la investigación, la cual se basó en técnicas metodológicas de la investigación y análisis de datos hasta la puesta en marcha de la misma, resultados obtenidos del análisis situacional, la implementación detallada de la metodología y los resultados.

En el tercer capítulo se realiza la presentación de resultados en función de los objetivos del marco metodológico de la investigación; se desarrollaron las etapas de inspección, mediante método estadístico del diagrama de Pareto la delimitación de los problemas, formulaciones de tendencias, confirmación de falla mediante reportes antes y después de los métodos de resolución de los problemas, contaminación de aceite y desalineamiento de ejes, así como una explicación detallada de los métodos de limpieza de lubricantes por medio de filtrado externo y alineación con tecnología láser.

Se propone una cultura organizacional para el sostenimiento de la gestión de mantenimiento preventivo con los planes del análisis de lubricantes y alineación de ejes, se determinan consecuencias asociadas a tiempos improductivos estimando horas totales de paro, y se propone la extensión del modelo a otros centros productivos.

El cuarto capítulo presenta la discusión de resultados, análisis interno y externo obtenidos en el transcurso de la investigación sobre el enfoque propuesto para una gestión de mantenimiento preventivo, utilizando la técnica del análisis de vibración mecánica.

1. MARCO TEÓRICO

Con el objetivo de dar forma y estructura al desarrollo de la presente investigación, se presentan fundamentos teóricos a sus temas relacionados describiendo industria siderúrgica, proceso de laminado, tren de laminación, mantenimiento y mantenimiento predictivo. Adicionalmente, se describen temas específicos como el análisis de vibración mecánica, conceptos sobre modelos de espectros y su relación directa con el pronóstico de fallas.

1.1. Industria siderúrgica

Proceso industrial de transformación del acero cuyo objetivo es producir perfil estructural para el negocio de la construcción, presentando diferentes grados de dureza y tipos de acabado. El método de producción en su modelo más básico es la fundición de chatarra clasificada, cumpliendo con recetas de formulación y proporciones adecuadas de ferroaleaciones y sales fundentes.

La composición debe establecer la formulación química respetando el grado de dureza relativo al carbono y a las propiedades mecánicas las cuales deben cumplir rangos de tolerancias en relación con esfuerzos mecánicos como fluencia, ductilidad y tenacidad establecidas en norma internacional, según McCormac (2012) modificando porcentajes de manganeso, cobre, silicio y níquel es posible alterar la cantidad de carbono en el acero estructural.

La fundición se elabora en hornos construidos con materiales refractarios que tienen la capacidad de operar con altos valores de temperatura, tienen un diseño capaz soportar un arco eléctrico generado y controlado en su interior por

3 columnas o pilotes solidos de carbón que describen un movimiento reciprocante.

Por medio de transmisión mecánica de biela sincronizada respecto de cada una de las fases de un sistema trifásico de alta tensión de corriente alterna, se consigue una descarga de energía de gran magnitud, logrando el efecto de fundición de chatarra con los elementos químicos contenidos dentro de la recámara del horno.

Cuando el contenido cambia de estado sólido a líquido es vertido en moldes especiales, los cuales se posicionan consecutivamente bajo la olla de fundición; estos pueden ser trasladados hacia estibas para enfriamiento y almacenamiento, o pueden realizar el proceso de colada continua el cual consiste en arrastrar la palanquilla hacia un horno de recalentamiento.

El grupo de arrastradores traslada los bloques de acero hacia un sistema automatizado de boquillas que utilizan gas argón para realizar cortes a medida; esta sección deberá trabajar bajo un estricto cumplimiento de longitudes de 6, 9 y 12 mt, para hornos de recalentamiento y 25 mt, cuando el acero es trasladado en rastras o vagones de tren hacia procesadoras externas.

La industria siderúrgica presenta un esquema de producción optimizado, ya que tiene un aprovechamiento del acero en varias presentaciones; algunas se realizan utilizando calor y otras pueden realizarse en frío, Según Bowles (1984) la producción de barra corrugada, perfiles como angular, hierro cuadrado, platina tipo hembra, alambrón corrugado, entre otros, obligan al recalentamiento del alambre galvanizado, clavo, figuración de acero para corte y doble, malla electrosoldada y malla ciclón para muro perimetral.

La operación siderúrgica necesita un adecuado flujo de proceso para el optimizar el calor del horno de fundición debido al costo de la energía eléctrica que esto representa; para reducir costos debe hacerse fuera de los horarios pico, pues el costo del kilovatio hora es menor, utilizando el resto de las 24 horas para reparaciones correctivas, mantenimiento preventivo, mejoramiento en proyectos de innovación, capacitación al personal, entre otros.

El análisis de este giro de negocio ha demostrado que el transporte en el abastecimiento a plantas de fundición o de producto terminado es considerado un desperdicio que genera costos ocultos; debido a problemas de logística obliga a mantener la operación dentro de un parque industrial ubicado cerca de vías terrestres despejadas, líneas férreas y puertos marítimos.

El proceso industrial en Guatemala ha sido de gran beneficio por la necesidad de mano de obra que genera oportunidades laborales a lo largo del tiempo. Debido a la automatización industrial, cada vez es mayor la presencia en plantas como acería, trefilado y prearmado estructural, donde ya se dispone de un conteo y empaque del producto terminado de última generación.

Lamentablemente esto puestos se han ido perdiendo en función de la confiabilidad de estos sistemas; adicional a la reducción del riesgo y el peligro para la persona, este sistema de atadoras utiliza programas de código de barras y etiquetado que permite saber en tiempo real el ritmo de producción y los niveles de reorden de inventarios, el posicionamiento exacto de cada producto estibado en el *layou*t de la bodega de producto terminado. Es importante describir el nivel de contaminación de cualquier industria siderúrgica y del poco o nulo involucramiento en el tema en relación con emisión de gases con monóxido de carbono generado en sus hornos y del tratamiento y manejo del ácido clorhídrico,

el cual en los últimos tiempos ha cobrado relevancia en las gerencias a nivel mundial.

Algunos ejemplos de sistemas de control de contaminación son: rejillas de ionización, las cuales se comportan como filtro de atrapamiento de hollín, que reciben una evacuación a un acumulador desde las chimeneas de emisión de gases, y para el caso del ácido clorhídrico se propone un sistema de filtrado por cortinas tipo exclusas para dosificar cáusticos y cloro, complementado con sistemas de floculación en forma de serpentines con ingresos especiales para dosificación de polímeros sillicos y soda cáustica, que buscan la reducción de niveles de alcalinidad, acidez y dureza del agua, que posteriormente ingresan a una planta de tratamiento aireada previa al retorno a la naturaleza.

1.2. Proceso de laminación

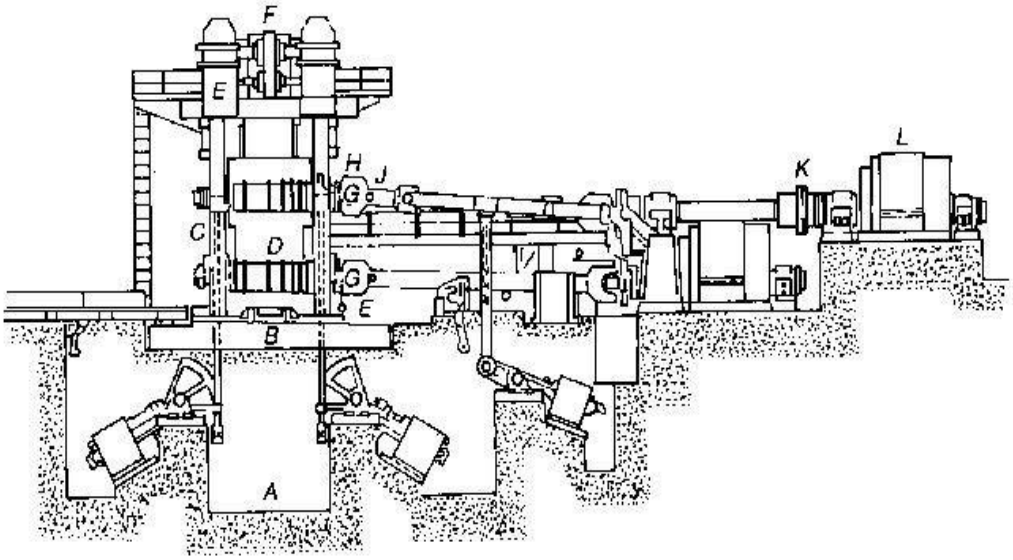
El proceso de laminación de barra corrugada es uno de los subsiguientes dentro del macroproceso de producción siderúrgica; este utiliza un horno de recalentamiento que en su lado de ingreso aparece una estructura denominada cama donde se descansa la palanquilla horizontalmente; luego es empujada por medio de cilindros hidráulicos con movimientos sincronizados.

La temperatura es un parámetro muy importante, ya que el proceso se rige con norma internacional y es regulado por medio de un sistema inteligente estructurado en dos etapas: la primera se denomina de precalentamiento gradual y la segunda de igualación; cada una de ellas cuenta con un grupo de quemadores que alternan la flama hacia el acero.

La calidad de la flama se puede modular entre los estados oxidante, carburante y neutro, los cuales impactan en el cumplimiento de especificaciones

establecidas relativas a esfuerzos mecánicos que luego son evaluados y medidos en laboratorios a lo interno de la industria y auditados por agentes externos.

Figura 1. **Configuración de un tren de laminación**



A Pozo de cascarilla
B Bancada de asiento
C Castilletes
D Cilindros
E Tornillos de presión
F Transmisión
G Trefiles
H Chocolateras
J Alargaderas
K Acoplamientos de los motores
L Motores de accionamiento

Fuente: BIRTLH (2008). *Trenes de laminación.* Consultado el 12 de noviembre de 2021. Recuperado de https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/DFM/TFM/TFM08/es_DFM_TFM08_ Contenidos/website _115_trenes_de_laminacin.html.

La radiación de calor dentro de la recámara es autorregulable; depende del ritmo de producción; el sistema funciona de la siguiente manera: sensores ubicados a la salida del horno sirven de comparadores, comunicándose con el control lógico programable que gobierna toda la secuencia de quemadores y circuito hidráulico de los empujadores de palanquilla.

El proceso de evacuación de palanquilla del horno de recalentamiento se conoce como deshornado; le sigue una etapa denominada reducción gruesa, la cual se lleva a cabo en el tren del desbaste; siguen los trenes intermedio y acabador donde se da una reducción más fina y por último la barra ingresa al tren acabador, donde se le da la característica forma de corruga.

El proceso finaliza con el enfriamiento y el corte a medida en frío; para realizar estas últimas etapas la barra es arrastrada por medio de unos rodillos especiales nitrurados, desde el tren de laminación hasta la cama de enfriamiento; un sistema de galope por contrapesos va desplazando y al mismo tiempo enfriando la barra. posicionándola para lograr el corte en frío.

1.3. Tren de laminación

Un molino laminador básico tiene el siguiente orden de componentes: motor eléctrico, acople, caja reductora, dos transmisiones (superior e inferior) y por último los dos rodillos laminadores de barra; un conjunto de molinos forma lo que se conoce dentro del ramo siderúrgico como un tren de laminación de barra o perfil en caliente.

La configuración de este tipo de procesos se describe a continuación: al inicio aparece una familia de molinos robustos, los cuales pueden hacer una reducción gruesa; en la parte intermedia aparece un grupo de molinos con un torque mediano, realizando una reducción intermedia en el área transversal; al final se encuentran los molinos acabadores haciendo un trabajo más fino que es dar el figurado y corruga.

El número de molinos laminadores y sus velocidades son variables que dependen del diámetro de producción, el grado de dureza en función del %

carbono, según Moffit (1992) la molienda puede realizar una deformación plástica del acero de tal forma que cada molino agregue valor al proceso del conformado con calor en el paso de la palanquilla, hasta obtener la barra corrugada.

El proceso debe respetar la relación entre ritmo de producción y el parámetro temperatura; el camino del acero por los molinos laminadores no debe de realizarse debajo de los 1150 grados centígrados; a este valor la deformación plástica no genera altos valores de torque que tengan como consecuencia generación de esfuerzos mecánicos.

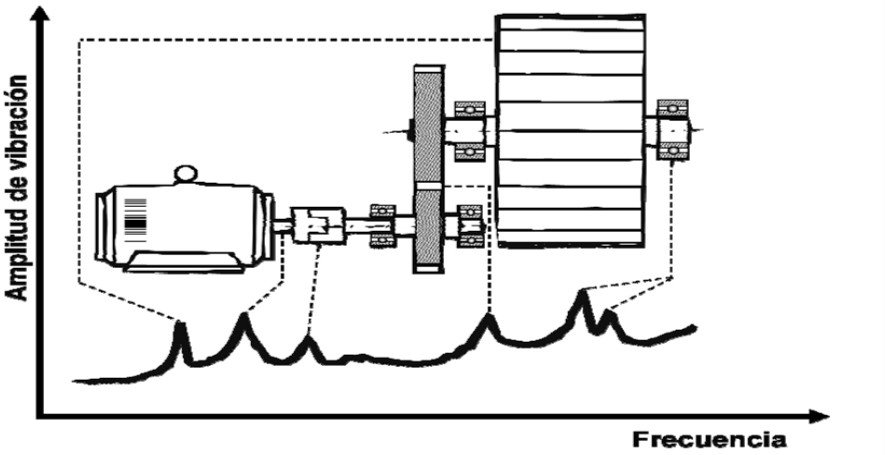
La configuración del proceso debe hacerse siguiendo pasos ya establecidos en relación con la reducción del área transversal de la palanquilla, según sea el diámetro de producción, así por ejemplo cuando el producto final es una barra delgada de 3/8” el equivalente a 10 mm. Lleva un total de catorce molinos laminadores comparados con una barra de 1 1/8”, equivalente a 27 mm. En este caso únicamente se utilizan 8 pasos de laminación.

Una configuración de este tipo trabaja en estricto apego a la sincronización de velocidades angulares desarrolladas en los rodillos de laminación; el concepto lleva por nombre regulación tipo cascada generada por un control lógico programable maestro que gobierna los variadores de velocidad o cuadro de inversores, compuestos de transistores bipolares de compuerta aislada.

Estos dispositivos tienen la capacidad de gobernar la máquina durante las cuatro etapas de laminado, primer estado del reposo del molino; esto lo realiza utilizando una función gradiente que manipula una delicada pendiente de ascenso de velocidad; en la segunda etapa el equipo ingresa a la sincronización de velocidades con el resto del tren.

En la tercera etapa se tiene el ingreso de palanquilla en los rodillos laminadores, generando el efecto de descompensación y reduciendo las revoluciones por minuto medidos por medio de dinamos tacométricos, los cuales envían señal hasta el control lógico programable para que este genere y compense las velocidades. En la última etapa se presenta la salida de la parte final de la palanquilla del molino laminador, generando el efecto de incremento de velocidad del molino que queda en vacío, lo que se conoce en planta como desboque de motor; el control lógico programable compensa equilibrando la velocidad para el ingreso de la nueva palanquilla en el mecanismo.

Figura 2. **Relación amplitud - frecuencia de vibración**



Fuente: Plusformación.com. (s.f). *Introducción al estudio de vibraciones mecánicas.* Consultado del 17 de noviembre de 2021. Recuperado de https://plusformacion.com/recursos/r/vibraciones-mecanicas.

1.4. Mantenimiento

Altos niveles de exigencia impuestos obligan a establecer una forma correcta para mantener los componentes, los equipos y las líneas de una planta de producción, listos para el momento en que la operación así lo demande; este

concepto se denomina disponibilidad, una gestión de mantenimiento correcta debe buscar que los activos cumplan las funciones para las cuales fueron diseñados, adquiridos y luego instalados.

Para definir el mantenimiento se propone describir cuatro etapas: dos de ellas son establecidas en un modelo tradicional y las últimas buscan la evolución de las técnicas de prevención; es importante remarcar que una organización debería buscar los medios que contribuyan a alcanzar los objetivos empresariales, buscando un buen desempeño y ser competitivo a todo nivel.

La primera de estas etapas en el círculo reactivo inherente a cualquier sistema de producción es el aparecimiento imprevisto de la falla; la segunda es el mantenimiento planificado; este se describe mediante una relación directa entre probabilidad de fallo y antigüedad del equipo; la tercera es la preventiva; aquí aparecen las técnicas modernas del tipo predictivo. El análisis de falla cambia la labor de mantenimiento, pues asegura la función de proceso sobre la base de la criticidad; se formula una matriz de criticidad a conveniencia de la organización. La cuarta de mayor trascendencia aplica conceptos como una intervención basada en condición; por lo tanto, crea la optimización de los recursos.

1.5. Mantenimiento predictivo

Pascual (2002) describe cómo las técnicas del mantenimiento predictivo tratan de evitar y contribuyen a reducir fallas potenciales o funcionales, minimizando la probabilidad de generar costos asociados a intervenciones de las máquinas; técnicamente dichos costos son trasladados a 3 rubros:

- La adquisición de los instrumentos.

- La capacitación y tecnificación constante de personal de responsabilidad.
- La retención del talento humano que ha desarrollado la expertiz y el conocimiento necesario para detectar fallos con anticipación.

Toda organización seria debería llevar una gestión de activos con base en:

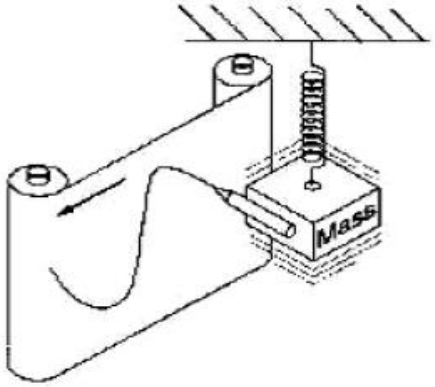
- El cumplimiento de pólizas de seguros.
- Un desempeño constante en los equipos buscando el cumplimiento de estrictas especificaciones de norma.
- Debido a estudios que ha demostrado que el equipo tiene un alto impacto en las finanzas de la organización.
- Reducción de costos de mantenimiento, extendiendo la vida útil de componentes y partes.

Un plan de mantenimiento predictivo ofrece dos ventajas: pronosticar el estado de la condición actual y por lo tanto alargar el tiempo de operación de las máquinas, y en el caso de que el equipo presente fallas, acompañar su evolución hasta que el intervalo de tiempo en el que el mantenimiento preventivo programado tome vigencia, permitiendo la opción de alternar variables y optimizar los paros en planta.

1.6. Técnica de vibración mecánica

Torres (2000) expone el concepto del comportamiento de vaivén de una máquina o cualquier elemento que la compone, hacia cualquier dirección del espacio desde su propio punto de equilibrio; a continuación, se muestra la actuación del resorte sobre el modelo y la forma básica de registro sobre el papel, análogo a lo que realiza la instrumentación en la técnica de análisis de vibración mecánica.

Figura 3. **Análisis de vibración**



Fuente: Plusformación.com. (s.f). *Introducción al estudio de vibraciones mecánicas.* Consultado del 17 de noviembre de 2021. Recuperado de https://plusformacion.com/recursos/r/vibraciones-mecanicas.

En la figura 3 se observa una masa a la que se pega un lápiz que vence un resorte; en condiciones ideales esta se suelta logrando un movimiento reciprocante o de vaivén que puede trazar sobre un papel que se va desenrollando a velocidad constante; muestra un trazo senoidal con una amplitud positiva hacia arriba y negativa hacia abajo, a la cual se le denomina desplazamiento pico a pico o por sus siglas en inglés valor RMS.

La gráfica formada por el mecanismo se denomina desplazamiento-tiempo y por definición se establece que la primera derivada relaciona velocidad del movimiento, y la segunda, la aceleración; el punto más positivo del desplazamiento de velocidad es mínimo, pero su aceleración es máxima; luego en el punto de origen la velocidad es máxima y su aceleración es mínima.

Para efectos de investigación se tomarán los espectros utilizando instrumentación existente en planta. Un analizador de vibraciones vibrotest 80 y

un sensor de contacto CDX A 60; este cuenta con la capacidad de registro en lo relativo a daños a baja y alta frecuencia, es decir los que se generan en las jaulas de los rodamientos.

Figura 4. **Instrumento vibrotest 80**

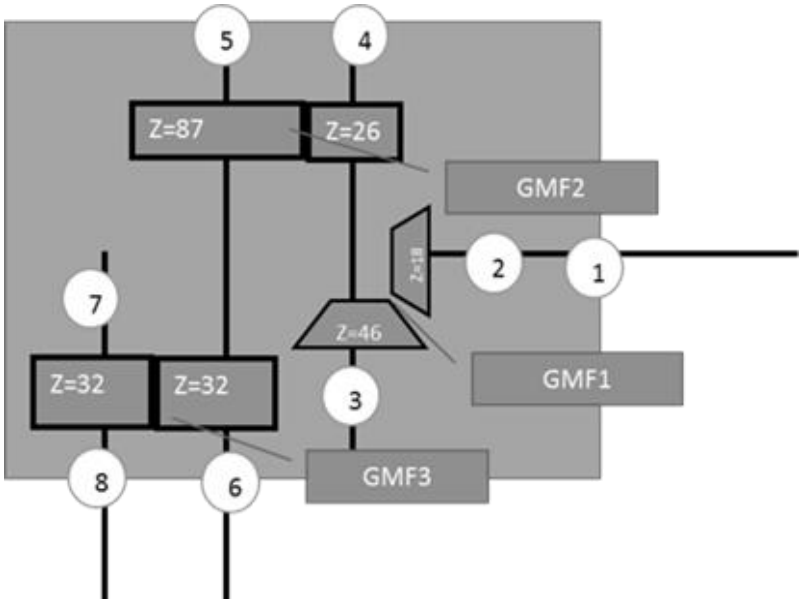
Fuente: DIRECTV Industry. (2019). *Vibroport 80 & Vibrotest 80*. Recuperado de https://www.schenck-usa.com/products/product-finder/product-detail-page/vibroport-80-vibrotest-80.html

La figura 4 representa la instrumentación a la que se le pueden configurar rutas de inspección mediante un software; previamente se estructura un mapeo respecto de los puntos más importantes de los cuales se pretende llevar registro para la formulación de un histórico; luego de haber hecho la toma de datos es posible regresar al servidor de enlace entre el instrumento y el analizador de datos.

El instrumento tiene funciones como alarmas, comentarios de ruta, eventos con anotaciones, eventos transitorios capturados, datos y estadísticas de ruta, apartado para poder importar imágenes en los informes; es posible crear bibliotecas con datos importantes como frecuencias espectrales de falla, cálculo de alarmas según la geometría, frecuencia de giro, y carga axial.

El punto de ingreso de potencia del motor eléctrico a la caja reductora será el que sostendrá todo el estudio ya que los registros históricos presentan una mayor cantidad de fallos debido a que los elementos rodantes del cojinete han salido expulsados de su jaula, en consenso con el personal a cargo se propone tomar de aquí el espacio muestral.

Figura 5. **Puntos propuestos para análisis de vibración**



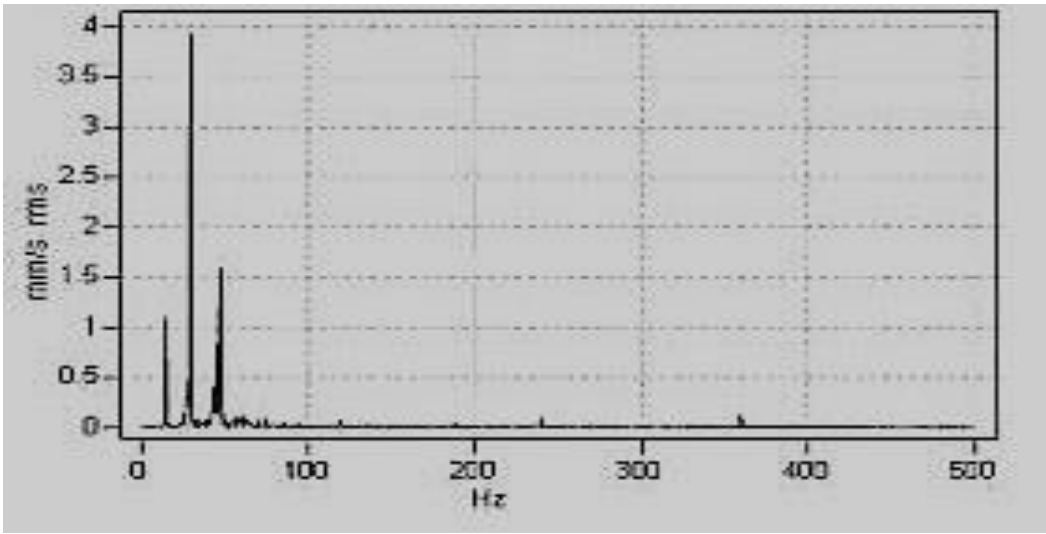
Fuente elaboración propia, empleando Visio.

