



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

**PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO BASADO EN CONDICIÓN UTILIZANDO EL
ANÁLISIS DE VIBRACIONES PARA LOS EQUIPOS ROTATIVOS DE GENERACIÓN DE
VAPOR DE UNA PLANTA GENERADORA DE ENERGÍA UBICADA EN LA COSTA SUR**

Ing. Juan Francisco López Rosales

Asesorado por el Mtro. Ing. Sergio Roberto Soto Gallardo

Guatemala, junio de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO BASADO EN CONDICIÓN UTILIZANDO EL
ANÁLISIS DE VIBRACIONES PARA LOS EQUIPOS ROTATIVOS DE GENERACIÓN DE
VAPOR DE UNA PLANTA GENERADORA DE ENERGÍA UBICADA EN LA COSTA SUR**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. JUAN FRANCISCO LÓPEZ ROSALES

ASESORADO POR EL MTRO. ING. SERGIO ROBERTO SOTO GALLARDO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ARTES 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 |

JURADO EVALUADOR QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE DEFENSA

| | |
|-------------|---|
| DECANA | Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada |
| DIRECTOR | Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí |
| EXAMINADORA | Mtra. Inga. Rocío Carolina Medina Galindo |
| EXAMINADOR | Mtro. Ing. Hugo Leonel Ramírez de León |
| SECRETARIO | Mtro. Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO BASADO EN CONDICIÓN UTILIZANDO EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES PARA LOS EQUIPOS ROTATIVOS DE GENERACIÓN DE VAPOR DE UNA PLANTA GENERADORA DE ENERGÍA UBICADA EN LA COSTA SUR

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 14 de julio de 2020.

Ing. Juan Francisco López Rosales

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.465.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO BASADO EN CONDICIÓN UTILIZANDO EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES PARA LOS EQUIPOS ROTATIVOS DE GENERACIÓN DE VAPOR DE UNA PLANTA GENERADORA DE ENERGÍA UBICADA EN LA COSTA SUR**, presentado por: **Juan Francisco López Rosales**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Ingeniería de mantenimiento después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada ★

Decana

Guatemala, junio de 2022

AACE/gaoc



Guatemala, junio de 2022

LNG.EEP.OI.465.2022

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

“PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO BASADO EN CONDICIÓN UTILIZANDO EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES PARA LOS EQUIPOS ROTATIVOS DE GENERACIÓN DE VAPOR DE UNA PLANTA GENERADORA DE ENERGÍA UBICADA EN LA COSTA SUR”

presentado por **Juan Francisco López Rosales** correspondiente al programa de **Maestría en artes en Ingeniería de mantenimiento** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





Guatemala 26 de noviembre 2020.

M.A. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

M.A. Ingeniero Álvarez Cotí:

Por este medio informo que he revisado y aprobado el **Trabajo de Graduación** titulado: **“PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO BASADO EN CONDICIÓN UTILIZANDO EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES PARA LOS EQUIPOS ROTATIVOS DE GENERACIÓN DE VAPOR DE UNA PLANTA GENERADORA DE ENERGÍA UBICADA EN LA COSTA SUR”** del estudiante **Ing. Juan Francisco López Rosales** quien se identifica con número de carné **200512035** del programa de **Maestría en Ingeniería de Mantenimiento**.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el *Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014*. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

Atentamente,

Mtra. Inga. Rocío Carolina Medina Galindo
Coordinadora
Maestría en Ingeniería de Mantenimiento
Escuela de Estudios de Postgrado

Guatemala, 31 de octubre de 2020

**Ingeniero Mtro.
Edgar Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería USAC
Ciudad Universitaria, Zona 12**

Distinguido Ingeniero Álvarez:

Atentamente me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que como asesor de trabajo de graduación del estudiante Juan Francisco López Rosales, carné número 200512035, cuyo título es '**PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO BASADO EN CONDICIÓN UTILIZANDO EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES PARA LOS EQUIPOS ROTATIVOS DE GENERACIÓN DE VAPOR DE UNA PLANTA GENERADORA DE ENERGÍA UBICADA EN LA COSTA SUR**', para optar al grado académico de Maestro en Ingeniería de Mantenimiento, he procedido a la revisión del mismo.

En tal sentido, en calidad de asesor doy mi anuencia y aprobación para que el estudiante López Rosales, continúe con los trámites correspondientes.

Sin otro particular, me es grato suscribirme de usted.

Atentamente,

**Sergio Roberto Soto Gallardo
Ingeniero Mecánico
Colegiado No. 13217**

Ing. Sergio Roberto Soto Gallardo
Mtro. Tecnología y Sostenibilidad Energética
Asesor

ACTO QUE DEDICO A:

| | |
|---------------------|---|
| Dios | Por todas las bondades recibidas en el camino de la vida. |
| Mis padres | Por el eterno apoyo incondicional. |
| Mis hermanos | Por la certeza de siempre poder contar con ellos. |
| Mi familia | María Xoyón y Amelia López, por su amor incondicional a través de los años. |
| Mi esposa | Regina Enriquez, fuente inagotable de motivación, comprensión y amor. |
| Mi hija | Emilia López, espero poder inspirarte con esta meta cumplida. |

AGRADECIMIENTOS A:

| | |
|---|--|
| Universidad de San Carlos de Guatemala | Por la oportunidad de continuar mi formación académica profesional. Vida eterna al <i>alma mater</i> . |
| Facultad de Ingeniería | Fuente inagotable de conocimientos, siempre será un honor volver. |
| Los ingenieros | Willy Mazariegos, Osvaldo Castillo y José Mendoza, por el compañerismo y experiencias compartidas. La amistad no depende del tiempo, sino de la calidad de las personas. |
| Mi asesor | Msc. Ing. Sergio Soto, por su apoyo y orientación durante este trabajo de graduación. |
| Maestro ingeniero | Carlos Alegre, por todo el apoyo brindado durante el desarrollo del trabajo de graduación. |

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 | XXIII |
| | |
| 1. MARCO TEÓRICO | 1 |
| 1.1. Planta generadora de energía | 1 |
| 1.2. Bloque de generación de energía..... | 1 |
| 1.3. Caldera de vapor | 2 |
| 1.4. Turbina de vapor | 2 |
| 1.5. Generador de energía | 3 |
| 1.6. Equipos rotativos | 3 |
| 1.6.1. Ventilador de tiro forzado primario | 4 |
| 1.6.2. Ventilador de tiro forzado secundario | 4 |
| 1.6.3. Ventilador de tiro inducido | 5 |
| 1.6.4. Bombas de alimentación de agua..... | 5 |

| | | |
|---------|---|----|
| 1.7. | Mantenimiento industrial | 6 |
| 1.7.1. | Mantenimiento preventivo | 7 |
| 1.7.2. | Mantenimiento basado en condición | 8 |
| 1.8. | END aplicados al monitoreo por condición..... | 9 |
| 1.8.1. | Análisis de vibraciones..... | 9 |
| 1.8.2. | Transductores de vibración | 12 |
| 1.8.3. | Sensor de proximidad | 13 |
| 1.8.4. | Sensor de velocidad..... | 13 |
| 1.8.5. | Acelerómetro | 14 |
| 1.8.6. | Componentes de una señal de vibraciones..... | 16 |
| 1.8.7. | Descripción del proceso para el análisis de vibraciones | 19 |
| 1.8.8. | Aspectos prácticos en la medición de vibración | 20 |
| 1.8.9. | Ubicación de los puntos de prueba | 21 |
| 1.8.10. | Mediciones triaxiales | 21 |
| 1.8.11. | Condiciones de prueba | 22 |
| 1.8.12. | Condiciones de operación | 23 |
| 2. | DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN | 25 |
| 2.1. | Reconocimiento y actualización de equipos..... | 25 |
| 2.2. | Inventario técnico de equipos..... | 26 |
| 2.3. | Categorización de la criticidad de los equipos | 27 |
| 2.4. | Recolección de datos de vibraciones | 29 |
| 2.4.1. | Parámetros de vibración aceptables | 30 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 2.4.2. | Equipo para la captura de datos | 32 |
| 2.4.3. | Estado actual de los equipos rotativos | 34 |
| 3. | PRESENTACIÓN DE RESULTADOS..... | 53 |
| 3.1. | Cálculo de la raíz media cuadrática..... | 53 |
| 3.2. | Análisis estadístico de datos de vibraciones | 67 |
| 3.3. | Proyección predictiva de fallas | 81 |
| 3.4. | Análisis e interpretación de resultados | 83 |
| 4. | PROPUESTA DE PLAN DE PLAN DE MANTENIMIENTO Y METODOLOGÍA DE DIVULGACIÓN..... | 85 |
| 4.1. | Plan de mantenimiento propuesto | 85 |
| 4.1.1. | Plan de mantenimiento menor de equipos rotativos | 85 |
| 4.1.2. | Plan de mantenimiento mayor para equipos rotativos | 90 |
| 4.2. | Metodología de divulgación | 95 |
| 4.3. | Análisis externo | 98 |
| 4.4. | Análisis interno | 99 |
| | CONCLUSIONES | 101 |
| | RECOMENDACIONES..... | 103 |
| | REFERENCIAS | 105 |
| | APÉNDICE..... | 109 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | Experimento masa-resorte..... | 10 |
| 2. | Desplazamiento en función del tiempo | 11 |
| 3. | Sensor de proximidad | 13 |
| 4. | Sensor de velocidad..... | 14 |
| 5. | Acelerómetro..... | 16 |
| 6. | Componentes señal de vibraciones | 18 |
| 7. | Amplitud en función del tiempo | 19 |
| 8. | Diagrama de flujo análisis de vibraciones | 20 |
| 9. | Ubicación de puntos de prueba | 21 |
| 10. | Orientación triaxial | 22 |
| 11. | Punto para toma de vibración | 30 |
| 12. | Equipo de medición de vibraciones..... | 33 |
| 13. | Acelerómetro para medición triaxial | 34 |
| 14. | Diagrama Boxplot inducido 1 C13 lado acople..... | 68 |
| 15. | Diagrama Boxplot inducido 1 C13 lado libre | 69 |
| 16. | Diagrama Boxplot inducido 2 C13 lado acople..... | 70 |
| 17. | Diagrama Boxplot inducido 2 C13 lado libre | 70 |
| 18. | Diagrama Boxplot primario 1 C13 lado acople | 71 |
| 19. | Diagrama Boxplot primario 1 C13 lado libre..... | 72 |
| 20. | Diagrama Boxplot primario 2 C13 lado acople | 73 |
| 21. | Diagrama Boxplot primario 2 C13 lado libre..... | 73 |
| 22. | Diagrama Boxplot secundario 1 C13 lado acople | 74 |
| 23. | Diagrama Boxplot secundario 1 C13 lado libre | 75 |

| | | |
|-----|---|----|
| 24. | Diagrama Boxplot secundario 2 C13 lado acople | 76 |
| 25. | Diagrama Boxplot secundario 2 C13 lado libre | 76 |
| 26. | Diagrama Boxplot bomba alimentación 1 C13 lado acople | 77 |
| 27. | Diagrama Boxplot bomba alimentación 1 C13 lado libre | 78 |
| 28. | Diagrama Boxplot bomba alimentación 2 C13 lado acople | 79 |
| 29. | Diagrama Boxplot bomba alimentación 2 C13 lado libre | 79 |
| 30. | Diagrama Boxplot bomba alimentación 3 C13 lado acople | 80 |
| 31. | Diagrama Boxplot bomba alimentación 3 C13 lado libre | 81 |
| 32. | Diagrama de flujo plan de mantenimiento | 97 |

TABLAS

| | | |
|-------|---|----|
| I. | Características de las vibraciones | 11 |
| II. | Tipos de transductores | 13 |
| III. | Variables de señales de transmisión | 17 |
| IV. | Inventario técnico de equipos rotativos de generación de vapor | 26 |
| V. | Matriz de criticidad de equipos rotativos de generación de vapor | 28 |
| VI. | Equipos críticos considerados | 29 |
| VII. | Valores de aceptación de vibración por equipo | 31 |
| VIII. | Criterio de evaluación de rangos de vibración | 32 |
| IX. | Costos mantenimiento bomba alimentación agua | 35 |
| X. | Costos mantenimiento ventilador inducido | 35 |
| XI. | Costos mantenimiento ventilador forzado primario | 36 |
| XII. | Costos mantenimiento ventilador forzado secundario | 36 |
| XIII. | Valores de vibración ventilador inducido 1 | 37 |
| XIV. | Valores de vibración ventilador inducido 2 | 38 |
| XV. | Valores de vibración ventilador forzado primario 1 | 40 |
| XVI. | Valores de vibración ventilador forzado primario 2 | 41 |
| XVII. | Valores de vibración ventilador forzado secundario 1 | 43 |

| | | |
|----------|---|----|
| XVIII. | Valores de vibración ventilador forzado secundario 2..... | 44 |
| XIX. | Valores de vibración bomba alimentación agua 1..... | 46 |
| XX. | Valores de vibración bomba alimentación agua 2..... | 47 |
| XXI. | Valores de vibración bomba alimentación agua 3..... | 49 |
| XXII. | Valores globales de vibración ventilador inducido 1..... | 54 |
| XXIII. | Valores globales de vibración ventilador inducido 2..... | 55 |
| XXIV. | Valores globales de vibración ventilador primario 1..... | 57 |
| XXV. | Valores globales de vibración ventilador primario 2..... | 58 |
| XXVI. | Valores globales de vibración ventilador forzado secundario 1..... | 60 |
| XXVII. | Valores globales de vibración ventilador forzado secundario 2..... | 61 |
| XXVIII. | Valores globales de vibración bomba alimentación agua 1..... | 63 |
| XXIX. | Valores globales de vibración bomba alimentación agua 2..... | 64 |
| XXX. | Valores globales de vibración bomba alimentación agua 3..... | 66 |
| XXXI. | Datos para análisis Boxplot inducido 1 C13..... | 68 |
| XXXII. | Datos para análisis Boxplot inducido 2 C13..... | 69 |
| XXXIII. | Datos para análisis Boxplot primario 1 C13..... | 71 |
| XXXIV. | Datos para análisis Boxplot primario 2 C13..... | 72 |
| XXXV. | Datos para análisis Boxplot secundario 1 C13..... | 74 |
| XXXVI. | Datos para análisis Boxplot secundario 2 C13..... | 75 |
| XXXVII. | Datos para análisis Boxplot bomba 1 C13..... | 77 |
| XXXVIII. | Datos para análisis Boxplot bomba 2 C13..... | 78 |
| XXXIX. | Datos para análisis Boxplot bomba 3 C13..... | 80 |
| XL. | Ecuaciones y proyecciones predictivas..... | 82 |
| XLI. | Plan de mantenimiento menor de equipos rotativos de generación de vapor..... | 86 |
| XLII. | Plan de mantenimiento mayor de equipos rotativos de generación de vapor..... | 91 |
| XLIII. | Personal para divulgación de información..... | 96 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|----------------|-------------------------|
| a | Aceleración |
| A | Amperios |
| D | Desplazamiento |
| F | Frecuencia |
| °C | Grado Celsius |
| °F | Grado Fahrenheit |
| Hz | Hertz |
| MW | Megavatio |
| μm | Micrómetro |
| mm/s | Milímetro por segundo |
| T | Período |
| Q | Quetzales |
| rpm | Revoluciones por minuto |
| t | Tiempo |
| v | Velocidad |
| V | Voltaje |

GLOSARIO

| | |
|----------------------|---|
| END | Ensayos no destructivos |
| Espectro | Representación de una señal compleja en el dominio del tiempo, por medio de curvas sinusoidales con valores de frecuencia y amplitud específicos. |
| Falla | Evento negativo que incide en el buen funcionamiento de un equipo o maquinaria. |
| Maquinaria | Equipo que desempeña una actividad específica en un proceso productivo. |
| Operador | Persona que ejecuta una actividad en un proceso productivo. |
| Precalentador | Intercambiador de calor que transfiere energía de los gases de escape hacia el aire utilizado en un proceso de combustión. |
| Presión | Fuerza por unidad de área que ejerce un gas, líquido o sólido sobre una superficie. |
| RMS | <i>Root mean square</i> (raíz media cuadrática). |

| | |
|------------------------|---|
| Sobrecalentador | Intercambiador de calor que eleva la temperatura del vapor para llevarlo a su condición de vapor sobrecalentado o seco. |
| Transductor | Dispositivo que tiene la misión de recibir energía de una naturaleza eléctrica, mecánica, acústica, entre otros y suministrar otra energía de diferente naturaleza, pero de características dependientes de la que recibió. |
| Triaxial | Se refiere al estudio de una variable en sus tres dimensiones conocidas. |
| Vibración | Es la variación en el tiempo de una magnitud que describe el movimiento o la posición de un sistema mecánico alrededor de un punto de equilibrio de forma alternativa. Se mide en milímetros por segundo (mm/s). |

RESUMEN

En la planta generadora de energía, específicamente en el área correspondiente al bloque de generación número 7, no existía una metodología de mantenimiento definida y tampoco algún criterio que definiera la toma de decisiones sobre las actividades que se realizarían en cada período de mantenimiento. Tampoco se aprovechaba adecuadamente la información generada a través de las diversas fuentes tecnológicas con las que se cuenta, particularmente los datos de análisis de vibraciones, estos simplemente eran utilizados como métodos de diagnóstico de fallas, cuando estas ya se encontraban presentes.

El estudio se realizó con la finalidad de ordenar, optimizar y dar una razón sólida a cada una de las actividades a desarrollar durante el período de mantenimiento al que es sometido cada bloque año con año. Cambiar la cultura de hacer actividades repetitivas que muchas veces son innecesarias y en las que se invierten recursos importantes y tiempo que podría ser aprovechado de mejor manera. Como punto de partida se realizó un inventario técnico de los equipos con los que se cuenta para poder categorizarlos de acuerdo a su impacto en la continuidad operativa. Este fue uno de los pasos más importantes, para determinar donde se centrarían los esfuerzos, tener el contexto general y poder delimitar el alcance de la investigación.

Al no contar con un programa de mantenimiento adecuado, se dejaba de tener visibilidad de los equipos con los que se cuenta, así como su impacto en la producción de energía y se desconocían los costos ocultos innecesarios en los que se incurría por no tener una metodología bien definida.

Con la finalidad de cerrar esta brecha, de la carencia de un programa de mantenimiento adecuado a las condiciones de la planta, se desarrolló el plan de mantenimiento, tomando como punto de partida el mismo inventario técnico de equipos para definir la dirección de los esfuerzos en los equipos más importantes, luego se eligió una herramienta tecnológica que sustentara las bases del plan y se aprovechó la disponibilidad de los equipos de medición de vibraciones, en primer lugar para conocer su estado actual y posteriormente para utilizar los datos recopilados y poder proyectar el momento y la manera más adecuada para su intervención.

Los resultados obtenidos permitieron concluir sin duda alguna que basar la metodología de administración del mantenimiento en datos confiables sobre análisis de vibraciones, permite no solo conocer el estado actual de los equipos sino proyectar a través de la utilización de regresiones lineales, el comportamiento de los equipos y poder no solo anticiparse a las fallas, sino que optimizar los recursos con los que cuenta, ya que no serán utilizados de no ser necesario.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS

El problema consistió en que en la planta generadora de energía no se contaba con una metodología de gestión del mantenimiento, que estableciera las actividades que se debían de realizar en los equipos rotativos de generación de vapor para garantizar su disponibilidad durante el año operativo.

La carencia de una metodología de gestión adecuada dificultó dar la trazabilidad necesaria a las actividades, documentarlas y priorizarlas de acuerdo con el tiempo disponible de mantenimiento con el que se contaba. Otra consecuencia de la falta de un plan de mantenimiento es que no se contaba con registros históricos que respaldaran los trabajos ya realizados, se desconocía quién, cuándo y cómo se realizaron intervenciones a los equipos y durante el siguiente período de mantenimiento, se realizarían actividades repetitivas, lo cual puede ser causa de incremento de los costos generales de mantenimiento.

La investigación se centró en uno de los bloques de generación de la planta generadora de energía, tomando este bloque como base para replicarlo en los demás a mediano plazo. La investigación y los análisis se realizaron durante el período operativo de los equipos, el cual inició en noviembre de 2019, ya que se tuvo la facilidad de tomar la información suficiente para posteriormente ser procesada.

Al realizar la investigación, se optimizó y ordenó las actividades de mantenimiento preventivo del bloque de generación en estudio y se redujeron significativamente los paros por mantenimiento correctivo, ya que se contó con

una guía clara de las actividades a desarrollar. Se establecieron indicadores de mantenimiento a todo nivel y se favoreció desarrollar la cultura de mantenimiento basado en condición. Se aprovecharon las herramientas predictivas con las que se cuenta y se utilizaron para la toma de decisiones.

De no haber realizado la investigación, se hubiese continuado realizando las actividades de mantenimiento sin guías de orientación, esto definitivamente contribuye a efectuar actividades de manera desordenada, favoreciendo el desperdicio de los recursos con los que se cuenta, aumentaba la probabilidad de paros no programados, afectando directamente indicadores de producción y aumentar significativamente la probabilidad de provocar daños severos en equipos críticos.

- Formulación del problema

Se planteó la pregunta central y las preguntas auxiliares que ayudan en la definición del problema que se pretende abordar en la presente investigación, las cuales también establecen las bases para determinar los objetivos tanto generales como específicos.