1.6.1. Diagnóstico de la condición

Torres (2013) describe las aplicaciones de sensores y detalla que una de las más populares es la utilizada en la técnica de vibración mecánica; además, se encuentra en el mantenimiento predictivo de máquinas rotatorias o de efecto reciprocante; los datos obtenidos mediante el procesamiento de la señal de los sensores revelan información del funcionamiento del equipo.

A continuación, se presenta un resumen de fallos más comunes: el primer desbalance aparece en máquinas que trabajan a altos valores de giro, provocando una fuerza centrífuga radial hacia afuera y transfiriéndose a la bancada de empotramiento, teniendo como origen la excentricidad en el rotor; la onda vibratoria es senoidal, con frecuencia de excitación igual a la de rotación.

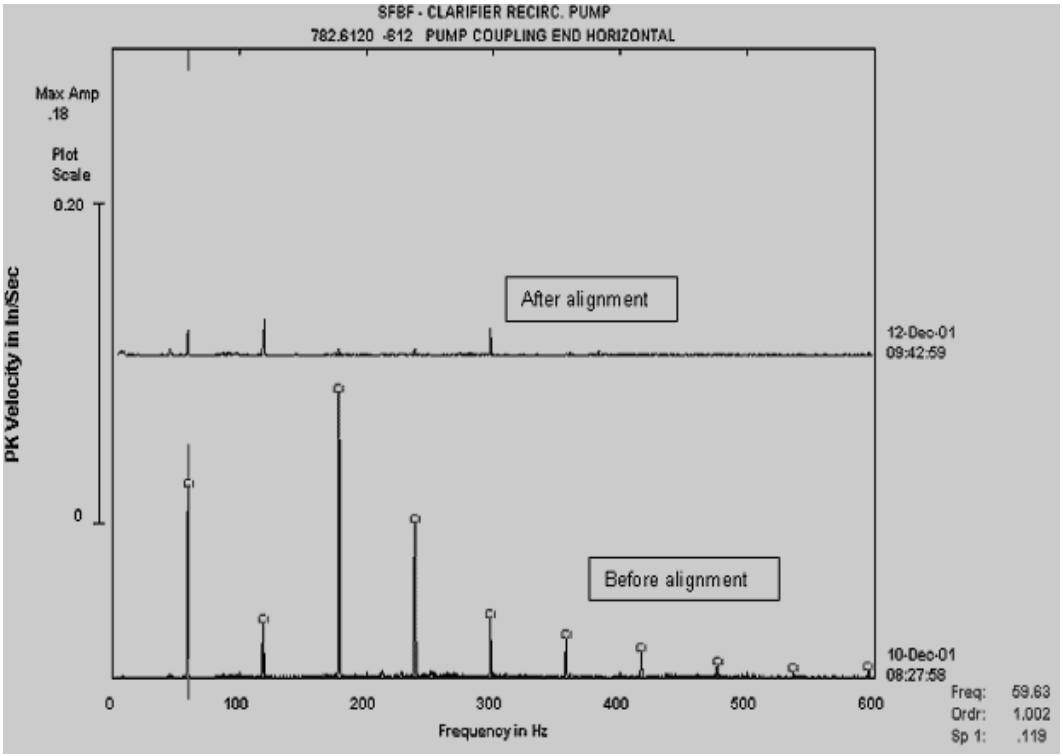
Figura 6. **Espectro de problema de desbalance**



Fuente: BlogSEAS (2016). *Desequilibrios en máquinas detectados en señales de vibraciones*. Consultado el 10 de noviembre de 2021. Recuperado de https://www.seas .es/blog/ automatizacion/desequilibrios-en-maquinas-detectados-en-senales-de-vibraciones/.

Según Torres (2000) el desalineamiento es un problema común debido a la dificultad de alinear dos ejes con masas robustas, de modo que generen fuerzas que produzcan vibraciones; la identificación del fallo se describe como el aparecimiento de picos a velocidad de giro y en casos más drásticos a dos o tres veces esta velocidad.

Figura 7. **Modelo básico de espectro de desalineación de ejes**



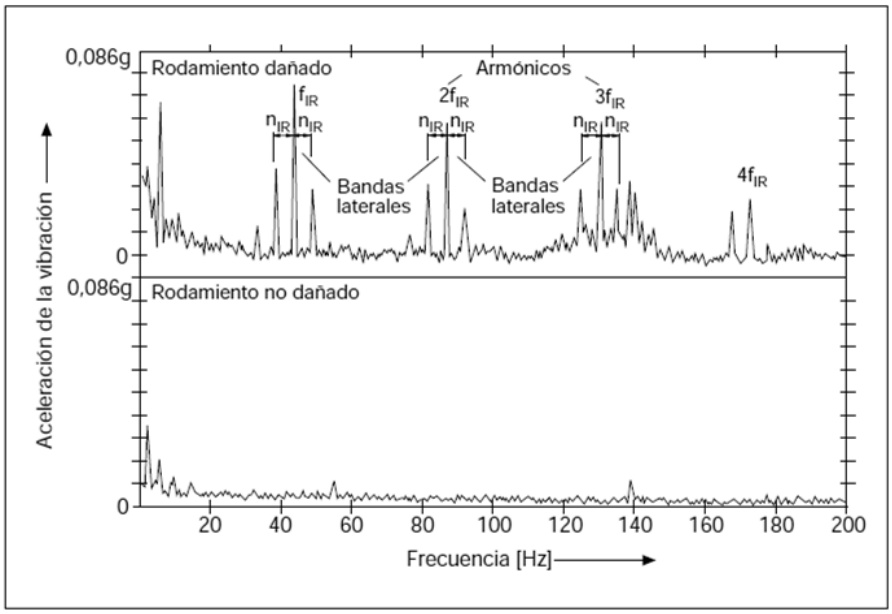
Fuente: Blogspot (2013). *Medidores de vibraciones mecánicas.* Consultado el 10 de noviembre de 2021. Recuperado de http://adqvibraciones.blogspot.com/2013/12/fallas-comunes-para-equipos-rotatorios.html.

Según Gamarra (2004) los daños más comunes en los cojinetes son: montajes inadecuados, poca lubricación, demasiada lubricación o lubricación inadecuada, rodamiento improcedente para la aplicación y ajuste o tolerancia

incorrecta, el elemento para el presente análisis tiene un rodamiento SKF 23048 CC/W33.

El desbalance mecánico es la fuente de vibración más común en sistema de elementos rotativos; todo rotor mantiene un nivel de desbalanceo residual; el hecho que estos generen vibraciones o no, dependen de que operen dentro de sus tolerancias de calidad establecidas en las normas para las características y velocidades del rotor en cuestión, según MetAs (2009).

Figura 8. **Modelo básico de daño en rodamiento por fallo de lubricación**



Fuente DOKUMEN (2020). *Averías de los rodamientos.* Consultado el 5 de noviembre de 2021. Recuperado de https://dokumen.tips/documents/fag-averias-de-los-rodamientos.html.

1.6.2. Tabulación de datos

Según Pascual (2002) la terminología falla es utilizada para describir las posibles formas en que un componente puede dejar de funcionar; además puede presentar varias maneras en las que ocurra el evento, el análisis de modos de falla puede hacer uso de distintos métodos como el descrito en el presente estudio, que se refiere al registro de los eventos que pueden ser detectados por el análisis de vibraciones.

A continuación, se presenta la tabla propuesta a gerencia de planta; en ella se tabulan modelos de espectro que representan determinado tipo de fallo a los que se expone cualquier máquina rotativa en el desempeño de su operación, se registra recurrencia y amplitud de datos que, posteriormente sirven para formular un diagrama de Pareto.

Tabla II. **Registro de recurrencia y amplitud de espectros**

Plan vibración mecánica Reductor H7 inspecciones preliminar y posterior a métodos de mejora					
Fecha	Soltura mecánica	Desalineamiento ejes	Fallo lubricación.	Desbalance	Resonancia

Fuente elaboración propia.

1.6.3. Formación de tendencias

Según Walpole (1998) la presentación e interpretación de resultados aleatorios que ocurren en una investigación o estudio científico pueden ser de categorización o numéricos; el presente capitulo incluye un resumen breve del método para formación de tendencias y formulación de intervalos de confianza en secciones posteriores que explica de mejor forma la secuencia.

El análisis parte de la tabulación en la que se registra recurrencia y amplitud de los modelos de vibración mecánica, las mediciones se realizan con el instrumento en el punto de apoyo del rodamiento propuesto dentro de la configuración mecánica del equipo, desarrollado en dos etapas: la preliminar y posterior a las acciones correctivas de mantenimiento.

El método establece el uso de herramientas del office Excel con las que se busca realizar cálculos de forma ordenada; analítica y gráfica; una comprensión del estado de la condición del rodamiento al inicio del estudio buscar causas y raíces, las corrige y luego realiza los mismos cálculos en una etapa posterior a la corrección.

A partir de un modelo de distribución normal formado por los valores de vibración mecánica, se plantean límites para un intervalo de confianza mediante la siguiente formulación $LSE = X - Z * \sigma/\sqrt{n}$ y $LIE= X + Z * \sigma/\sqrt{n}$; se desarrolla una secuencia de dos pasos, cada uno con herramientas de office Excel.

Lo primero es la utilización del análisis de datos; se elabora una tabla que contenga valores de estadística descriptiva donde aparece el valor de la media X y el error típico $\sigma/\sqrt{n}$; luego el valor de Z se calcula por medio de la función

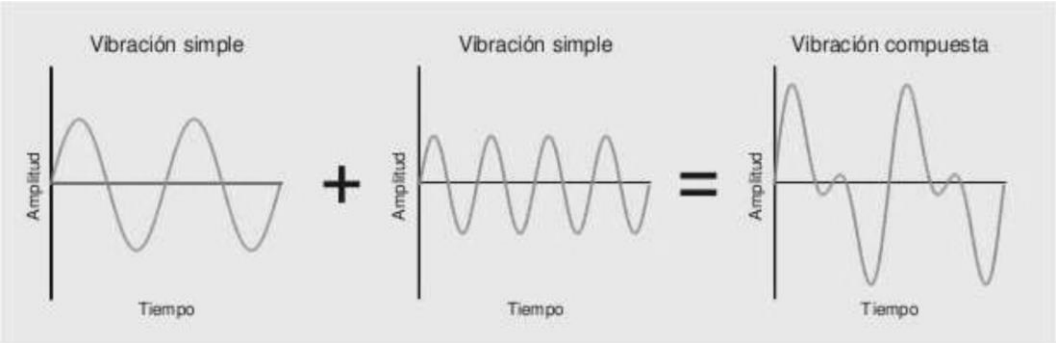
inv.dist.norm.invers, la cual proporciona el inverso del valor de la distribución normal; con estos tres valores ya se pueden encontrar los dos límites.

Posteriormente, se generan gráficas donde se evidencian los dos límites de confianza para apreciar qué tan dispersa se encuentra la distribución de datos. Se hace la comparación entre amplitudes de vibración en ambas etapas, para evidenciar si es factible o no la mejora, en relación con la solución de la causa - raíz de los modelos de espectro.

1.7. Métodos de solución de fallas diagnosticadas por la técnica

El objetivo es considerar resultados del plan de análisis de vibración mecánica, los cuales se evidencian por el diagrama de Pareto. Según el manual *Análisis de vibraciones* del grupo Elliot (2000) un espectro de onda de vibración es la sumatoria de vibraciones independientes conjuntas generadas por sus componentes internos en movimiento.

Figura 9. **Ondas de vibración conteniendo información de fallas**



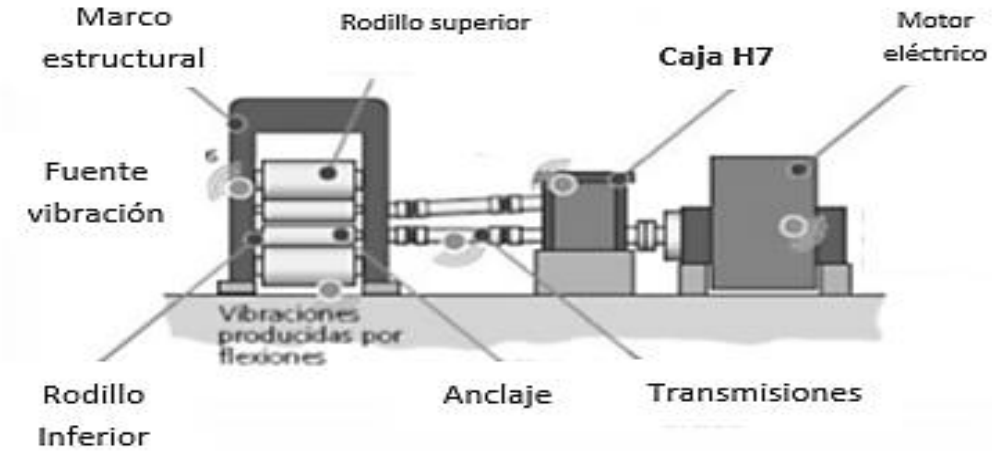
Fuente Power-MI (2011). *Vibración en maquinaria industrial.* Consultado el 12 de noviembre de 2021.Recuperado de https://power-mi.com/es/content/vibraci%C3%B3n-en-maquinaria-industrial.

1.7.1. Fallo por el sistema de lubricación

Según Duffuaa (2000) un análisis de rodamientos describe que solo un pequeño porcentaje de estos fallan por operación; por lo general duran en servicio más tiempo que la máquina que los tiene alojados; la mayor parte de cojinetes fallan por lubricante deficiente o inadecuado, contaminación, mala instalación por cruzamientos ocasionando, fatiga en los componentes del mismo como jaulas, elementos rodantes entre otros.

El presente estudio enfoca el análisis en el punto de apoyo del rodamiento; de acuerdo con experiencia compartida por el personal de responsabilidad del equipo, coincide la falla catastrófica de expulsión de los elementos rodantes de cojinete con atrancamientos de barra en proceso, entendiéndose que este realiza funciones de fusible mecánico.

Figura 10. **Rodillos laminadores como fuente de vibración**



Fuente: Imágenes y productos (2019). *Manual laminadora.* Consultado el 12 de diciembre de 2021. Recuperado de http://www.infomac.es/images/productos/342/Manual%20Laminadora.pdf.

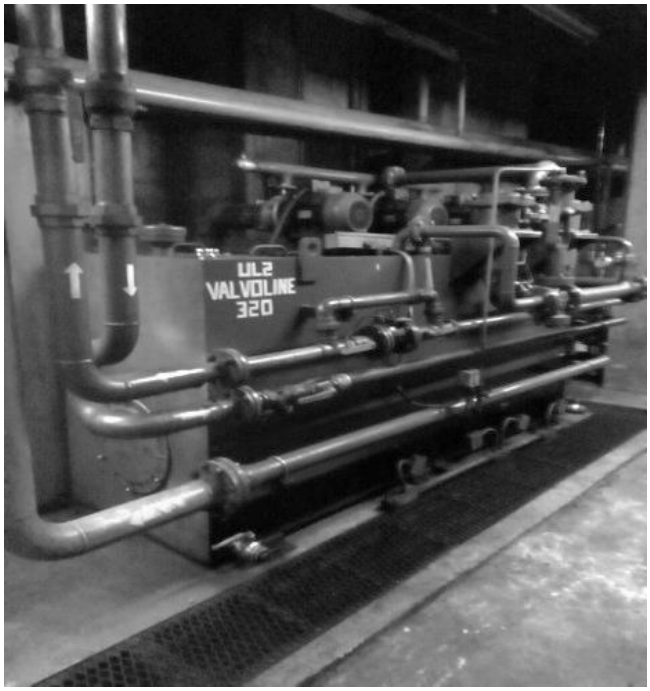
A continuación, se describen algunas condiciones adversas al buen funcionamiento de centrales de lubricación en siderúrgicas, altas temperaturas resultantes de la sumatoria de temperatura de proceso más la ambiental; este efecto genera condensación en las paredes del reservorio, así como la nube metálica permanente del proceso de desbaste.

De acuerdo con Trout (2019) para la contaminación metálica una buena regla general es que su filtro más fino tenga alrededor de 3 micrones para un fluido hidráulico y alrededor de 6 para los aceites de engranajes, por lo tanto, deben existir sistemas de filtración doble, uno para partículas gruesas y otro para las finas que lo complementan.

Según el manual de averías de FAG (2001) el establecimiento de un plan de monitoreo de la condición en los lubricantes y los equipos que protegen, es necesario para la toma de muestras, periódicamente; a partir del análisis de contaminantes se puede deducir el origen de procedencia, en el intervalo de tiempo establecido y con el estricto cumplimiento de normas.

El punto mecánico donde se centra el presente análisis es bañado por medio de aspersor, el cual recibe la inyección de un aceite AGMA 320; el trabajo de recirculación del lubricante es realizado por medio de una central oleodinámica con capacidad de 13.20 galones /h, salpicando el lubricante en el bloque de cajas denominado sección intermedia del tren de laminado.

Figura 11. **Central oleodinámica UL2, lubricación caja H7**



Fuente: [Fotografía de Douglas Rodas]. (Ciudad de Guatemala, Guatemala, 2021). Colección particular. Guatemala.

Según Tranter *et al.* (2013) los rodamientos igualmente reducen su vida por la mala lubricación o lubricación inadecuada, problemas de diseño como deslizamiento, brinco de los elementos al rodar por fisuras en sus pistas de rodadura y patinamiento; pueden ser detectados también con un plan de monitoreo de vibración mecánica.

Barnes (2014) propone que el análisis de aceite utiliza una prueba elemental; esta proporciona concentraciones expresadas en partes por millón de hasta 25 elementos, incluyendo metales que son indicativos de desgaste de la maquinaria, tales como hierro, plomo, estaño o cobre, elementos aditivos como el zinc, fósforo, calcio y contaminantes como el silicio y sodio.

Figura 12. **Sistema de filtración de aceite**

Fuente: [Fotografía de Douglas Rodas]. (Ciudad de Guatemala, Guatemala, 2021). Colección particular. Guatemala.

1.7.2. Fallo por desalineamiento de ejes

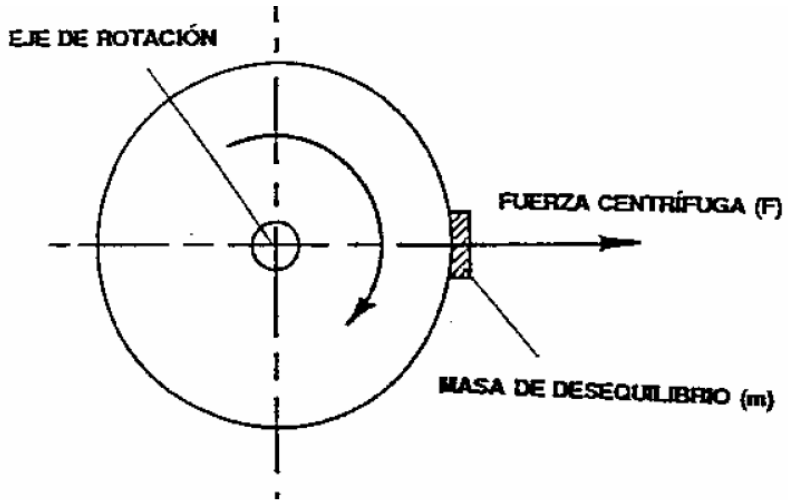
Gamarra (2004) propone que la simetría circular de un elemento rotativo tiene que cumplir un patrón sin irregularidad, distribuida equitativamente alrededor del eje de rotación; así la masa se encuentra en equilibrio y gira libre de vibración; si existe una proporción inadecuada a un lado del rotor, la fuerza centrífuga genera un desequilibrio empujando el rotor hacia el lado más pesado.

El fenómeno de la desalineación de ejes es una falla que puede ser diagnosticad. por medio de la técnica del análisis de vibración mecánica. La

organización en función de la cantidad de equipo adquiere un alineador con tecnología láser con una precisión que puede alcanzar décimas, centésimas y milésimas de milímetro.

El instrumento tiene tres aristas de análisis: la primera es en función de la linealidad entre los dos ejes caja reductora-motor eléctrico en el lenguaje del instrumento, a este se le denomina offset; la otra es en cuanto a lo concéntrico, qué tan adheridos están los dos labios de ejes alrededor de los 680 °F y una tercera que mide dicha distancia.

Figura 13. **Desalineamiento de ejes y generación de fuerza centrífuga**



Fuente Wikiland (2020). *Fuerza centrífuga.* Consultado el 5 de diciembre de 2021.Recuperado de https://www.wikiwand.com/es/Fuerza_centr% C3%ADfuga.

La figura muestra un eje cartesiano cuyo origen es el centro del eje de cualquiera de las dos máquinas; la linealidad consiste en lograr coincidir los dos planos cartesianos y sus orígenes, o al menos llevarlos a un valor de tolerancia basado en tablas internacionales que consideran valores de velocidad a la que está girando el equipo.

El k*it* que compone el instrumento alineador está integrado por dos sensores ópticos, los cuales se posicionan por medio de *brackets* o cadenas que rodean los ejes uno frente del otro; estos se consideran *hardware* del analizador, el cual se complementa con un iPad que recibe la señal vía infrarrojo y traduce la información por medio de un *software* de precisión.

Figura 14. **Kit de componentes de instrumento alineador láser**

Fuente Borbolla Metrology (2012). *Hamar L-705 para la alineación.* Consultado el 12 de diciembre de 2021. Recuperado de https://www.borbollametrology.com/hamar-705.html.

El procedimiento de alineación láser se describe detalladamente en las secciones posteriores, pero aquí se da una breve explicación de las dos formas de realizarlo: primero, es girando los dos ejes y buscando un recorrido de al menos 200 °, luego, se ubican los siguientes valores horarios 9, 12 15 y 18 h. Cualquiera de los dos aplicado de la forma correcta puede generar un reporte.

Es necesario cumplir los siguientes requisitos para lograr la linealidad de ejes, primero los agujeros de la bancada del motor eléctrico (equipo móvil por ser más liviano) tienen que ser mayores; es decir deben contar con una geometría en forma de óvalo, lo que se conoce como ojo chino, que permite las maniobras de desplazamiento requeridas por el instrumento.

Es necesario que la alineación cumpla con la horizontal, es decir que los dos equipos estén de frente y acoplados; es importante que las correderas sean funcionales para mover la masa de forma precisa; adicionalmente, se recomienda contar con un torquímetro que garantice la aplicación de la misma fuerza sobre la tornillería de la bancada.

1.8. Normas internacionales

La Organización Internacional de Normalización es una institución de carácter mundial cuyo origen se remonta al fin de la Segunda Guerra Mundial; es el organismo que rige y propicia el diseño de normas en el campo de la manufactura de productos o servicios, excluye lo concerniente a las especialidades eléctrica y electrónica; adicionalmente prioriza criterios de impacto ambiental. Inicialmente se componía de un total de 157 países representados por sus respectivas comisiones de gobiernos como de otras agrupaciones con el mismo interés; a pesar de ser un ente rector no es obligatoria la adherencia, por lo que cada país puede decidir ser miembro o no, así como el cumplimiento de las mismas.

1.8.1. Norma ISO 10816-3

Alguna de las principales ventajas de gestionar correctamente un plan de análisis de vibración mecánica para una organización es una notable reducción de costos por daños de componentes, reducción de tiempos improductivos y daños colaterales. La presente norma internacional define los valores de severidad de fallo permisibles por causa de vibración mecánica.

La importancia de esta reglamentación es tomada en cuenta incluso para equipos críticos como turbogeneradores, sistemas de turbinas en industria de

aviación y refrigeración industrial, marítima entre otros. Implica que, al no tener recomendación específica del fabricante respecto de un nivel de severidad de vibración en determinado componente, la norma se toma como referencia en forma de onda y amplitud para sus niveles de prealarma y alarma.

La probabilidad de fallo en la maquinaria será inherente a cualquier proceso productivo; la norma es una referencia que permite detectar fuentes de problemas con anticipación para actuar antes de una falla catastrófica; también evalúa la intervención del equipo hasta un paro de planta programado, siempre que se respeten las condiciones ambientales en las que opera el activo.