- Pregunta central

¿Cómo un plan de mantenimiento basado en condición puede mejorar la gestión del mantenimiento preventivo en los equipos rotativos de generación de vapor de una planta generadora de energía?

- Preguntas auxiliares
 - ¿Cómo se pueden clasificar los equipos de un bloque de generación de energía de acuerdo con su impacto en la operación anual de un bloque de generación de energía?
 - ¿Cómo se puede determinar el estado operacional de los equipos rotativos durante el período de operación?
 - ¿Cuál es la rutina de mantenimiento más adecuada para intervenir los equipos con base en la condición operativa de los mismos?
 - ¿Cuál es la mejor forma de dar a conocer la metodología propuesta sobre el mantenimiento por condición a todos los involucrados?

OBJETIVOS

- General

Proponer un plan de mantenimiento preventivo basado en condición, utilizando la herramienta de análisis de vibraciones, para los equipos rotativos de generación de vapor de un bloque de generación de energía.

- Específicos

- Realizar un inventario técnico de los equipos rotativos de generación de vapor para categorizarlos de acuerdo con su criticidad e impacto en la operación anual de un bloque de generación de energía.
- Determinar el estado operacional de los equipos rotativos de generación de vapor a través del análisis de vibraciones, como herramienta de recolección de información, análisis y proyección de continuidad operativa.
- Establecer rutinas de mantenimiento con base en las condiciones operativas de los equipos y su forma de documentación para garantía de ejecución.
- Establecer una metodología para la divulgación del procedimiento propuesto para todo el personal involucrado, a través de la distribución sintetizada de la información.

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

El enfoque de la investigación fue mixto debido a que se realizó un análisis de variables cuantitativas y cualitativas: cuantitativas, porque se midieron variables que describieron la condición actual de los equipos, se analizaron tendencias y se establecieron límites aceptables de funcionamiento. Cualitativas, debido a que se utilizó revisión documental de los conceptos fundamentales, antecedentes de investigaciones previas y marco teórico relacionado. Por último, transversal ya que la propuesta consideró la delimitación del tiempo tanto de operación de la planta generadora de energía, como su período de mantenimiento, para el cual existe una fecha fijada para su inicio y para su final.

El tipo de estudio para este caso de investigación fue descriptivo, ya que se analizó la condición de los equipos y con base en estos resultados, se propuso un sistema de aceptación o rechazo del funcionamiento de los equipos, para posteriormente diseñar un plan de mantenimiento preventivo adecuado, el cual no existía. La administración del mantenimiento se realizaba de manera empírica y poco ordenada, por lo que la propuesta del plan de mantenimiento preventivo tuvo un impacto positivo para los resultados de la planta generadora de energía.

La metodología propuesta para desarrollar la presente investigación se desarrolló en cuatro fases:

- Inventario técnico de equipos: a través del trabajo de campo, se realizó un inventario técnico de equipos rotativos de generación de vapor, con la finalidad de establecer el panorama general y delimitar el alcance. Dicho

alcance se definió a través de una matriz de criticidad, para concentrar los esfuerzos donde se genera mayor impacto en la operación.

- Análisis del estado actual: se inició tomando datos de vibraciones en los puntos recomendados, para tener una idea concreta de cómo se encontraban los equipos al inicio de la investigación, esta medición se realizó en los tres ejes cartesianos (medición triaxial). Se definió en esta etapa también los parámetros de aceptación y rechazo del nivel de vibración del equipo en función del tamaño del mismo.
- Análisis y presentación de resultados: se procesaron los datos para contar con una medida global de vibraciones a través del cálculo de la raíz media cuadrática (RMS, por sus siglas en inglés). Con los valores globales de vibración se realizó una proyección para los siguientes tres períodos operativos, utilizando regresiones lineales y predecir cuál será el estado de los mismos en esos momentos y determinar el mejor momento para su intervención.
- Propuesta de plan de mantenimiento y metodología de divulgación: al conocer el momento más adecuado para intervenir los equipos, se propusieron dos formas de intervención: mantenimiento menor, para los equipos que a través del tiempo no incrementan su vibración y mantenimiento mayor, para los equipos que ya se encuentran o se encuentra próximos a superar el nivel aceptable y que podrían fallar provocando paros no programados.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación es considerado como una sistematización para la manera de gestionar el mantenimiento de los equipos rotativos de generación de vapor de una planta generadora de energía eléctrica.

La manera de gestionar el mantenimiento varía desde muchos puntos de vista en una planta de producción, dependiendo principalmente de la criticidad de los equipos, capacidad instalada, tiempo disponible para reparaciones, disponibilidad de redundancia y respaldo de equipos críticos y capacidad para atender las emergencias de manera eficiente, entre otros.

La carencia de una metodología de gestión de mantenimiento planteada de acuerdo con las necesidades y condiciones de la planta genera problemas como: tiempos de reparación extendidos, se desaprovecha la vida útil de los equipos y repuestos, mal manejo de inventario de repuestos, inversiones innecesarias, actividades repetitivas, incremento de costos por mantenimiento y operativos y en algunos casos, multas por indisponibilidad del bloque de generación de energía

La importancia de contar con un plan de mantenimiento basado en condición es que, permite trabajar con una metodología que ha demostrado mejorar sustancialmente el rendimiento de las plantas de administración donde se ha utilizado. Ya que basa sus métodos en la optimización de la vida útil de los repuestos a través de la aplicación de tecnologías, como el análisis de vibraciones, como un monitoreo constante que permite visualizar en tiempo real

el estado del equipo, identificar fallas tempranas e incluso proyectar el momento más adecuado para la intervención del equipo.

El aporte de esta investigación consistió en plantear la propuesta de un plan de mantenimiento basado en la condición de los equipos, utilizando el análisis de vibraciones como herramienta de monitoreo de la condición de los equipos rotativos de generación de vapor de una planta generadora de energía. Todo con el fin de ordenar las actividades, optimizar los recursos (mano de obra, insumos y materiales) y adaptar la administración de dichos recursos al período de mantenimiento anual establecido para un bloque de generación de energía.

El esquema que se utilizó consistió en cuatro fases principales, en la etapa inicial se realizó un análisis documental para entrar en contexto de los antecedentes del problema central. En la segunda fase, se realizó un inventario técnico de equipos, en esta fase también se categorizó cada equipo de acuerdo a su criticidad, se estableció la metodología para toma de datos así como los rangos aceptables de niveles de vibración; para posteriormente en la tercera fase analizar estos datos, adecuarlos para su manejo a través de la aplicación de la raíz media cuadrática y realizar proyecciones adecuadas al resultado de cada equipo para predecir el mejor momento para su intervención.

En la cuarta etapa se propuso rutinas de mantenimiento con base en los resultados de la etapa tres y de acuerdo con la necesidad establecida con base en los resultados, también se estableció la metodología de documentación para garantizar su ejecución y trazabilidad. Para finalizar en la cuarta fase, se propuso la metodología de divulgación de la información para garantizar que todo el personal involucrado tuviera conocimiento de la nueva metodología propuesta.

El trabajo de investigación fue factible, puesto que se contó con todos los recursos necesarios para ejecutar los ensayos y fases desarrolladas. Se contó con el aval de la empresa para desarrollar las diferentes etapas del proyecto de investigación y puso a disposición del investigador los recursos humanos, tecnológicos, información e infraestructura para llevarlo a cabo exitosamente.

En el capítulo I, se desarrolló el marco teórico, donde se revisó y definió los conceptos relacionados como: plantas generadoras de energía, bloque de generación de energía, caldera de vapor, turbina de vapor, generador rotativo de energía, equipos rotativos auxiliares de una planta generadora de vapor (bombas de alimentación, ventiladores de tiro forzado primario, forzado secundario e inducido), mantenimiento industrial, mantenimiento preventivo, mantenimiento basado en condición, ensayos no destructivos aplicados al monitoreo por condición, conceptos fundamentales de análisis de vibraciones, tipos de sensores de vibraciones, procedimiento para el análisis de vibraciones, condiciones de prueba y condiciones óptimas de operación. Todos estos conceptos, fundamentales para contextualizar el desarrollo de la investigación.

En el capítulo II, se realizó el desarrollo de la investigación, a través de la realización de un reconocimiento y actualización del inventario técnico de equipos del bloque de generación de energía en consideración. Se tomó en cuenta el impacto que cada uno de los equipos tiene para el desarrollo de las operaciones de la planta generadora de energía para realizar un análisis de criticidad y enfocar los esfuerzos en los equipos de mayor impacto. También se establecieron los parámetros de vibración aceptables para cada equipo, en función de su tamaño. Posteriormente se definió la manera en la que se recopilaron los datos de vibraciones, el período de análisis y la manera en que dichos datos fueron procesados para utilizarlos posteriormente como base para la toma de decisiones.

En el capítulo III, se encuentra al análisis y presentación de resultados, en donde se procesaron los datos para poder contar con un valor de vibraciones global a través de la utilización de la raíz media cuadrática (RMS), esto para facilitar el manejo de la información recopilada en campo. También se realizó un análisis Boxplot, para comprender el comportamiento del grupo de datos de vibraciones de cada uno de los equipos. Finalmente se realizó una proyección a través de la utilización de regresiones lineales para predecir el momento en que los valores de vibración superen el parámetro permitido y determinar el momento más adecuado para la intervención de los equipos.

En el capítulo IV, corresponde a la propuesta del plan de mantenimiento y su correspondiente metodología de divulgación, en donde se determinó si la intervención amerita ser invasiva o no. La metodología de divulgación establece un procedimiento para hacer llegar la información sobre la propuesta de mantenimiento a todos los involucrados y partes interesadas.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Planta generadora de energía

Una planta termoeléctrica es una planta de generación de energía eléctrica que aprovecha la energía química contenida en una cantidad determinada de combustible y que es liberada como energía térmica mediante un proceso de combustión. Los gases de combustión atraviesan la caldera cediendo su energía al agua o vapor en diferentes etapas: paredes de agua, sobre calentador, evaporador, economizador y precalentadores de aire (García, 2009).

El vapor a presión formado en la caldera es transportado hasta una turbina, donde se expande, produciéndose una nueva transformación por la que la energía potencial contenida en el vapor a presión se convierte primero en energía cinética y después en energía mecánica rotativa. La turbina transmite la energía mecánica rotativa para mover el generador, creando un campo inducido lo suficientemente grande para generar energía eléctrica.

1.2. Bloque de generación de energía

Un bloque de generación de energía es el conjunto de máquinas y equipos auxiliares con los cuales se tiene un sistema integrado para producir cierta cantidad de energía. En términos generales, un bloque de generación consta de: caldera y sus auxiliares, turbogenerador y sus auxiliares, torre de enfriamiento, entre otros.

1.3. Caldera de vapor

La caldera es sin duda el equipo principal de una central de generación de energía termoeléctrica. Es en ella donde se lleva a cabo el proceso de transformación de la energía química contenida en la biomasa en energía térmica, que será transformada en energía mecánica.

Las calderas modernas de la industria azucarera son unidades productoras de vapor que permiten la quema de una amplia gama de combustibles con características diferentes: bagazo de caña, madera, carbón, entre otros (Abarca, 2005).

La industria azucarera en Guatemala cuenta con calderas que aprovechan los combustibles provenientes del proceso de molienda (rastrojo y bagazo de caña) para hacer sus operaciones más eficientes. La fibra del bagazo provee suficiente cantidad de combustible para generar energía para operaciones propias y para generación de energía como fuente secundaria de ingresos a través de la venta al sistema eléctrico nacional (Franck, Golato, Morales, Cruz y Paz, 2011).

1.4. Turbina de vapor

La turbina de vapor es un equipo robusto y a su vez muy sencillo, es el equipo encargado de transformar energía potencial en forma de presión de vapor en energía cinética de rotación.

Funciona de una manera muy sencilla: se introduce vapor a una temperatura y presión determinadas y la expansión de este vapor en su interior

hace girar los álabes unidos a un eje rotor. A la salida de la turbina, el vapor que se introdujo tiene una presión y una temperatura inferior (García, 2009).

Consta de equipos auxiliares para su correcto funcionamiento: un sistema de lubricación, refrigeración del aceite de lubricación, sistema de regulación y control, extracciones para aumentar eficiencia térmica tanto en la turbina como en la caldera, entre otros.

1.5. Generador de energía

El generador es el equipo responsable de convertir la energía mecánica de la turbina de vapor en energía eléctrica. Se trata de una máquina muy experimentada y que funciona de forma muy convencional de acuerdo con las condiciones existentes en las plantas de generación (García, 2009).

La velocidad de rotación del generador es de 3600 rpm, por lo que la frecuencia de la corriente generada es exactamente 60 Hz. La velocidad de rotación de la turbina es normalmente superior, por lo que, en la mayoría de los casos, es necesario acoplar entre el generador y la turbina, una caja reductora de velocidad, normalmente de ejes paralelos.

1.6. Equipos rotativos

Se considera como equipo rotativo todo aquel que cuenta con movimiento rotatorio continuo para su funcionamiento. Los hay de flujo axial y flujo radial y pueden ser de mayor o menor velocidad, dependiendo de la aplicación para la que es utilizado.

1.6.1. Ventilador de tiro forzado primario

En términos de generación de vapor, un ventilador de tiro forzado primario es una máquina que coloca aire en la cámara de combustión de una caldera de vapor (Sánchez, 2014). Es un ventilador de flujo axial y de desplazamiento positivo respecto a la cámara de combustión. Trabaja a 3600 rpm a través de un motor eléctrico a 480 V.

El flujo de aire movido a través de un ventilador de tiro forzado primario es ascendente, a través del piso del hogar de la caldera, para favorecer y avivar la combustión dentro de la misma. Para aumentar la eficiencia de la caldera, es introducido previo paso por un precalentador de aire, por lo que es tomado a temperatura ambiente y precalentado hasta una temperatura de 130 °C.

1.6.2. Ventilador de tiro forzado secundario

Un ventilador de tiro forzado secundario es una máquina rotativa de flujo axial y de desplazamiento positivo respecto a la cámara de combustión de una caldera (Sánchez, 2014). Al igual que un ventilador de tiro forzado primario, trabaja a 3600 rpm movido a través de un motor eléctrico a 480 V.

La principal diferencia respecto al tiro forzado primario es que ingresa al hogar por la parte frontal y posterior de la caldera, provocando un efecto remolino ascendente. Esto provoca retención de partículas de combustible, aumentando el tiempo que estas partículas pasan dentro de la cámara de combustión, lo que se conoce como tiempo de residencia, aprovechando al máximo su poder calorífico.

El aire es tomado a temperatura ambiente y pasa a través de una segunda etapa del precalentador de aire, ingresando al hogar de la caldera a una temperatura de alrededor de 100 °C.

1.6.3. Ventilador de tiro inducido

Es un tipo de ventilador de flujo radial, desplazamiento negativo respecto a la cámara de combustión de la caldera y se utiliza para extraer los gases de escape y otras partículas suspendidas producto de la combustión, por lo que sus especificaciones técnicas, son muy exigentes (Sánchez, 2014).

Funcionan con succión cerrada y descarga abierta al ambiente, previo paso de algún método de filtrado de partículas nocivas al ambiente. La extracción de gases se realiza a una temperatura superior a los 400 °C, por lo que su correcto funcionamiento es crucial para la operación de una central de generación de energía.

1.6.4. Bombas de alimentación de agua

Abarca (2005), indica que, en toda caldera, existen dos tipos de circulación de agua. Circulación de agua natural, cuando esta circula por el efecto del peso de la columna de agua y circulación de agua forzada, cuando se impulsa a través de un sistema de bombeo.

Las bombas de alimentación de agua son cruciales en el funcionamiento de la caldera, evitan el sobrecalentamiento de los elementos expuestos al calor del hogar impulsando a través de intercambiadores de calor el flujo hasta llegar al domo. Desde ahí, se distribuye a los cabezales inferiores, evaporadores y sobre

calentadores, para lograr las condiciones adecuadas para la operación de la turbina.

1.7. Mantenimiento industrial

El mantenimiento industrial se refiere al conjunto de actividades organizadas y sistematizadas que buscan, como objetivo principal, la conservación de los equipos, instalaciones, maquinaria y todo elemento utilizado para la producción en una planta industrial.

Para la Organización Internacional para la Estandarización (ISO), el mantenimiento se define como la actividad o el conjunto de actividades necesarias para devolver la condición de funcionalidad un equipo (ISO 17359, 2003).

Para Ruíz (2012), el mantenimiento ha evolucionado desde los inicios de la industria formando parte fundamental de su desarrollo, cambiando paradigmas. Pasando de ser considerado como un gasto a ser visto como un grupo que trabaja en la mejora de la gestión de los activos de la empresa y de la conservación de estos.

García (2003) en su libro, *Organización y Gestión Integral de Mantenimiento*, indica que, a lo largo de la historia, el mantenimiento se ha desarrollado de la mano de la industria desde finales del siglo XIX pasando por diferentes etapas. En los inicios de la revolución industrial, la función del mantenimiento era realizada por los operadores de las mismas máquinas, sin embargo, cuando las máquinas se fueron haciendo más complejas, fue necesario delegar las tareas de reparación a grupos particulares encargados directamente del mantenimiento.

De acuerdo con García (2003), inicialmente se realizó una clasificación general de los tipos de mantenimiento de acuerdo con las tareas desarrolladas, donde los más comunes son: el mantenimiento correctivo y el mantenimiento preventivo.

En términos generales, para la buena gestión de un programa de mantenimiento, no es recomendable considerar las actividades aisladas y encuadrarlas en los tipos básicos de mantenimiento. Lo más adecuado es mezclar cada uno de los tipos de mantenimiento y generar una serie de actividades encaminada a garantizar la disponibilidad de los equipos, de acuerdo con la naturaleza de su operación, a las tecnologías disponibles y en general a las necesidades identificadas durante el proceso productivo.

De la combinación de actividades que se desarrollan para el diseño de un plan de mantenimiento integral, nace el concepto de modelo condicional de mantenimiento o mantenimiento basado en condición, el cual de acuerdo con García (2003) toma en cuenta una serie de pruebas o ensayos que condicionan una acción posterior. Si tras las pruebas se descubre una anomalía, se programa una intervención en el momento más adecuado. Este modelo es válido para equipos con poco uso o para aquellos equipos con probabilidades de fallo bajas.

1.7.1. Mantenimiento preventivo

Neto (2008), define al mantenimiento preventivo como la serie de actividades que se realizan con el fin de prevenir la ocurrencia de fallas y mantener un nivel determinado de disponibilidad en los equipos.

Por otra parte, Botero (1991), menciona que el mantenimiento preventivo no debe de ser tomado como una solución definitiva para todos los problemas

que se presentan durante un proceso productivo, pero si puede considerarse como una organización sistemática de las actividades que tradicionalmente se realizan para mantener la disponibilidad de las máquinas y poder mantener así los altos índices de productividad.

La planificación preventiva del mantenimiento debe basarse en aspectos como: catálogos y manuales del fabricante, planos de construcción del equipo, memorias de cálculo si se han realizado mejoras o reparaciones que afecten la integridad del equipo y muy importante: la experiencia de los técnicos y supervisores de mantenimiento (Botero, 1991).

1.7.2. Mantenimiento basado en condición

La estrategia del mantenimiento basado en condición se caracteriza por la utilización de información de los equipos tales como: el resultado de inspecciones, históricos de pruebas, diagnóstico de fallos, información del comportamiento de los equipos ante eventos del sistema, datos de diseño y funcionamiento nominal, entre otros (Martínez, 2014).

Por facilidad, la información debe estar disponible y ser documentada para poder darle trazabilidad, de tal manera que permita construir tendencias, reglas de diagnóstico y establecer niveles de alarma cuando se presenten condiciones anormales para el funcionamiento conocido del equipo. La alteración de una variable en observación, debe ser visible en el tiempo, por lo que el período de monitoreo debe ser considerable para poder trazar una línea base de los parámetros aceptables.

Si se compara el mantenimiento correctivo con el mantenimiento basado en condición, se puede reducir el riesgo de fallas catastróficas, debido a que puede

identificarse el momento en que se origina una falla. Mientras que si se compara el mantenimiento basado en condición con el mantenimiento preventivo puro, el primero permite flexibilizar las decisiones y eliminar actividades innecesarias, reduciendo no solo costos, sino que también otros recursos como mano de obra y tiempo (Martinez, 2014),

1.8. END aplicados al monitoreo por condición

El monitoreo por condición, como ya se dijo, se basa en el análisis de las variables críticas de un equipo, por lo tanto, la toma de decisiones sobre realizar o no una intervención, se toma con base en los resultados y tendencias de estas variables.

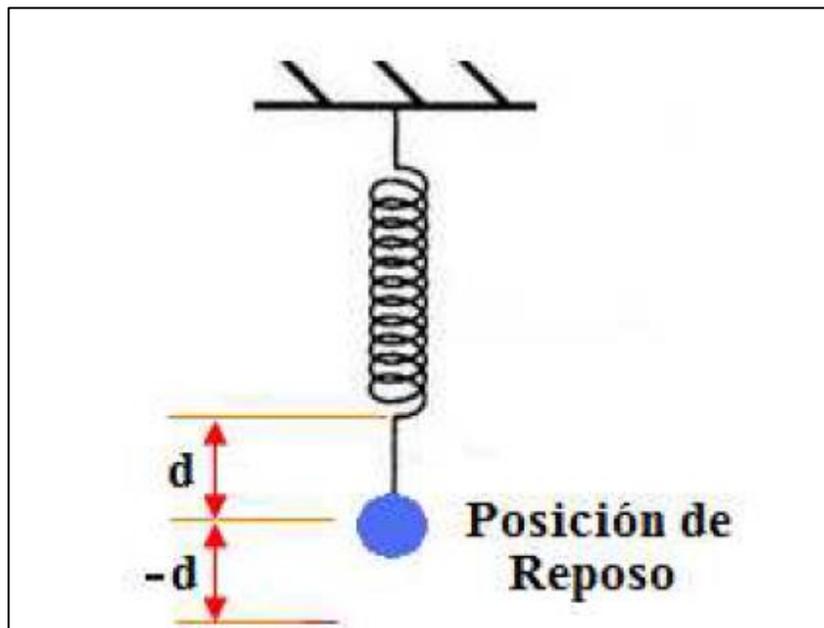
Dicha información puede ser recopilada a través del uso de tecnologías predictivas, como el análisis de vibraciones, herramienta que permite medir de manera continua el comportamiento de un equipo y que, además, interpretándola de manera adecuada puede brindar información certera sobre la identificación del origen de la variación en el comportamiento de esta variable.

1.8.1. Análisis de vibraciones

El análisis de vibraciones es una de las técnicas no destructivas más utilizadas, la cual permite determinar el estado de cada uno de los componentes de los equipos con el fin de programar las actividades de mantenimiento respectivas, sin afectar el desarrollo normal de la planta de producción. Para efectos prácticos, se define la vibración como la oscilación de un cuerpo con respecto a un punto de referencia (Olarte, Botero y Cañon, 2010).

Se puede representar de una forma muy sencilla a través del experimento masa-resorte, cuando la masa se saca de su posición de reposo hasta una distancia determinada como se muestra en la figura 1.

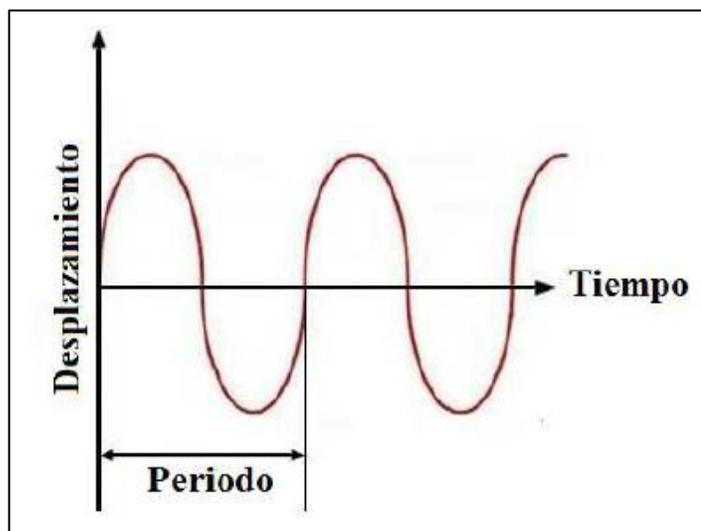
Figura 1. Experimento masa-resorte



Fuente: Olarte *et al.* (2010). *Análisis de vibraciones: Una herramienta clave en el mantenimiento predictivo.*

Cuando la masa se suelta desde una posición fuera del reposo, esta se mueve por arriba y por debajo de su punto de equilibrio, lo cual genera lo que se conoce como oscilación. Esta oscilación se comporta de manera sinodal de acuerdo con la siguiente figura 2.

Figura 2. **Desplazamiento en función del tiempo**



Fuente: Olarte *et al.* (2010). *Análisis de vibraciones: Una herramienta clave en el mantenimiento predictivo.*

El fenómeno de las vibraciones cuenta con varias características:

Tabla I. **Características de las vibraciones**

| Característica | Descripción |
|-----------------------|--|
| Desplazamiento | Cantidad de movimiento que la masa experimenta con respecto a su posición de reposo. |
| Período | Tiempo que tarda la masa en realizar un ciclo completo. |
| Frecuencia | Número de ciclos en una unidad de tiempo. |
| Velocidad | Cambio de posición con respecto al tiempo. |
| Aceleración | Medida del cambio de la velocidad con respecto al tiempo. |

Fuente: Olarte *et al.* (2010). *Análisis de vibraciones: Una herramienta clave en el mantenimiento predictivo.*

En condiciones ideales, una máquina no producirá vibraciones, puesto que se asume que toda la energía se emplea en la realización del trabajo para el cual fue diseñada. Sin embargo, existen diversos factores que inciden en la aparición de espectros de vibraciones como: desbalance dinámico, falta de alineamiento, desajuste de cojinetes, entre otros (Castellanos y Sánchez, 2005).

El efecto producido por las vibraciones en los elementos mecánicos es contraproducente tanto para ellos mismos como para el personal, la estructura que lo soporta y probablemente equipos aledaños. Una vibración excesiva puede provocar: riesgo de accidentes para el personal operativo, reducción de la vida útil de los componentes y de los equipos, condiciones deficientes de operación de los equipos, generación de ruido excesivo, entre otros (Castellanos y Sánchez, 2005).

1.8.2. Transductores de vibración

El transductor de vibraciones es un aparato que produce una señal eléctrica que es una réplica o análogo del movimiento vibratorio al cual está sujeto (White, 2010). En otras palabras, un transductor es el sensor que se encarga de monitorear directamente las ondas producidas por la vibración de un equipo y de transmitir esas ondas transformadas en impulsos eléctricos para ser traducidas a datos numéricos.

Uno de los primeros transductores utilizados para diversas aplicaciones empíricas fue el dedo humano, el cual es un transductor muy básico, pero que sirvió de precursor para los transductores modernos de la actualidad.

Existen diferentes tipos de transductores, los cuales responden a parámetros diferentes dependiendo de la fuente de vibración:

Tabla II. Tipos de transductores

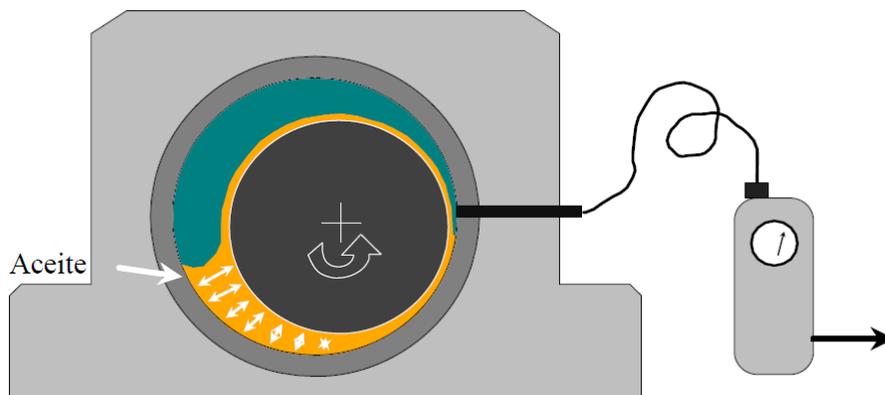
| Nombre | Sensible a |
|----------------------|----------------|
| Sensor de proximidad | Desplazamiento |
| Sensor de velocidad | Velocidad |
| Acelerómetro | Aceleración |

Fuente: White (2010). *Introducción al análisis de vibraciones*.

1.8.3. Sensor de proximidad

Es una unidad de montaje permanente, necesita un amplificador que condiciona la señal para generar un voltaje de salida, proporcional a la distancia entre el transductor y la extremidad de la flecha. Basa su funcionamiento en un principio magnético, mide el desplazamiento relativo entre las piezas donde se encuentra instalado y no mieda un nivel de vibración total (White, 2010).

Figura 3. Sensor de proximidad

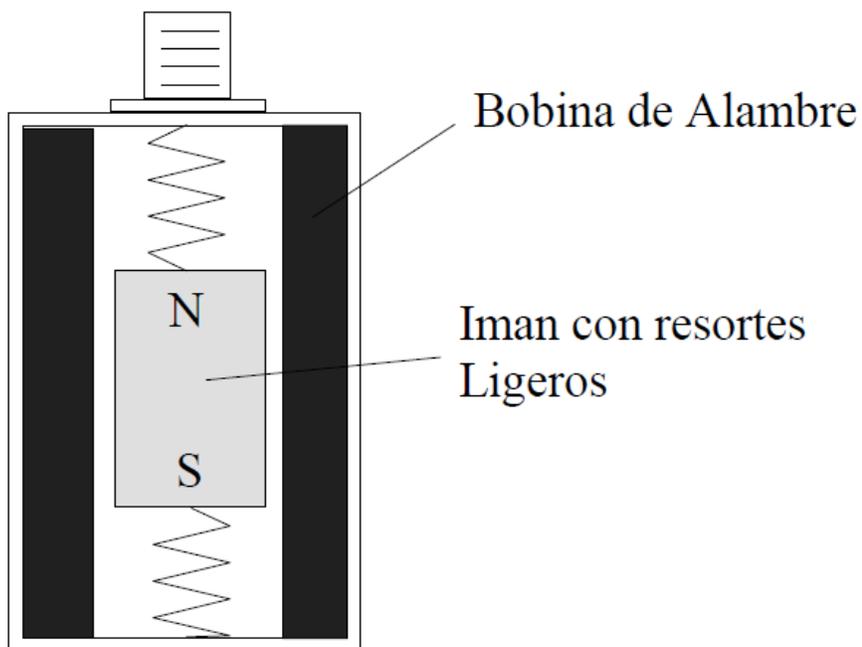


Fuente: White (2010). *Introducción al análisis de vibraciones*.

1.8.4. Sensor de velocidad

El sensor de velocidad fue uno de los primeros transductores de vibración que fueron construidos. Consta de una bobina de alambre y de un imán, colocados de tal manera que, si se mueve el alojamiento de la pieza donde se encuentra instalado, el imán inducirá una corriente proporcional a la velocidad del movimiento. De esta manera, la unidad produce una señal directamente proporcional a la velocidad de la vibración. No necesita equipos electrónicos adicionales para funcionar, la impedancia de salida eléctrica es relativamente baja, lo que hace que sea insensible a la inducción del ruido. Aun tomando en cuenta estas ventajas, el transductor de velocidad tiene muchas desventajas que lo vuelven obsoleto para instalaciones nuevas (White, 2010).

Figura 4. **Sensor de velocidad**



Fuente: White (2010). *Introducción al análisis de vibraciones*.

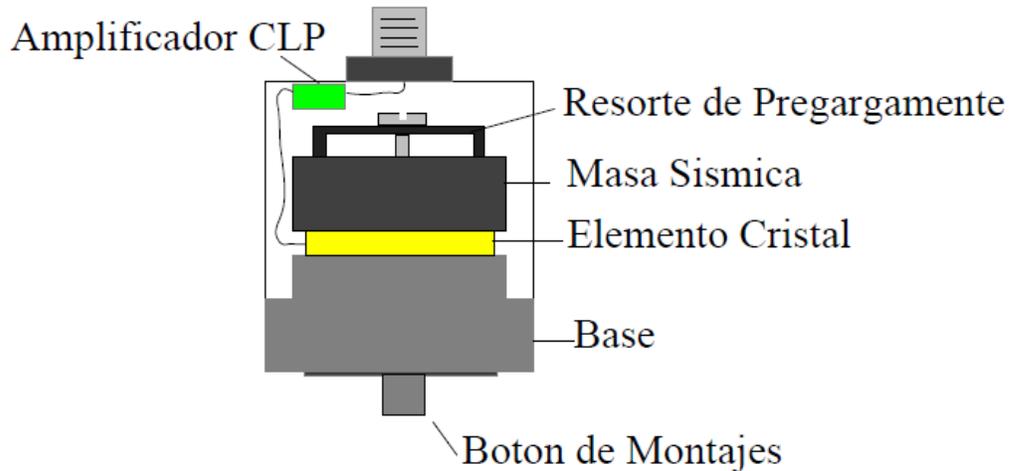
1.8.5. Acelerómetro

Dentro de los transductores de vibración, el acelerómetro puede considerarse como el transductor estándar para la medición de vibración en máquinas. Existen diversos diseños, pero el que funciona para describir el principio de la operación de este, es el transductor a compresión.

Consta de un elemento piezoeléctrico que se encuentra ajustado entre una base y la masa sísmica. Cuando una materia es sometida a una fuerza, se genera una carga eléctrica entre sus superficies, lo que provoca cierta cantidad de movimiento. Cuando se mueve el acelerómetro en la dirección arriba-abajo, la fuerza que se requiere para mover la masa sísmica está soportada por el elemento activo. De acuerdo con la segunda ley de Newton, esa fuerza es proporcional a la aceleración de la masa. La fuerza sobre el cristal produce la señal de salida, que por consiguiente es proporcional a la aceleración del transductor (White, 2010).

Los acelerómetros son lineales en términos de la amplitud, esto implica que tienen un rango dinámico prolongado. Por otra parte, los acelerómetros piezoeléctricos mantendrán su calibración si no son sometidos a calor excesivo o golpeado por elementos demasiado duros, que puedan afectar directamente su integridad.

Figura 5. **Acelerómetro**



Fuente: White (2010). *Introducción al análisis de vibraciones*.

1.8.6. **Componentes de una señal de vibraciones**

Según Castellanos y Sánchez (2005), las señales de vibración consisten en la suma de las aportaciones de diferentes señales generadas por su respectiva fuente de excitación, las cuales se presentan como una sola señal integrada. Mediante el análisis de vibraciones se busca separar el conjunto de señales en sus componentes más importantes, las cuales serán características de la fuente de origen. Existen dos formas de poder visualizar las señales de vibraciones en un equipo en general: dominio de tiempo y dominio de frecuencia.

El dominio de tiempo es un análisis de señales impulsivas muy útil, como en el caso de señales originadas por rodamientos, engranajes y para relaciones de fases de las señales. El problema con este tipo de visualización se da, cuando existen más de un componente de una señal de vibración, ya que, en la presentación de la gráfica amplitud en función del tiempo, no permite observar

las dos señales por separado, sino que únicamente la superposición de ambas (Castellanos y Sánchez, 2005).

Como lo describe Castellanos y Sánchez (2005), las variables utilizadas para definir la señal de vibración en un dominio de tiempo son:

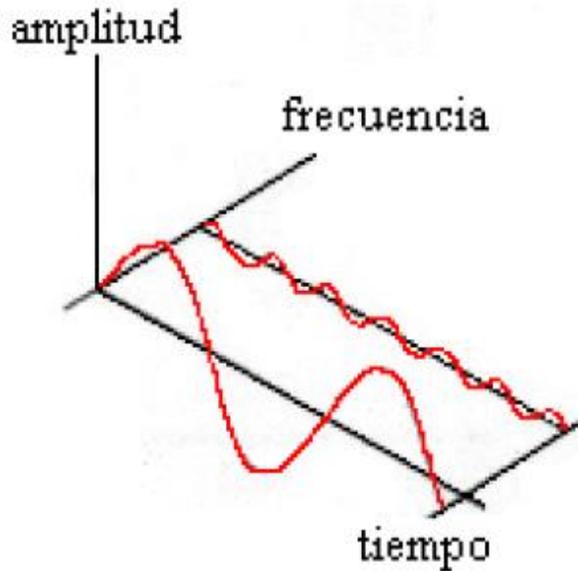
Tabla III. **Variables de señales de transmisión**

| Variable | Descripción |
|-----------------------|--|
| Pico (cero-pico) | Es el valor máximo de la amplitud en dirección positiva. |
| Pico-pico | Es la distancia que hay entre un pico positivo y un pico negativo. Su equivalente es 2 veces la amplitud. |
| RMS | Es el valor efectivo de una señal de vibración. Se toma como la medida de la potencia de la vibración. |
| Tiempo de observación | Tiempo de duración de la medición de una señal. Es el número de muestras, multiplicado por el período de una señal muestreada. |

Fuente: Castellanos y Sánchez (2005). *Programa de mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones en equipos críticos de la industria azucarera.*

Castellanos y Sánchez (2005), indican que la segunda forma de visualizar señales de vibración es el dominio de frecuencia, que es la representación en tres dimensiones de una señal de vibración. Los ejes de análisis son: amplitud, tiempo y frecuencia.

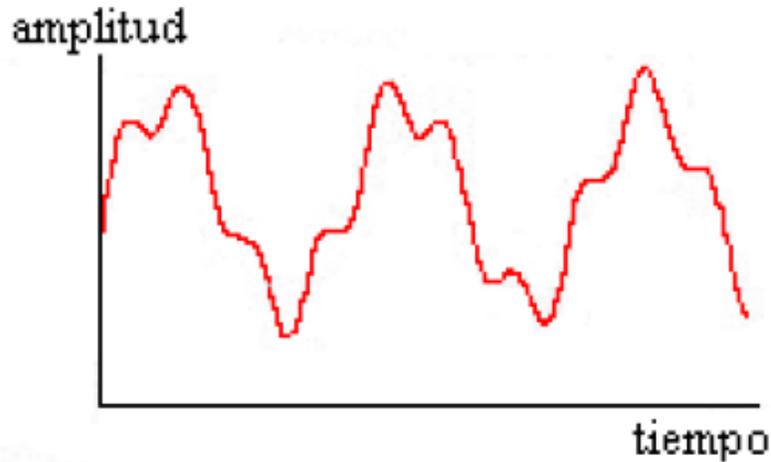
Figura 6. **Componentes señal de vibraciones**



Fuente: Castellanos y Sánchez (2005). *Programa de mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones en equipos críticos de la industria azucarera.*

De igual forma, puede obtenerse representaciones en 2 ejes de las señales de vibración, tanto en un plano amplitud versus tiempo como en un plano amplitud versus frecuencia. En ambos casos la representación es limitada, en el plano amplitud versus tiempo no se pueden observar las dos componentes de la señal de vibración debido a que se superponen entre sí y solo se visualiza la unión de ambas componentes. En el caso del gráfico amplitud en función de la frecuencia, únicamente se muestran los dos picos máximos de las componentes de la señal de vibración, representación que tiene el nombre de: espectro de vibración (Castellanos y Sánchez, 2005).

Figura 7. **Amplitud en función del tiempo**



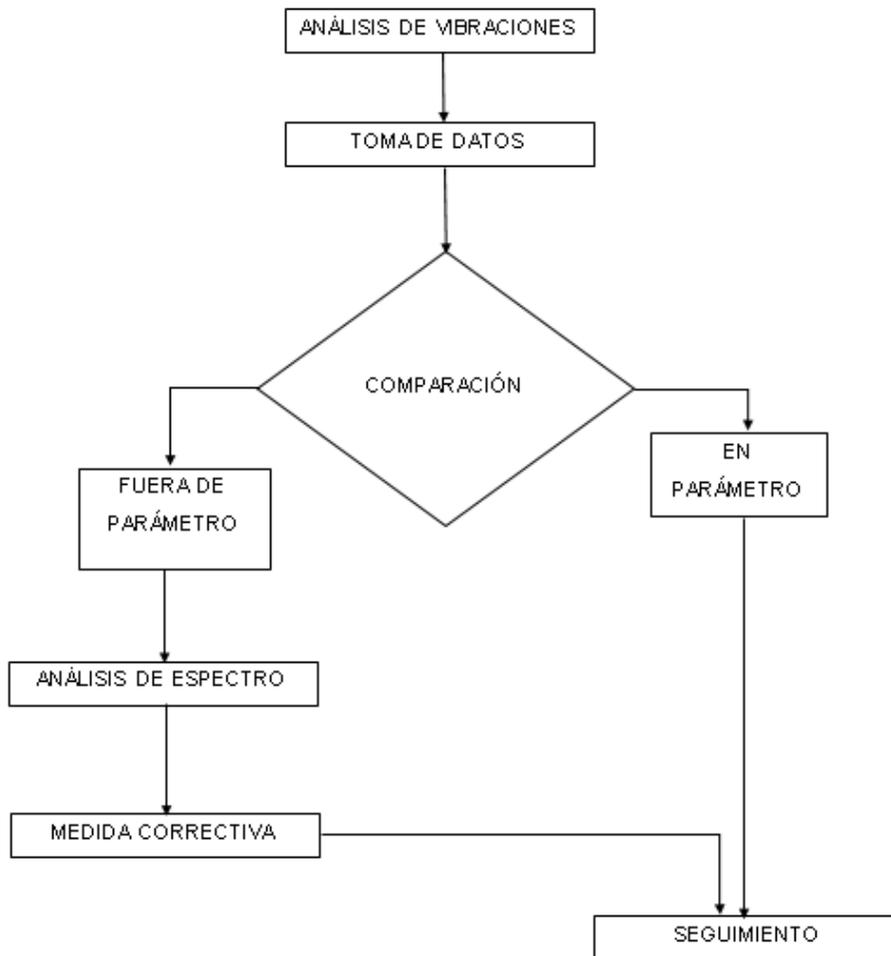
Fuente: Castellanos y Sánchez (2005). *Programa de mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones en equipos críticos de la industria azucarera.*

1.8.7. Descripción del proceso para el análisis de vibraciones

Para poder realizar un análisis de vibraciones en las máquinas críticas de una planta de producción, es necesario tomar las lecturas de la magnitud de las vibraciones, su frecuencia, velocidad y aceleración. Con estas lecturas se podrá realizar el estudio de los espectros y así determinar el estado del equipo (Castellanos y Sánchez, 2005).