La técnica basada en la norma se utiliza en maquinaria rotativa o con movimiento reciprocante; se realiza a plena marcha con la instrumentación adecuada y traduce el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de su punto de equilibrio; la medición se realiza en la carcasa que sirve de alojamiento a rodamientos o mediante aplicaciones especiales; además, toma referencia de frecuencias de giro en engranes.

Este criterio es usado cuando no se dispone de información acerca del comportamiento vibratorio de la máquina, o se ha realizado algún cambio de una pieza debido a alguna intervención y se desea comenzar con un historial desde cero para formar tendencia; el método consiste en encasillar la máquina que se desea evaluar dentro de los grupos propuestos y la flexibilidad de la suportación; luego se mide la amplitud de la vibración, ya sea en desplazamiento o velocidad RMS.

Para verificar los valores de amplitud en los que se encuentra la máquina, a continuación, se presenta la clasificación:

- Grupo 1: equipos giratorios robustos con potencia nominal sobre 300 kW. Motores eléctricos con altura del centro de eje h >= 315 mm.

- Grupo 2: equipos giratorios medianos con potencia nominal, comprendida entre 15 y 300 kW. Motores eléctricos con altura del centro de eje entre 160 y 315 mm.

- Grupo 3: sistema de bombeo en varias etapas y con motor separado (flujo axial, mixto centrífugo) con potencia superior a 15 KW.

- Grupo 4: sistema de bombeo de varias etapas con motor incorporado (flujo axial, mixto y centrífugo) con potencia sobre los 15 KW.

La técnica consiste en ponderar el equipo dentro de las clasificaciones propuestas, seleccionando la flexibilidad del acople; posteriormente se mide la amplitud de la vibración, registrando el desplazamiento y la velocidad RMS, proponiendo el intervalo vibratorio en el que se encuentra, para ubicarlo en la tabla donde se encuentran las calificaciones de severidad.

Tabla III. **Clasificación de zonas de severidad vibratoria, grupo 3**

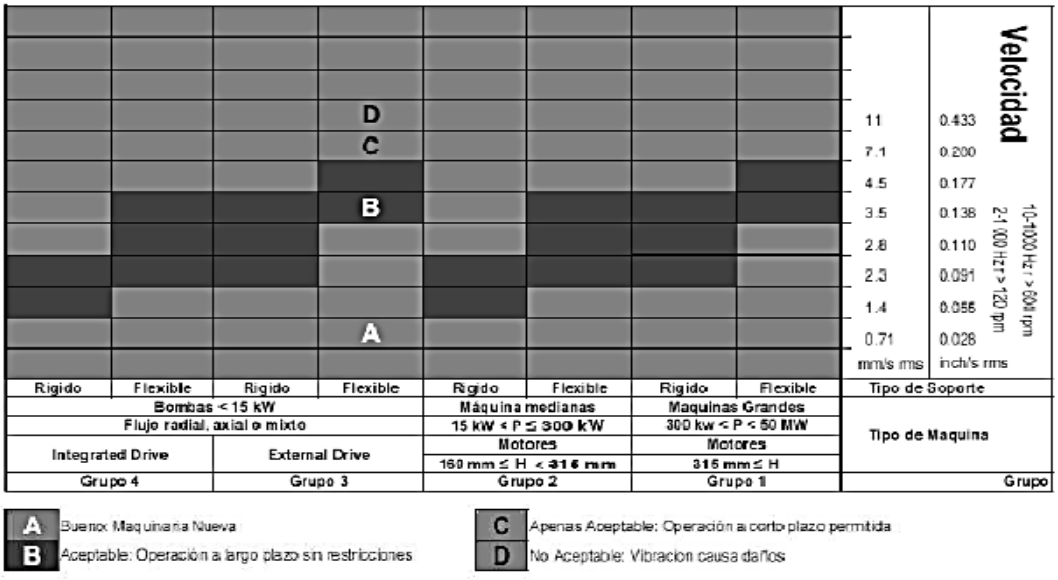
Desplazamiento RMS (µ m)	Velocidad RMS (mm/s)	Tipo de soporte rígido	Tipo de soporte flexible
Bajo 18	Bajo 2.3	A	A
18-28	23-3.5	B	A
28-36	3.5-4.5	B	B
36-56	4.5-7.1	C	B
56-90	7.1-11	D	C

Fuente: elaboración propia.

Dentro de los valores de la tabla anterior se encuentra clasificada la caja horizontal H7; el grupo motriz es de 560 KW. Dato importante del manual de mantenimiento es la recomendación de operar con soporte flexible, por lo que puede verse en relación con el parámetro velocidad mm/s, que cuando marca por debajo de 2.3 hasta 3.5 tiene nivel de vibración normal; luego de 3.5 hasta 7.1, tiene un nivel de vibración aceptable; de 7.1 a 11, nivel de vibración ligeramente severo y por último arriba de 11, severo.

Los valores pueden alcanzarse por cualquiera de las siguientes causas desbalanceo, desalineamiento, soltura mecánica, eje torcido, daños en el grupo motriz, y en las unidades de gravedad, problemas de engranajes y rodamientos como daños en sus pistas de rodadura interna y externa, en los elementos rodantes, en las jaulas, entre otros.

Tabla IV. **Clasificación de severidad y grupos norma ISO 10816-3**



Fuente Prufetechnik (2013). *Grupos norma ISO 10816-3.* Consultado el 3 de diciembre de 2021. Recuperado de https://pruftechnik.wordpress.com/2011/10/13/la-vibracion-confirma-la-norma/.

Respecto de la tabulación de datos es importante señalar que el objetivo de la norma y su campo de aplicación es la reducción en la amplitud de la onda vibratoria; por lo tanto, debe de atacarse el origen o causa de cualquier valor que aparezca a través del tiempo, pero más importante aún debería de ser el diseño y montaje del estudio pertinente anticipado de estos valores.

Un aspecto importante son los cuatro estados de operación del equipo: el primero es cuando se encuentra en vacío con su velocidad de flecha 1X; posteriormente, cuando entra la barra a los rodillos laminadores su velocidad decae, ya que automáticamente sufre una compensación de velocidad en cascada, la cual es recuperada por el autómata maestro.

El último estado es la salida de la barra de los rodillos laminadores, es también denominado estado de desboque debido a que el motor tiende a incrementar la velocidad, por lo que nuevamente el sistema electrónico lo regula hasta dejarlo en su valor inicial y estable de giro 1X.

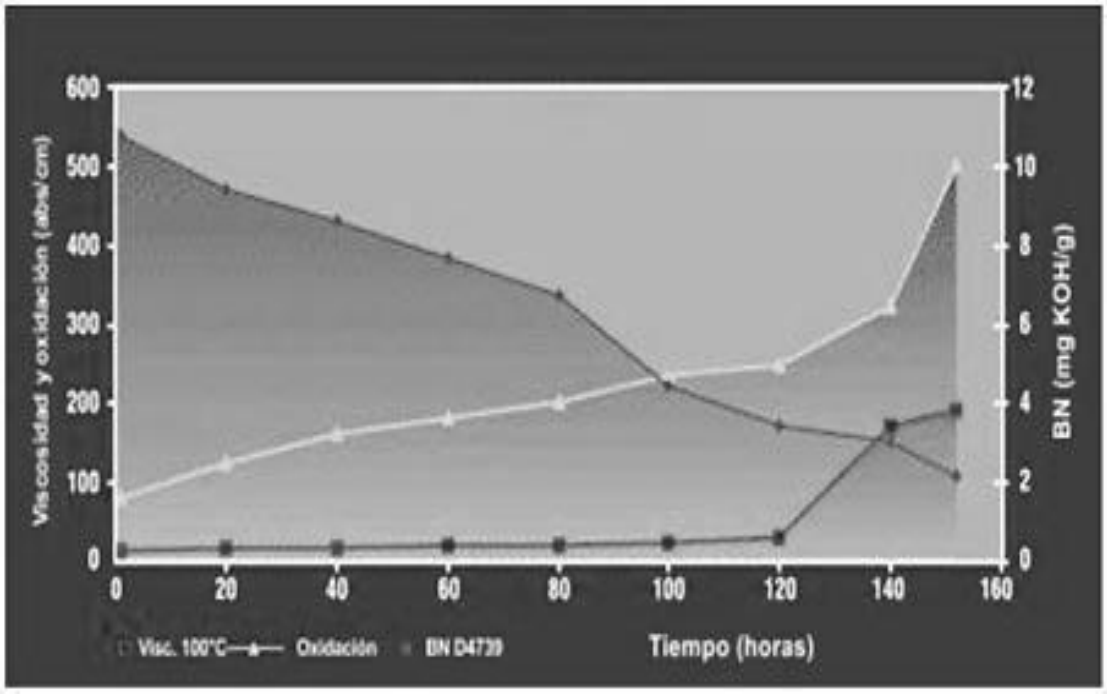
1.8.2. Norma ASTM D-943

Esta norma internacional mide los niveles de oxidación de un lubricante y las consecuencias negativas que conlleva en cuanto al aparecimiento de un incremento de viscosidad, formación de barnices, lodos y sedimentación, agotamientos de aditivos, degradación de la base del lubricante y la posibilidad de taponamiento de sistemas de filtrado.

Cada lubricante tiene una formulación química contra los efectos dañinos de la oxidación; esto es muy particular en el diseño, en función de variables como la exposición a la carga de trabajo, cambios de temperatura ambiental y de temperatura de trabajo.

El paquete de aditivos contra la oxidación tiene como fin exclusivo el sacrificarse para evidenciar el nivel de óxido presente, o la vida potencial del lubricante libre de daños severos por oxidación.

Figura 15. **Efecto de viscosidad e índice de oxidación según horas uso**



Fuente NORIA (2016). *Oxidación, enemiga de los lubricantes.* Consultado el 13 de diciembre de 2021. Recuperado de https://noria.mx/lublearn/la-oxidacion-enemiga-del-lubricante/

La figura muestra la relación de viscosidad contra el tiempo. Se puede observar que con una viscosidad cercana a 32 °F la oxidación medida en mg de hidróxido de potasio (KOH) se mantiene relativamente estable hasta las 120 horas uso, donde los niveles de oxidación tienen un crecimiento exponencial y dañino; también se puede observar un comportamiento parecido en una viscosidad inicial cercana a los 212 °F, con una tendencia de registro de valores más altos de hidróxido de potasio.

2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÒN

El desarrollo de la presente investigación busca una secuencia de pasos estructurados para proponer una gestión de mantenimiento preventivo con la técnica de ensayo de vibración mecánica para detección de fallas en la caja horizontal H7; esta se ubica en el tren de laminación de una industria siderúrgica guatemalteca y cumple con los objetivos propuestos en el marco metodológico del propio trabajo investigativo. Además, fue necesaria la participación y apoyo del personal especialista en mantenimiento, encargado de la operatividad del reductor H7, y de analizar y comprender aspectos necesarios del funcionamiento del equipo como la relación existente con la central de lubricación UL2 y el elemento elastómero del acople.

La primera fase consistió en lectura y análisis de información relativa a los aspectos operativos, técnicos del reductor H7 y conceptos de mantenimiento de clase mundial relacionados a los correctivos con paro, planeados, preventivo de oportunidad y programado y el basado en condición con técnicas predictivas, instrumentación necesaria para realizar las inspecciones y alineación, recapitulación de conceptos estadísticos y de office Excel, comprensión de reportería de laboratorio de análisis de aceite software Couple 6, lectura sobre laminación de barra y los cinco estados de velocidad de cascada a los que está sometido el reductor, para establecer el momento propicio que permita realizar la inspección de vibración mecánica.

En la segunda fase se realizaron tareas de inspección preliminar con el instrumento analizador, lo que permitió establecer el estado de la condición inicial del equipo, tabulando el recuento de aparecimiento de espectros vibratorios a lo

largo del mix de productos laminados, sus valores promedios de amplitud en mm/s, formular un diagrama de Pareto para establecer las fallas de mayor aporte a la probabilidad de daño catastrófico y analizar su tendencia.

Los métodos estadísticos de análisis Pareto y límite central, tanto en su conceptualización como en el planteamiento con herramientas de office Excel permiten presentar los datos capturados durante el intervalo de laminado de barra denominado a plena carga seleccionado, debido a que es donde se presenta un relativo nivel de equilibrio en la exigencia de los esfuerzos mecánicos.

Luego se confirma la condición inicial del equipo mediante el primer reporte de análisis de laboratorio, confirmando daño severidad 4 por alto nivel de contaminación de partículas ferrosas, cobre – cromo. En relación con el pronóstico de desalineamiento, la inspección encuentra un bloque del elemento acople quebrado; por tanto, el instrumento alineador propone un reporte con descompensación en los ejes horizontal y vertical, confirmando falta de paralelismo entre ejes.

En la tercera fase se desarrollan métodos de mejora de limpieza del lubricante con la recirculación del aceite por filtros de arena sííica con micrón cerrado que permita el atrapamiento de las partículas suspendidas en el sistema y la compensación mediante la colocación de galgas para nivelar el plano vertical de la bancada y la maniobra de desplazamiento horizontal con la tornillería de corrimiento del motor eléctrico, definido como equipo móvil.

Se realiza una inspección denominada posterior con valores de recuento de aparecimiento de espectro de vibración y su promedio de amplitud complementada con los reportes de análisis de aceite y del instrumento

analizador que confirman corrección en los modelos de falla para el reductor H7 del tren de laminado, utilizando nuevamente el concepto de limite central se formulan las tendencias para evidenciar la mejora.

Por último, en la cuarta etapa se analiza la reducción del efecto vibratorio; se propone la utilización de métodos periódicos de limpieza del lubricante siempre y cuando se encuentre en rango la viscosidad, limpieza del reservorio, cambios periódicos de filtros y expulsores de humedad del sistema, así como evaluación periódica del elemento elastómero adicional inspecciones de paralelismo entre ejes, que permitan acompañar el equipo con la condición del mismo.

Una quinta etapa propone considerar la utilización de técnicas complementarias en el sistema de transporte del fluido de aceite como radiografía industrial, ensayos no destructivos y pulso eco que permitan entender el nivel de desgaste en la tubería del sistema de control así como una evaluación para migración a tubería de acero inoxidable; en el caso de pérdida de paralelismo utilizar sensor vigía posicionado sobre el punto de análisis, permite evaluar el estado de la condición del elemento elastómero y su nivel de vibración por desalineamiento de ejes.

La tabulación de datos en las dos etapas contiene valores reales medidos en campo para todo el mix de producción del proceso industrial de laminación de barra. Adicionalmente, se presentan gráficas que muestran el modelo de falla; luego e realiza la mejora aplicando los dos métodos propuestos en la presente investigación, emanados del análisis de vibración mecánica.

Para demostrar el beneficio de un plan estructurado del mantenimiento basado en condición, se desarrolla un seguimiento registro y análisis de datos de

los valores de vibración. Para la elaboración de dichos resultados se tabulan datos durante 12 meses en la etapa preliminar y 9 en la posterior a la implementación de la alineación de ejes y mejoramiento en la calidad del lubricante en la caja reductora H7.

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

El presente capitulo da a conocer los resultados obtenidos a lo largo de la investigación, partiendo desde el diagnóstico situacional, determinando las dos fallas de mayor impacto, la formulación de tendencias iniciales y finales, los métodos de mejora y las propuestas de herramientas estadísticas como sistema de gestión de mantenimiento preventivo, utilizando la técnica de análisis de vibración mecánica.

3.1. Objetivo 1: identificar fallas mayormente recurrentes en el punto de apoyo del cojinete del lado acople de la caja reductora H7, utilizando la técnica del análisis de vibración mecánica

Se realizó un periodo de inspecciones denominado preliminar capturando y tabulando datos de recuento de aparecimiento de modelos de espectros, así como el registro de los promedios de amplitud, permitiendo una delimitación por medio del diagrama de Pareto, logrando identificar las dos fallas más recurrentes para darles tratamiento. A partir de esta información se formulan tendencias y presentan reportes de laboratorio de análisis de aceite y del software del instrumento alineador de ejes.

3.1.1. Caja reductora H7

La configuración mecánica de la caja reductora H7 se compone de elementos rotativos que generan fuerza motriz, cuya magnitud se incrementa siguiendo la secuencia de pasos de transmisión de torque en las diferentes secciones, contrario al parámetro velocidad donde aparece una reducción

gradual en cada una de las diferentes etapas donde existe una relación de engranes.

Inherente a la operación del equipo aparecen principios físicos como torque, diferenciales de velocidad, presión interna, temperatura y vibración, a los que es necesario mantener en un nivel aceptable de tolerancia; por lo que los diseñadores del equipo recomiendan en el manual de operaciones el cumplimiento de cartillas de lubricación, ya que en ellas se listan lubricantes propuestos según región del mundo donde operará el equipo, tomando en cuenta temperaturas ambientales.

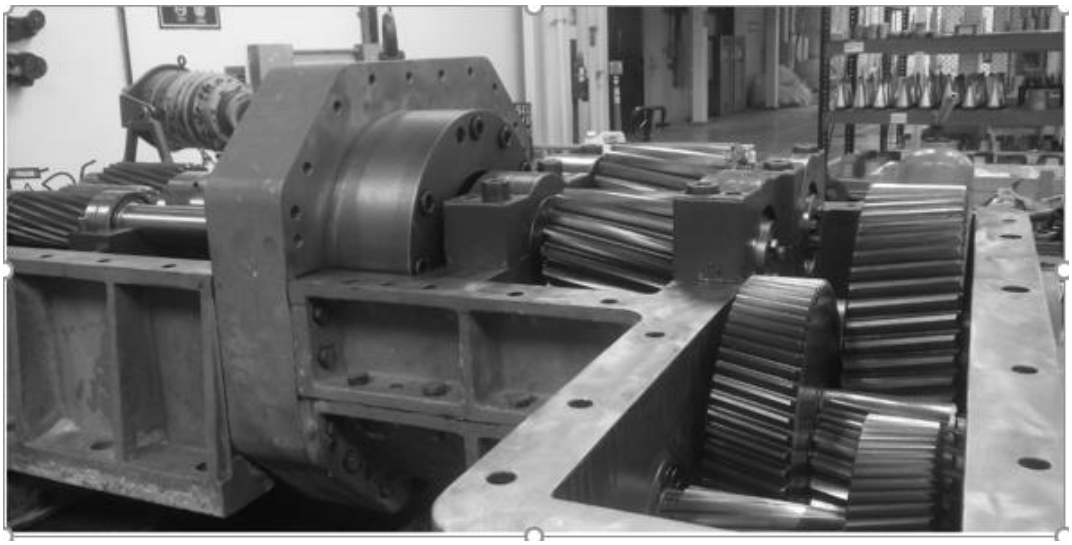
Estudios desarrollados en laboratorio evidencian condiciones de operación en relación con la lubricación, factor importante que se debe considerar para reducir la probabilidad del aparecimiento de fallas; el objetivo principal es mantener la película protectora en cantidad y calidad entre las paredes metalúrgicas de contacto, reduciendo rozamientos abrasivos que luego generen desgastes y como consecuencia desprendimientos de partículas metálicas que posteriormente puedan ser transferidas al depósito o reservorio por medio del aceite, y puedan terminan alojándose e incrustándose en el mecanismo, causando daño en dientes de engranes, piñones, coronas, pistas de rodadura de cojinetes y rupturas en sellos de retenedores.

El efecto abrasivo, incluso, puede alcanzar la recámara y los componentes de la caja reductora fabricados con aceros especiales que cumplen estrictas formulaciones estequiométricas; sus aleaciones se componen de elementos como tungsteno, molibdeno, cromo y vanadio, nitrurados y tratados térmicamente, los cuales a su vez también pueden fisurarse y causar desprendimientos.

Este daño, se complementa con la carga radial, axial, velocidad y temperatura en los rodamientos, afectando sus componentes internos, pistas de rodadura inferior y superior, jaula de sostenimiento y los elementos rodantes maquinados con aceros aleados de níquel, cobre, aluminio y cromo, a los que luego se les aplica un tratamiento del tipo marquensítico.

La carcasa se complementa con cuatro pernos empotrados al suelo nivelado, generando la rigidización a la base de la caja reductora, medio que permite a la máquina una operación equilibrada reduciendo efectos vibratorios dañinos como soltura mecánica por aflojamientos en el anclaje, resonancia por transferencia de ondas de otras fuentes de vibración externa a la caja horizontal H7, entre otros.

Figura 16. **Carcasa de reductor H7**



Fuente: [Fotografía de Douglas Rodas]. (Ciudad de Guatemala, Guatemala, 2021). Colección particular. Guatemala.

El espesor metalúrgico de carcasa imposibilita un análisis visual; el único medio de inspección y evaluación es un visor de vidrio templado circular de 1” cuya función únicamente es mostrar el nivel del aceite; por tal motivo se dificulta una comprensión general del estado de la condición de la caja reductora H7 y del funcionamiento del mecanismo. Este es uno de los factores que contribuye al aparecimiento de fallas que luego se convierten en problemas como interrupciones de proceso por reparaciones correctivas, mermas o desperdicios, lo que se conoce en el medio siderúrgico como chatarra, falla catastrófica e incluso daños colaterales a otros equipos.

Técnicas complementarias como voso e instrumentos como boroscopio, estetoscopio, y lectores de temperatura a distancia vía láser, permiten una comprensión parcializada del funcionamiento del equipo; esto contribuye a evidenciar la necesidad del desarrollo de un plan de monitoreo de la condición con la técnica del análisis de vibración mecánica.

Figura 17. **Componentes mecánicos de caja reductora H7**

Fuente: [Fotografía de Douglas Rodas]. (Ciudad de Guatemala, Guatemala, 2021). Colección particular. Guatemala.

El desarrollo de una gestión de mantenimiento que incluye análisis predictivo puede definirse como una fuente de beneficios; sus técnicas permiten comprender el funcionamiento del equipo a plena marcha y anticipar fallos; el presente estudio se centra en la caja reductora H7, buscando detectar modelos de falla.

3.1.2. Punto de inspección de caja reductora H7

La etapa de medición consiste en colocar el sensor del instrumento sobre la carcasa de la caja reductora en el área circundante al alojamiento del cojinete, es decir que el inspector debe pararse frente a la caja reductora y dar la espalda al motor eléctrico; a partir de esta ubicación deberá realizar todo el análisis sobre el tercer cuadrante o 270° del origen de la circunferencia.

Este es un punto recomendado por la teoría del análisis de vibración mecánica, pues recibe una mayor concentración de fuerzas, y aparece, por ejemplo, la normal fuerza de reacción del efecto del peso del rotor, así como las de transferencia, debido a la conexión del eje con el primer piñón de la configuración mecánica.

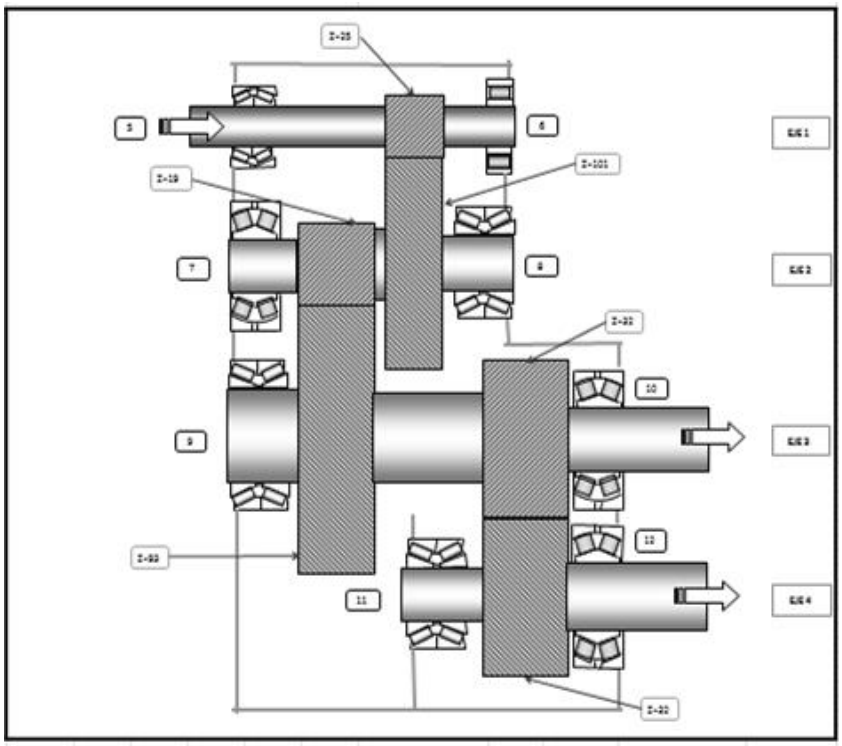
Figura 18. **Daño histórico de rodamiento de expulsión elemento cilíndrico**

Fuente: [Fotografía de Douglas Rodas]. (Ciudad de Guatemala, Guatemala, 2021). Colección particular. Guatemala.