Un diagrama de flujo del proceso de análisis de vibraciones, de acuerdo con Castellanos y Sánchez (2005) sería:

Figura 8. Diagrama de flujo análisis de vibraciones



Fuente: Castellanos y Sánchez (2005). *Programa de mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones en equipos críticos de la industria azucarera.*

1.8.8. Aspectos prácticos en la medición de vibración

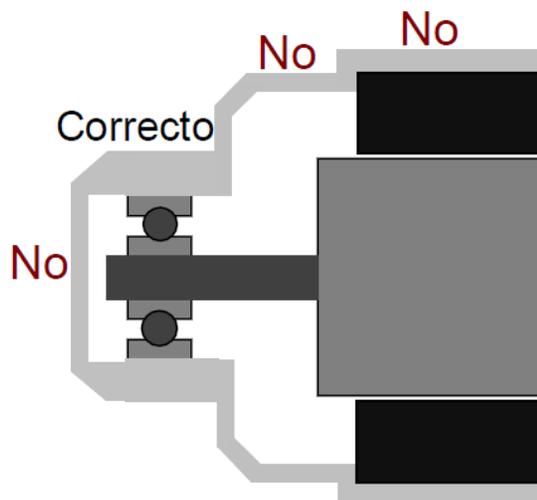
De acuerdo con la experiencia, deben de tomarse consideraciones especiales para realizar un correcto análisis de vibraciones, tanto desde el punto de vista de la ubicación de los puntos de prueba, ubicación de los sensores de vibración, mediciones triaxiales, condiciones de prueba y operación, entre otros.

1.8.9. Ubicación de los puntos de prueba

Como sugiere White (2010), en general es recomendable colocar el transductor de prueba lo más cerca posible del rodamiento del equipo, interponiendo una placa de metal sólido entre el rodamiento y el sensor. La utilización de superficies planas y sólidas es ampliamente recomendada, debido a que la parte plana y sólida, permite que las ondas vibratorias viajen limpiamente a través del transductor y los datos recopilados sean confiables.

Un aspecto extremadamente importante es mantener la homogeneidad en la recopilación de los datos de monitoreo de las máquinas, para asegurar que las muestras mantengan cierta homologación, esto favorecerá al establecer cierta tendencia en el tiempo.

Figura 9. Ubicación de puntos de prueba

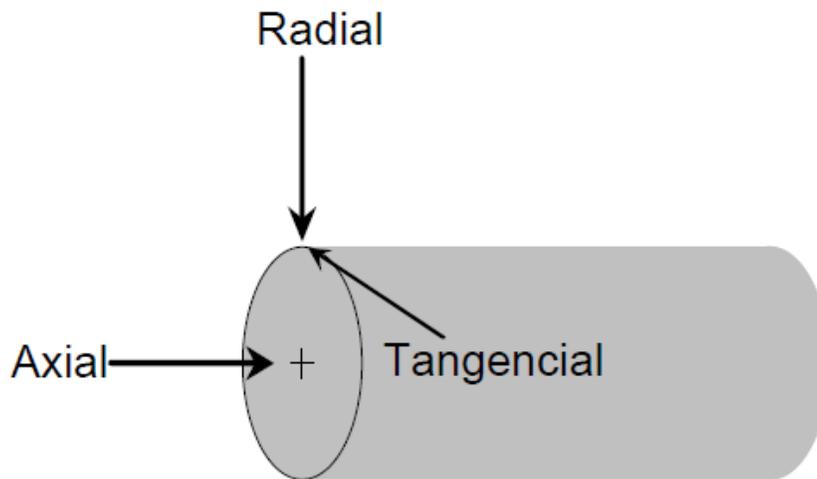


Fuente: White (2010). *Introducción al análisis de vibraciones*.

1.8.10. Mediciones triaxiales

Para ayudar en la determinación de problemas de máquinas, es muy útil obtener datos de vibración de cada punto de medición en tres direcciones. Estas direcciones se llaman axial, radial y tangencial. Axial, se refiere a la dirección paralela a la flecha. Radia, es la dirección desde el transductor hacia el centro de la flecha. Tangencial es a 90° de radial y tangente a la flecha (White, 2010).

Figura 10. Orientación triaxial



Fuente: White (2010). *Introducción al análisis de vibraciones*.

1.8.11. Condiciones de prueba

La firma de vibración de una máquina depende en gran parte de sus parámetros de operación y de su estado físico. Dentro de los parámetros de operación podemos mencionar: velocidad de operación, carga de trabajo, temperatura ambiente, entre otros.

Las condiciones de prueba, cuando se realizan periódicamente deben de procurarse mantenerlas constantes. Como indica, White (2010), la firma de vibración no sería igual a las firmas de vibración recopiladas anteriormente cuando las condiciones de operación de la máquina han cambiado y esto provocaría contaminación del muestreo e incongruencia en los datos recopilados. De igual forma, debe de tratar de controlarse los niveles de vibración provocados por fuentes extrañas como máquinas cercanas.

1.8.12. Condiciones de operación

White (2010), recalca la importancia de que, al momento de recopilarse los datos, las rpm de la máquina durante la prueba, sean muy similares a las que se usaron en pruebas anteriores. Se puede apoyar con equipos como tacómetros estroboscópicos para verificar que se cumpla esta condición.

Todas las máquinas deben ser probadas en condiciones de operación, esto quiere decir, que debe de haberse alcanzado la temperatura normal de operación previo a la realización de la prueba. La temperatura de la máquina afectará la alineación y las holguras en operaciones debido a la expansión térmica. En pocas palabras, una máquina en condiciones frías tendrá una firma de vibración diferente de una máquina caliente y esas pueden a veces ser totalmente diferentes (White, 2010).

2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

Para el desarrollo de la investigación, se realizaron visitas de campo para reconocimiento y actualización de equipos y definición del inventario que fue tomado en cuenta dentro del proyecto, posteriormente se definieron visitas periódicas semanales para recolección de datos de vibraciones y finalmente el registro y tabulación de la base de datos de los valores recopilados.

El inventario técnico de equipos fue proporcionado por el departamento de mantenimiento y únicamente se corroboró que no existieran cambios en las características de los equipos contra lo definido en el listado proporcionado, por lo que esta información se obtuvo de manera transversal, dicha información se tomó como referencia para categorizar por criticidad los equipos que forman parte de la presente investigación. Por otra parte, la recopilación de datos de vibraciones de los distintos equipos se realizó de forma longitudinal.

2.1. Reconocimiento y actualización de equipos

La visita de reconocimiento fue realizada en el mes de octubre de 2019, directamente en las instalaciones de la planta, ubicada en el km. 99.5 carretera a Sipacate, La Democracia, Escuintla, interior finca Bugarvilla, Guatemala, C.A. (N 14° 7' 12.169" O 90° 55' 36.696").

Para la visita de reconocimiento estuvieron presentes tanto el jefe de mantenimiento mecánico, como el jefe de turno de operaciones para acordar los lineamientos y la información a recopilar, también se contó con el apoyo de un técnico en mecánica industrial.

Durante el recorrido se informó la manera en la que se desarrollarían las actividades para recopilación de información necesaria para efectuar la investigación, se divulgaron los objetivos y la metodología de mantenimiento que se espera adoptar con base en los resultados de los datos que fueron objeto de estudio.

2.2. Inventario técnico de equipos

Como etapa inicial, se logró obtener el inventario técnico de los equipos rotativos, información que fue proporcionada por el jefe de mantenimiento mecánico de la planta. Este fue el punto de partida para iniciar con la recopilación de la información requerida, contrastando la información contenida en el documento actual para verificar que no hubiera variaciones y actualizar de ser necesario.

Tabla IV. **Inventario técnico de equipos rotativos de generación de vapor**

| Nombre del equipo | Código/ ID | Potencia (HP) | Voltaje (V) | Velocidad (rpm) | Ubicación |
|-------------------------|---------------|------------------|----------------|--------------------|-----------|
| Ventilador inducido 1 | IDF1 | 560 | 4160 | 900 | C13 |
| Ventilador inducido 2 | IDF2 | 560 | 4160 | 900 | C13 |
| Ventilador forzado 1 | FAF1 | 177 | 4160 | 1200 | C13 |
| Ventilador forzado 2 | FAF2 | 177 | 4160 | 1200 | C13 |
| Ventilador secundario 1 | SAF1 | 301 | 4160 | 1800 | C13 |
| Ventilador secundario 2 | SAF2 | 301 | 4160 | 1800 | C13 |
| Bomba alimentación 1 | BFP1 | 1140 | 13800 | 3600 | C13 |
| Bomba alimentación 2 | BFP2 | 1140 | 13800 | 3600 | C13 |
| Bomba alimentación 3 | BFP3 | 1140 | 13800 | 3600 | C13 |

Continuación tabla IV.

| | | | | | |
|-------------------------|-----|-----|-----|------|-----|
| Alimentadores de bagazo | BF | 10 | 460 | 1728 | C13 |
| Alimentadores de carbón | CF | 1 | 460 | 1300 | C13 |
| Sopladores retráctiles | RSB | 0.6 | 460 | 1780 | C13 |
| Ventilador neumático | DAF | 50 | 460 | 3540 | C13 |
| Tolvas rotativas | RAV | 5 | 460 | 1660 | C13 |

Fuente: elaboración propia.

Al corroborar la información, entre el inventario técnico actual y los equipos instalados físicamente, se comprobó que no hay cambios y que todos los datos se mantienen desde fecha de instalación y puesta en marcha de la planta desde el año 2012. Por lo tanto, la información pudo ser utilizada para continuar con el proyecto de investigación.

2.3. Categorización de la criticidad de los equipos

En la planta no se contaba con un análisis de criticidad y de influencia que los equipos rotativos de generación de vapor tienen en la operación, por lo tanto, no se tenía la visibilidad necesaria para priorizar de manera adecuada los trabajos de mantenimiento y enfocar los esfuerzos en los equipos con mayor impacto en términos de generación.

La clasificación de los equipos por nivel de criticidad se realizó en conjunto con personal de mantenimiento y operaciones, para tener dos puntos de vista diferentes y poder realizar la categorización de manera más certera. Para ello, se tomó como base una matriz de criticidades.

Tabla V. **Matriz de criticidad de equipos rotativos de generación de vapor**

| EVALUACIÓN DE EQUIPOS | | | | | | | | | |
|---|--------|------------------|-----|-----|------------------------------------|------|------|-------|----------|
| CRÍTICOS GENERACIÓN | | | | | MAG-REG-MANTTO-B7-1 | | | | |
| VAPOR BLOQUE 7 | | | | | | | | | |
| Elaborado por: jefe de mantenimiento | | | | | Versión 1 | | | | |
| Revisado por: gerente mantenimiento | | | | | Fecha de la aprobación: 15/20/2019 | | | | |
| Aprobado por: gerente de planta | | | | | | | | | |
| Ítem | Sector | Código de equipo | Seg | Cal | Tie | Asis | Frec | Costo | Clas |
| 1 | C13 | IDF1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | A |
| 2 | C13 | IDF2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | A |
| 3 | C13 | FAF1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | A |
| 4 | C13 | FAF2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | A |
| 5 | C13 | SAF1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | A |
| 6 | C13 | SAF2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | A |
| 7 | C13 | BFP1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 3 | 1 | A |
| 8 | C13 | BFP2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 3 | 1 | A |
| 9 | C13 | BFP3 | 1 | 1 | 2 | 1 | 3 | 1 | A |
| 10 | C13 | BF | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | C |
| 11 | C13 | CF | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | C |
| 12 | C13 | RSB | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | C |
| 13 | C13 | DAF | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 3 | B |
| 14 | C13 | RAV | 2 | 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | C |

Fuente: elaboración propia.

De los resultados obtenidos al realizar el análisis de criticidad en los equipos rotativos, se acordó orientar el análisis a los equipos con prioridad A, de acuerdo con la tabla de evaluación de equipos críticos, esto para concentrar los esfuerzos y atención en los equipos más críticos, los cuales representan el mayor costo de mantenimiento e impacto en la producción.

Tabla VI. **Equipos críticos considerados**

| EQUIPOS CRÍTICOS CONSIDERADOS | | | | |
|--------------------------------------|---------------|---------------|-------------------------|-------------------|
| Ítem | Sector | Código | Descripción | Criticidad |
| 1 | C13 | IDF1 | Ventilador inducido 1 | A |
| 2 | C13 | IDF2 | Ventilador inducido 2 | A |
| 3 | C13 | FAF1 | Ventilador forzado 1 | A |
| 4 | C13 | FAF2 | Ventilador forzado 2 | A |
| 5 | C13 | SAF1 | Ventilador secundario 1 | A |
| 6 | C13 | SAF2 | Ventilador secundario 2 | A |
| 7 | C13 | BFP1 | Bomba alimentación 1 | A |
| 8 | C13 | BFP2 | Bomba alimentación 2 | A |
| 9 | C13 | BFP3 | Bomba alimentación 3 | A |

Fuente: elaboración propia.

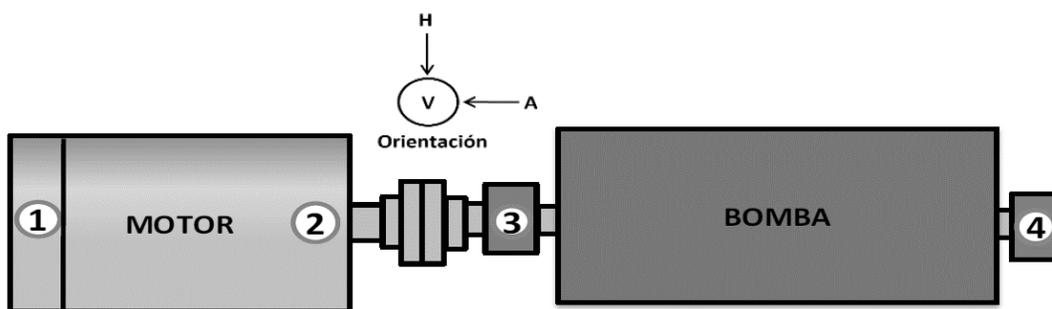
2.4. Recolección de datos de vibraciones

Para realizar la recopilación de datos de los equipos rotativos de generación de vapor, se acordó contar con el apoyo del Departamento de Mantenimiento Predictivo de la empresa. Este departamento cuenta con técnicos calificados y certificados en nivel II para realizar análisis de vibraciones, por lo que la confiabilidad y veracidad de los datos se asegura a través del personal calificado.

Se estableció una rutina semanal a partir de la fecha de arranque de operaciones del bloque de generación de vapor, la cual se denominará en adelante como semana 1, en la primera semana de octubre de 2019. El bloque de generación tuvo posteriormente 45 semanas calendario para operar de manera continua, por lo que se asegura la continuidad operativa para poder contar de manera constante con la disponibilidad de los equipos en marcha y realizar el muestreo correspondiente.

Las mediciones de vibración se realizarán en los tres ejes cartesianos posibles en cada uno de los puntos definidos, la medición triaxial está orientada como X (medición horizontal), Y (medición vertical) y Z (medición axial, respecto al eje de rotación).

Figura 11. **Punto para toma de vibración**



Fuente: elaboración propia.

Para efectos prácticos, se tomaron en cuenta únicamente los valores de vibración en los equipos rotativos y no en los motores eléctricos, debido a que las fallas se presentan con mayor recurrencia en estos y no en los rodamientos de los motores.

2.4.1. **Parámetros de vibración aceptables**

Cada uno de los equipos rotativos de generación de vapor, cuenta con un rango aceptable de vibraciones. Estos parámetros son establecidos de acuerdo a recomendaciones de fabricante, potencia del motor, tipo de acoplamiento y velocidad de giro del equipo. Los rangos se muestran en la tabla VII y fueron proporcionados por el jefe de mantenimiento mecánico.

Tabla VII. **Valores de aceptación de vibración por equipo**

| Tabla de valores aceptables de vibración | | | |
|---|------------------|-----------------|----------------------|
| Descripción del equipo | Rango | Rango de | Rango crítico |
| | aceptable | alarma | |
| Ventilador inducido 1 | 0-4.5 | 4.5-7.1 | 7.1 |
| Ventilador inducido 2 | 0-4.5 | 4.5-7.1 | 7.1 |
| Ventilador forzado primario 1 | 0-2.8 | 2.8-4.5 | 4.5 |
| Ventilador forzado primario 2 | 0-2.8 | 2.8-4.5 | 4.5 |
| Ventilador forzado secundario 1 | 0-2.8 | 2.8-4.5 | 4.5 |
| Ventilador forzado secundario 2 | 0-2.8 | 2.8-4.5 | 4.5 |
| Bomba alimentación agua 1 | 0-4.5 | 4.5-7.1 | 7.1 |
| Bomba alimentación agua 2 | 0-4.5 | 4.5-7.1 | 7.1 |
| Bomba alimentación agua 3 | 0-4.5 | 4.5-7.1 | 7.1 |

Fuente: elaboración propia.

Los rangos anteriores fueron determinados de acuerdo con la figura 12 con base en la norma ISO 10816-3 (2003), tomando en cuenta el tipo de acoplamiento, el tamaño del motor, tamaño del eje y demás criterios recomendados.

Tabla VIII. Criterio de evaluación de rangos de vibración

| | | | | | | | | v. r.m.s. mm/s | v. r.m.s. inch/s | Velocidad Vibración <small>(2 - 1000 Hz n > 600 1/min n > 120 1/min)</small> |
|---|----------|--------------------------|----------|---|----------|--|----------|------------------------|---------------------|---|
| | | | | | | | | 11 | 0.433 | |
| | | | | | | | | 7.1 | 0.280 | |
| | | | | | | | | 4.5 | 0.177 | |
| | | | | | | | | 3.5 | 0.138 | |
| | | | | | | | | 2.8 | 0.110 | |
| | | | | | | | | 2.3 | 0.091 | |
| | | | | | | | | 1.4 | 0.055 | |
| | | | | | | | | 0.71 | 0.028 | |
| rigida | flexible | rigida | flexible | rigida | flexible | rigida | flexible | Fundación | | |
| Bombas > 15 kW radial, axial, diagonal | | | | Máquinas medianas 15 kW < P ≤ 300 kW | | Máquinas Grandes 300 kW < P < 50 MW | | Tipo de Máquina | | |
| Acople directo | | Eje intermedio / Poleas. | | Motores 160 mm ≤ H < 315 mm | | Motores 315 mm ≤ H | | | | |
| Grupo 4 | | Grupo 3 | | Grupo 2 | | Grupo 1 | | Grupo | | |

A Puesta en operación recientemente.

B Operación para largo plazo.

C Operación para corto plazo

D Vibración causando daños

Fuente: International Organization for Standardization (2009). *ISO 10816-3: Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts.*

2.4.2. Equipo para la captura de datos

Para realizar la recolección de datos se utilizó un equipo SKF Mircolog® serie GX CMXA 75, con un software SKF @ptitude Analyst para el manejo y procesamiento de la información recopilada. Esta información fue exportada a través de una hoja de cálculo para facilitar las proyecciones necesarias.

Este equipo tiene la capacidad para tomar datos de vibración en los tres ejes necesarios y procesarlos en tiempo real. Por otra parte, puede ser configurado para establecer una ruta de toma de datos y con esto optimizar el tiempo para realizar las mediciones semanales, almacenar los datos y

posteriormente descargarlos y exportarlos a una hoja de cálculo para su manejo más adecuado.

Figura 12. **Equipo de medición de vibraciones**



Fuente: SKF, USA Inc. (2013). *Manual de usuario: SKF @ptitude analyst para SKF microlog analyzer.*

También se utilizó un acelerómetro CMSS2200, de la marca SKF, el cual tiene una sensibilidad de 100 mV/g para optimizar su utilización en múltiples aplicaciones, por lo que no es necesario utilizar un acelerómetro distinto para cada equipo.