El análisis del reporte histórico de planta demuestra recurrencia de fallo en el rodamiento NU 2073, posición 1, del diagrama de configuración mecánica; este elemento es el receptor de la fuerza de tracción generada por el movimiento rotativo proveniente del eje del rotor del motor eléctrico, hacia el eje de ingreso de la caja reductora H7.

Adicionalmente el nivel de automatización del proceso industrial utiliza un control lógico programable PLC que impone diferentes recetas según sea el diámetro y grado de dureza de la barra a producir; esto no solo hace cambiante las magnitudes de parámetros físicos como velocidad, temperaturas, presiones y vibración, lo que implícitamente obliga al rodamiento a trabajar en condiciones cambiantes.

Figura 19. **Puntos para inspección de vibración mecánica, reductor H7**



Fuente elaboración propia, realizado con Visio.

Estableciendo el método y punto físico donde se realizarán las dos inspecciones, tanto la preliminar como la etapa posterior a la mejora, es posible analizar el comportamiento del cojinete en los lotes de producción de barra corrugada para los diferentes diámetros que van desde 3/8” hasta 1”, en las dos presentaciones de dureza de grado al carbono 40 y 60; se busca alguna evidencia que anticipe la expulsión de los elementos rodantes de su jaula.

Adicionalmente, es necesario para el desarrollo del presente trabajo de investigación tomar en consideración las recomendaciones de gerencia en relación con los peligros del proceso siderúrgico, con estricto cumplimiento a las normativas del departamento de seguridad industrial y salud ocupacional,

resaltando como ejemplo inspecciones del análisis de vibración mecánica en pareja, registro previo de documentación denominada APR y análisis preliminar del riesgo para cada una de las mediciones.

Otro factor importante por considerar es que el estudio únicamente analiza el rodamiento del lado de acople de la caja reductora H7; físicamente se encuentra ubicado sobre la plataforma de anclaje rodeada de una baranda fabricada con tubería a distancia relativamente segura del proceso de laminación, lo que se define como una barrera de ingeniería, permitiendo realizar las inspecciones en un ambiente relativamente controlado y seguro.

3.1.3. Tabulación de datos e inspección preliminar

El análisis se estructura en dos etapas de investigación: la primera, denominada preliminar, con 4 inspecciones diarias formulan 997 registros, y la segunda, posterior a los métodos de mejora establecida, con 10 inspecciones diarias que forman 761 mediciones; estas son realizadas para los diferentes diámetros de barra, grados de carbono, horario y operador de cabina central.

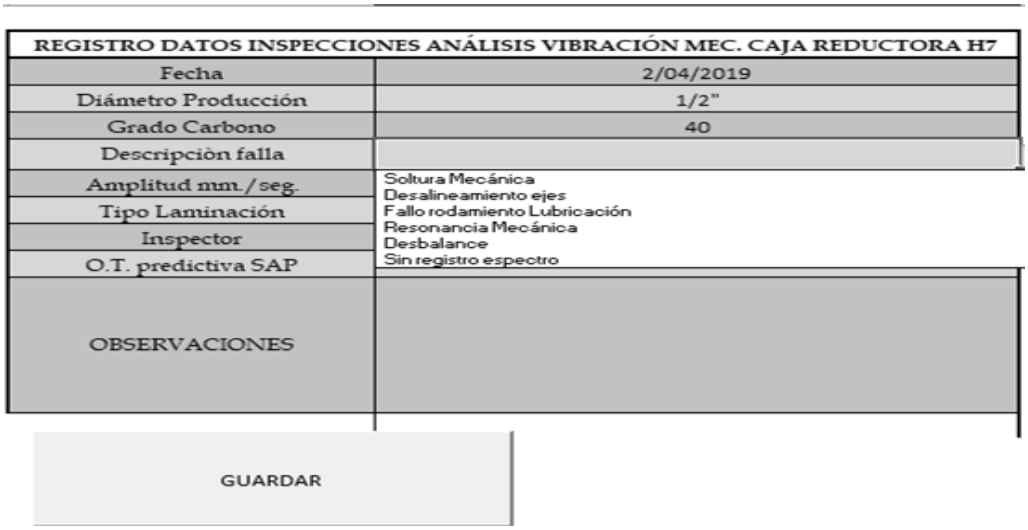
El estudio busca evidenciar dos aspectos: el recuento de los modelos de espectro de frecuencia descritos en la técnica de vibración como soltura mecánica, desalineamiento de ejes, resonancia mecánica, fallo en el rodamiento por lubricación inadecuada, desbalance en las masas en los acoples, y las amplitudes de onda vibratoria registradas por el instrumento analizador, de las que se formula un promedio para establecer 80-20 de las causas.

Para optimizar el proceso de captura de datos se formuló una hoja electrónica con herramientas de office Excel, aplicando conceptos de listas desplegables, las cuales generan un catálogo de fallas; esto permite atribuir un

modelo de espectro de onda vibratoria con su respectiva amplitud; también toma en cuenta el diámetro de producción, grado de dureza de la palanquilla, inspector, fecha de la inspección, y si es con proceso de recalentamiento o de colada continua.

También se establece hora y fecha de ingreso del reporte de inspección; este dato fue solicitado por gerencia de planta como requisito para el desarrollo del trabajo de investigación; se busca el cumplimiento de metas estratégicas para un sistema de producción esbelta; el plan establece una reducción en la relación de órdenes de trabajo correctivas comparadas con las preventivas y predictivas. Deberá registrarse en el sistema empresarial SAP; adicionalmente, se hace el análisis de vibración, se agrega al reporte el tipo de laminación si es por medio de colada continua, se aprovecha la temperatura de fundición del horno por arco, o si es por el método de recalentamiento, se pasa la palanquilla por el horno recalentamiento Bendotti, siendo este el que se utiliza en el presente estudio.

Tabla V. **Lista desplegable de catálogo de espectros**



Fuente: elaboración propia. Captura de pantalla del Catálogo de espectros.

La demanda del mercado siderúrgico genera en un mes normal el siguiente orden de producción respecto de los diámetros de barra corrugada 3/8”, ½”, 7/8” y 1”, en lotes para las dos fórmulas estequiométricas de aleación de grado al carbono 40 y 60. Siendo las de mayor producción las presentaciones comerciales en un largo de 6 mt.

3.1.4. Formulación del diagrama de Pareto

La formulación del diagrama de Pareto plantea la necesidad de describir la condición de operación del reductor H7 respecto de los 5 estados inherentes al proceso siderúrgico; el objetivo es demostrar cómo se establece el conteo de los espectros y la amplitud de la onda vibratoria, así como dar fundamento al análisis y procedimiento de la creación de tendencias en las etapas.

El primer estado abarca desde el momento del arranque cuando el equipo sale del reposo con velocidad angular cero, hasta alcanzar la velocidad de trabajo o cascada (velocidad impuesta por un control lógico programable); el efecto se logra aplicando un criterio de automatización industrial denominado gradiente de proporcionalidad o rampa de aceleración.

El efecto deseado es incrementar la velocidad de forma gradual y constante; proporcionalmente lograr vencer la inercia de todo del pesado mecanismo; este es un valor numérico que se encuentra memorizado en una receta de algoritmos del autómata, según el tipo de barra que se va a producir, considerando diámetro y grado al carbono.

El segundo estado se establece cuando el equipo se encuentra trabajando en la velocidad de cascada, justo en el momento de ingreso de la palanquilla al molino laminador; el efecto genera un decaimiento en las revoluciones por

minuto, la maquinaria registra una reducción de velocidad debido a que inicia el arrastre de la barra desde la caja reductora anterior a la H7.

Los transductores de velocidad digitales *encoder* gobiernan el sistema de estabilización del motor eléctrico, generan una señal en forma de pulso cuadrado hacia el controlador maestro que inicia la compensación de corriente, desde el variador de velocidad esclavo hacia el estator del motor eléctrico, logrando ubicarlo nuevamente al ritmo de los demás motores del tren en la velocidad de cascada.

Al tercer estado se le denomina laminación a plena carga; este ocurre cuando el autómata y la receta de algoritmos tienen pleno control sobre el equipo, inyectando y suprimiendo pulsos de corriente alterna a los campos del *estator* del motor eléctrico; este proceso se realiza a conveniencia buscando la compensación y estabilización de la velocidad tangencial de los rodillos del molino laminador.

Durante este intervalo se realiza la inspección, el objetivo es aprovechar un periodo de relativa estabilidad en el desempeño de la máquina, aspecto necesario para la captura de datos, logrando que el instrumento pueda procesar la información y modelar un espectro de frecuencia y amplitud; este proceso genera los datos para tabulación. Por medio de tabla dinámica se establece el recuento de la recurrencia de modelos de espectros, así como los promedios de amplitud; con lo que se puede formular el 80-20 del diagrama de Pareto, así como posteriormente poder establecer el comportamiento de las tendencias preliminar y posterior a la mejora.

El cuarto estado se caracteriza por una sobrevelocidad debido a que se incrementan las revoluciones por minuto; esto sucede a causa del efecto de

arrastre del tramo final de la palanquilla por parte de la caja posterior; en este momento el molino posterior al reductor H7 tiene la jerarquía de la velocidad de cascada y sobre todo el tren laminador.

Esto tiende a revolucionar el reductor H7, por lo que nuevamente vuelve a funcionar el sistema de estabilización descrito en la etapa número dos, solo que, de forma inversa, el objetivo es reducir las revoluciones por minuto hasta alcanzar nuevamente la velocidad de laminación justo antes del ingreso de la próxima palanquilla para que se repita todo el proceso.

Por último, aparece el estado número cinco, el cual surge de la necesidad de llevar el equipo hasta el reposo, al igual que en la etapa 1 donde el controlador electrónico gobierna el sistema; en esta etapa lo hace de forma inversa debido a que genera un índice de proporcionalidad o gradiente negativo, para que la velocidad disminuya en una rampa suave desde el valor de laminación hasta cero revoluciones por minuto, siendo esta la forma correcta de apagar el equipo.

Tabla VI. **Recurrencia de modelos de espectro, etapa preliminar**

Modelo espectral de falla	Recuento del aparecimiento
Sin registro de espectro	481
Fallo de rodamiento en lubricación	232
Desalineamiento de ejes	215
Soltura mecánica	13
Resonancia mecánica	12
Desbalance	12

Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente se tabulan los promedios de amplitud de las ondas vibratorias en función de los modelos de espectro; los valores se obtienen durante la primera etapa de análisis o inspección preliminar, con ellos se formula el diagrama de Pareto, evidenciando las dos causas con mayor probabilidad de ocurrencia de fallo en el rodamiento del lado del acople de la caja reductora H7.

Tabla VII. **Promedios de amplitud de onda vibratoria, reductor H7**

Espectro de frecuencia	Valor promedio de amplitud en mm/s
Fallo de rodamiento en lubricación	14.4
Desalineamiento de ejes	13.42
Desbalance	3.11
Soltura mecánica	2.7
Resonancia mecánica	1.1

Fuente: elaboración propia.

Para establecer la herramienta es necesario formular una fracción cuyo denominador sea la sumatoria de los valores de la columna valor promedio de amplitud; el numerador es cada uno de los números ubicados en los renglones donde se registra el modelo de espectro; el resultado de este cociente se multiplica por 100, obteniendo el valor porcentual de probabilidad de ocurrencia de fallo en el rodamiento de acople del reductor H7 atribuido a dicha causa.

Por último, se tabula una tercera columna con el valor acumulado ubicándolos en la gráfica en un eje vertical a la derecha; en función de estos valores porcentuales se pueden formar los rectángulos del histograma,

asignándole un porcentaje a cada modelo de fallo. Así concluye el procedimiento para la creación del diagrama de Pareto para la caja reductora H7.

Se determina que el 20 % de las fallas son causa del 80 % del registro de valores de amplitud de vibración mecánica en el rodamiento del lado de acople de la caja reductora H7, siendo estos atribuidos a una lubricación contaminada y desalineamiento de los ejes de motor eléctrico con el reductor.

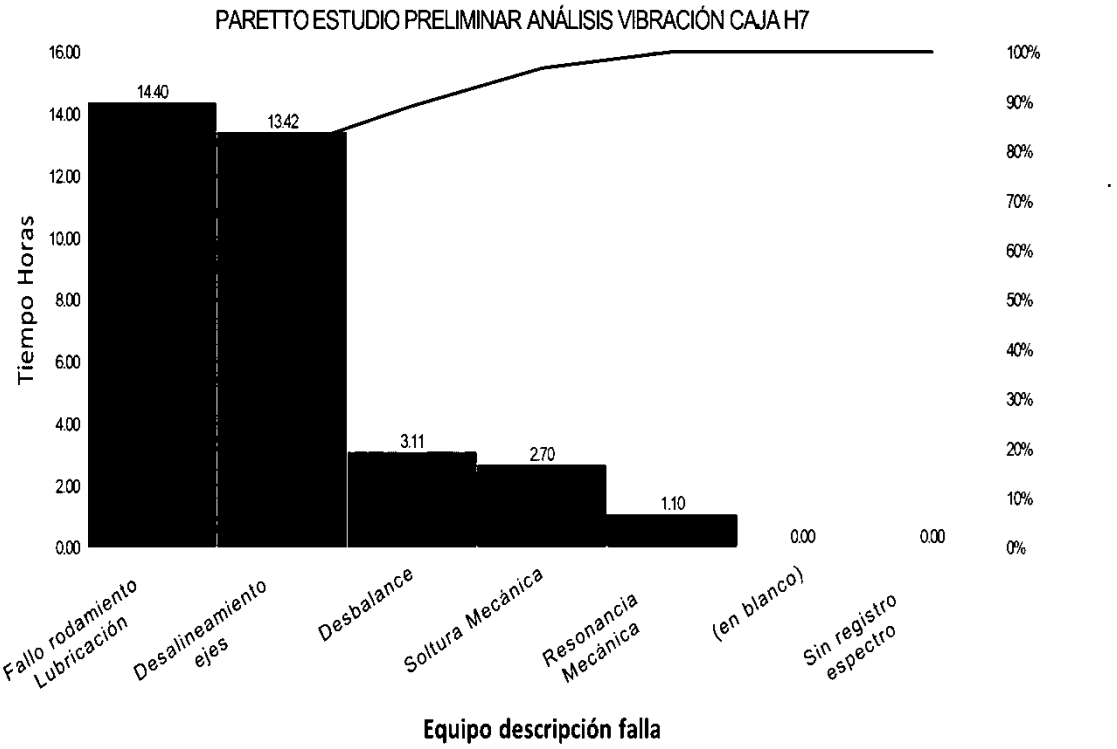
Tabla VIII. **Desarrollo del análisis de Pareto**

Diagrama Pareto análisis preliminar promedio espectros frecuencia.			
Espectro frecuencia	Promedio mm/s	Porcentaje	Acumulado
Fallo rodamiento Lubricación	14.400	41.463%	41.463%
Desalineamiento ejes	13.420	38.641%	80.104%
Desbalance	3.110	8.955%	89.058%
Soltura Mecánica	2.700	7.774%	96.833%
Resonancia Mecánica	1.100	3.167%	100.000%
Sin registro espectro	0.000	0.000%	100.000%
En blanco	0.000	0.000%	100.000%
TOTAL	34.730	100.000%	100.000%

Fuente: elaboración propia, datos obtenidos utilizando Microsoft Excel.

El modelo propuesto permite establecer fallo en el lubricante y falta de paralelismo entre ambos ejes; estos representan el 20 % del total de espectros que forman la base del histograma; la línea de tendencia del diagrama de Pareto intersecan la arista superior derecha de la barra que corresponde al desalineamiento de ejes; este punto de coordenadas tiene un valor de abscisa del 80 % que se obtiene de proyectar el eje vertical ubicado a la derecha de la gráfica, donde se encuentra el registro del acumulado de los porcentajes.

Figura 20. **Diagrama de Pareto con espectros de vibración mecánica**



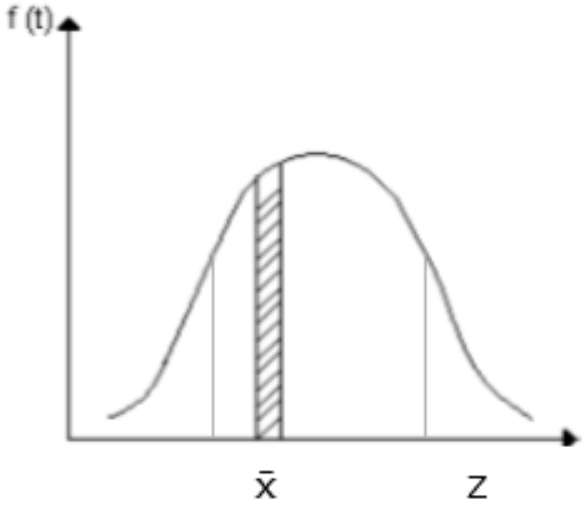
Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

La herramienta justifica el presente estudio en relación con el establecimiento de causas potenciales de fallo: daño en el lubricante y desalineamiento de ejes; adicionalmente se complementa el análisis con la formulación de tendencias formuladas con herramientas de office Excel; el objetivo es describir gráficamente el estado de la condición con los datos obtenidos en la etapa preliminar y posteriormente al desarrollo de los métodos de mejora.

3.1.5. Formulación de tendencias

El objetivo es establecer un modelo matemático que describa el comportamiento de la vibración mecánica para el rodamiento de acople del reductor H7, para los dos modelos de fallo correspondientes al 20 % del total de espectros, a los que se les atribuye el 80 % de la probabilidad de avería catastrófica. El método se desarrolla a partir del intervalo de confianza para una distribución normal en una muestra aleatoria simple de la siguiente manera: se formulan dos límites simétricos a ambos lados de la media muestral, con lo que se establece una delimitación de la campana de la distribución normal, donde se encuentra el 95 % de las amplitudes de onda vibratoria captadas en cada una de las etapas de inspección preliminar y posterior a la mejora.

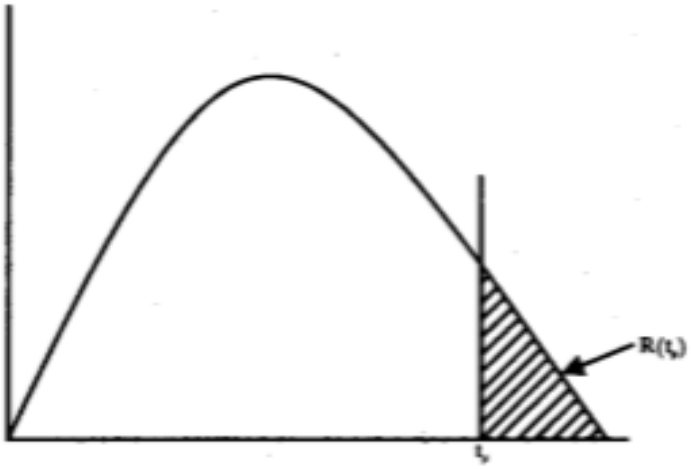
Figura 21. **Media muestral de intervalo de confianza, distribución normal**



Fuente: static1.squarespace (2020). *Muestreo: intervalos de confianza.* Consultado el 2 de diciembre de 2021. Recuperado de https://static1.squarespace.com/static/526e85b4e4b09c47421bd159/t/587b410a1e5b6cf13b835014/1484472589277/MCST10ESMUES.pdf.

Partiendo de la definición de límites de confianza se analizan las ecuaciones LSE = $\overline{x}$ + Z α/2 * σ/√n ; LIE= $\overline{x}$ - Z α/2 * σ/√n , debido a que encierran importantes conceptos estadísticos; en el caso del término Zα/2 es un valor de abscisa al que le corresponde el área ponderada, que para el presente estudio se le asigna un valor del 95 %, el análisis de tablas por definición únicamente presenta datos hacia la izquierda, por lo que se incorpora el segmento de la campana del 5 %, distribuido simétricamente 2.5 % a la izquierda y de igual manera a la derecha.

Figura 22. **Distribución normal área sin sombrear correspondiente a Z**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

El complemento del término para el cálculo del error en la expresión para el cálculo de los límites de confianza es el cociente formulado por la desviación estándar entre la raíz cuadrada del número de elementos muestrales σ/√**N**; para describir su significancia es necesario establecer dos escenarios en relación con el denominado: cuando la muestra analizada es de gran valor el error es pequeño la media muestral es más representativa y el intervalo de confianza es más preciso; luego, al tener en análisis una muestra pequeña el error será más

significativo debido a que se tiene una representación muy pequeña, de todas las amplitudes de la vibración mecánica.

Figura 23. **Distribución normal y ecuaciones de intervalo de confianza**

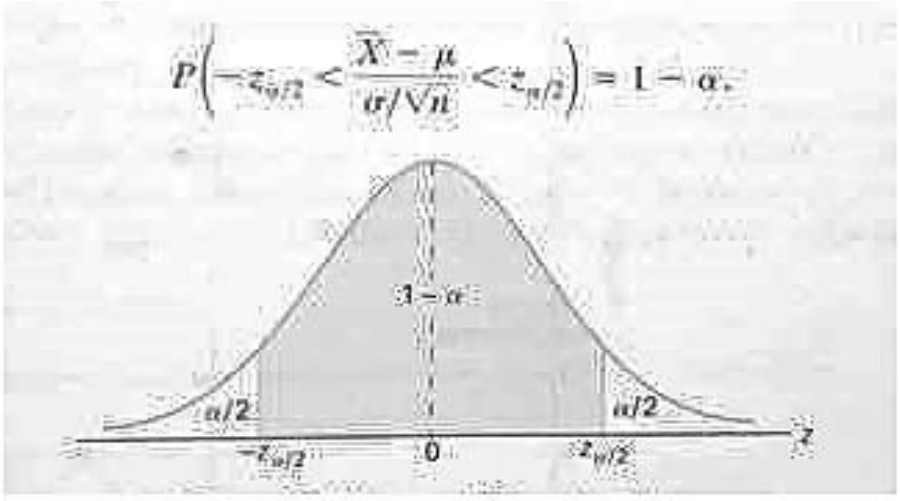


Figura: Pintarelli (2012). *Intervalos de confianza.* Consultado el 10 de diciembre de 2021. Recuperado de https://www.mate.unlp.edu.ar/practicas/117_12_12092016211213.pdf.

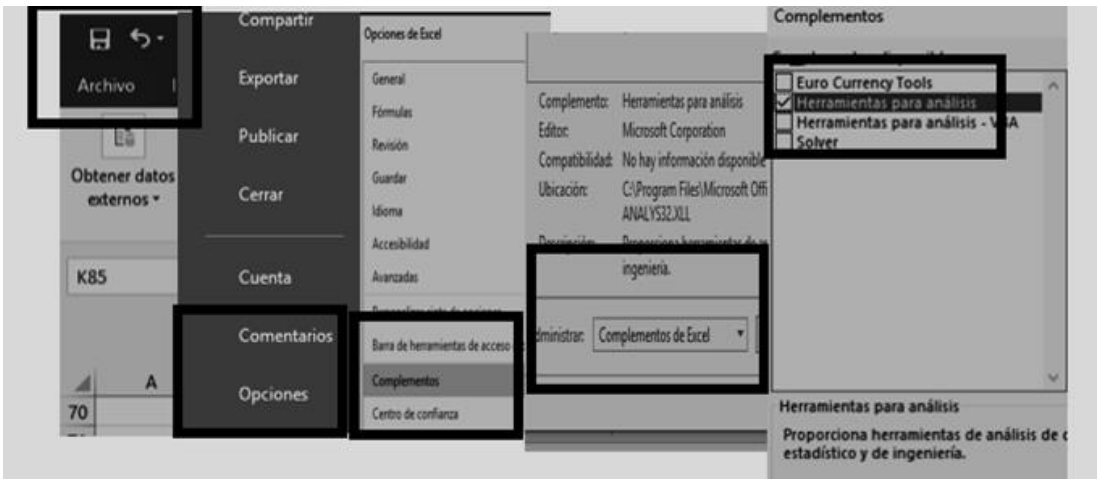
El criterio que debe prevalecer es el siguiente: dado que no se conoce exactamente el valor de la media que represente a todos los valores amplitud de vibración mecánica para el reductor H7, se puede establecer con una certeza del 97.5 % que $\bar{x}$ se encuentra dentro de las cotas del intervalo de confianza.

Comprendido dentro de las cotas de la campana y el complemento del segmento que queda fuera de esta, el desarrollo del trabajo de investigación ofrece un método alternativo con herramientas de office Excel que permiten aplicar los conceptos de forma más inmediata y automatizada para el cálculo desde una hoja electrónica.

Como primer paso es necesario instalar en Excel, en la pestaña datos, un complemento de office llamado análisis de datos; esta herramienta permite analizar de forma rápida y ordenada una serie de valores estadísticos como la media, el error típico, la desviación estándar, entre otros. Datos necesarios para el cálculo de los límites estadísticos superior e inferior de las amplitudes de vibración mecánica.

A continuación, se describe la secuencia o ruta a seguir, desde archivos ubicar opciones, complementos, administrar complementos Excel,} y seleccionar la opción *ir*; finalmente se despliega un cuadro que se llama complementos, ahí deberán aparecer varias opciones ubicar y marcar la de interés personal: análisis de datos. Como un aporte adicional, el presente estudio hará mención que con la presente secuencia es posible anclar las otras herramientas mostradas en complementos, por ejemplo, *solver,* que tiene propósitos de optimización para aplicaciones del balance de líneas de producción, distribución equilibrada de cargas de trabajo, análisis en procedimientos médicos y militares.

Figura 24. **Secuencia para instalación de herramienta de análisis datos**



Fuente: elaboración propia. Captura de pantalla de herramienta de análisis de datos.

Teniendo a disposición la herramienta y previo al desarrollo del método, es necesario ordenar los datos obtenidos en las inspecciones de vibración mecánica preliminar y posterior a la mejora; de forma aleatoria se construye una serie de datos para los modelos daño en el lubricante y desalineamiento entre ejes.

Se formulan tablas para los espectros de mayor aporte en el análisis de Pareto resultado del análisis dentro del intervalo de tiempo del desarrollo de las inspecciones, para este trabajo de investigación su etapa preliminar una duración de 12 meses, importante recalcar que el presente proceso se realiza de igual manera luego de efectuada la mejora.

Tabla IX. **Modelos de vibración de valores promedio mensual**

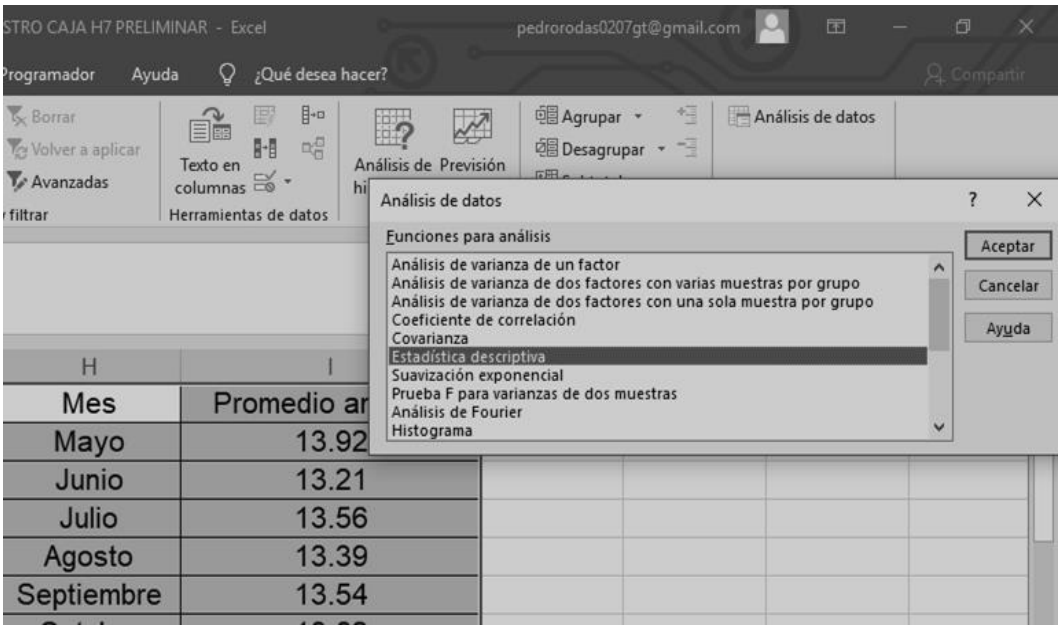
Modelo fallo por daño en el lubricante		Modelo fallo por desalineamiento ejes	
Mes	Amp. Prom. Vib. mm/s	Mes	Amp. Prom. Vib. mm/s
Abril	14.18	Abril	13.92
mayo	14.39	mayo	13.21
Junio	14.56	Junio	13.56
Julio	14.42	Julio	13.39
Agosto	14.76	Agosto	13.54
Septiembre	14.44	Septiembre	13.62
Octubre	14.41	Octubre	13.62
Noviembre	13.43	Noviembre	13.5
Diciembre	14.51	Diciembre	12.96
Enero	14.64	Enero	13.56
Febrero	14.43	Febrero	13.45
Marzo	14.89	Marzo	12.93

Fuente: elaboración propia.

Para desarrollar la herramienta es necesario ubicar la pestaña datos en la barra de comandos. en la esquina superior derecha según sea la version del office; ahí deberá aparecer anclada la función análisis de datos; se abre y

despliega un cuadro con el mismo titulo; ahí es necesario correr el cursor y seleccionar estadistica descriptiva luego aceptar.

Figura 25. **Función de análisis de datos, opción estadistica descriptiva**

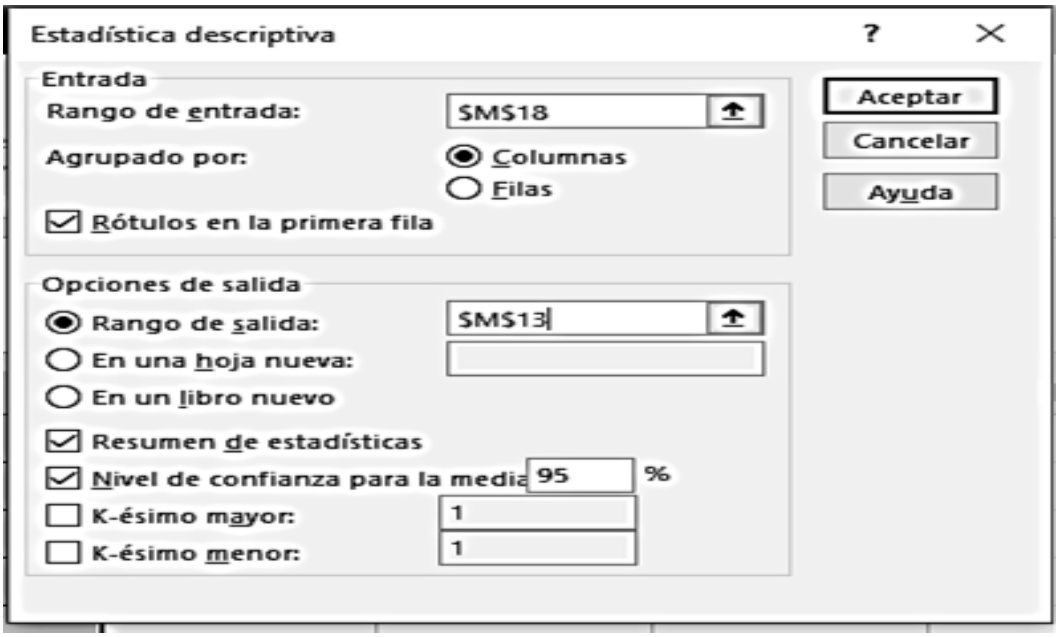


Fuente: elaboración propia. Captura de pantalla del proceso de análisis de datos.

Dentro del cuadro estadística descriptiva es necesario marcar al menos los siguientes campos para que la herramienta realice el análisis: el primer campo obligatorio rango de entrada; más a la derecha aparece una flecha que señala hacia arriba; al seleccionarla permite delimitar en la hoja electrónica los datos que se van a analizar; es necesario marcar las columnas completas incluyendo el título. Al establecer el análisis agrupado por columnas, rango de salida es la posición de celda donde la herramienta devolverá los resultados; puede ser en la misma hoja o en una diferente; es necesario marcar que se necesita el resumen estadístico para que muestre todos los resultados del análisis, y por último

ponderar un valor del nivel de confianza para la media, en este caso será del 95 %; luego se selecciona aceptar.

Figura 26. **Campos obligatorios de análisis de estadística descriptiva**



Fuente: elaboración propia. Captura de pantalla de los campos obligatorios.

Habiendo ingresado la información de forma correcta a los diferentes campos obligatorios, la herramienta valida y acepta el proceso, devolviendo un resumen de datos estadísticos por tabla; esto permite de forma fácil y sencilla obtener la media, desviación estándar, el error típico, la mediana, entre otros datos importantes según sea la necesidad del análisis.

Tabla X. **Cálculos de función de análisis de datos, ambos espectros**

Caja H7 Modelo fallo en lubricante		*Caja H7 Fallo desalineamiento ejes*	
Media	14.421	Media	13.438
Error típico	0.105	Error típico	0.082
Mediana	14.432	Mediana	13.520
Moda	13.490	Moda	13.563
Desviación estándar	0.363	Desviación estándar	0.285
Varianza de la muestr	0.132	Varianza de la muestr	0.081
Curtosis	5.338	Curtosis	0.323
Coeficiente de asimetría	-1.897	Coeficiente de asimetría	-0.577
Rango	1.460	Rango	0.997
Mínimo	13.430	Mínimo	12.928
Máximo	14.890	Máximo	13.925
Suma	173.054	Suma	161.254
Cuenta	12.000	Cuenta	12.000
Nivel de confianza(95.	0.231	Nivel de confianza(95.	0.181

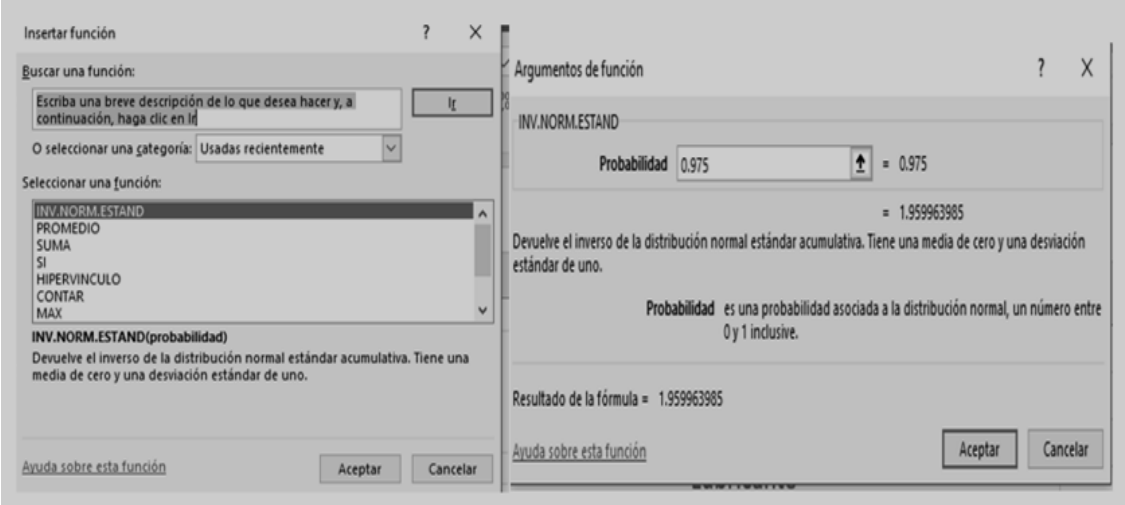
Fuente: elaboración propia.

Como se ha explicado anteriormente, el término que involucra el error en la ecuación del intervalo de confianza viene dado por $Z\ \alpha/2 * \sigma/\sqrt{N}$; la tabla anterior ayuda a resolver de forma sencilla; en el segundo renglón aparece el error típico; implícitamente realiza el cálculo dividiendo la desviación estándar dentro de la raíz cuadrada del número de elementos analizados de la siguiente manera: tabla fallo en el lubricante error típico = $0.3629 /\sqrt{12} = 0.1047$ y tabla de desalineamiento de ejes error típico = $0.2849 /\sqrt{12} = 0.082$.

El término de la ecuación $Z\alpha/2$ se calcula fácilmente con la barra de fórmulas ubicando *inv.norm.estand* factor confiabilidad; se selecciona y despliega un cuadro llamado argumentos de función; se deberá asignar en el campo de probabilidad un valor comprendido entre 0 y 1; para el presente trabajo se le

asignará un valor de área del 0.975; se le da aceptar y devuelve un valor Z de 1.959963985.

Figura 27. **Cálculo de intervalos de confianza**



Fuente: elaboración propia, Captura de pantalla de los intervalos de confianza encontrados.

Habiendo calculado los términos de las ecuaciones $LSE = X - Z * \sigma/\sqrt{n}$ & $LIE = X + Z * \sigma/\sqrt{n}$, se procede a encontrar los limites superior e inferior del modelo vibración para el rodamiento fallo en el lubricante de la siguiente manera: LSE = 14.42116114 + (0.104782381*1.959963985) = 14.62653083; de igual forma LIE = 14.42116114 - (0.104782381*1.959963985) = 14.21579145; de esta manera se obtienen los dos límites del intervalo de confianza.

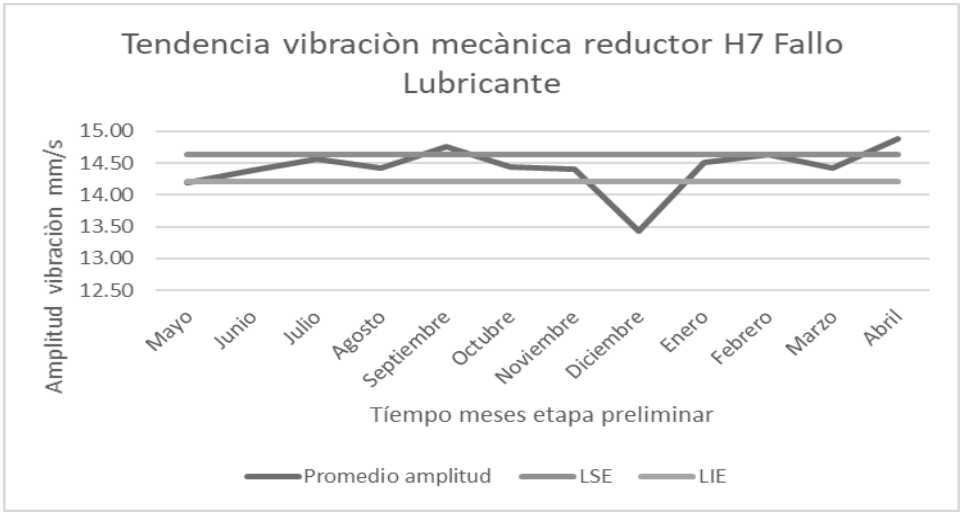
Se procede a graficar las dos tendencias preliminares llenando las columnas LSE y LIE; el mismo procedimiento se desarrolla para el modelo vibración de desalineamiento de ejes: LSE= 13.43783789 + (0.082245278 *1.959963985) = 13.59903567; de igual forma LIE = 13.43783789- (0.082245278*1.959963985) = 13.27664011.

Tabla XI. **Tabulación preliminar que incluye límites**

Anàlisis vibraciòn mecànica reductor H7 fallo en lubricante				Anàlisis vibraciòn mecànica reductor H7 fallo desalineamiento de eje			
Mes	Promedio amplitud	LSE	LIE	Mes	Promedio amplitud	LSE	LIE
Mayo	14.184	14.627	14.216	Mayo	13.925	13.599	13.277
Junio	14.390	14.627	14.216	Junio	13.210	13.599	13.277
Julio	14.564	14.627	14.216	Julio	13.563	13.599	13.277
Agosto	14.415	14.627	14.216	Agosto	13.385	13.599	13.277
Septiembre	14.760	14.627	14.216	Septiembre	13.540	13.599	13.277
Octubre	14.438	14.627	14.216	Octubre	13.617	13.599	13.277
Noviembre	14.410	14.627	14.216	Noviembre	13.621	13.599	13.277
Diciembre	13.430	14.627	14.216	Diciembre	13.500	13.599	13.277
Enero	14.513	14.627	14.216	Enero	12.959	13.599	13.277
Febrero	14.635	14.627	14.216	Febrero	13.563	13.599	13.277
Marzo	14.426	14.627	14.216	Marzo	13.445	13.599	13.277
Abril	14.890	14.627	14.216	Abril	12.928	13.599	13.277

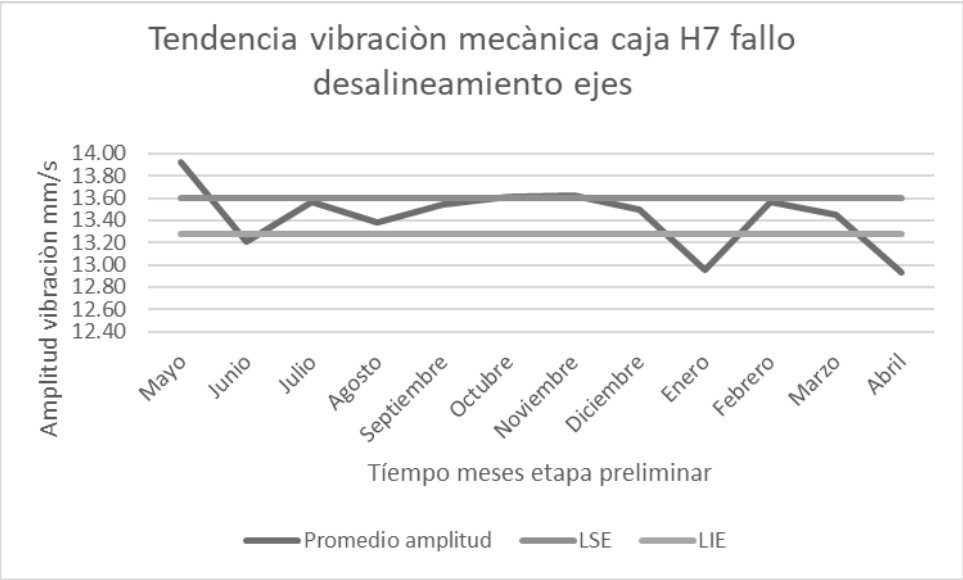
Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Tendencia preliminar modelo de vibración de fallo lubricante**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 29. **Tendencia preliminar modelo de desalineamiento de ejes**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

3.2. Objetivo 2: analizar las técnicas de solución correctiva aplicadas a las fallas más recurrentes encontradas con vibración mecánica para el reductor H7, fallo contaminación aceite y desalineamiento de ejes

Se presentan las técnicas de limpieza de aceite por medio de filtros externos con sistema de bombeo individual, recirculándolo en la primera ocasión a toneles limpios para limpiar el reservorio, así como el método de alineación láser con el software del instrumento Couple 6.

3.2.1. Confirmación del fallo en el lubricante

El objetivo primordial del lubricante es ofrecer una película o capa de protección adherida a la pared metalúrgica, especialmente si esta se encuentra expuesta a entornos rústicos y a elementos adversos como rozamientos,

temperaturas extremas, movimientos circulares, reciprocantes, desgastes y contaminantes.

La exposición del lubricante durante largos intervalos de tiempo ante estos agentes degrada su calidad, tanto en la base de su constitución (olefínica, parafínica o sintética), como en el paquete de aditivos propuesto para asegurar el desempeño de la máquina, aun bajo las condiciones de operación en las que se encuentra sometido el equipo.

Por lo tanto, es válido proponer la calidad del aceite como un parámetro indicador del desempeño del reductor H7; se le puede dar trazabilidad; tanto a la degradación como al nivel de contaminantes de partículas metálicas de desgaste (hierro fe y cobre), agua, lodos, sílice, polvos e islas de lacas.

El análisis de aceite forma parte complementaria del mantenimiento preventivo para la planta laminadora, obliga al cumplimiento de un plan de muestreo donde se realizan de forma correcta y segura las tomas de aceite, previo a ser enviadas al laboratorio, donde se establece la calidad de este con pruebas fisicoquímicas y presencia de partículas de desgaste por medio de ferrografías.

Como primer paso es necesario redactar documentación de compromiso y recibir nuevamente la inducción de comportamiento seguro como parte de la gestión de seguridad industrial de planta; es importante mencionar que este procedimiento también se aplicó previo a la realización de las inspecciones de vibración mecánica durante las dos etapas: preliminar y posterior a la mejora.

Habiendo cumplido con el prerrequisito del departamento de SEHI y por instrucción de gerencia de planta se recibió apoyo para el presente estudio con

recipientes esterilizados, mangueras plásticas, etiquetas para rotulación y bomba de succión en forma de émbolo para extraer desde el tanque de la central de lubricación UL2 la muestra previa al envío de laboratorio.

Figura 30. **Kit necesario para muestreo de aceite**

Fuente: [Fotografía de Douglas Rodas]. (Ciudad de Guatemala, Guatemala, 2021). Colección particular. Guatemala.

La toma se realiza durante un medio día del mes de marzo cuando la planta se encuentra a plena marcha, en producción de barra de 1” grado 60; se abre la tapa del cárter con cuidado y se esperan 15 minutos para evacuación de gases; se introduce la manguera al menos 5” del nivel superior del aceite y se bombea este hacia el recipiente; por último, se rotula antes de enviar la muestra al laboratorio.

El reporte de laboratorio confirma un nivel de *severidad 4* debido al alto nivel de contaminación, como consecuencia del conteo de partículas metálicas en suspensión; adicionalmente, se recomienda el reemplazo de filtros aun si se este

se encuentra fuera del periodo; se realiza el procedimiento de filtrado. Se comparte información requerida como volumen del cárter y el tamaño del micrón del filtro.