Figura 13. **Acelerómetro para medición triaxial**



Fuente: SKF, USA Inc. (2013). *Manual de usuario: SKF @ptitude analyst para SKF microlog analyzer.*

2.4.3. Estado actual de los equipos rotativos

Respecto a las actividades de mantenimiento que se desarrollan normalmente, estas se realizan de manera anual independientemente del estado de los equipos, todas las actividades desarrolladas durante este período son realizadas sin ningún criterio de toma de decisiones, llegando incluso a realizar cambios en algunos repuestos cuyo costo es significativo y que es posible que aún puedan rendir de forma eficiente durante un período de tiempo más prolongado. Los costos en los que se incurre en la actualidad se detallan en las siguientes tablas:

Tabla IX. **Costos mantenimiento bomba alimentación agua**

| Material | Cantidad | Costo | Total |
|-----------------------------------|--------------------|--------------|--------------------|
| Cojinete shellHG/CHT3RD | 2 | Q 9,480.00 | Q 18,960.00 |
| Cojinete de bolas 7307 BECBP | 2 | Q 465.00 | Q 930.00 |
| Aceite D/circulación | | | |
| TERESSTIC46 | 5 | Q 60.15 | Q 300.75 |
| Solvente mineral | 5 | Q 30.64 | Q 153.20 |
| | | | Q 20,343.95 |
| Mano de obra | Q/día | Días | Total |
| Mecánico especial | Q 140.00 | 7 | Q 980.00 |
| Mecánico IV | Q 113.00 | 7 | Q 791.00 |
| | | | Q 1,771.00 |
| Costo mantenimiento unidad | Q 22,114.95 | | |
| Costo mantenimiento 3 | | | |
| Unidades | Q 66,377.85 | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Costos mantenimiento ventilador inducido**

| Material | Cantidad | Costo | Total |
|-----------------------------------|--------------------|--------------|-------------------|
| Cojinete 22228EK C/manguito | | | |
| HA3128 | 2 | Q 3,715.00 | Q 7,430.00 |
| Grasa polirex EM-ESSO | 6 | Q 24.32 | Q 145.92 |
| Solvente mineral | 5 | Q 30.64 | Q 153.20 |
| | | | Q 7,729.12 |
| Mano de obra | Q/día | Días | Total |
| Mecánico I | Q 126.00 | 5 | Q 630.00 |
| Mecánico IV | Q 113.00 | 5 | Q 565.00 |
| | | | Q 1,195.00 |
| Costo mantenimiento unidad | Q 8,924.12 | | |
| Costo mantenimiento 2 | | | |
| Unidades | Q 17,848.24 | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Costos mantenimiento ventilador forzado primario**

| Material | Cantidad | Costo | Total |
|---------------------------------------|-------------------|--------------|-------------------|
| Cojinete 22222EK C/manguito H322 | 2 | Q 1,921.00 | Q 3,842.00 |
| Grasa polirex EM-ESSO | 4 | Q 24.32 | Q 97.28 |
| Solvente mineral | 3 | Q 30.64 | Q 91.92 |
| | | | Q 4,031.20 |
| Manon de obra | Q/día | Días | Total |
| Mecánico I | Q 126.00 | 3 | Q 378.00 |
| Mecánico IV | Q 113.00 | 3 | Q 339.00 |
| | | | Q 717.00 |
| Costo mantenimiento unidad | Q 4,748.20 | | |
| Costo mantenimiento 2 Unidades | Q 9,496.40 | | |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Costos mantenimiento ventilador forzado secundario**

| Material | Cantidad | Costo | Total |
|---------------------------------------|-------------------|--------------|-------------------|
| Cojinete 22222EK C/manguito H322 | 2 | Q 1,921.00 | Q 3,842.00 |
| Grasa polirex EM-ESSO | 4 | Q 24.32 | Q 97.28 |
| Solvente mineral | 3 | Q 30.64 | Q 91.92 |
| | | | Q 4,031.20 |
| Puesto | Q/día | Días | Total |
| Mecánico I | Q 126.00 | 3 | Q 378.00 |
| Mecánico IV | Q 113.00 | 3 | Q 339.00 |
| | | | Q 717.00 |
| Costo Mantto | Q 4,748.20 | | |
| Costo mantenimiento 2 Unidades | Q 9,496.20 | | |

Fuente: elaboración propia.

Se realizaron 45 muestreos en cada uno de los equipos, correspondientes a cada una de las semanas operativas del período 2019-2020. Durante este período se monitoreó y se registró cada una de las mediciones triaxiales y se considera que se cuenta con suficientes muestras para iniciar con un análisis estadístico de los resultados obtenidos.

Tabla XIII. **Valores de vibración ventilador inducido 1**

| Semana | Chumacera L acople | | | Chumacera L libre | | |
|--------|--------------------|----------|-------|-------------------|----------|-------|
| | Horizontal | Vertical | Axial | Horizontal | Vertical | Axial |
| 1 | 2.151 | 1.095 | 1.500 | 1.545 | 0.411 | 0.720 |
| 2 | 2.010 | 1.467 | 1.631 | 1.054 | 0.352 | 0.660 |
| 3 | 2.263 | 1.084 | 1.908 | 1.615 | 0.389 | 1.031 |
| 4 | 2.166 | 0.713 | 1.579 | 1.359 | 0.401 | 0.775 |
| 5 | 2.120 | 0.897 | 1.660 | 1.200 | 0.678 | 0.951 |
| 6 | 2.410 | 1.788 | 1.653 | 1.197 | 0.400 | 0.891 |
| 7 | 2.357 | 1.205 | 1.517 | 1.673 | 0.537 | 0.961 |
| 8 | 0.739 | 0.365 | 0.940 | 0.472 | 0.259 | 0.355 |
| 9 | 0.585 | 0.378 | 0.955 | 0.538 | 0.766 | 0.368 |
| 10 | 0.683 | 0.353 | 0.959 | 0.728 | 0.272 | 0.486 |
| 11 | 0.597 | 0.329 | 0.984 | 0.451 | 0.219 | 0.367 |
| 12 | 0.585 | 0.378 | 0.955 | 0.538 | 0.766 | 0.368 |
| 13 | 0.818 | 0.449 | 1.199 | 0.638 | 0.290 | 0.518 |
| 14 | 0.653 | 0.239 | 0.975 | 0.401 | 0.185 | 0.391 |
| 15 | 0.671 | 0.894 | 0.928 | 0.429 | 0.655 | 0.463 |
| 16 | 0.460 | 0.658 | 1.015 | 0.435 | 0.176 | 0.352 |
| 17 | 1.571 | 0.603 | 1.704 | 2.124 | 0.654 | 1.058 |
| 18 | 0.393 | 0.285 | 1.509 | 0.407 | 0.192 | 0.299 |
| 19 | 0.411 | 0.247 | 1.099 | 0.426 | 0.229 | 0.302 |
| 20 | 0.377 | 0.518 | 1.122 | 0.311 | 0.225 | 0.329 |
| 21 | 1.940 | 0.497 | 1.161 | 1.024 | 0.302 | 0.713 |
| 22 | 1.303 | 0.743 | 1.279 | 1.007 | 0.338 | 0.762 |
| 23 | 1.669 | 1.203 | 1.500 | 1.958 | 0.546 | 0.944 |
| 24 | 1.417 | 0.613 | 1.261 | 1.360 | 0.419 | 0.773 |
| 25 | 1.392 | 1.157 | 1.157 | 0.889 | 0.609 | 0.774 |
| 26 | 1.581 | 2.550 | 1.785 | 1.548 | 0.499 | 0.783 |
| 27 | 1.545 | 0.455 | 1.170 | 1.213 | 0.375 | 0.876 |

Continuación tabla XIII.

| | | | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 28 | 1.426 | 0.903 | 1.170 | 0.988 | 0.364 | 1.000 |
| 29 | 1.582 | 1.074 | 1.446 | 1.608 | 0.448 | 0.933 |
| 30 | 1.494 | 0.659 | 1.291 | 1.881 | 0.568 | 1.037 |
| 31 | 1.842 | 1.110 | 1.337 | 2.155 | 0.379 | 1.125 |
| 32 | 2.484 | 1.248 | 1.600 | 1.690 | 0.797 | 0.772 |
| 33 | 1.677 | 0.602 | 1.254 | 1.448 | 0.323 | 0.880 |
| 34 | 1.729 | 0.918 | 1.237 | 0.958 | 0.926 | 0.932 |
| 35 | 1.759 | 0.506 | 1.816 | 1.305 | 0.547 | 0.974 |
| 36 | 1.622 | 1.462 | 1.469 | 1.206 | 0.368 | 0.881 |
| 37 | 1.535 | 0.975 | 1.586 | 0.994 | 0.542 | 0.932 |
| 38 | 2.655 | 0.788 | 1.563 | 1.540 | 0.491 | 0.808 |
| 39 | 0.975 | 1.579 | 2.148 | 1.559 | 0.622 | 0.569 |
| 40 | 3.336 | 0.978 | 1.741 | 1.664 | 0.525 | 1.152 |
| 41 | 2.787 | 2.220 | 2.127 | 0.943 | 1.095 | 0.896 |
| 42 | 1.811 | 0.572 | 1.180 | 1.405 | 0.345 | 0.981 |
| 43 | 1.734 | 1.334 | 1.566 | 1.469 | 0.451 | 0.919 |
| 44 | 1.992 | 1.517 | 1.545 | 0.842 | 0.858 | 0.864 |
| 45 | 0.796 | 0.335 | 1.418 | 0.965 | 0.670 | 0.723 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Valores de vibración ventilador inducido 2**

| Semana | Chumacera L acople | | | Chumacera L libre | | |
|--------|--------------------|----------|-------|-------------------|----------|-------|
| | Horizontal | Vertical | Axial | Horizontal | Vertical | Axial |
| 1 | 1.294 | 1.071 | 1.452 | 0.973 | 0.512 | 0.501 |
| 2 | 2.215 | 2.228 | 1.175 | 0.358 | 0.252 | 0.455 |
| 3 | 1.235 | 0.610 | 1.382 | 0.725 | 0.394 | 0.716 |
| 4 | 1.084 | 1.302 | 1.301 | 0.588 | 0.184 | 0.377 |
| 5 | 1.025 | 0.624 | 1.174 | 0.474 | 0.193 | 0.456 |
| 6 | 1.124 | 0.966 | 1.505 | 0.691 | 0.521 | 0.670 |
| 7 | 0.670 | 0.446 | 2.021 | 0.701 | 0.257 | 0.602 |
| 8 | 0.607 | 0.401 | 1.323 | 0.629 | 0.670 | 0.356 |
| 9 | 0.661 | 0.346 | 1.972 | 0.373 | 0.233 | 0.303 |
| 10 | 0.672 | 0.378 | 1.232 | 0.399 | 0.247 | 0.464 |
| 11 | 0.607 | 0.401 | 1.323 | 0.394 | 0.281 | 0.260 |

Continuación tabla XIV.

| | | | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 12 | 0.889 | 0.552 | 1.640 | 0.373 | 0.233 | 0.303 |
| 13 | 0.557 | 0.345 | 0.764 | 0.508 | 0.193 | 0.310 |
| 14 | 0.652 | 0.752 | 1.320 | 0.279 | 0.147 | 1.030 |
| 15 | 0.690 | 0.377 | 1.062 | 0.728 | 0.289 | 0.240 |
| 16 | 0.747 | 0.382 | 1.104 | 0.240 | 0.165 | 0.295 |
| 17 | 3.305 | 1.814 | 2.146 | 0.316 | 0.141 | 0.269 |
| 18 | 2.189 | 1.678 | 2.749 | 0.495 | 0.228 | 0.882 |
| 19 | 0.837 | 0.616 | 2.962 | 0.477 | 0.335 | 0.543 |
| 20 | 0.925 | 0.783 | 3.112 | 0.522 | 0.308 | 0.713 |
| 21 | 0.984 | 0.610 | 1.717 | 0.398 | 0.186 | 0.260 |
| 22 | 3.374 | 1.790 | 2.634 | 1.056 | 0.309 | 0.486 |
| 23 | 2.760 | 2.179 | 3.022 | 0.543 | 0.304 | 0.468 |
| 24 | 2.921 | 1.295 | 2.291 | 0.594 | 0.302 | 0.823 |
| 25 | 2.782 | 1.345 | 2.213 | 0.547 | 0.250 | 0.670 |
| 26 | 2.603 | 1.641 | 1.874 | 0.585 | 0.350 | 0.636 |
| 27 | 2.678 | 1.224 | 2.720 | 0.529 | 0.389 | 0.464 |
| 28 | 2.906 | 1.354 | 2.005 | 0.654 | 0.237 | 0.861 |
| 29 | 2.553 | 0.954 | 2.080 | 0.487 | 0.351 | 1.027 |
| 30 | 3.070 | 2.101 | 2.453 | 0.395 | 0.316 | 0.789 |
| 31 | 2.110 | 1.352 | 2.795 | 0.489 | 0.322 | 0.726 |
| 32 | 2.787 | 1.873 | 1.977 | 0.442 | 0.287 | 0.767 |
| 33 | 3.077 | 1.513 | 2.661 | 0.581 | 0.431 | 0.461 |
| 34 | 3.531 | 2.938 | 2.652 | 0.640 | 0.227 | 0.657 |
| 35 | 3.01 | 1.880 | 1.742 | 0.638 | 0.375 | 0.694 |
| 36 | 3.222 | 1.839 | 2.080 | 0.607 | 0.348 | 0.626 |
| 37 | 3.398 | 2.017 | 2.787 | 0.590 | 0.206 | 0.678 |
| 38 | 2.817 | 2.628 | 3.018 | 0.487 | 0.455 | 0.568 |
| 39 | 3.318 | 2.474 | 2.336 | 0.508 | 0.224 | 0.610 |
| 40 | 2.839 | 2.965 | 2.640 | 0.491 | 0.193 | 0.576 |
| 41 | 2.157 | 0.879 | 2.600 | 0.410 | 0.206 | 0.682 |
| 42 | 2.537 | 2.532 | 2.823 | 0.440 | 0.319 | 0.515 |
| 43 | 2.741 | 1.411 | 2.339 | 0.489 | 0.226 | 0.851 |
| 44 | 2.433 | 2.444 | 2.394 | 0.425 | 0.584 | 0.440 |
| 45 | 2.815 | 1.705 | 2.188 | 0.373 | 0.220 | 0.387 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. Valores de vibración ventilador forzado primario 1

| Semana | Chumacera L acople | | | Chumacera L libre | | |
|--------|--------------------|----------|-------|-------------------|----------|-------|
| | Horizontal | Vertical | Axial | Horizontal | Vertical | Axial |
| 1 | 0.471 | 0.250 | 0.911 | 0.309 | 0.133 | 0.185 |
| 2 | 0.437 | 0.372 | 0.400 | 0.306 | 0.122 | 0.148 |
| 3 | 0.541 | 0.382 | 0.650 | 0.296 | 0.351 | 0.269 |
| 4 | 0.438 | 0.271 | 0.894 | 0.308 | 0.110 | 0.160 |
| 5 | 0.587 | 0.407 | 0.545 | 0.312 | 0.090 | 0.126 |
| 6 | 0.536 | 0.386 | 0.611 | 0.378 | 0.099 | 0.143 |
| 7 | 0.566 | 0.557 | 0.957 | 0.328 | 0.215 | 0.143 |
| 8 | 0.867 | 0.829 | 0.873 | 0.350 | 0.133 | 0.264 |
| 9 | 0.482 | 0.322 | 0.641 | 0.425 | 0.226 | 0.311 |
| 10 | 0.585 | 0.415 | 0.888 | 0.229 | 0.089 | 0.120 |
| 11 | 0.538 | 0.320 | 0.502 | 0.341 | 0.099 | 0.235 |
| 12 | 0.689 | 0.777 | 0.684 | 0.313 | 0.120 | 0.260 |
| 13 | 0.784 | 0.418 | 0.762 | 0.346 | 0.123 | 0.271 |
| 14 | 0.670 | 0.546 | 0.592 | 0.444 | 0.100 | 0.223 |
| 15 | 0.574 | 0.322 | 0.590 | 0.397 | 0.089 | 0.135 |
| 16 | 0.476 | 0.408 | 0.502 | 0.337 | 0.136 | 0.266 |
| 17 | 0.493 | 0.398 | 0.481 | 0.317 | 0.084 | 0.166 |
| 18 | 0.950 | 0.710 | 2.028 | 0.312 | 0.124 | 0.136 |
| 19 | 0.471 | 0.792 | 1.024 | 0.333 | 0.132 | 0.163 |
| 20 | 0.535 | 0.731 | 0.730 | 0.318 | 0.083 | 0.150 |
| 21 | 0.613 | 0.617 | 0.793 | 0.376 | 0.104 | 0.163 |
| 22 | 0.497 | 0.642 | 1.063 | 0.409 | 0.180 | 0.264 |
| 23 | 0.526 | 0.899 | 1.730 | 0.288 | 0.150 | 0.167 |
| 24 | 0.581 | 1.408 | 2.244 | 0.246 | 0.260 | 0.242 |
| 25 | 0.482 | 0.727 | 1.805 | 0.442 | 0.329 | 0.441 |
| 26 | 0.607 | 0.522 | 0.870 | 0.255 | 0.290 | 0.290 |
| 27 | 0.530 | 0.631 | 0.657 | 0.355 | 0.127 | 0.253 |
| 28 | 0.416 | 0.447 | 0.763 | 0.358 | 0.143 | 0.174 |
| 29 | 0.501 | 0.694 | 0.781 | 0.296 | 0.133 | 0.137 |
| 30 | 0.500 | 0.474 | 0.718 | 0.324 | 0.208 | 0.188 |
| 31 | 0.495 | 0.634 | 1.260 | 0.297 | 0.160 | 0.183 |
| 32 | 0.507 | 0.354 | 0.638 | 0.268 | 0.122 | 0.238 |
| 33 | 0.602 | 0.911 | 1.052 | 0.364 | 0.093 | 0.128 |
| 34 | 0.674 | 0.374 | 0.719 | 0.282 | 0.150 | 0.241 |
| 35 | 0.640 | 0.564 | 0.881 | 0.357 | 0.220 | 0.165 |

Continuación tabla XV.

| | | | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 36 | 0.522 | 0.809 | 0.677 | 0.576 | 0.125 | 0.234 |
| 37 | 0.620 | 0.398 | 0.753 | 0.310 | 0.127 | 0.174 |
| 38 | 0.488 | 0.700 | 0.777 | 0.317 | 0.098 | 0.155 |
| 39 | 0.713 | 0.616 | 0.843 | 0.273 | 0.111 | 0.153 |
| 40 | 0.675 | 0.924 | 1.091 | 0.285 | 0.158 | 0.300 |
| 41 | 0.454 | 0.459 | 0.772 | 0.260 | 0.241 | 0.243 |
| 42 | 0.494 | 0.527 | 0.753 | 0.255 | 0.132 | 0.184 |
| 43 | 0.591 | 0.649 | 0.757 | 0.350 | 0.113 | 0.119 |
| 44 | 0.493 | 0.506 | 0.509 | 0.506 | 0.505 | 0.486 |
| 45 | 1.148 | 0.816 | 0.852 | 0.306 | 0.109 | 0.134 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Valores de vibración ventilador forzado primario 2**

| Semana | Chumacera L acople | | | Chumacera L libre | | |
|--------|--------------------|----------|-------|-------------------|----------|-------|
| | Horizontal | Vertical | Axial | Horizontal | Vertical | Axial |
| 1 | 0.474 | 0.648 | 0.944 | 0.349 | 0.092 | 0.122 |
| 2 | 0.371 | 0.370 | 0.374 | 0.367 | 0.372 | 0.371 |
| 3 | 0.666 | 0.990 | 0.883 | 0.331 | 0.167 | 0.294 |
| 4 | 0.472 | 0.806 | 0.718 | 0.359 | 0.109 | 0.146 |
| 5 | 0.419 | 0.412 | 0.408 | 0.213 | 0.093 | 0.167 |
| 6 | 0.545 | 0.758 | 0.845 | 0.345 | 0.103 | 0.152 |
| 7 | 0.642 | 0.692 | 0.902 | 0.366 | 0.100 | 0.148 |
| 8 | 0.381 | 0.351 | 0.694 | 0.231 | 0.102 | 0.175 |
| 9 | 0.566 | 0.462 | 0.706 | 0.355 | 0.101 | 0.140 |
| 10 | 0.489 | 0.474 | 0.725 | 0.393 | 0.139 | 0.195 |
| 11 | 0.394 | 0.189 | 0.637 | 0.391 | 0.128 | 0.185 |
| 12 | 0.577 | 0.511 | 0.858 | 0.380 | 0.112 | 0.161 |
| 13 | 0.506 | 0.381 | 0.595 | 0.360 | 0.105 | 0.209 |
| 14 | 0.423 | 0.631 | 0.670 | 0.213 | 0.112 | 0.166 |
| 15 | 0.676 | 0.512 | 0.885 | 0.310 | 0.102 | 0.182 |
| 16 | 0.851 | 0.673 | 1.128 | 0.470 | 0.226 | 0.196 |
| 17 | 0.449 | 0.901 | 0.984 | 0.441 | 0.112 | 0.192 |
| 18 | 0.646 | 0.552 | 0.582 | 0.303 | 0.114 | 0.169 |

Continuación tabla XVI.

| | | | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 19 | 0.929 | 0.890 | 0.811 | 0.464 | 0.142 | 0.296 |
| 20 | 0.715 | 0.800 | 0.873 | 0.276 | 0.112 | 0.152 |
| 21 | 0.569 | 0.617 | 1.009 | 0.411 | 0.113 | 0.191 |
| 22 | 0.442 | 0.397 | 0.696 | 0.247 | 0.114 | 0.181 |
| 23 | 0.498 | 0.329 | 0.652 | 0.291 | 0.121 | 0.143 |
| 24 | 0.433 | 0.296 | 0.760 | 0.296 | 0.095 | 0.145 |
| 25 | 0.622 | 0.427 | 0.969 | 0.400 | 0.129 | 0.205 |
| 26 | 0.646 | 0.570 | 0.859 | 0.393 | 0.080 | 0.142 |
| 27 | 0.701 | 0.280 | 0.649 | 0.407 | 0.129 | 0.221 |
| 28 | 0.715 | 0.280 | 0.804 | 0.533 | 0.166 | 0.207 |
| 29 | 0.956 | 0.239 | 1.289 | 0.674 | 0.219 | 0.297 |
| 30 | 1.026 | 0.405 | 0.763 | 0.392 | 0.193 | 0.254 |
| 31 | 0.604 | 0.559 | 0.788 | 0.548 | 0.127 | 0.357 |
| 32 | 0.635 | 0.368 | 0.803 | 0.394 | 0.117 | 0.478 |
| 33 | 0.731 | 0.599 | 0.974 | 0.616 | 0.259 | 0.358 |
| 34 | 0.918 | 0.419 | 0.839 | 0.431 | 0.296 | 0.612 |
| 35 | 0.633 | 0.374 | 1.395 | 0.380 | 0.092 | 0.156 |
| 36 | 0.676 | 0.563 | 0.710 | 0.462 | 0.326 | 0.584 |
| 37 | 0.640 | 0.468 | 1.189 | 0.443 | 0.265 | 0.591 |
| 38 | 0.721 | 0.447 | 1.291 | 0.329 | 0.126 | 0.199 |
| 39 | 0.535 | 0.623 | 0.881 | 0.441 | 0.267 | 0.194 |
| 40 | 0.566 | 0.387 | 0.803 | 0.540 | 0.328 | 0.235 |
| 41 | 0.607 | 0.340 | 0.644 | 0.318 | 0.263 | 0.238 |
| 42 | 0.503 | 0.275 | 0.736 | 0.419 | 0.329 | 0.200 |
| 43 | 0.543 | 0.510 | 0.568 | 0.422 | 0.287 | 0.198 |
| 44 | 0.680 | 0.311 | 0.554 | 0.435 | 0.335 | 0.251 |
| 45 | 0.426 | 0.348 | 0.661 | 0.427 | 0.359 | 0.186 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. Valores de vibración ventilador forzado secundario 1

| Semana | Chumacera L acople | | | Chumacera L libre | | |
|--------|--------------------|----------|-------|-------------------|----------|-------|
| | Horizontal | Vertical | Axial | Horizontal | Vertical | Axial |
| 1 | 1.788 | 0.580 | 2.143 | 1.662 | 0.392 | 0.655 |
| 2 | 1.688 | 1.066 | 1.516 | 0.941 | 0.397 | 0.470 |
| 3 | 1.608 | 1.708 | 1.388 | 1.042 | 0.436 | 0.497 |
| 4 | 0.790 | 0.290 | 1.196 | 0.49 | 0.250 | 0.338 |
| 5 | 0.514 | 0.318 | 0.696 | 0.589 | 0.270 | 0.278 |
| 6 | 0.530 | 0.248 | 0.764 | 0.738 | 0.414 | 0.280 |
| 7 | 0.581 | 0.376 | 0.814 | 0.599 | 0.183 | 0.240 |
| 8 | 0.403 | 0.198 | 0.604 | 0.451 | 0.151 | 0.228 |
| 9 | 0.574 | 0.255 | 0.740 | 0.557 | 0.178 | 0.176 |
| 10 | 0.426 | 0.154 | 0.478 | 0.457 | 0.253 | 0.182 |
| 11 | 0.443 | 0.224 | 0.809 | 0.515 | 0.189 | 0.264 |
| 12 | 0.513 | 0.254 | 0.795 | 0.478 | 0.249 | 0.330 |
| 13 | 0.483 | 0.227 | 0.737 | 0.516 | 0.212 | 0.216 |
| 14 | 0.343 | 0.132 | 0.471 | 0.257 | 0.091 | 0.197 |
| 15 | 0.435 | 0.218 | 0.492 | 0.428 | 0.096 | 0.234 |
| 16 | 0.472 | 0.237 | 0.804 | 0.465 | 0.143 | 0.375 |
| 17 | 2.155 | 0.595 | 3.054 | 0.872 | 0.307 | 0.300 |
| 18 | 0.856 | 0.544 | 1.031 | 0.436 | 0.268 | 0.189 |
| 19 | 0.875 | 0.538 | 1.032 | 0.583 | 0.256 | 0.267 |
| 20 | 0.816 | 0.383 | 1.073 | 0.395 | 0.144 | 0.276 |
| 21 | 2.018 | 0.386 | 1.748 | 0.878 | 0.219 | 0.316 |
| 22 | 1.692 | 0.332 | 1.499 | 0.800 | 0.216 | 0.275 |
| 23 | 0.870 | 0.583 | 1.445 | 0.606 | 0.233 | 0.338 |
| 24 | 1.834 | 0.917 | 1.367 | 0.691 | 0.261 | 0.241 |
| 25 | 2.162 | 0.388 | 1.817 | 0.910 | 0.223 | 0.366 |
| 26 | 1.982 | 0.693 | 1.941 | 1.084 | 0.405 | 0.543 |
| 27 | 2.437 | 0.529 | 1.704 | 0.768 | 0.216 | 0.405 |
| 28 | 2.324 | 0.612 | 1.902 | 1.072 | 0.690 | 0.494 |
| 29 | 1.898 | 0.672 | 1.926 | 0.860 | 0.578 | 0.303 |
| 30 | 2.573 | 0.585 | 2.375 | 1.580 | 0.500 | 0.545 |
| 31 | 2.544 | 0.519 | 2.183 | 1.360 | 0.654 | 0.386 |
| 32 | 2.188 | 0.663 | 1.910 | 1.052 | 0.520 | 0.438 |
| 33 | 3.148 | 0.470 | 1.802 | 1.149 | 0.319 | 0.363 |
| 34 | 2.561 | 0.523 | 2.127 | 1.263 | 0.483 | 0.501 |
| 35 | 2.398 | 0.589 | 2.45 | 1.253 | 0.472 | 0.410 |

Continuación tabla XVII.

| | | | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 36 | 3.733 | 0.610 | 1.873 | 1.726 | 0.344 | 0.491 |
| 37 | 3.286 | 0.570 | 1.689 | 1.296 | 0.655 | 0.568 |
| 38 | 3.208 | 0.780 | 2.502 | 1.422 | 0.522 | 0.532 |
| 39 | 3.76 | 0.511 | 1.972 | 1.796 | 0.977 | 0.655 |
| 40 | 3.086 | 0.812 | 1.894 | 1.526 | 0.534 | 0.669 |
| 41 | 2.443 | 0.504 | 0.505 | 1.118 | 0.349 | 0.543 |
| 42 | 2.776 | 1.517 | 1.479 | 1.419 | 0.573 | 0.788 |
| 43 | 2.448 | 0.573 | 1.464 | 1.203 | 0.206 | 0.371 |
| 44 | 2.530 | 2.553 | 2.582 | 2.590 | 2.594 | 2.590 |
| 45 | 2.891 | 0.835 | 2.235 | 1.207 | 0.343 | 0.501 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Valores de vibración ventilador forzado secundario 2**

| Semana | Chumacera L acople | | | Chumacera L libre | | |
|--------|--------------------|----------|-------|-------------------|----------|-------|
| | Horizontal | Vertical | Axial | Horizontal | Vertical | Axial |
| 1 | 2.356 | 2.047 | 3.527 | 1.421 | 0.657 | 0.662 |
| 2 | 2.153 | 1.359 | 2.388 | 1.44 | 0.512 | 0.594 |
| 3 | 1.620 | 1.089 | 2.979 | 1.236 | 0.708 | 0.627 |
| 4 | 2.282 | 1.408 | 2.930 | 1.261 | 0.746 | 0.501 |
| 5 | 0.745 | 0.261 | 0.652 | 0.714 | 0.265 | 0.507 |
| 6 | 0.576 | 0.253 | 0.651 | 0.609 | 0.222 | 0.394 |
| 7 | 0.750 | 0.551 | 0.670 | 0.671 | 0.235 | 0.389 |
| 8 | 0.646 | 0.336 | 0.552 | 0.656 | 0.238 | 0.344 |
| 9 | 0.756 | 0.224 | 0.569 | 0.661 | 0.231 | 0.298 |
| 10 | 0.512 | 0.212 | 0.515 | 0.605 | 0.242 | 0.409 |
| 11 | 0.525 | 0.193 | 0.567 | 0.493 | 0.204 | 0.254 |
| 12 | 0.858 | 0.258 | 0.610 | 0.574 | 0.233 | 0.345 |
| 13 | 0.705 | 0.245 | 0.605 | 0.540 | 0.203 | 0.348 |
| 14 | 0.992 | 0.477 | 2.011 | 0.766 | 0.276 | 0.428 |
| 15 | 0.378 | 0.477 | 0.953 | 0.368 | 0.138 | 0.159 |
| 16 | 0.443 | 0.262 | 0.898 | 0.394 | 0.144 | 0.153 |
| 17 | 0.435 | 0.519 | 0.811 | 0.448 | 0.175 | 0.298 |
| 18 | 0.999 | 1.168 | 1.343 | 1.183 | 0.444 | 0.449 |
| 19 | 0.820 | 0.865 | 1.375 | 0.766 | 0.256 | 0.352 |

Continuación tabla XVIII.

| | | | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 20 | 0.932 | 0.872 | 1.435 | 0.884 | 0.261 | 0.481 |
| 21 | 1.014 | 1.287 | 1.361 | 0.842 | 0.327 | 0.480 |
| 22 | 0.935 | 0.250 | 1.317 | 0.905 | 0.553 | 0.605 |
| 23 | 1.343 | 0.288 | 1.619 | 1.114 | 0.953 | 0.702 |
| 24 | 1.014 | 0.864 | 1.483 | 0.952 | 0.308 | 0.656 |
| 25 | 0.900 | 0.228 | 1.496 | 0.643 | 0.293 | 0.323 |
| 26 | 1.116 | 1.122 | 1.462 | 0.990 | 0.985 | 0.486 |
| 27 | 1.149 | 0.955 | 1.396 | 0.987 | 0.957 | 0.471 |
| 28 | 1.068 | 1.035 | 1.609 | 1.025 | 0.779 | 0.382 |
| 29 | 1.119 | 1.259 | 1.554 | 1.033 | 0.272 | 0.352 |
| 30 | 1.038 | 1.079 | 1.361 | 1.135 | 0.696 | 0.441 |
| 31 | 0.920 | 0.242 | 1.444 | 0.653 | 0.317 | 0.488 |
| 32 | 1.562 | 1.562 | 1.378 | 1.056 | 0.543 | 0.612 |
| 33 | 1.389 | 1.804 | 1.57 | 0.930 | 0.434 | 0.467 |
| 34 | 1.407 | 0.656 | 1.799 | 1.140 | 0.761 | 0.599 |
| 35 | 1.559 | 1.113 | 1.907 | 1.408 | 0.756 | 0.470 |
| 36 | 1.039 | 0.782 | 1.786 | 0.834 | 0.674 | 0.407 |
| 37 | 1.098 | 1.234 | 1.612 | 0.920 | 0.689 | 0.602 |
| 38 | 1.607 | 1.321 | 1.894 | 1.131 | 0.420 | 0.482 |
| 39 | 1.360 | 1.083 | 1.535 | 1.472 | 0.310 | 0.347 |
| 40 | 1.631 | 0.730 | 1.729 | 1.214 | 0.590 | 0.645 |
| 41 | 1.050 | 1.023 | 1.008 | 0.847 | 0.646 | 0.717 |
| 42 | 1.539 | 1.289 | 1.736 | 1.274 | 0.676 | 0.482 |
| 43 | 1.719 | 0.763 | 1.632 | 0.962 | 0.280 | 0.430 |
| 44 | 1.273 | 1.304 | 1.311 | 1.306 | 1.304 | 1.288 |
| 45 | 1.812 | 1.374 | 1.998 | 1.337 | 0.435 | 0.424 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. Valores de vibración bomba alimentación agua 1

| Semana | Chumacera L acople | | | Chumacera L libre | | |
|--------|--------------------|----------|-------|-------------------|----------|-------|
| | Horizontal | Vertical | Axial | Horizontal | Vertical | Axial |
| 1 | 0.785 | 0.976 | 0.863 | 1.160 | 0.864 | 0.306 |
| 2 | 0.788 | 1.120 | 0.548 | 0.887 | 0.896 | 0.402 |
| 3 | 1.032 | 1.269 | 0.536 | 0.866 | 0.747 | 0.270 |
| 4 | 0.750 | 0.973 | 0.381 | 0.745 | 1.002 | 0.307 |
| 5 | 0.812 | 0.949 | 0.342 | 1.104 | 1.044 | 0.306 |
| 6 | 0.825 | 0.881 | 0.487 | 1.236 | 1.132 | 0.417 |
| 7 | 0.873 | 1.016 | 0.843 | 1.986 | 1.063 | 0.651 |
| 8 | 0.591 | 0.887 | 0.338 | 1.030 | 0.847 | 0.312 |
| 9 | 0.819 | 0.949 | 0.430 | 1.265 | 1.313 | 0.419 |
| 10 | 0.785 | 0.902 | 0.477 | 1.261 | 1.064 | 0.306 |
| 11 | 0.925 | 0.970 | 0.618 | 1.65 | 1.147 | 0.369 |
| 12 | 0.786 | 1.023 | 0.401 | 1.702 | 1.315 | 0.340 |
| 13 | 0.916 | 1.012 | 0.412 | 1.020 | 0.733 | 0.332 |
| 14 | 1.068 | 1.207 | 0.534 | 1.244 | 0.953 | 0.319 |
| 15 | 1.072 | 1.347 | 0.395 | 1.251 | 1.136 | 0.595 |
| 16 | 0.985 | 1.354 | 0.562 | 1.152 | 0.879 | 0.419 |
| 17 | 1.028 | 0.973 | 0.412 | 1.155 | 0.674 | 0.500 |
| 18 | 0.997 | 1.401 | 0.587 | 1.155 | 0.990 | 0.358 |
| 19 | 1.265 | 1.340 | 0.481 | 1.108 | 1.105 | 0.461 |
| 20 | 1.113 | 1.299 | 0.654 | 1.033 | 1.126 | 0.442 |
| 21 | 1.238 | 1.719 | 0.467 | 1.288 | 1.339 | 0.479 |
| 22 | 1.212 | 1.448 | 0.618 | 1.112 | 0.992 | 0.379 |
| 23 | 1.151 | 1.379 | 0.469 | 1.253 | 1.127 | 0.460 |
| 24 | 0.913 | 1.275 | 0.444 | 1.145 | 0.932 | 0.327 |
| 25 | 1.361 | 1.697 | 0.544 | 1.232 | 1.347 | 0.416 |
| 26 | 1.348 | 1.436 | 0.489 | 1.269 | 1.458 | 0.372 |
| 27 | 1.373 | 1.742 | 0.692 | 1.497 | 1.498 | 0.437 |
| 28 | 1.299 | 1.498 | 3.091 | 1.389 | 1.362 | 0.380 |
| 29 | 1.369 | 1.698 | 0.603 | 1.280 | 1.123 | 0.412 |
| 30 | 1.865 | 1.689 | 0.621 | 1.410 | 0.950 | 0.488 |
| 31 | 1.943 | 1.638 | 0.598 | 1.543 | 1.169 | 0.324 |
| 32 | 1.895 | 1.843 | 0.796 | 1.701 | 1.423 | 0.364 |
| 33 | 1.476 | 1.639 | 0.531 | 1.240 | 1.108 | 0.422 |
| 34 | 1.527 | 1.519 | 0.551 | 1.251 | 1.007 | 0.326 |
| 35 | 0.817 | 1.041 | 0.343 | 1.066 | 0.932 | 0.343 |

Continuación tabla XIX.

| | | | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 36 | 1.218 | 1.308 | 0.569 | 1.112 | 1.146 | 0.341 |
| 37 | 1.225 | 1.335 | 0.499 | 0.964 | 0.932 | 0.391 |
| 38 | 1.481 | 1.553 | 0.494 | 1.238 | 1.054 | 0.318 |
| 39 | 2.062 | 1.793 | 0.567 | 1.199 | 1.055 | 0.415 |
| 40 | 1.685 | 1.471 | 0.434 | 1.052 | 1.062 | 0.586 |
| 41 | 1.380 | 1.369 | 0.927 | 1.158 | 1.301 | 0.412 |
| 42 | 0.973 | 1.124 | 0.532 | 1.279 | 1.119 | 0.454 |
| 43 | 1.035 | 1.246 | 0.439 | 1.210 | 1.011 | 0.380 |
| 44 | 1.289 | 1.365 | 0.930 | 1.086 | 1.078 | 1.016 |
| 45 | 1.346 | 1.310 | 0.498 | 1.199 | 0.926 | 0.401 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Valores de vibración bomba alimentación agua 2**

| Semana | Chumacera L acople | | | Chumacera L libre | | |
|--------|--------------------|----------|-------|-------------------|----------|-------|
| | Horizontal | Vertical | Axial | Horizontal | Vertical | Axial |
| 1 | 1.395 | 0.941 | 0.564 | 2.913 | 3.147 | 1.097 |
| 2 | 1.879 | 0.972 | 0.584 | 3.551 | 2.668 | 0.800 |
| 3 | 2.442 | 1.402 | 0.705 | 4.183 | 2.748 | 0.893 |
| 4 | 1.671 | 1.633 | 0.533 | 3.508 | 2.820 | 0.721 |
| 5 | 1.680 | 1.239 | 0.512 | 2.637 | 2.217 | 0.563 |
| 6 | 2.284 | 2.179 | 0.67 | 3.281 | 2.526 | 0.703 |
| 7 | 1.911 | 2.037 | 0.773 | 3.439 | 2.609 | 0.742 |
| 8 | 1.707 | 1.899 | 0.798 | 3.425 | 2.485 | 0.869 |
| 9 | 1.426 | 1.390 | 0.571 | 1.858 | 2.132 | 0.361 |
| 10 | 1.699 | 1.383 | 0.684 | 1.948 | 1.626 | 0.349 |
| 11 | 1.149 | 1.318 | 0.514 | 1.837 | 1.783 | 0.301 |
| 12 | 1.153 | 1.122 | 0.433 | 1.754 | 1.775 | 0.329 |
| 13 | 5.391 | 5.404 | 1.250 | 4.031 | 2.734 | 1.380 |
| 14 | 3.563 | 2.926 | 1.277 | 1.896 | 2.028 | 0.586 |
| 15 | 6.653 | 6.934 | 2.216 | 5.237 | 4.059 | 0.979 |
| 16 | 5.324 | 4.997 | 1.446 | 3.158 | 2.297 | 0.760 |
| 17 | 3.343 | 3.95 | 1.693 | 2.423 | 1.369 | 1.153 |
| 18 | 2.798 | 2.426 | 1.119 | 2.289 | 1.705 | 0.497 |

Continuación tabla XX.

| | | | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 19 | 4.489 | 2.931 | 1.553 | 2.541 | 1.739 | 0.557 |
| 20 | 4.49 | 3.261 | 0.821 | 3.064 | 2.004 | 0.520 |
| 21 | 4.372 | 3.371 | 0.959 | 3.025 | 2.075 | 0.517 |
| 22 | 4.194 | 2.662 | 0.803 | 2.896 | 2.238 | 0.472 |
| 23 | 3.503 | 2.694 | 0.718 | 1.833 | 1.854 | 0.561 |
| 24 | 3.452 | 2.958 | 1.300 | 2.080 | 2.165 | 0.500 |
| 25 | 3.754 | 2.761 | 0.769 | 2.531 | 2.186 | 0.518 |
| 26 | 3.784 | 3.593 | 0.846 | 2.176 | 2.256 | 0.466 |
| 27 | 3.827 | 3.416 | 0.933 | 2.426 | 2.048 | 0.564 |
| 28 | 3.550 | 3.050 | 0.758 | 2.120 | 1.945 | 0.490 |
| 29 | 4.849 | 4.100 | 1.205 | 2.725 | 3.393 | 0.920 |
| 30 | 4.366 | 3.854 | 1.593 | 3.208 | 2.608 | 0.738 |
| 31 | 5.000 | 4.002 | 0.721 | 3.782 | 2.958 | 0.739 |
| 32 | 4.460 | 3.562 | 0.960 | 2.513 | 2.703 | 1.131 |
| 33 | 4.381 | 4.526 | 1.479 | 3.184 | 3.267 | 0.951 |
| 34 | 4.442 | 4.312 | 1.205 | 3.247 | 3.886 | 1.168 |
| 35 | 4.890 | 4.444 | 0.735 | 3.326 | 3.427 | 1.305 |
| 36 | 4.356 | 3.728 | 0.986 | 3.507 | 3.800 | 0.676 |
| 37 | 4.854 | 4.514 | 1.437 | 3.485 | 3.933 | 0.937 |
| 38 | 3.509 | 1.860 | 0.752 | 3.027 | 2.920 | 0.506 |
| 39 | 3.305 | 4.271 | 1.188 | 2.452 | 3.512 | 0.862 |
| 40 | 4.857 | 5.031 | 2.776 | 3.309 | 5.558 | 2.134 |
| 41 | 4.023 | 4.770 | 1.193 | 3.793 | 4.358 | 0.815 |
| 42 | 5.045 | 5.723 | 2.095 | 3.633 | 5.54 | 1.602 |
| 43 | 5.361 | 4.920 | 1.362 | 3.249 | 1.831 | 0.782 |
| 44 | 3.821 | 3.721 | 1.361 | 3.502 | 2.327 | 1.050 |
| 45 | 3.204 | 2.135 | 1.397 | 2.337 | 2.043 | 0.565 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. Valores de vibración bomba alimentación agua 3