Tabla XII. **Reporte preliminar de severidad del aceite y recomendaciones**

POLARIS Laboratories

Reporte de Analísis de Lubricante

North America: +1-877-808-3750

0	1	2	3	4
NORMAL		ANORMAL		CRITICO

Severidad General del Reporte

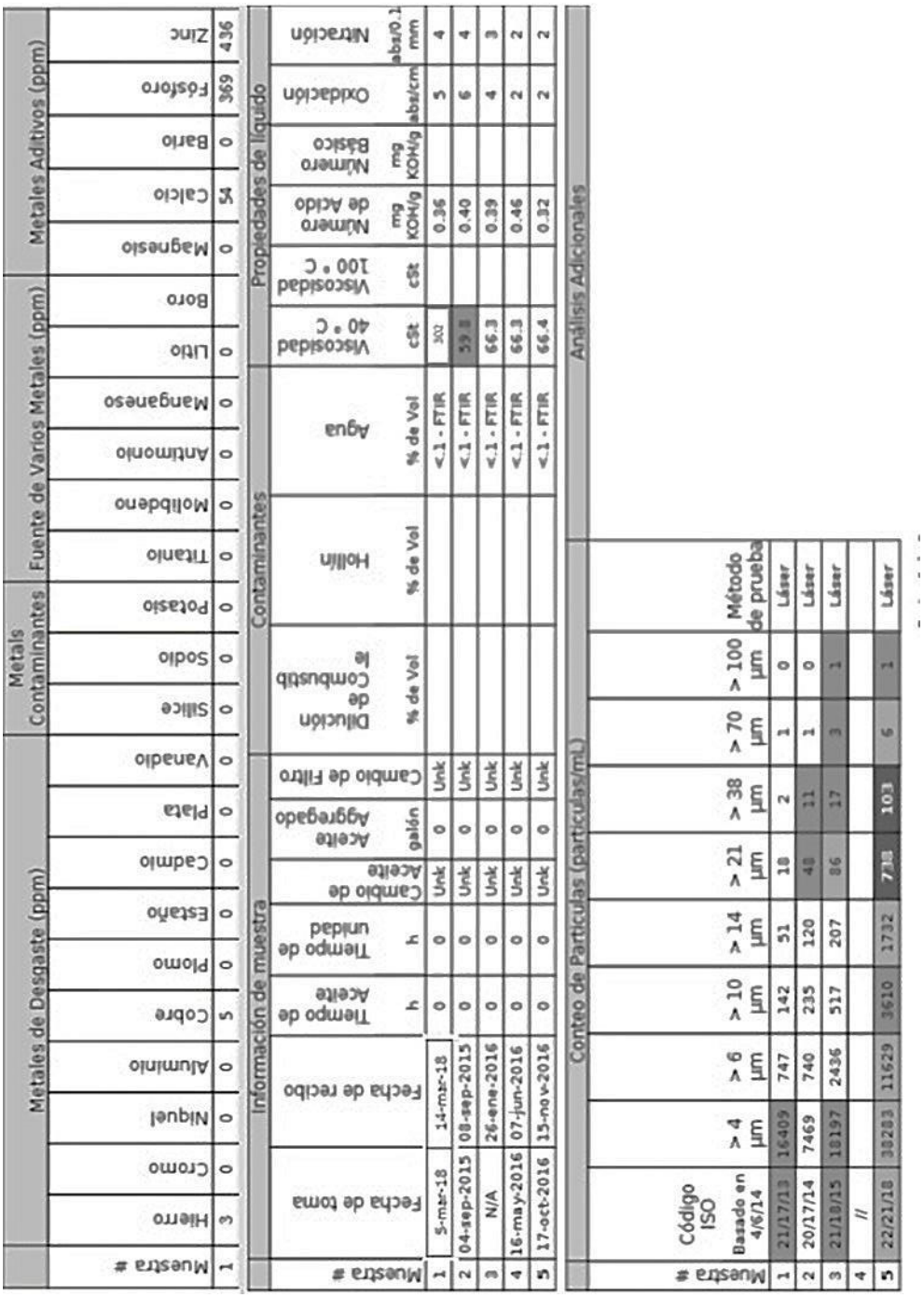
Información de Cuenta		Información del Componente		Información de muestra	
Número de cuenta:	507487-0047-0001	ID de Componente:	UL2	Número de Huella:	16145D04068
Nombre de Compañia :	AG LAMINACION LBA	ID Secundaria:	Reductor H7	Número de laboratorio:	G-225630
Contacto:		Filtro de tipo de componente:	REDUCTION GEAR	Localización de Laboratorio:	Guatemala City
Dirección:		Fabricante:	Informacion solicitada	Analista de Datos:	EAD
		Modelo:	Informacion solicitada	Tomada:	
Teléfono:		Aplicación:	PLANT/INDUSTRIAL	Recibido:	05-3-2019
		Capacidad de sumidero:	0 galón	Completado:	14-3-2019

Informacion de filtro		Información Misceláneo	Información del Producto	
Tipo de filtro:	Informacion solicitada		Fabricante del Producto:	VALVOLINE
Indice de Micrón:	0		Nombre del Producto:	AGMA EP GEAR OIL
			Grado de Viscosidad:	ISO 320

Comentarios	Debido al resultado del analisis de CONTEO DE PARTICULAS, se sugiere filtrar el sistema para mejorar la limpieza del mismo. y/o Cambio del filtro es sugerido si no hecho en el tiempo del muestreo (como aplicable); El conteo de partículas se encuentra a NIVEL SEVERO; Por favor de proveer la unidad del Fabricante/Modelo para comparar los datos a los estándares apropiados para esta unidad; Provea por favor la capacidad del colector de aceite (carter) de la unidad en la siguiente muestra; Por favor de proveer el tamaño de micron y tipo de filtro. Esto no ayudará a evaluar apropiadamente el conteo de partículas.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Niveles de contaminación del aceite reductor H7**



Muestra #	Metales de Desgaste (ppm)												Metals Contaminantes			Fuente de Varios Metales (ppm)							Metales Aditivos (ppm)					
	Hierro	Cromo	Níquel	Aluminio	Cobre	Plomo	Estaño	Cadmio	Plata	Vanadio	Sílice	Sodio	Potasio	Titanio	Molibdeno	Antimonio	Manganeso	Litio	Boro	Magnesio	Calcio	Bario	Fósforo	Zinc
1	3	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	54	0	369	436

Muestra #	Información de muestra							Contaminantes			Propiedades de líquido					
	Fecha de toma	Fecha de recibo	Tiempo de Aceite	Tiempo de unidad	Cambio de Aceite	Aceite Agregado	Cambio de Filtro	Dilución de Combustible	Hollín	Agua	Viscosidad 40 ° C	Viscosidad 100 ° C	Número de Ácido	Número Básico	Oxidación	Nitración
			h	h		galón		% de Vol	% de Vol	% de Vol	cSt	cSt	mg KOH/g	mg KOH/g	abs/cm	abs/0.1 mm
1	5-mar-18	14-mar-18	0	0	Unk	0	Unk			<.1 - FTIR	302		0.36		5	4
2	04-sep-2015	08-sep-2015	0	0	Unk	0	Unk			<.1 - FTIR	359		0.40		6	4
3	N/A	26-ene-2016	0	0	Unk	0	Unk			<.1 - FTIR	66.3		0.39		4	3
4	16-may-2016	07-jun-2016	0	0	Unk	0	Unk			<.1 - FTIR	66.3		0.46		2	2
5	17-oct-2016	15-nov-2016	0	0	Unk	0	Unk			<.1 - FTIR	66.4		0.32		2	2

Muestra #	Conteo de Partículas (partículas/mL)							Análisis Adicionales
	Código ISO Basado en 4/6/14	> 4 µm	> 6 µm	> 10 µm	> 14 µm	> 21 µm	> 38 µm	> 70 µm	> 100 µm	Método de prueba
1	21/17/13	16409	747	142	51	18	2	1	0	Láser
2	20/17/14	7469	740	235	120	48	11	1	0	Láser
3	21/18/15	18197	2436	517	207	86	17	3	1	Láser
4	//									
5	22/21/18	38283	11629	3610	1732	738	103	6	1	Láser

Fuente: elaboración propia.

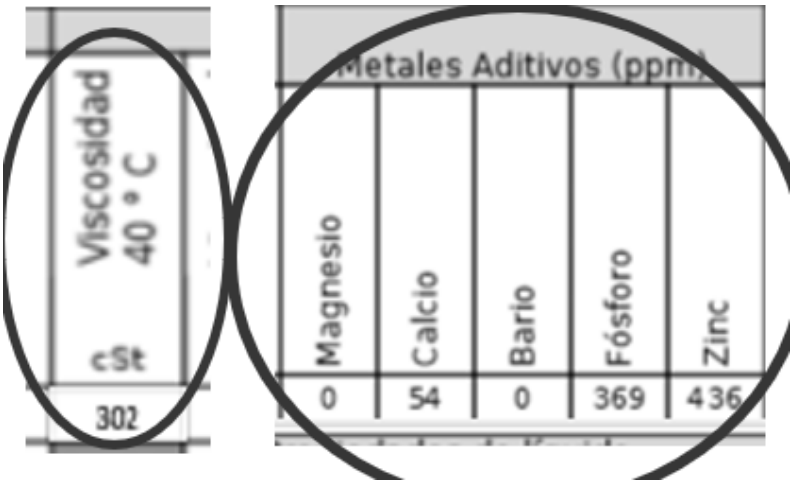
Se analizan los métodos de resolución de las fallas de circulación del aceite a través de un sistema de filtros externos, proponiendo su traslado a recipientes nuevos, la limpieza del reservorio y forzar el paso de dicho aceite por los filtros por siete veces; también se explica el método de alineación de ejes y el cambio del elemento elastómero dañado.

3.2.2. Descripción del método de mejora en el lubricante

Antes de describir la importancia del cuidado del aceite es conveniente señalar la relación que existe entre el precio de compra y la calidad; esto en función de paros en la producción debido al aparecimiento de fallas catastróficas o por caer en ciclos incorrectos de parada de planta, por cambios tempranos en el lubricante.

Un aspecto importante en relación con el procedimiento es que puede desarrollarse siempre y cuando parámetros como el paquete de aditivos o la viscosidad se encuentren aún dentro del intervalo de operación; es decir que todavía haya una viscosidad denominada hidrodinámica, la cual consiste en una película de lubricante que debe permanecer entre el elemento rodante y la pista de rodadura con cambios de velocidad y cargas en el rodamiento.

Figura 31. **Comportamiento de viscosidad y paquete de aditivos**



Fuente: elaboración propia. Capturas de pantalla de viscosidad y paquetes de aditivos..

La viscosidad del aceite para el reductor H7 se encuentra dentro del nivel de tolerancia para un lubricante ISO 320; su intervalo ±10 % va desde 288 a 352 CST, y la presencia en buena cantidad del paquete de aditivos, el cual viene diseñado para soportar extrema presión, efecto de limpieza por detergencia y antiespumante, los cuales aparecen en una buena cantidad; es posible utilizar un sistema de filtración externa.

El laboratorio reporta presencia de las siguientes partículas de metales de desgaste suspendidas en 1 ml en el lubricante: Hierro 3 Fe y cobre 5 Cu ppm; estos datos tienen validez únicamente debajo de 5 µm, por lo que arriba de este rango pueden aparecer muchos más elementos de metales de desgaste causando daño en el sistema.

Figura 32. **Contaminantes de partículas metálicas**

Metales de Desgaste (ppm)									
Hierro	Cromo	Niquel	Aluminio	Cobre	Plomo	Estaño	Cadmio	Plata	Vanadio
3	0	0	0	5	0	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia. Captura de pantalla de los contaminantes.

El reporte incluye una tabla con el conteo según normas internacionales; para este caso se encontraron 738 partículas suspendidas en 1 ml con un tamaño mayor a 21 micrones y 103 partículas en suspensión en 1 ml, con un tamaño mayor a los 38 micrones; lo que implica un alto valor de contaminación para la muestra de aceite del reductor H7.

Tabla XIV. **Conteo de partículas contaminantes**

Conteo de Particulas (particulas/mL)									
Código ISO Basado en 4/6/14	> 4 µm	> 6 µm	> 10 µm	> 14 µm	> 21 µm	> 38 µm	> 70 µm	> 100 µm	Método de prueba
21/17/13	16409	747	142	51	18	2	1	0	Láser
20/17/14	7469	740	235	120	48	11	1	0	Láser
21/18/15	18197	2436	517	207	86	17	3	1	Láser
//									
22/21/18	38283	11629	3610	1732	738	103	6	1	Láser

Fuente: elaboración propia. Captura de pantalla del conteo de partículas.

El metodo sencillo consiste en forzar recirculación de aceite (275 galones) del cárter hacia un sistema de filtros externos y luego regresarlo al punto de origen; los elementos filtrantes son de última generación, ya que estan fabricados con fibras sintéticas de composición silica, los cuales logran atrapar impurezas menores a los 8 µm; el procedimiento se realiza al menos 7 veces, segùn Trout (2019).

Esto fue realizado con la menor cantidad de personal en planta: un especialista eléctrico, un especialista mecánico y un ayudante mecánico; fue necesario realizar el procedimiento un fin de semana aprovechando un paro de planta; la forma de realizarlo es práctica, ya que unicamente se conecta una manguera al final del tanque, y esta hacia la succión de una bomba que descarga el aceite hacia al sistema de filtros; luego retorna al resorvorio; el flujómetro marcó 2060 galones.

Posteriormente se espera un dia de producción para volver a realizar el procedimiento de la toma de aceite, realizando el procedimiento descrito anteriormente; a simple vista se observa un cambio de tonalidad menos opaco que en la primera ocasión, se rotula y se envia a laboratorio para los pruebas correspondientes; se solicita poner enfasis en la ferrografía.

Adicionalmente, la gerencia de planta apoyó autorizando el reemplazo del filtro de cedazo ubicado en el retorno del aceite, desde el reductor hacia el cárter; tambien sugirió el cambio del respirador previo al arranque del sistema de recirculación y una limpieza de todo el equipo para evitar el ingreso de contaminación.

Posteriormente se reciben los resultados de laboratorio, confirmando un nivel de severidad 0, así como un mejoramiento notable en relación con el conteo

de particulas; por lo que se puede confrimar que el procedimiento fue exitoso; al menos en el momento de la toma del aceite, el cual fue un dia posterior al arranque.

Tabla XV. **Mejora en la calidad del lubricante**

POLARIS Laboratories

Reporte de Analísis de Lubricante

North America: +1-877-808-3750

0	1	2	3	4
NORMAL		ANORMAL		CRITICO

Severidad General del Reporte

Información de Cuenta		Información del Componente		Información de muestra	
Número de cuenta:	507487-0047-0001	ID de Componente:	UL2	Número de Huella:	16145D04060
Nombre de Compañia :	AG LAMINACION LBA	ID Secundaria:	Reductor H7	Número de laboratorio:	G-225597
Contacto:		Filtro de tipo de componente:	REDUCTION GEAR	Localización de Laboratorio:	Guatemala City
Dirección:		Fabricante:	Informacion solicitada	Analista de Datos:	FLG
		Modelo:	Informacion solicitada	Tomada:	
Teléfono:		Aplicación:	PLANT/INDUSTRIAL	Recibido:	19-3-2019
		Capacidad de sumidero:	0 galón	Completado:	23-3-2019

Informacíon de filtro		Información Misceláneo	Información del Producto	
Tipo de filtro:	Informacion solicitada		Fabricante del Producto:	VALVOLINE
Indice de Micrón:	0		Nombre del Producto:	AGMA EP GEAR OIL
			Grado de Viscosidad:	ISO 320

Comentarios	Los datos no indican ningún resultado anormal. Tomar una nueva muestra en el próximo intervalo de cambio; Por favor de proveer la unidad del Fabricante/Modelo para comparar los datos a los estándares apropiados para esta unidad; Provea por favor la capacidad del colector de aceite (carter) de la unidad en la siguiente muestra;

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Mejora en el registro y conteo de particulas**

G-225597 Reductor H7 507487-0047-0001 AG LAMINACION LBA Pagina 2

	Conteo de Particulas (particulas/mL)										Análisis Adicionales
Muestra #	Código ISO Basado en 4/6/14	> 4 µm	> 6 µm	> 10 µm	> 14 µm	> 21 µm	> 38 µm	> 70 µm	> 100 µm	Método de prueba	
NL	//										
6	//										
7	//										
8	//										
9	//										
10	//										

Fuente: elaboración propia.

3.2.3. Confirmación de fallo en linealidad de ejes

Producir barra corrugada en caliente es una operación riesgosa y de alta exigencia para todos los equipos que agregan valo; dentro de las caracteristicas inherentes al proceso existe la vibración, la cual es perseptible desde cualquier ubicación; subjetivamente es fácil confundir los distintos niveles, así como el origen de la misma; por este motivo es imperativo un intrumento al igual que el analista, que contribuyan a encontrar anomaliías que luego puedan ser registradas en informes para su seguimiento.

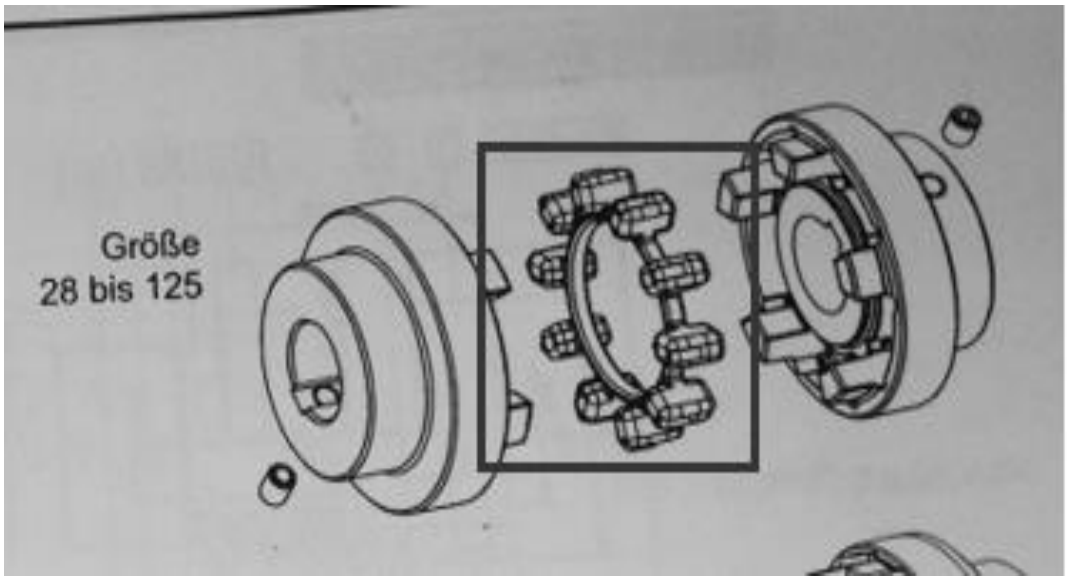
El movimiento circular en los ejes del motor eléctrico y de la caja reductora H7 debiera ser uniforme, evitando movimiento helicoidal; lo que comunmente se conoce en lenguaje popular como cabezeo del acople; este fenómeno se da en la mayoria de casos por falta de paralelismo, fenómeno común en equipos de grandes masas como es el caso del reductor H7.

La transferencia de torque entre el generador de fuerza motriz que es el motor eléctrico y la caja reductora H7 se realiza por medio de un acople especial; dentro de las funciones de este mecanismo se pueden mencionar las siguientes:

- Asegura el giro de los ejes.

- Funciona como seguro mecánico, ya que su elemento elastómero absorbe la vibración, sacrificandose para no dañar otros componentes.

Figura 33. **Acople de reductor H7 entre motor eléctrico y caja reductora**



Fuente: elaboración propia, empleando Visio.

El acople como cualquier componente del equipo tiene una aplicación específica en su funcionamiento; al no contar con el elemento elastómero el movimiento tiende a ocasionar un juego axial, el cual se transfiere hacia los puntos de alojamiento del cojinete, creando desgastes que posteriormente lleva mucho tiempo repararlos, ya que es necesario metalizar la parte dañada y luego rectificarla en torno; adicionalmente, también el daño llega hasta el propio rodamiento causando la falla catastrófica.

Figura 34. **Elemento elastómero dañado de reductor H7**

Fuente: [Fotografía de Douglas Rodas]. (Ciudad de Guatemala, Guatemala, 2021). Colección particular. Guatemala.

Subjetivamente es posible sugerir que el estudio de análsis de vibración mecánica sea suficiente para afirmar que existe desalineamieto de ejes en el reductor H7; el alineador láser será el instrumento encargado de validar la probabilidad de fallo para el rodamiento del lado del acople; en seguida se muestra el reporte preliminar de este barrido.

A continuación, se describen los conceptos que deben ser comprendidos para una adecuada lectura de los reportes, tanto el preliminar como el posterior a la mejora, La base utilizada para el análisis es una tabla internacional de intervalos de tolerancia, la cual sustenta tres parámetros de medición denominados por los instrumentos *OFFSET, ANGLE Y GAP.*

El aviso al analista del estado de la alineación es por medio de colores tipo semáforo, lo que ayuda en el desarrollo de la actividad ya que va indicando su cercanía o alejamiento de los diferentes intervalos de tolerancia por parámetro; lo que debe conocerse previo a la parametrización del instrumento son las

revoluciones por minuto a las que el equipo trabaja, ya que establecerá el intervalo que se utilizará en la tabla.

Tabla XVII. **Intervalo de tolerancia del instrumento alineador láser**

Rev./Min.	Intervalo	Offset	Angle	Gap
600-899	Aceptable	0.23	0.15	0.04
	Excelente	0.13	0.1	0.03
900-1199	Aceptable	0.15	0.1	0.03
	Excelente	0.08	0.07	0.02
1200-1799	Aceptable	0.1	0.08	0.02
	Excelente	0.06	0.05	0.01
1800-2999	Aceptable	0.08	0.05	0.01
	Excelente	0.05	0.03	0.01
3600-5999	Aceptable	0.04	0.03	0.01
	Excelente	0.03	0.02	0.01
6000-7200	Aceptable	0.025	0.02	0.05
	Excelente	0.013	0.01	0.03

Fuente: elaboración peopia.

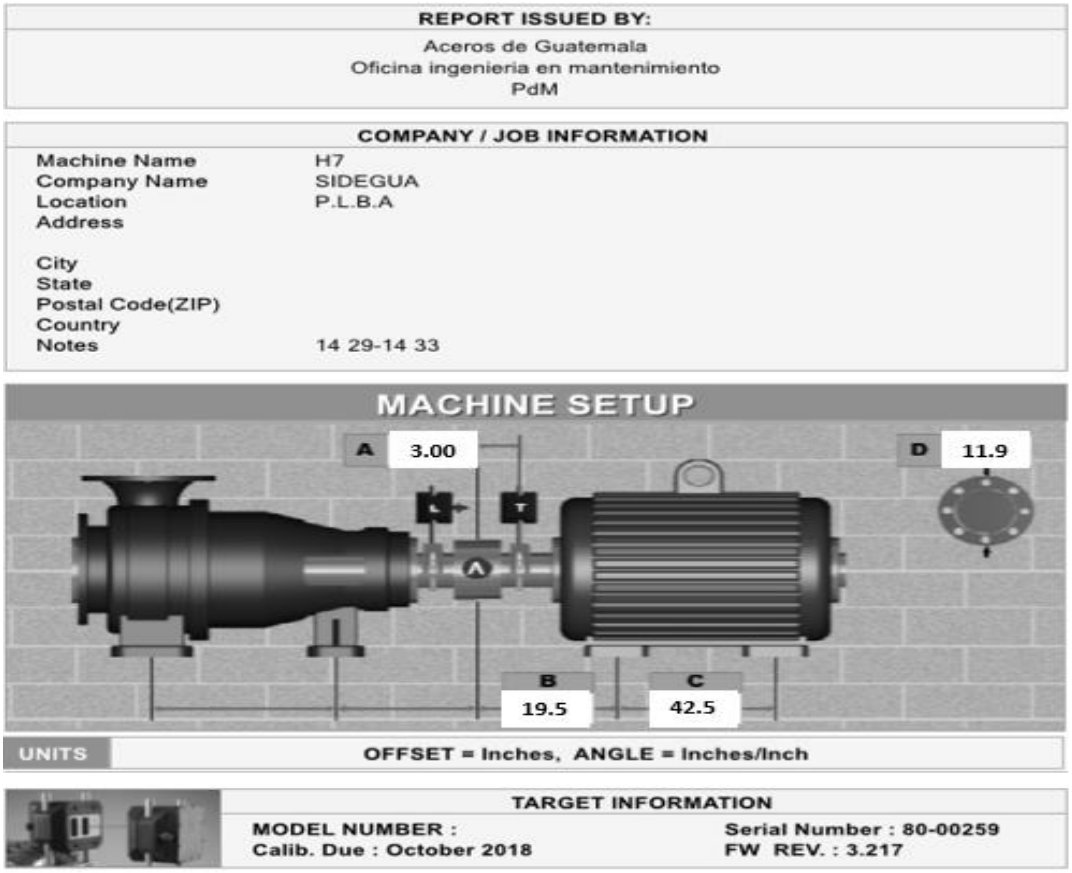
De igual manera es necesario llenar los siguientes campos para el análisis: la distancia que existe entre los centros de los agujeros de los tornillos de la bancada y entre los dos sensores, cuánta es la medida entre los centros de los agujeros de los tornillos frontales del conjunto y de igual manera en los ubicados en la parte de atrás en la bancada; adicionalmente se establece el diámetro del eje del equipo móvil y por último la escala en la que se trabajará, si se hará en metros o pulgadas.

Luego de haber ingresado los datos se inicia el procedimiento, el cual deberá de realizarse con todo el equipo fuera de línea, por lo que para el actual trabajo de investigación se efectuó durante un fin de semana cuando la planta se encontraba sin producir; con la mano deberán girarse los ejes a manera que los

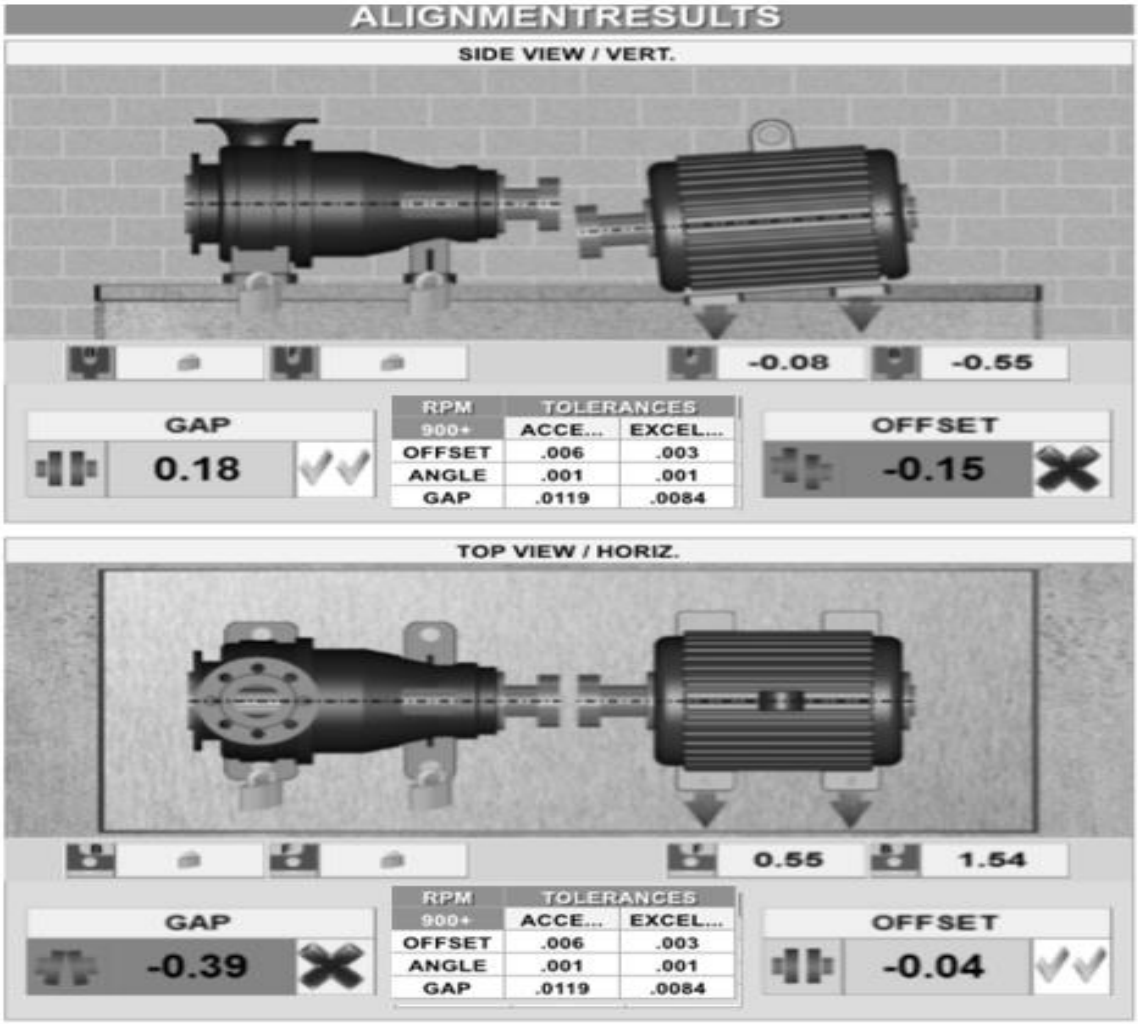
sensores empiecen a registrar datos desde un valor inicial hasta un segmento de la circunferencia.

El entorno del iPad parpadea emitiendo instantáneamente el siguiente reporte, el cual contiene información real del estado de la condición en la que se encuentra el equipo del nivel de descompensación en la que se encuentra, tanto en su linealidad horizontal como vertical; cabe mencionar que para corregir anomalía es necesario contar con una bancada totalmente limpia, es decir sin irregularidades, por lo que se sugiere limpiar con aire comprimido toda el área de la bancada para evitar que no aparezca escoria del acero de proceso.

Figura. 35. **Reporte preliminar de linealidad de reductor H7**



Continuación de la figura 35.



Fuente: SEW EURODRIVE (2007). *Reductores industriales.* Consultado el 3 de diciembre de 2021. Recuperado de https://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/11513500.pdf.

La información que tiene el reporte preliminar es precisa en relación con que existe falta de linealidad entre los dos ejes tanto en el plano horizontal como en el vertical; es necesario levantar la parte frontal del motor y lograr un corrimiento

de este en dirección de las flechas para compensarlo horizontalmente, por lo que se procede a la corrección.

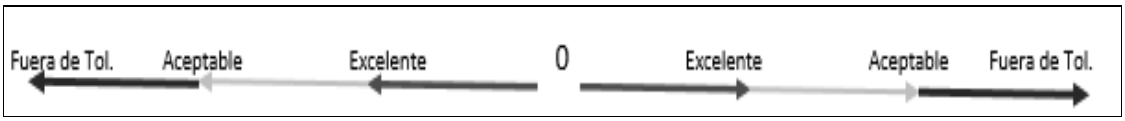
3.2.4. Descripción del método para alinear ejes y reporte posterior al mejoramiento

El procedimiento para lograr la linealidad de los ejes es sencillo siempre y cuando se cuente con los requerimientos y conocimientos básicos necesarios; primero se explicará el concepto de los parámetros involucrados en las mediciones vertical y horizontal, para luego detallar el procedimiento de compensación de paralelismo entre los ejes del reductor H7.

Parámetro Offset es el intervalo de distancia vertical y/o horizontal de corrimiento donde se encuentren los dos centros de ejes motor- caja reductora o motor impulsor de bomba; este se considera de cero a la izquierda o de cero a la derecha; se forman dos rangos excelente y aceptable, se mide en décimas, centésimas y milésimas de mm o pulgada, según sea seleccionado el sistema previamente.

Gap es la distancia alrededor de cualquiera de los 360° respecto de la separación de los labios entre acoples, es decir en sus circunferencias; también se utiliza el concepto de tolerancia de la tabla anterior, medido en décimas, centésimas y milésimas de mm o pulgada, según sea el sistema seleccionado previamente y, por último, la angularidad que es la distancia medida en mm/m Independientemente de la escala establecida.

Figura 36. **Interpretación de tolerancias y rangos del instrumento**



Fuente: elaboración propia.

Con la aplicación de estos conceptos es posible trabajar la corrección de la falta de linealidad del reductor H7 respecto de su motor eléctrico: el procedimiento se detalla en 5 pasos, los cuales deben seguirse en secuencia y con las recomendaciones pertinentes, en relación con el cumplimiento de normas de seguridad industrial divulgado al personal encargado de la operación.

Previo a la ejecución de la tarea es necesario asegurarse que los 4 tornillos para corrimiento horizontal tengan las hebras de sus hilos libres de suciedad; debido a que estos pasan mucho tiempo sin removerse tienden a formar lodos y corrosión que es necesario eliminar de la superficie; el objetivo es ofrecer el efecto de un corrimiento práctico y preciso.

Este movimiento debe actuar libremente sobre la masa del motor eléctrico pivoteado desde la platina de sujeción hacia el rostro de la bancada del equipo móvil; adicionalmente debe asegurarse que el cuerpo de los tornillos no tenga ninguna torcedura para realizar las maniobras de formar sencilla y sin aplicar demasiada fuerza.

Adicionalmente, es necesario contar con una superficie totalmente limpia de irregularidades; en este caso fue posible utilizar aire comprimido, por lo que hubo opción a izar el motor a una pequeña altura para soplar a lo interno de la base y

los rieles que soportan la bancada; a continuación, se describe la secuencia de pasos que deberán seguirse para alineaciones láser.

- Paso 1: es necesario siempre trabajar con los tornillos de la bancada, sueltos, para tener libertad de efectuar las maniobras de corrimiento sugeridas en el informe preliminar; deberá optimizarse el aprovechamiento de la forma elíptica de los agujeros de la bancada del motor para lograr la linealidad entre los ejes; por definición siempre el primer plano que se va a alinear será el horizontal, que por lo general es el más susceptible a desplazamientos durante la operación.

- Paso 2: posicionado el equipo dentro de las tolerancias del eje horizontal se procede trabajar el plano vertical; para lograrlo es necesario utilizar un mecanismo de izaje, el cual puede ser un sistema de marco con polipasto o un puente grúa; en este caso se utilizó la grúa de planta tirando sobre una argolla normada ubicada en el centro de la masa del motor. El objetivo es levantarlo a una pequeña altura únicamente con la intención de colocar láminas de compensación (*shim*) en forma de “U” que rodean los tornillos de sujeción; estas deberán alojarse entre la base y la parte inferior de la pata de la bancada del motor, las delgas deberán ser normadas respecto de su espesor, debido a que si son de otro material como latón tienden a comprimirse al efectuar el torque de apriete.

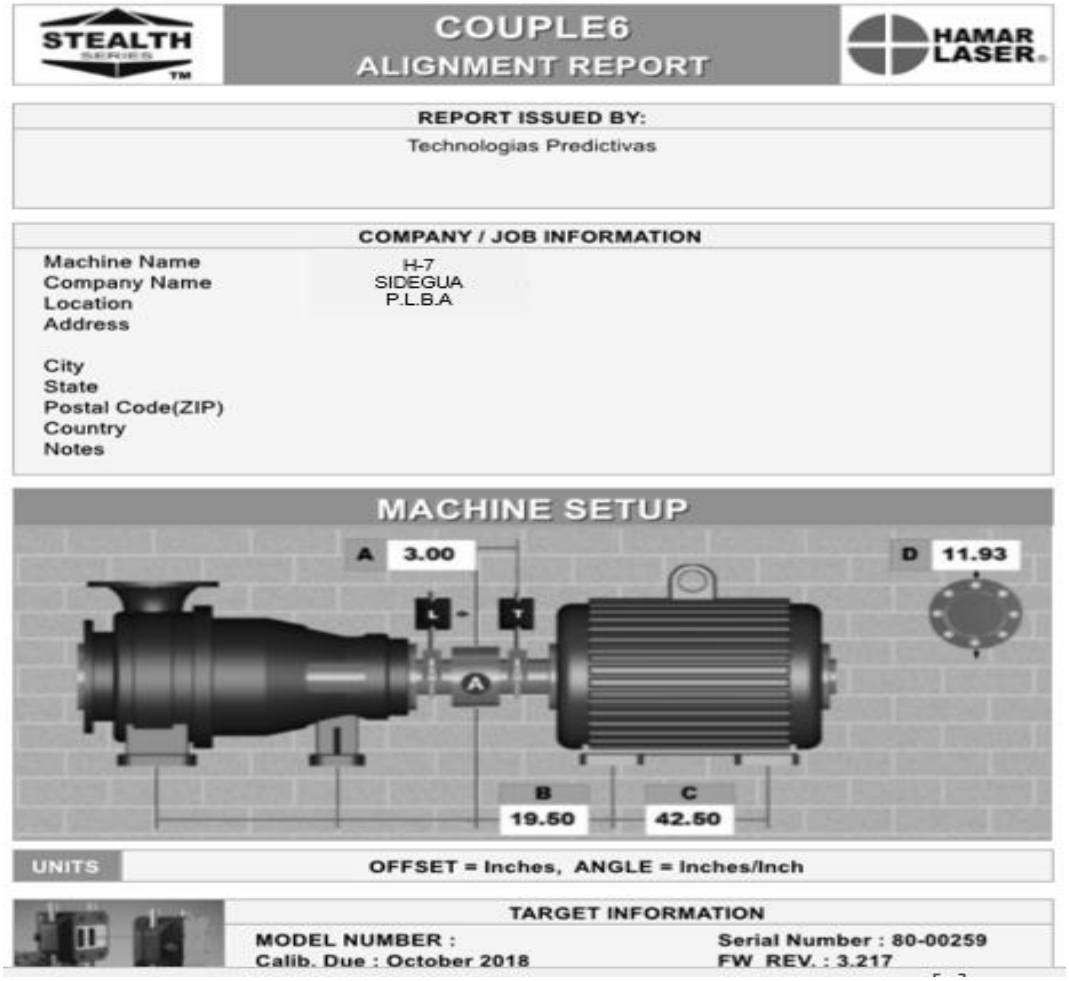
- Paso 3: por último, se procede al apriete de los 4 tornillos de la base aplicando un valor correcto de torque según el diámetro del tornillo; esto deberá realizarse con un torquímetro que ofrezca las características necesarias; como se ha explicado antes el apriete deberá ser en forma de diagonal; por ultimo dejar los tornillos de corrimiento en su posición de

reposo, desplazados hacia la pared de la pata del motor eléctrico para que sirvan de tope.

- Paso 4: se repite el procedimiento descrito anteriormente para la comprobación de linealidad necesario para que el instrumento pueda realizar un nuevo barrido de lecturas, logrando generar un nuevo reporte con una lectura posterior al presente método y por último se vuelve a conectar el motor para verificar que no exista alguna anomalía.

A continuación, se muestra el reporte posterior al alineamiento luego de realizadas las correcciones sugeridas se evidencia el alcance del objetivo dado que se ha logrado compensar el desequilibrio logrando llevar el equipo a los intervalos de tolerancias sugeridas por la norma en relación con los parámetros de linealidad. A continuación, se presenta el reporte que confirma la corrección.

Figura 37. **Reporte posterior al procedimiento de alineación láser**



Fuente Hamar Laser (2021). *Stealth Series™ Shaft Alignment Systems.* Consultado el 13 de diciembre de 2021. Recuperado de http://www.hamarlaser.com/pdf/S-680T%208pg%20Brochure%20-%2085x11%20-%20Rev%20B.pdf.

3.3. Objetivo 3: describir los beneficios por implementación de la técnica de análisis de vibración mecánica demostrando la reducción del aparecimiento de fallas tabulando recurrencia, promedio de valores de amplitud y formulación de tendencias

Se presentan tabulaciones comparativas demostrando una reducción significativa tanto en el recuento de aparecimiento como en los valores de amplitud con la formulación de tendencias y confirmación de reportes.

3.3.1. Tabulación de datos posterior a la aplicación de los métodos

Luego de haber realizado el filtrado de aceite y la alineación láser se realiza el arranque de planta y del equipo; se establece una etapa de seguimiento en la que se estudia el estado de la condición, llevando un registro de parámetros de operación como temperatura, consumo de corriente, ruidos o chasquidos y vibración subjetiva.

Logrado arrancar de manera satisfactoria, en función de haber realizado los procedimientos de mejora se inicia un nuevo ciclo de inspecciones de análisis de vibración mecánica, este se establece en las mismas condiciones que en la etapa preliminar, el objetivo es poder evaluar el estado de la condición en general del reductor H7.

En la siguiente tabla comparativa se describe la condición inicial y posterior evidenciando la eficacia del método de mejora, muestra una reducción del número de aparecimientos de los modelos de espectros de frecuencia durante las inspecciones finales, la columna de reducción de aparecimiento del espectro y el porcentaje de reducción.

Tabla XVIII. **Comparativo de espectros entre etapas**

Recurrencia aparecimiento espectros rodamiento caja reductora H7			
Tipo de espectro	Etapa preliminar	Etapa posterior al método	Reducción recurrencia y amplitud
Fallo Lubricante	232.000	154.000	34.000%
Falta de Linealidad	215.000	79.000	63.000%
LSE Fallo Lubricante	14.630	2.500	82.910%
LSE Fallo alineación	13.600	2.000	85.290%

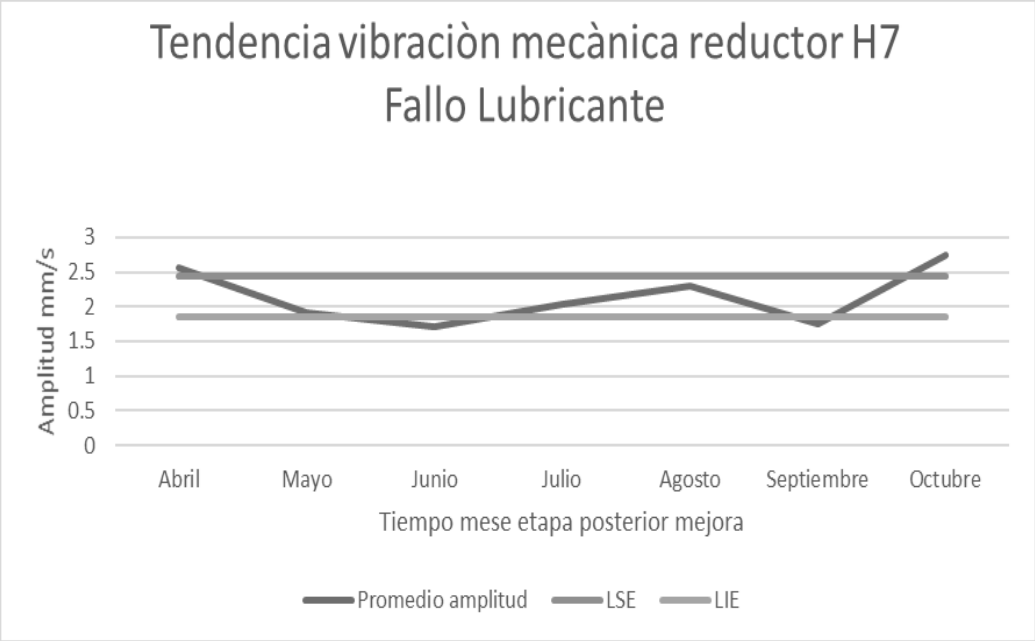
Fuente: elaboración propia.

3.3.2. Formulación de tendencias, posterior al mejoramiento

Otro aspecto de importancia en el presente análisis es lo relativo a la amplitud de onda vibratoria, debido al efecto dañino causado en el rodamiento del lado del acople, una reducción implicaría un mejoramiento en el estado de la condición estableciendo las condiciones para el aprovechamiento del intervalo de vida útil del componente, evidenciando la labor de mantenimiento como una fuente de beneficios.

La siguiente gráfica muestra el comportamiento del lubricante posterior al procedimiento de filtrado, se describe una reducción en el valor de la amplitud por lo que se puede establecer una reducción en el nivel de contaminación, lo que permite un giro con mayor libertada en los elementos rotativos del cojinete cilíndrico.

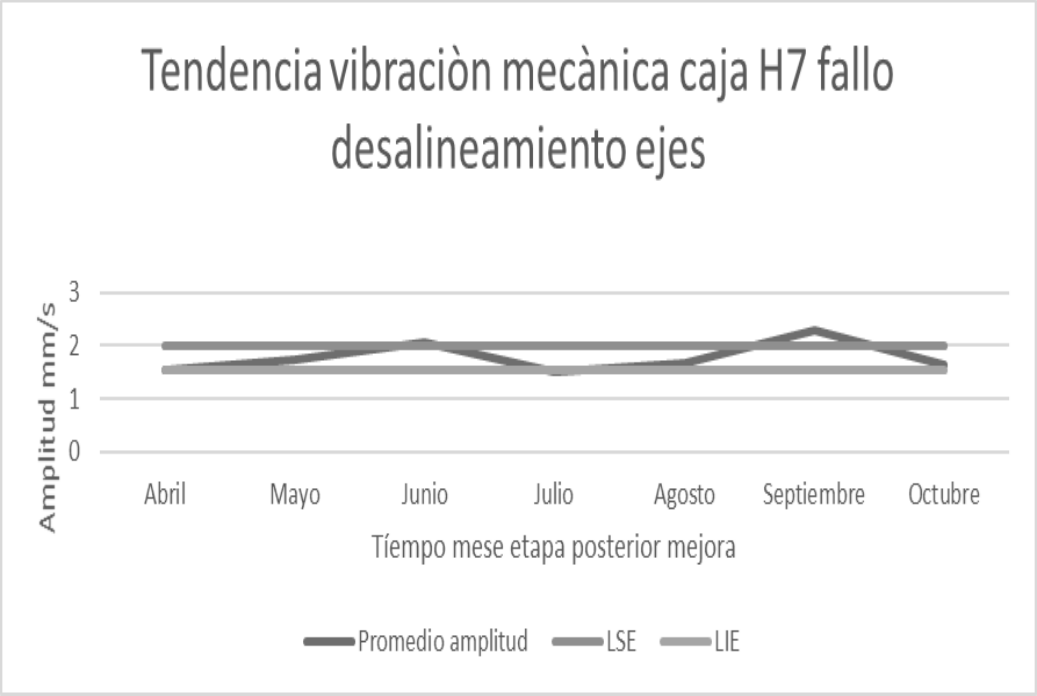
Figura 38. **Tendencia posterior al mejoramiento de modelo de fallo en lubricación**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel

A continuación, se presenta la gráfica de tendencia para desalineamiento de ejes posterior al procedimiento de alineación láser, el trazo del gráfico se realizó siguiendo el mismo procedimiento explicado anteriormente; se evidencia la reducción obtenida en la magnitud de la amplitud de la onda vibratoria presentando una mejor condición para la operación de la caja reductora H7.

Figura 39. **Tendencia posterior al mejoramiento de modelo de desalineamiento de ejes**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

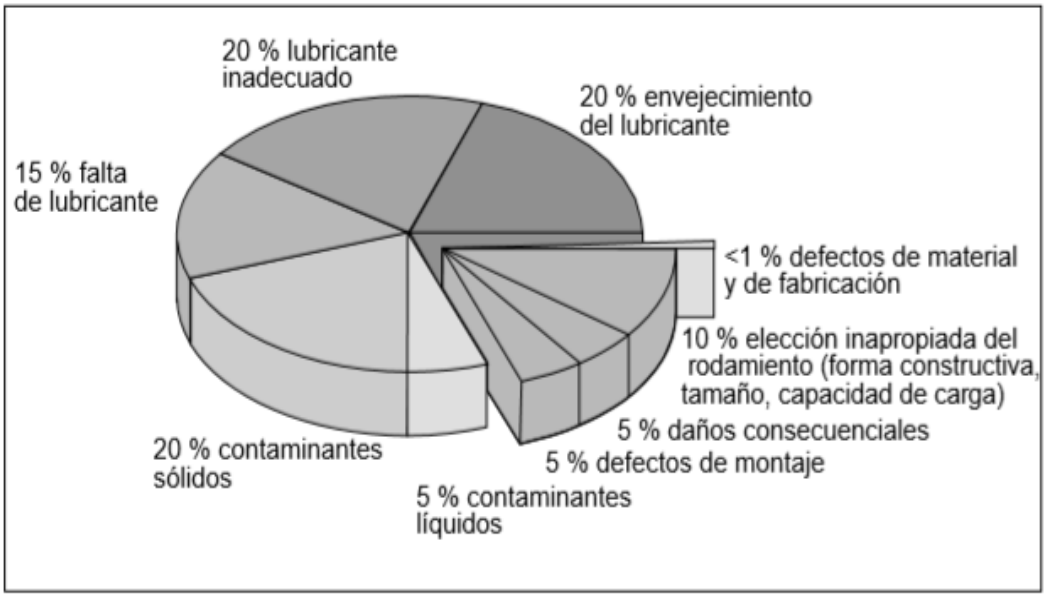
3.4. Objetivo general: propuesta para una gestiòn de mantenimiento preventivo con anàlisis de vibraciòn mecànica para detecciòn de fallas en la caja reductora horizontal H7 de una industria siderúrgica

Se propone un modelo de gestion enfocado principalmente en la identificaciòn y reducciòn del dañino efecto de la vibraciòn mecànica con enfoque en la contaminaciòn de aceite y desalineamiento de ejes, buscando proponer métodos alternativos que contribuyan al estado de la condiciòn de los equipos.

3.4.1. Anàlisis de resultados de la propuesta

El daño en el rodamiento puede tener causa raiz en el lubricante por sus altos niveles de contaminaciòn, pérdida del paquete de aditivos, valor de viscosidad fuera de tolerancia, corrosiòn, acidez y envejecimiento, siendo válida una propuesta de uso de tecnologìa con aceite sintètico que permita la aplicaciòn de sus bondades y beneficios, como el desempeño del reductor H7 con una pelicula de lubricante en sus paredes de rozamiento de extrema presion y un alargamiento en el intervalo de recambio.

Figura 40. **Asignación porcentual de daño en el lubricante**



Fuente:DOKUMEN (2020). *Manual Fag*: *guía de falla de rodamientos.* Consultado el 3 de diciembre de 2021. Recuperado de https://dokumen.tips/documents/fag-guia-de-fallas-rodamientos.html

Por otro lado, los intervalos de inactividad en el reductor H7 propician corrosión en la tubería de transporte (tubo proceso-hierro negro); según registro

histórico se han reparado fallas de picaduras y fugas de aceite debido a esta causa. Se propone evaluar una migración a tubería de acero inoxidable que permita el transporte del fluido con una resistencia mayor a la oxidación.

Otra probable fuente de contaminación es el cárter o reservorio, el cual se encuentra en un entorno propicio para formación de humedad debido a que se encuentra en un ambiente fuera del proceso de laminación con un Venturi natural; este efecto podría presentarse durante los turnos nocturnos, especialmente durante las madrugadas generado del choque térmico del aceite que ingresa del grupo de reductores de planta.