| Semana | Chumacera L acople | | | Chumacera L libre | | |
|--------|--------------------|----------|-------|-------------------|----------|-------|
| | Horizontal | Vertical | Axial | Horizontal | Vertical | Axial |
| 1 | 1.045 | 1.449 | 0.420 | 1.823 | 1.397 | 0.355 |
| 2 | 1.340 | 1.018 | 0.458 | 1.441 | 1.134 | 0.529 |
| 3 | 1.098 | 1.453 | 0.435 | 1.722 | 1.431 | 0.415 |
| 4 | 1.114 | 1.090 | 0.459 | 1.874 | 1.121 | 0.385 |
| 5 | 0.961 | 1.117 | 0.472 | 1.910 | 1.280 | 0.434 |
| 6 | 1.062 | 1.239 | 1.211 | 1.379 | 0.942 | 0.968 |
| 7 | 0.958 | 1.059 | 0.425 | 1.699 | 1.081 | 0.435 |
| 8 | 0.83 | 1.020 | 0.406 | 1.461 | 1.455 | 0.428 |
| 9 | 0.828 | 1.217 | 0.340 | 1.372 | 1.062 | 0.448 |
| 10 | 0.905 | 1.312 | 0.483 | 1.801 | 1.183 | 0.382 |
| 11 | 0.799 | 1.135 | 0.408 | 1.614 | 1.549 | 0.427 |
| 12 | 0.652 | 1.109 | 0.449 | 1.633 | 1.206 | 0.394 |
| 13 | 0.834 | 1.235 | 0.376 | 1.692 | 1.405 | 0.383 |
| 14 | 0.794 | 1.165 | 0.455 | 1.279 | 1.040 | 0.342 |
| 15 | 0.723 | 1.097 | 0.443 | 1.362 | 0.986 | 0.409 |
| 16 | 0.747 | 1.182 | 0.413 | 1.374 | 1.400 | 0.403 |
| 17 | 0.837 | 1.140 | 0.326 | 1.664 | 1.349 | 0.405 |
| 18 | 0.849 | 1.049 | 0.453 | 1.643 | 1.123 | 0.360 |
| 19 | 0.815 | 0.996 | 0.412 | 1.691 | 1.195 | 0.393 |
| 20 | 0.998 | 1.132 | 0.415 | 1.593 | 1.325 | 0.450 |
| 21 | 1.035 | 1.275 | 0.472 | 1.837 | 1.248 | 0.475 |
| 22 | 0.846 | 1.338 | 0.616 | 1.734 | 1.542 | 0.553 |
| 23 | 2.486 | 1.378 | 0.830 | 2.712 | 1.210 | 0.741 |
| 24 | 1.322 | 3.516 | 2.252 | 1.800 | 1.943 | 0.855 |
| 25 | 1.126 | 3.545 | 1.537 | 1.909 | 3.053 | 0.994 |
| 26 | 2.134 | 4.227 | 1.587 | 1.958 | 2.769 | 0.833 |
| 27 | 1.897 | 4.944 | 1.075 | 1.810 | 1.979 | 0.721 |
| 28 | 1.721 | 4.223 | 1.731 | 1.855 | 2.273 | 0.730 |
| 29 | 2.008 | 4.932 | 2.353 | 2.191 | 2.658 | 0.899 |
| 30 | 2.218 | 1.424 | 2.888 | 2.124 | 2.147 | 0.925 |
| 31 | 1.605 | 2.751 | 0.953 | 1.611 | 1.755 | 0.888 |
| 32 | 1.419 | 2.696 | 1.155 | 1.690 | 1.627 | 0.572 |
| 33 | 1.534 | 2.752 | 1.410 | 1.798 | 1.65 | 0.645 |
| 34 | 1.414 | 2.719 | 1.047 | 1.685 | 1.716 | 0.724 |
| 35 | 1.446 | 3.939 | 1.592 | 1.822 | 1.647 | 0.552 |

Continuación tabla XXI.

| | | | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 36 | 1.470 | 1.952 | 0.933 | 1.775 | 1.653 | 0.694 |
| 37 | 1.309 | 3.367 | 1.560 | 1.644 | 0.709 | 0.781 |
| 38 | 1.478 | 3.661 | 1.623 | 1.675 | 2.233 | 0.704 |
| 39 | 1.310 | 2.752 | 1.096 | 1.555 | 1.860 | 1.178 |
| 40 | 1.995 | 2.618 | 1.121 | 1.893 | 2.072 | 0.795 |
| 41 | 2.051 | 2.377 | 1.007 | 2.426 | 2.057 | 0.749 |
| 42 | 2.396 | 2.062 | 1.542 | 1.829 | 2.349 | 0.668 |
| 43 | 1.597 | 2.312 | 1.085 | 2.255 | 2.418 | 0.718 |
| 44 | 1.583 | 2.685 | 0.991 | 1.811 | 2.154 | 0.717 |
| 45 | 1.377 | 2.585 | 0.738 | 1.758 | 1.840 | 0.482 |

Fuente: elaboración propia.

Como puede observarse, para cada equipo y en cada punto donde se realizó el muestreo, se tomaron mediciones en los tres ejes cartesianos, por lo que se cuenta con una base de datos extremadamente amplia. El siguiente paso consiste en encontrar una forma de mantener la consistencia de los datos y representarlos de manera más simplificada sin afectar la correlación entre los mismos.

Dado que las vibraciones se comportan como una magnitud vectorial, sus componentes (ejes triaxiales), pueden integrarse en una magnitud representativa, utilizando operaciones matemáticas como la raíz media cuadrática.

Este procedimiento permite reducir el número de datos para que la información sea manejable de forma más simplificada. Para este caso en particular, el resultado de la raíz media cuadrática se somete a un análisis estadístico que permite poder comprender de manera sencilla las predicciones que se pretenden realizar en la presente investigación.

Los valores que se obtienen posterior a la aplicación de la raíz media cuadrática pueden ser sometidos a un análisis predictivo, a través de la utilización de herramientas estadísticas, como: métodos de regresión. Estas técnicas, permiten utilizar datos del pasado para generar ecuaciones que pueden determinar un dato futuro de un sistema dependiente con certeza.

Para este caso en particular, la cantidad de datos recopilados a lo largo de un año operativo reduce la incerteza de las proyecciones, puesto que mientras más datos del pasado se analizan, mayor será la confiabilidad de los cálculos y por consiguiente, de las predicciones realizadas.

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Para la presentación de resultados, los datos de vibraciones se mostrarán considerando la RMS, siglas en inglés que se refiere a la raíz media cuadrática, la cual es considerada en el campo de las vibraciones como la vibración efectiva de un equipo. Esto no cambia las dimensionales de los valores de vibración, los cuales se miden en mm/s (milímetros por segundo)

3.1. Cálculo de la raíz media cuadrática

Para el cálculo de vibraciones en RMS se utilizará la siguiente ecuación:

$$RMS = \sqrt{\frac{X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_n^2}{n}} [1]$$

Donde:

- RMS: raíz media cuadrática.
- X: valor de la componente analizada.
- n: número de componentes analizadas.

Este valor de vibraciones es un valor muy representativo debido a que es la magnitud que puede ser comparada con los valores de la norma ISO 10816-3, la cual define los parámetros permisibles de vibración en los equipos rotativos en general.

La utilización del valor de vibraciones en RMS simplifica el manejo de la información recopilada, ya que unifica los valores de los tres ejes cartesianos (axial, vertical, horizontal) proporcionando un valor global de vibraciones.

De la ecuación 1, se obtuvieron los siguientes valores globales de vibración:

Tabla XXII. **Valores globales de vibración ventilador inducido 1**

| Semana | Vibración global RMS | |
|--------|----------------------|-------------------|
| | Chumacera L acople | Chumacera L libre |
| 1 | 1.641 | 1.395 |
| 2 | 1.718 | 1.405 |
| 3 | 1.820 | 1.573 |
| 4 | 1.601 | 1.271 |
| 5 | 1.639 | 1.291 |
| 6 | 1.978 | 1.567 |
| 7 | 1.762 | 1.478 |
| 8 | 0.722 | 0.643 |
| 9 | 0.682 | 0.669 |
| 10 | 0.710 | 0.724 |
| 11 | 0.691 | 0.653 |
| 12 | 0.682 | 0.669 |
| 13 | 0.877 | 0.826 |
| 14 | 0.691 | 0.624 |
| 15 | 0.839 | 0.784 |
| 16 | 0.747 | 0.742 |
| 17 | 1.383 | 1.610 |
| 18 | 0.915 | 0.917 |
| 19 | 0.692 | 0.695 |
| 20 | 0.746 | 0.736 |
| 21 | 1.336 | 0.939 |
| 22 | 1.138 | 1.033 |
| 23 | 1.470 | 1.584 |
| 24 | 1.151 | 1.128 |
| 25 | 1.240 | 1.075 |
| 26 | 2.016 | 2.007 |
| 27 | 1.149 | 1.008 |

Continuación tabla XXII.

| | | |
|----|-------|-------|
| 28 | 1.186 | 1.026 |
| 29 | 1.384 | 1.394 |
| 30 | 1.202 | 1.371 |
| 31 | 1.462 | 1.598 |
| 32 | 1.852 | 1.525 |
| 33 | 1.258 | 1.159 |
| 34 | 1.337 | 1.047 |
| 35 | 1.489 | 1.324 |
| 36 | 1.519 | 1.384 |
| 37 | 1.393 | 1.218 |
| 38 | 1.836 | 1.346 |
| 39 | 1.639 | 1.783 |
| 40 | 2.245 | 1.501 |
| 41 | 2.396 | 1.857 |
| 42 | 1.291 | 1.110 |
| 43 | 1.553 | 1.459 |
| 44 | 1.699 | 1.341 |
| 45 | 0.959 | 1.009 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Valores globales de vibración ventilador inducido 2**

| Semana | Vibración global RMS | |
|--------|----------------------|-------------------|
| | Chumacera L acople | Chumacera L libre |
| 1 | 1.282 | 1.184 |
| 2 | 1.937 | 1.469 |
| 3 | 1.127 | 0.967 |
| 4 | 1.233 | 1.116 |
| 5 | 0.969 | 0.815 |
| 6 | 1.220 | 1.107 |
| 7 | 1.256 | 1.262 |
| 8 | 0.872 | 0.877 |
| 9 | 1.217 | 1.176 |
| 10 | 0.839 | 0.779 |
| 11 | 0.872 | 0.830 |

Continuación tabla XXIII.

| | | |
|----|-------|-------|
| 12 | 1.123 | 1.022 |
| 13 | 0.581 | 0.566 |
| 14 | 0.954 | 0.892 |
| 15 | 0.763 | 0.775 |
| 16 | 0.801 | 0.689 |
| 17 | 2.505 | 1.633 |
| 18 | 2.248 | 1.881 |
| 19 | 1.812 | 1.768 |
| 20 | 1.928 | 1.877 |
| 21 | 1.196 | 1.077 |
| 22 | 2.679 | 1.937 |
| 23 | 2.677 | 2.174 |
| 24 | 2.270 | 1.558 |
| 25 | 2.194 | 1.528 |
| 26 | 2.080 | 1.477 |
| 27 | 2.314 | 1.749 |
| 28 | 2.183 | 1.447 |
| 29 | 1.979 | 1.351 |
| 30 | 2.573 | 1.879 |
| 31 | 2.167 | 1.815 |
| 32 | 2.250 | 1.593 |
| 33 | 2.506 | 1.799 |
| 34 | 3.062 | 2.315 |
| 35 | 2.282 | 1.525 |
| 36 | 2.456 | 1.641 |
| 37 | 2.792 | 2.015 |
| 38 | 2.825 | 2.328 |
| 39 | 2.744 | 1.986 |
| 40 | 2.818 | 2.310 |
| 41 | 2.015 | 1.602 |
| 42 | 2.634 | 2.204 |
| 43 | 2.234 | 1.602 |
| 44 | 2.424 | 1.990 |
| 45 | 2.282 | 1.616 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Valores globales de vibración ventilador primario 1**

| Semana | Vibración global RMS | |
|---------------|-----------------------------|--------------------------|
| | Chumacera L acople | Chumacera L libre |
| 1 | 0.609 | 0.574 |
| 2 | 0.700 | 0.361 |
| 3 | 0.928 | 0.532 |
| 4 | 1.032 | 0.364 |
| 5 | 0.898 | 0.348 |
| 6 | 0.900 | 0.416 |
| 7 | 1.244 | 0.417 |
| 8 | 1.484 | 0.458 |
| 9 | 0.864 | 0.573 |
| 10 | 1.141 | 0.273 |
| 11 | 0.802 | 0.426 |
| 12 | 1.244 | 0.424 |
| 13 | 1.170 | 0.456 |
| 14 | 1.048 | 0.507 |
| 15 | 0.884 | 0.429 |
| 16 | 0.803 | 0.450 |
| 17 | 0.795 | 0.368 |
| 18 | 2.349 | 0.362 |
| 19 | 1.378 | 0.394 |
| 20 | 1.163 | 0.361 |
| 21 | 1.177 | 0.423 |
| 22 | 1.338 | 0.519 |
| 23 | 2.019 | 0.365 |
| 24 | 2.712 | 0.432 |
| 25 | 2.005 | 0.706 |
| 26 | 1.182 | 0.483 |
| 27 | 1.054 | 0.454 |
| 28 | 0.977 | 0.423 |
| 29 | 1.159 | 0.352 |
| 30 | 0.995 | 0.428 |
| 31 | 1.495 | 0.384 |
| 32 | 0.888 | 0.379 |
| 33 | 1.516 | 0.397 |
| 34 | 1.054 | 0.400 |
| 35 | 1.226 | 0.451 |

Continuación tabla XXIV.

| | | |
|----|-------|-------|
| 36 | 1.177 | 0.634 |
| 37 | 1.053 | 0.377 |
| 38 | 1.154 | 0.366 |
| 39 | 1.264 | 0.332 |
| 40 | 1.581 | 0.443 |
| 41 | 1.006 | 0.430 |
| 42 | 1.043 | 0.341 |
| 43 | 1.159 | 0.387 |
| 44 | 0.871 | 0.864 |
| 45 | 1.646 | 0.351 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Valores globales de vibración ventilador primario 2**

| Semana | Vibración global RMS | |
|--------|----------------------|-------------------|
| | Chumacera L acople | Chumacera L libre |
| 1 | 0.715 | 0.691 |
| 2 | 0.372 | 0.370 |
| 3 | 0.857 | 0.789 |
| 4 | 0.680 | 0.657 |
| 5 | 0.413 | 0.357 |
| 6 | 0.727 | 0.685 |
| 7 | 0.754 | 0.690 |
| 8 | 0.500 | 0.468 |
| 9 | 0.587 | 0.528 |
| 10 | 0.574 | 0.549 |
| 11 | 0.446 | 0.445 |
| 12 | 0.666 | 0.617 |
| 13 | 0.502 | 0.458 |
| 14 | 0.585 | 0.545 |
| 15 | 0.708 | 0.617 |
| 16 | 0.904 | 0.805 |
| 17 | 0.813 | 0.811 |
| 18 | 0.595 | 0.495 |

Continuación tabla XXV.

| | | |
|----|-------|-------|
| 19 | 0.878 | 0.745 |
| 20 | 0.799 | 0.702 |
| 21 | 0.758 | 0.723 |
| 22 | 0.528 | 0.484 |
| 23 | 0.510 | 0.454 |
| 24 | 0.533 | 0.501 |
| 25 | 0.709 | 0.654 |
| 26 | 0.702 | 0.637 |
| 27 | 0.575 | 0.471 |
| 28 | 0.642 | 0.580 |
| 29 | 0.937 | 0.851 |
| 30 | 0.774 | 0.548 |
| 31 | 0.658 | 0.641 |
| 32 | 0.628 | 0.558 |
| 33 | 0.784 | 0.750 |
| 34 | 0.758 | 0.596 |
| 35 | 0.910 | 0.862 |
| 36 | 0.653 | 0.587 |
| 37 | 0.825 | 0.781 |
| 38 | 0.892 | 0.811 |
| 39 | 0.695 | 0.673 |
| 40 | 0.610 | 0.602 |
| 41 | 0.547 | 0.459 |
| 42 | 0.539 | 0.514 |
| 43 | 0.541 | 0.504 |
| 44 | 0.537 | 0.445 |
| 45 | 0.496 | 0.497 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. Valores globales de vibración ventilador forzado secundario 1

| Semana | Vibración global RMS | |
|--------|----------------------|-------------------|
| | Chumacera L Acople | Chumacera L Libre |
| 1 | 1.646 | 1.601 |
| 2 | 1.447 | 1.200 |
| 3 | 1.574 | 1.406 |
| 4 | 0.844 | 0.765 |
| 5 | 0.532 | 0.558 |
| 6 | 0.556 | 0.630 |
| 7 | 0.617 | 0.623 |
| 8 | 0.435 | 0.450 |
| 9 | 0.560 | 0.555 |
| 10 | 0.380 | 0.392 |
| 11 | 0.548 | 0.569 |
| 12 | 0.566 | 0.555 |
| 13 | 0.525 | 0.536 |
| 14 | 0.345 | 0.319 |
| 15 | 0.400 | 0.397 |
| 16 | 0.555 | 0.553 |
| 17 | 2.185 | 1.866 |
| 18 | 0.835 | 0.719 |
| 19 | 0.841 | 0.752 |
| 20 | 0.809 | 0.696 |
| 21 | 1.557 | 1.151 |
| 22 | 1.319 | 1.000 |
| 23 | 1.030 | 0.965 |
| 24 | 1.423 | 1.031 |
| 25 | 1.646 | 1.194 |
| 26 | 1.651 | 1.344 |
| 27 | 1.744 | 1.121 |
| 28 | 1.769 | 1.309 |
| 29 | 1.609 | 1.278 |
| 30 | 2.050 | 1.681 |
| 31 | 1.958 | 1.515 |
| 32 | 1.720 | 1.316 |
| 33 | 2.112 | 1.263 |
| 34 | 1.946 | 1.460 |

Continuación tabla XXVI.

| | | |
|----|-------|-------|
| 35 | 2.008 | 1.625 |
| 36 | 2.437 | 1.512 |
| 37 | 2.158 | 1.272 |
| 38 | 2.392 | 1.721 |
| 39 | 2.469 | 1.568 |
| 40 | 2.142 | 1.480 |
| 41 | 1.469 | 0.766 |
| 42 | 2.016 | 1.472 |
| 43 | 1.680 | 1.143 |
| 44 | 2.555 | 2.575 |
| 45 | 2.164 | 1.544 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Valores globales de vibración ventilador forzado secundario 2**

| Semana | Vibración global RMS | |
|---------------|-----------------------------|--------------------------|
| | Chumacera L Acople | Chumacera L Libre |
| 1 | 2.719 | 2.493 |
| 2 | 2.015 | 1.791 |
| 3 | 2.056 | 1.965 |
| 4 | 2.293 | 2.013 |
| 5 | 0.591 | 0.578 |
| 6 | 0.523 | 0.535 |
| 7 | 0.662 | 0.633 |
| 8 | 0.528 | 0.532 |
| 9 | 0.561 | 0.520 |
| 10 | 0.437 | 0.475 |
| 11 | 0.460 | 0.448 |
| 12 | 0.626 | 0.506 |
| 13 | 0.555 | 0.489 |
| 14 | 1.324 | 1.273 |
| 15 | 0.653 | 0.651 |
| 16 | 0.598 | 0.586 |
| 17 | 0.610 | 0.613 |

Continuación tabla XXVII.

| | | |
|----|-------|-------|
| 18 | 1.178 | 1.234 |
| 19 | 1.051 | 1.037 |
| 20 | 1.109 | 1.096 |
| 21 | 1.230 | 1.186 |
| 22 | 0.944 | 0.934 |
| 23 | 1.226 | 1.147 |
| 24 | 1.151 | 1.133 |
| 25 | 1.017 | 0.949 |
| 26 | 1.244 | 1.208 |
| 27 | 1.181 | 1.131 |
| 28 | 1.265 | 1.253 |
| 29 | 1.323 | 1.300 |
| 30 | 1.168 | 1.198 |
| 31 | 0.998 | 0.926 |
| 32 | 1.503 | 1.348 |
| 33 | 1.597 | 1.481 |
| 34 | 1.372 | 1.287 |
| 35 | 1.561 | 1.512 |
| 36 | 1.276 | 1.224 |
| 37 | 1.333 | 1.287 |
| 38 | 1.624 | 1.485 |
| 39 | 1.339 | 1.378 |
| 40 | 1.436 | 1.290 |
| 41 | 1.027 | 0.963 |
| 42 | 1.532 | 1.449 |
| 43 | 1.438 | 1.179 |
| 44 | 1.296 | 1.307 |
| 45 | 1.748 | 1.599 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. Valores globales de vibración bomba alimentación de agua 1

| Semana | Vibración global RMS | |
|--------|----------------------|-------------------|
| | Chumacera L Acople | Chumacera L Libre |
| 1 | 0.878 | 1.007 |
| 2 | 0.852 | 0.883 |
| 3 | 0.994 | 0.939 |
| 4 | 0.743 | 0.741 |
| 5 | 0.748 | 0.863 |
| 6 | 0.751 | 0.920 |
| 7 | 0.914 | 1.377 |
| 8 | 0.646 | 0.809 |
| 9 | 0.765 | 0.946 |
| 10 | 0.743 | 0.937 |
| 11 | 0.852 | 1.161 |
| 12 | 0.780 | 1.170 |
| 13 | 0.823 | 0.863 |
| 14 | 0.980 | 1.047 |
| 15 | 1.020 | 1.086 |
| 16 | 1.020 | 1.076 |
| 17 | 0.851 | 0.904 |
| 18 | 1.049 | 1.102 |
| 19 | 1.100 | 1.042 |
| 20 | 1.057 | 1.030 |
| 21 | 1.252 | 1.269 |
| 22 | 1.147 | 1.113 |
| 23 | 1.072 | 1.109 |
| 24 | 0.941 | 1.022 |
| 25 | 1.295 | 1.251 |
| 26 | 1.172 | 1.142 |
| 27 | 1.341 | 1.385 |
| 28 | 2.120 | 2.139 |
| 29 | 1.307 | 1.276 |
| 30 | 1.496 | 1.320 |
| 31 | 1.507 | 1.344 |
| 32 | 1.594 | 1.519 |
| 33 | 1.310 | 1.226 |
| 34 | 1.284 | 1.180 |