Es recomendable entonces, emanado del plan de análisis de aceite, el seguimiento al rango de viscosidad, el cual permite el procedimiento propuesto en el actual trabajo relativo a filtrado del aceite, limpieza del cárter y reemplazo o limpieza de filtros de atrapamiento de impurezas; adicionalmente se propone limpiezas periódicas al reductor H7 e inspecciones a la tubería de transporte, buscando el empoderamiento de las gerencias para el apoyo y respaldo para estos planes de conservación del activo.

Como se ha mencionado anteriormente, la operación siderúrgica es muy peligrosa; la operación de todo el tren se realiza a distancia desde el púlpito de mando; por lo general el estado de la condición de los equipos se controla desde ahí en lo referente a temperatura, velocidades, aceleraciones, torques, entre otros; lamentablemente el paràmetro de vibración no fue considerado en el diseño original.

En la actualidad el entendimiento de las causas de vibración ha tomado un gran valor debido a los beneficios que conlleva; uno de los avances es lo referente a sistemas de vigía, los cuales se componen de sensores ubicados a

distancia en puntos estrategicos fuera del peligro para el analista; estos transfieren la información a un módulo en un lugar seguro donde se pueden descargar los datos al instrumento analizador en forma de interrogación.

La tecnología ha avanzado hasta el punto de ofrecer monitoreo por módulo de comunicación, presentando los espectros de los modelos de vibración en tiempo real hasta un monitor que puede ser ubicado en cabina central; esto permitiría monitoreo de cambios en el estado de la condición o de niveles de amplitud, pudiendo setear niveles de alarma y prealarma.

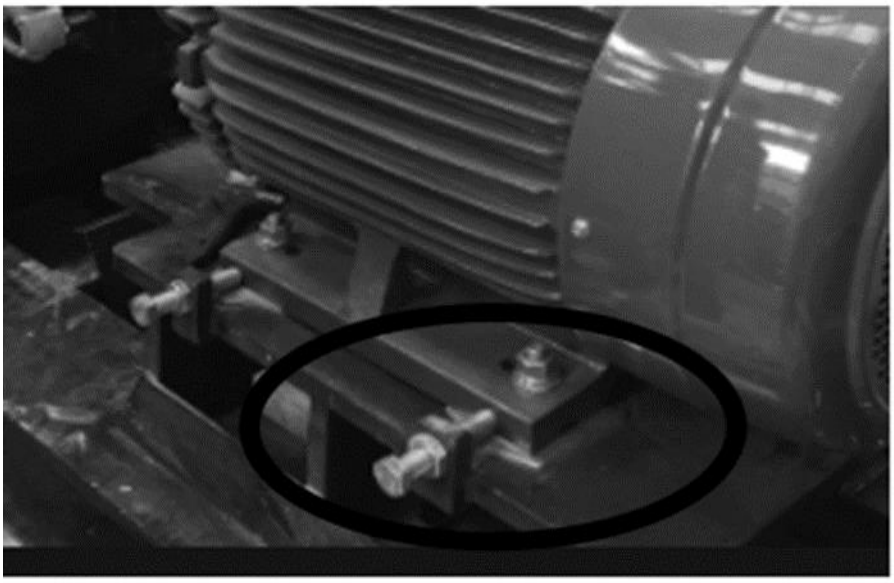
Un sistema de este tipo puede comportarse como un vigía del estado en general de la máquina, puede traducir las condiciones en que se encuentra el elemento elastómero de vital importancia, debido a que es el primero en resentir deterioro y en alertar un daño; de igual manera pero más importante aún, el rodamiento puede ser evaluado constantantemente.

Un aspecto importante es lo relativo al costo financiero, por lo que para insentivar la inversión sería de vital importancia una presentación del costo-beneficio relativo a la implantación del sistema; es importante establecer los alcances y necesidades; dentro de ellas debería mencionarse el costo del equipo, la capacitación del equipo de analistas y luego un plan de retención del talento humano, debido a la importancia que representa la curva de expertiz.

Otro aspecto de vital importancia es lo relativo al rodamiento del motor eléctrico, ya que es parte del sistema, pues se trata de otro punto de apoyo del eje; este presenta una probabilidad de inestebalidad, ya que según registros históricos ha sufrido daños por fatiga en el alojamiento, generando la tarea correctiva de metalizar la cuna en la tapa frontal y el reemplazo del rodamiento.

Para corregir el problema generado por la desalineación respecto de la pérdida de medida en el eje y su asiento, el cual genera deformación en la simetria circular donde se aloja el rodamiento creando un desgaste comúnmente denominado daño por cintura debido a la pérdida de medida por deformación oval la tapa, se propone un rodamiento de contacto angular equivalente a las cargas radiales - axiales, de ser posible buscar un especialista asesor de marca. Otro aspecto es lo relativo a la evaluación de tornilleria para maniobras de corrimiento de la bancada en el motor eléctrico, los cuales están fabricados en material de hierro negro; la propuesta consiste en presentar estos en acero inoxidable con alto valor de cromo, evitando la incrustación en el tiempo de sarros corrosivos en la hebras del alma de tornillo.

Figura 41. **Correderas de bancada para motor eléctrico**



Fuente: [Fotografía de Douglas Rodas]. (Ciudad de Guatemala, Guatemala, 2021). Colección particular. Guatemala.

3.4.2. Crear una cultura para control y sostenibilidad del muestreo de aceite e inspecciones de alineación láser

La alineación de ejes es un modelo de fallo que se presenta de la siguiente manera, saltan las protecciones del motor eléctrico las cuales persiven un incremento de corriente debido a la soltura que se genera en el acople debido al elastomero dañado, el exceso de torque por lo tanto detiene el flujo de corriente al estator.

En la actualidad ya existe la practica de revision del acople como parte de la inspección general del equipo, al manipular los ejes y notar la ausencia del elemento se solicita tiempo para su verificación, por lo que es necesario aflojar los flanges y luego reemplazar el elemento, como ultimo paso nuevamente es necesario el apriete de la tornilleria de todo el acople; estos no suelen ser objeto de una partida contable tal como se aplica a los costos directos, pero su volumen puede ser incluso superior a los directos.

3.4.3. Determinar consecuencias e impactos de tiempos improductivos en el proceso de laminación de barra corrugada

En función del tiempo improductivo se realiza la siguiente cuantificación, debido al disparo del motor eléctrico de la caja reductora H7 la barra en proceso queda incrustada en el resto de molinos laminadores, deteniendo el resto de motores eléctricos, las palanquillas des hornadas quedan en el tren del desbaste o primer acabador, a continuación se tabula el tiempo improdutivo.

Tabla XIX. **Cálculo de tiempo improductivo**

Item	Descripción	Tiempo aproximado
1	Liberar molinos de la barra en proceso	4 Horas.
2	Liberar palanquillas el tren desbaste	12 Horas.
3	Volver a calibrar el tren para habilitar nuevamente el proceso.	4 Horas.
4	Tiempo total paro	20 Horas.

Fuente: elaboración propia.

Lamentablemente no se tuvo acceso al costo promedio de la hora de producción, en consecuencia el presente estudio no puede determinar el impacto economico que tiene que absorver la organización en relación a las 20 horas improductivas, las cuales tienen como causa raiz el desalineamiento de ejes.

Es válido establecer la siguiente relación perdida de casi 1 dia de producción debido a daño de un elemento elastomero al cuál se le asigna un valor ponderado de Q300.00, esta es una de las razones por las cuales tanto el mantenimiento preventivo como la aplicación de la tecnica de alineamiento de ejes justifica su desarrollo.

Por último una falla catastrofica total podria ser que sucedieran todos los eventos descritos anteriormente sumado la quema del motor eléctrico, lo que implicaria dias completos para poder volver a producir la barra lo que implicaria dejar proyectos de infraestructura sin abastecimiento de material, problemas legales por inclumplimientos de contratos y la molestia del cliente.

De alguna manera el registro historico compartido presenta este modelo de forma muy puntual en equipos perifericos ajenos al tren de laminación, por ejemplo en la familia de ventiladores del horno de recalentamiento tiro forzado y el turbo ventilador, estos manejan en su orden el desalojo del volumen de gases de emision hacia la chimenea que luego se expulsa al ambiente, el segundo inyecta aire a presion para combustion en los 16 quemadores de bunker de la recamara.

3.4.4. Propuesta para presentar la gestión de mantenimiento preventivo como modelo para otros procesos productivos

Las propuestas de mejora de las condiciones en la central de lubricación UL2 y del rodamiento del lado del acople del motor eléctrico a la caja reductora, así como en el estado de la condición del acople y el alineamiento entre ejes del reductor H7 buscando reducir el aparecimiento de fallas tempranas en dichos equipos Crear una cultura para control y sostenibilidad del muestreo de aceite e inspección de linealidad entre ejes.

Por último, la propuesta del presente estudio es extender los beneficios de un análisis vibración mecánica como un programa integral que en su primera fase se dirija hacia la caja reductora H7, pero que posteriormente se pueda replicar hacia las otros equipos del tren de laminación, incluso podria extenderse a la planta que se iguala en las condiciones donde se fabrica el perfil angular, hierro cuadrado, perfil hembra, entre otros.

Adicionalmente el peso de todo el mecánismo se transferie a una pequeña área ubicada en la parte inferior de la pista de rodadura del cojinete o del elemento rodante, lo que puede ocasionar fractura o fisuras, descascaramiento

de la pared metalurgica y un valle debido a hundimiento, esto es un fenomeno normal en equipos de grandes masas como en el caso del reductor H7.

Figura 42. **Daño de pista de rodadura interna**

Fuente: [Fotografía de Douglas Rodas]. (Ciudad de Guatemala, Guatemala, 2021). Colección particular. Guatemala.

La oportunidad de mejora que se propone en relación a este fenomeno es llevar un programa que pueda cuantificar los tiempos de reposo asignados al equipo H7 mayores a 30 dias, luego podria proponerse un arranque en vacío de 15 minutos que ayuden a lubricar y redistribuir cargas; otra opción podria ser llevar un control y cada semana darle un giro horario con la mano o utilizando una prensa de mano con faja y rotar unos 90°.

Otro aspecto es lo referente a la tubería de transporte por percepción; se denotan altos valores de presencia de hierro; la experiencia del personal de mantenimiento mecánico reporta haber trabajdo en varios correctivos realizando reemplazo de tramos rectos y curvos deteriorados. La corrección se realizó cambiando únicamente las partes picadas, ya que no se contaba con el tiempo necesario.

4. DISCUSIÒN DE RESULTADOS

A continuación, se hace un análisis de la validez interna y externa del trabajo de investigación, asì como el análisis de los resultados obtenidos.

4.1. Análisis interno

Una fortaleza en la investigación es el registro de los espectros y su amplitud a lo largo de la fabricación de todas las presentaciones de barra que forman el mix de productos por el primer enfoque de su tipo propuesto en planta de laminaciòn.

El personal encargado de la tabulación cuenta con el conocimiento técnico necesario, la conceptualización estadistica y su desarrollo utilizando herramientas de office excel, reportes de laboratorio de análisis de aceite y del software del instrumento alineador *lasser* para poder establecer y confirmar el estado de la condición inicial del equipo, la debilidad radica en que para establecer un plan de monitoreo de la condiciòn para un equipo como el propuesto en el actual estudio se necesita inversion de recurso por lo tanto una gestiòn de mantenimiento necesitara impulsar el concepto como una fuente de beneficios a mediano y largo plazo.

Es muy probable que una propuesta como la actual funcionara en un entorno empresarial con vision estrategica que busque altos niveles de disponibilidad en sus lineas de producciòn y que busque desarrollar su actividad productiva con estandares de clase mundial.

Otra fortaleza en la investigación es la capacidad de evidenciar y pronosticar fallos mediante la tecnica del análisis de vibración mecánica la posibilidad de registrar fallos mediante instrumentaciòn especializada que fundamentan las inspecciones y comprender si el reductor H7 presenta algùn modelo de falla como incipiente, potencial, funcional y catastrofica dando paso al mejoramiento de la condición en la curva del desempeño del equipo.

Una debilidad viene del alto numero de reductores dentro de un tren de laminación donde desarrollar un plan de monitoreo de vibración mecánica tiene alta probabilidad de ser inoportuno y permitir el aparecimiento de fallas catastroficas imprevistas dentro de los intervalos de peridiocidad de las inspecciones por lo que una gerencia sin la información y conocimiento de las virtudes puede subestimar o en el peor de los casos menospreciar la técnica.

El aparecimiento de fallas es inherente a cualquier mecanismo o configuración eléctrica-electronica, lamentablemente existen esquemas de dirección empresarial distantes de conceptos fundamentales para el entendimiento del funcionamiento de las maquinas, marcando distancia de principios basicos de ingeniería como esfuerzo-deformación, fatiga de materiales, la relación directa entre probabilidad de fallo y antigüedad del equipo, entre otros.

El análisis de vibración mecánica en planta de laminación de barras se puede plantear como un modelo de pronostico en un entorno cambiante debido a varios factores entre ellos podemos mencionar, los rodillos de laminación fabricados con un espesor compuesto de un acero aleado quimicamente, el cual con el transcurrir del tiempo de trabajo se reduce ocasionando perdida del ajuste en la laminación y producción de barra fuera de especificaciones.

Otro factor es lo relativo a la calidad de la palanquilla que se procesa, debido a los precios internacionales del acero tiende a ser más rentable la importación del insumo desde paises asiaticos, esta materia prima presenta caracteristicas quimicas y mecánicas aleatorias que dificultan la operatividad en planta, generando tiemos improductivos debido a atascos de barra en el tren y al castigo mecànico que sufre las cajas reductoras.

En realidad el análisis de vibración mecánica para el reductor H7 tiene un alcance limitado, debido a que unicamente representa una imagén en un instante del tiempo con condiciones imperantes para ese momento, para poder sacar el maximo provecho de la tecnica habria que realizar modificaciones e inversion.

4.2. Análisis externo

Para hacer el análisis externo de la presente investigación se presenta el estado del arte que sirvio de guia y de orientación para desarrollarlo.

No se puede demeritar los alcances logrados en el actual estudio de alguna manera evidencia las condiciones en las que opera el equipo y cuales son los componentes sacrificados para alancanzar los requerimientos de producción, Silva (2002) propone “simpre debemos tener en cuenta los resultados. Una estategia bien definida debe ser clara en cuanto a los resultados esperados y el tiempo en el cual se deben lograr esos resultados.

Este debiera ser un procedimiento normal si se tratara de otro tipo de proceso, no es el caso del laminado de barra en caliente donde es necesario describir otros costos, según Gamarra,(2004) costos de avería son los derivados de la falta de disponibilidad o del deterioro de las funciones de los equipos.

Fag (2000) menciona en relación con una falla potencial o funcional, que si en un rodamiento se producen daños estrictamente delimitados como impresiones o deformaciónes en los cuerpos rodantes o corrosión formada debido a paradas de servicio o roturas, la forma más rápida de reconocerlos es por medio de mediciones de vibraciones, con la intención de establecer un método científico sobre la priorización de las actividades en función de las inspección preliminar del plan de vibración mecánica realizado en el reductor H7. Tal como lo menciona Pascual (2002), para solventar la escasez del recurso impuesto al gestor de mantenimiento se utiliza el diagrama de Pareto.

De esta manera se inicia el análisis presentando un delimitador para centralizar la atención de los dos causales de falla preponderantes; al haber construido un marco objetivo para el inicio del análisis se establecen métodos que buscan la corrección del estado de la condición sobre el rodamiento del lado del acople.

Debido a que el método que sostiene el presente estudio contempla inspecciones de tipo esporádico es muy dificil p asegurar al 100 % el comportamiento del equipo respecto de los modelos de vibración que anticipan un fallo en el rodamiento del reductor H7 propuesto por Walpole en 1999; obviamente el usuario de los métodos estadísticos no puede generar suficiente información o datos experimentales para caracterizar por completo la distribución, pero a menudo se utilizan conjuntos de datos para aprender acerca de ciertas propiedades de la distribución..

Debido a lo anterior una forma que contribuye a describir el comportamiento de la vibración mecánica en función de su amplitud es un gráfico de tendencia que propone Duffuaa (2004), el cual se utiliza para detectar inestabilidad en un estudio de muestreo de datos estadisticos; si todos los puntos caen dentro de los

limites se puede concluir que es sistema estable; la inestabilidad puede deberse a errores de metodología o a un cambio en el entorno.

En la caja reductora el enfoque se centra en el rodamiento del lado del acople, el cual recibe la fuerza motriz desde el motor eléctrico, ya que los registros lo muestran como falla recurrente debido al deterioro del mismo, Quan (2010) señala en relación con el análisis de vibraciones mecánicas, que este puede detectar problemas como desbalance o desalineamiento.

CONCLUSIONES

1. La gestión de mantenimiento preventivo con la técnica de ensayo de análisis de vibración mecánica permitió tabular amplitud de vibración y recurrencia para los diferentes espectros capturados por el analizador, formulando el 80-20 de un diagrama de Pareto. Posterior a la aplicación de los métodos de mejora se obtuvo una reducción porcentual por fallo de lubricante y pérdida de linealidad de 34 % y 63 %, respectivamente.

2. Se identificaron fallas de mayor incidencia en el rodamiento del reductor H7, lado de acople con el motor eléctrico, tabulando 232 por fallo de lubricante y 215 por pérdida de linealidad de ejes durante la etapa de inspección preliminar en la investigación, para los diámetros comerciales de varillas que van desde 3/8” hasta 1” grado 40°.

3. Se desarrollaron técnicas que corrigen fallos detectados en el rodamiento del lado del acople del reductor H7: la limpieza del lubricante por medio de recirculación del aceite por 2 elementos filtrantes y alineación de ejes por medio de analizador de linealidad láser; se obtuvo reducción en el conteo de partículas ferrosas y rangos de tolerancia en el paralelismo.

4. Se desarrolló la técnica de análisis de vibración mecánica y se formularon tendencias posteriores al desarrollo de los modelos correctivos en los límites superiores estadísticos, por problemas en el lubricante y falta de linealidad de ejes; se obtuvieron los siguientes porcentajes de reducción: 82.91 % y 85.29 %, respectivamente.

RECOMENDACIONES

1. Sostener la gestión de mantenimiento preventivo en el tiempo, capacitando y entrenando al personal encargado de las inspecciones, correcciones y análisis estadístico, y buscar un total involucramiento a nivel gerencial de planta, que permita lograr la madurez del modelo de gestión de mantenimiento preventivo con la técnica de ensayo de análisis de vibración mecánica.

2. Se propone seguimiento a los equipos utilizando la técnica de análisis de vibración mecánica, utilizando modelo propuesto, tabulando datos y utilizando herramientas estadísticas que permitan anticipar fallas incipientes para tener el control del estado de la condición de los equipos.

3. Se plantea la necesidad de entrenamiento y capacitación para el personal de campo que ejecuta las técnicas de análisis y filtración de contaminantes en el lubricante, así como la de linealidad, complementado con la inspección de elementos elastómeros del acople de masas cilíndricas de los ejes.

4. Se expone como necesario un seguimiento del monitoreo del lubricante con muestreos y análisis de laboratorio permanentes, con rigurosa periodicidad; al igual que las inspecciones de paralelismos de ejes por medio del alineador láser se propone al menos una al año en ambas técnicas.

REFERENCIAS

1. Barnes, M. (2014). *Las 10 principales percepciones erróneas acerca del análisis de aceite.* Colombia: PaperBlog. Recuperado de http://www.maintapps.com/search/label/Mantenimiento%20Predictivo

2. Bowles, J. (1984) *Diseño estructural de acero.* México: Editorial Limusa, Recuperado de https://www.scribd.com/document/225453598/diseno-de-acero-estructural-bowles-limusa.

3. Castellanos, M. y Sánchez Miranda, M. (2005). *Análisis de vibraciones en equipos críticos de la industria azucarera.* El Salvador: Universidad Simeón Cañas. https://www.academia.edu/33077038/ANALISIS_DE_VIBRACIONES_EN_EQUIPOS_CRITICOS_DE_LA_INDUSTRIA_AZUCARERA_TRABAJO_DE_GRADUACION_PREPARADO_PARA_LA_FACULTAD_DE_INGENIERIA_Y_ARQUITECTURA_INGENIERO_MECANICO.

4. Cruz, A. (2011). *Implementación de mantenimiento predictivo*. México: Catálogo universitario. Recuperado de https://www.uttt.edu.mx/CatalogoUniversitario/imagenes/galeria/63A.

5. DOKUMEN (2000). *Averías de los rodamientos.* España: FAG. Recuperado de https://dokumen.tips/documents/fag-averias-de-los-rodamientos.html? page=1.

6. Duffuaa, R. (2000). *Sistemas de mantenimiento planeación y control.* México: Casa del libro. Recuperado de https://es.slideshare. net/rusvel7/sistemas-demantenimientoduffuayotros.

7. Gamarra, J. (2004). *Libro de mantenimiento industrial.* Perú: Escuela Superior de Tecnología, SENATI, Recuperado de https://es. slideshare.net/JorgeGamarraTolentino/libro-demantenimiento industrial-24925104.

8. Hamar Laser (2014). *Manual alineador Laser de doble sensor Couple 6, catálogo FR – 5.* Suecia: Damalini. Recuperado de https://easy laser.com/Files/Files/Downloads/Manuals/D-systems/D-series_ Manual_7-3_spa.pdf.

9. La guía MetAs (2009) *Desbalanceo mecánico.* México: GuíametAS. Recuperado de http://www.metas.com.mx/guiametas/La-Guia-Met As-09-03-desbalanceo-mecanico.pdf.

10. MacCormac, J. (2012) *Diseño de estructuras de acero.* Universidad de Siracusa, New York State. Recuperado de https://www.academia. edu/28111116/Dise%C3%B1o_de_Estructuras_De_Acero_McCor mac_5ta_Ed_pdf

11. Moffit, Augustine (1980). *Industrias basadas en recursos naturales hierro y acero.* INSHT Universidad de Columbia Británica Canadá. Recuperado de https://www.insst.es/documents/94886/161971/ Cap%C3%ADtulo+73.+Hierro+y+acero

12. Pascual, Rodrigo (2002) *Gestión moderna del mantenimiento.* Facultad de Ingeniería de la Universidad de Santiago Chile. Recuperado de https://www.academia.edu/32223323/Gesti%C3%B3n_Moderna_del_Mantenimiento_1

13. Royo, Jesús (2008). *Análisis de vibraciones e interpretación de datos.* España: Universidad de Zaragoza. Recuperado de http://www.todosensores.es/articulos/vibraciones.pdf.

14. Silva, Pedro (2007). *Mantenimiento en la práctica.* Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada Colombia. Recuperado de https://pdfcoffee.com/qdownload/mantenimiento-en-la-practica-libro-pedro-e-silva-2007-pdf-free.html.

15. Tranter, J., Rienstra, A. y Murphy, T. (2013). *Vibraciones vs ultrasonido.* USA: Reliabilityweb. *Recuperado de* https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/vibraciones-vs-ultrasonido-dos-tecnicas-a-tomar-en-cuenta-en-cbm.

16. Trout, J. (2019) *Carros de filtración: Una revisión técnica.* México. Parker. Recuperado de https://noria.mx/carros-de-filtracion-una-revision-tecnica-2/

17. Valdés, Jorge Luis y San Martin, Erick. (2009). *Diseño de un plan de mantenimiento preventivo-predictivo aplicado a los equipos de la empresa Remaplast.* (Tesis de grado Administrador Industrial). Universidad de Cartagena de Indias. Recuperado de https://repositorio.unicartagena.edu.co/bitstream/handle/11227/802/275-%20TTG%20-%20DISE%C3%91º%20DE%20%20UN%

20PLAN%20DE%20MANTENIMIENTO%20PREVENTIVO-PREDICTIVO%20APLICADO%20A%20LOS%20EQUIPOS%20DE%20LA%20EMPRESA%20REMAPLAST.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

18. Walpole, Ronald; Myers, Raymond y Myers, Sharon (2002). *Probabilidad y estadística para ingenieros.* México: Pearson. Recuperado de https://estadisticainferencial2010.files.wordpress.com/2012/09/probabilidad-walpole-6ed.pdf

19. White, Glen (2010) *Introducción al análisis de vibraciones*. USA: Azima DLI. Recuperado de https://termogram.com/images/pdf/analisis-vibraciones/introduccion-al-analisis-de-vibraciones-azima-dli.pdf.