Continuación tabla XXVIII.

| | | |
|----|-------|-------|
| 35 | 0.789 | 0.883 |
| 36 | 1.083 | 1.044 |
| 37 | 1.085 | 0.993 |
| 38 | 1.271 | 1.182 |
| 39 | 1.611 | 1.288 |
| 40 | 1.315 | 1.074 |
| 41 | 1.243 | 1.165 |
| 42 | 0.912 | 1.030 |
| 43 | 0.969 | 1.034 |
| 44 | 1.210 | 1.141 |
| 45 | 1.122 | 1.065 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Valores globales de vibración bomba alimentación de agua 2**

| Semana | Vibración global RMS | |
|---------------|-----------------------------|--------------------------|
| | Chumacera L Acople | Chumacera L Libre |
| 1 | 1.025 | 1.797 |
| 2 | 1.267 | 2.152 |
| 3 | 1.676 | 2.579 |
| 4 | 1.384 | 2.255 |
| 5 | 1.241 | 1.708 |
| 6 | 1.863 | 2.307 |
| 7 | 1.673 | 2.350 |
| 8 | 1.545 | 2.307 |
| 9 | 1.196 | 1.380 |
| 10 | 1.325 | 1.435 |
| 11 | 1.052 | 1.339 |
| 12 | 0.962 | 1.228 |
| 13 | 4.466 | 3.959 |
| 14 | 2.762 | 2.144 |
| 15 | 5.694 | 5.177 |
| 16 | 4.298 | 3.513 |
| 17 | 3.143 | 2.848 |

Continuación tabla XXIX.

| | | |
|----|-------|-------|
| 18 | 2.234 | 2.031 |
| 19 | 3.223 | 2.412 |
| 20 | 3.239 | 2.627 |
| 21 | 3.235 | 2.673 |
| 22 | 2.905 | 2.318 |
| 23 | 2.585 | 1.926 |
| 24 | 2.730 | 2.219 |
| 25 | 2.727 | 2.208 |
| 26 | 3.052 | 2.474 |
| 27 | 3.010 | 2.478 |
| 28 | 2.737 | 2.189 |
| 29 | 3.732 | 2.926 |
| 30 | 3.486 | 3.038 |
| 31 | 3.721 | 3.206 |
| 32 | 3.342 | 2.577 |
| 33 | 3.736 | 3.307 |
| 34 | 3.641 | 3.193 |
| 35 | 3.838 | 3.233 |
| 36 | 3.359 | 3.009 |
| 37 | 3.916 | 3.395 |
| 38 | 2.334 | 2.097 |
| 39 | 3.192 | 2.925 |
| 40 | 4.344 | 3.828 |
| 41 | 3.668 | 3.585 |
| 42 | 4.568 | 4.096 |
| 43 | 4.274 | 3.494 |
| 44 | 3.178 | 3.053 |
| 45 | 2.365 | 1.998 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. Valores globales de vibración bomba alimentación de agua 3

| Semana | Vibración global RMS | |
|--------|----------------------|-------------------|
| | Chumacera L Acople | Chumacera L Libre |
| 1 | 1.060 | 1.366 |
| 2 | 1.007 | 1.052 |
| 3 | 1.081 | 1.325 |
| 4 | 0.938 | 1.279 |
| 5 | 0.893 | 1.306 |
| 6 | 1.173 | 1.278 |
| 7 | 0.860 | 1.182 |
| 8 | 0.795 | 1.055 |
| 9 | 0.872 | 1.077 |
| 10 | 0.962 | 1.316 |
| 11 | 0.835 | 1.163 |
| 12 | 0.787 | 1.169 |
| 13 | 0.887 | 1.229 |
| 14 | 0.855 | 1.033 |
| 15 | 0.800 | 1.042 |
| 16 | 0.842 | 1.073 |
| 17 | 0.838 | 1.180 |
| 18 | 0.822 | 1.155 |
| 19 | 0.780 | 1.158 |
| 20 | 0.904 | 1.153 |
| 21 | 0.987 | 1.319 |
| 22 | 0.981 | 1.314 |
| 23 | 1.710 | 1.821 |
| 24 | 2.529 | 2.625 |
| 25 | 2.324 | 2.488 |
| 26 | 2.883 | 2.841 |
| 27 | 3.120 | 3.102 |
| 28 | 2.816 | 2.844 |
| 29 | 3.361 | 3.399 |
| 30 | 2.257 | 2.227 |
| 31 | 1.919 | 1.921 |
| 32 | 1.881 | 1.954 |
| 33 | 1.993 | 2.065 |
| 34 | 1.870 | 1.943 |

Continuación tabla XXX.

| | | |
|----|-------|-------|
| 35 | 2.591 | 2.669 |
| 36 | 1.510 | 1.616 |
| 37 | 2.272 | 2.343 |
| 38 | 2.465 | 2.506 |
| 39 | 1.870 | 1.932 |
| 40 | 2.008 | 1.974 |
| 41 | 1.904 | 2.045 |
| 42 | 2.031 | 1.823 |
| 43 | 1.739 | 1.967 |
| 44 | 1.888 | 1.955 |
| 45 | 1.744 | 1.854 |

Fuente: elaboración propia.

3.2. Análisis estadístico de datos de vibraciones

Para el análisis estadístico de los datos, se utilizó un diagrama Boxplot, puesto que es una herramienta práctica y su construcción es muy sencilla a la vez que su interpretación es bastante representativa.

A través de esta gráfica, se puede obtener de manera inmediata una representación del estado general de los puntos analizados, por lo que pueden tomarse decisiones en función de la variación de los puntos considerados como atípicos.

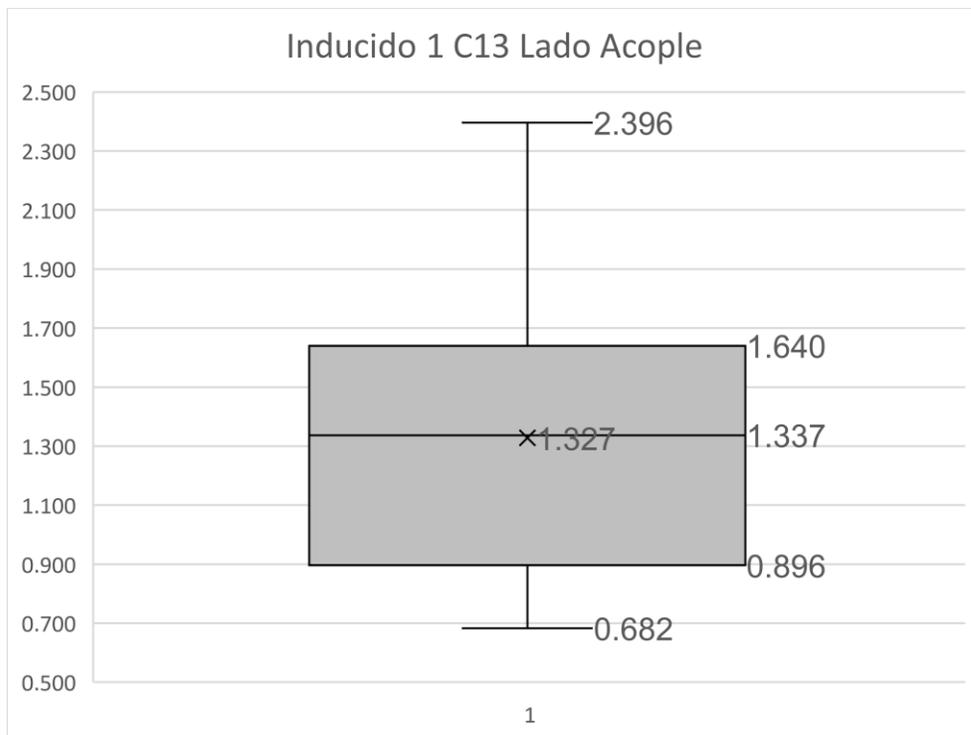
Se realizó el cálculo estadístico y se presenta para cada uno de los motores analizados la tabla de valores para los dos puntos analizados y su respectivo diagrama Boxplot.

Tabla XXXI. **Datos para análisis Boxplot inducido 1 C13**

| Lado acople | | Lado Llibre | |
|--------------|--------|--------------|--------|
| Mín. | 0.682 | Mín. | 0.624 |
| Q1 | 0.896 | Q1 | 0.872 |
| Q2 (mediana) | 1.337 | Q2 (Mediana) | 1.218 |
| Q3 | 1.640 | Q3 | 1.469 |
| Máx. | 2.396 | Máx. | 2.007 |
| | | | |
| RIQ | 0.744 | RIQ | 0.597 |
| Mín. | -0.219 | Mín. | -0.024 |
| Máx. | 2.755 | Máx. | 2.364 |

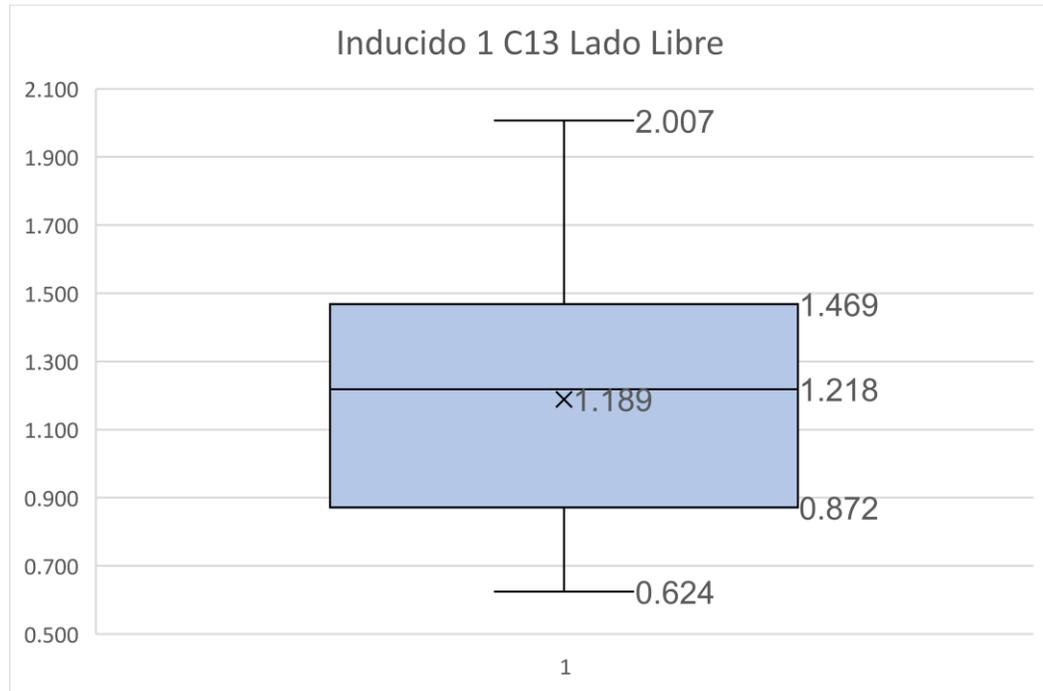
Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **Diagrama Boxplot inducido 1 C13 lado acople**



Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Diagrama Boxplot inducido 1 C13 lado libre**



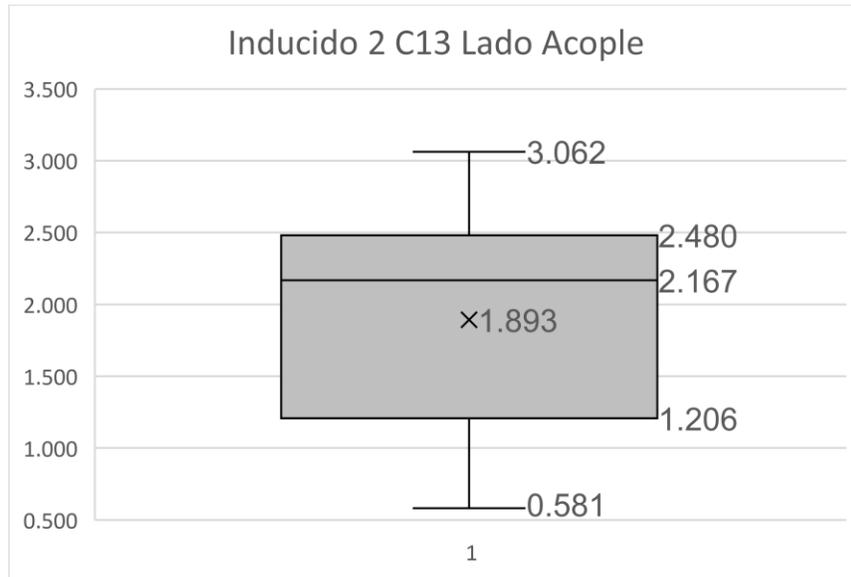
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. **Datos para análisis Boxplot inducido 2 C13**

| Lado acople | | Lado Libre | |
|--------------|--------|--------------|--------|
| Mín. | 0.581 | Mín | 0.566 |
| Q1 | 1.206 | Q1 | 1.092 |
| Q2 (Mediana) | 2.167 | Q2 (Mediana) | 1.558 |
| Q3 | 2.480 | Q3 | 1.878 |
| Máx. | 3.062 | Máx. | 2.328 |
| RIQ | 1.274 | RIQ | 0.786 |
| Mín. | -0.704 | Mín. | -0.087 |
| Máx. | 4.391 | Máx. | 3.057 |

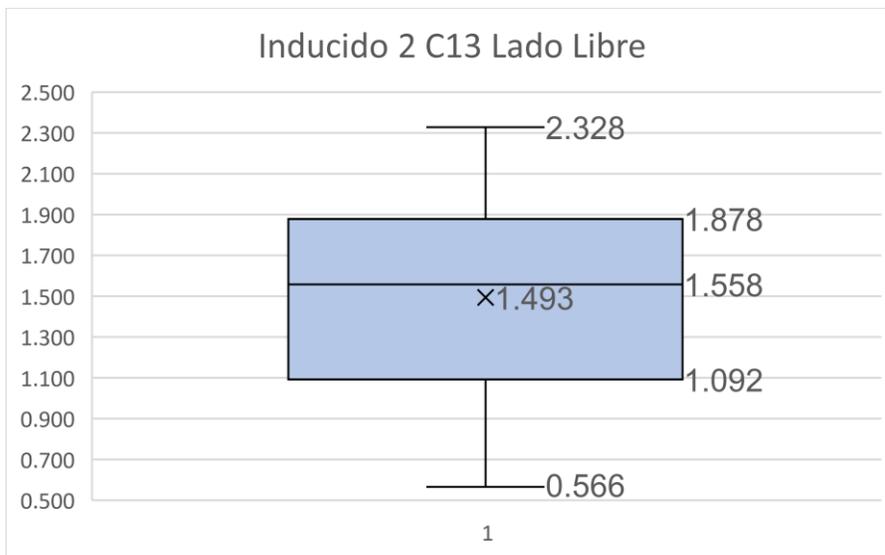
Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Diagrama Boxplot inducido 2 C13 lado acople**



Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Diagrama Boxplot inducido 2 C13 lado libre**



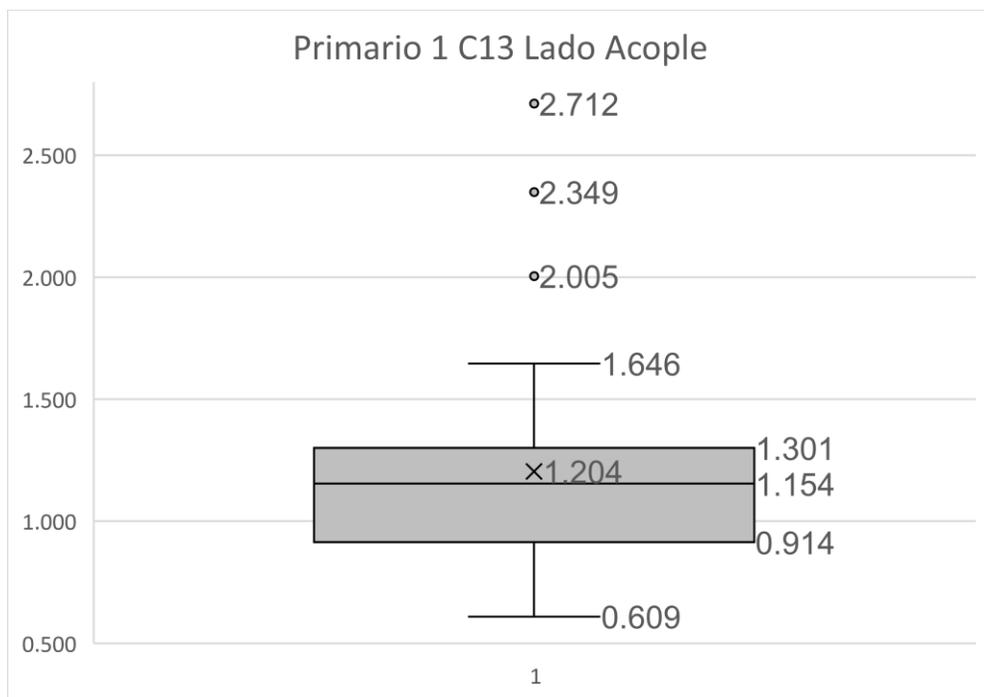
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Datos para análisis Boxplot primario 1 C13**

| Lado acople | | Lado Libre | |
|--------------|-------|--------------|-------|
| Mín. | 0.609 | Mín. | 0.273 |
| Q1 | 0.914 | Q1 | 0.366 |
| Q2 (Mediana) | 1.154 | Q2 (Mediana) | 0.423 |
| Q3 | 1.301 | Q3 | 0.455 |
| Máx. | 2.712 | Máx. | 0.864 |
| RIQ | 0.387 | RIQ | 0.090 |
| Mín. | 0.333 | Mín. | 0.231 |
| Máx. | 1.882 | Máx. | 0.590 |
| Atípicos | 3 | Atípicos | 3 |

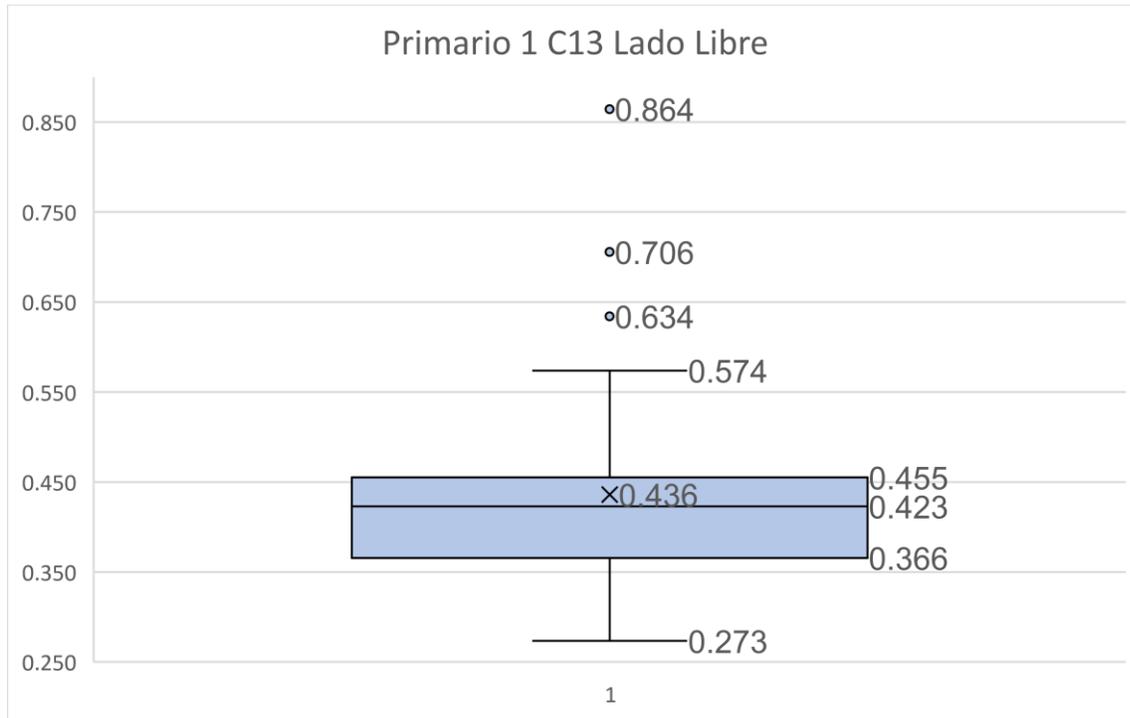
Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Diagrama Boxplot primario 1 C13 lado acople**



Fuente: elaboración propia

Figura 19. **Diagrama Boxplot primario 1 C13 lado libre**



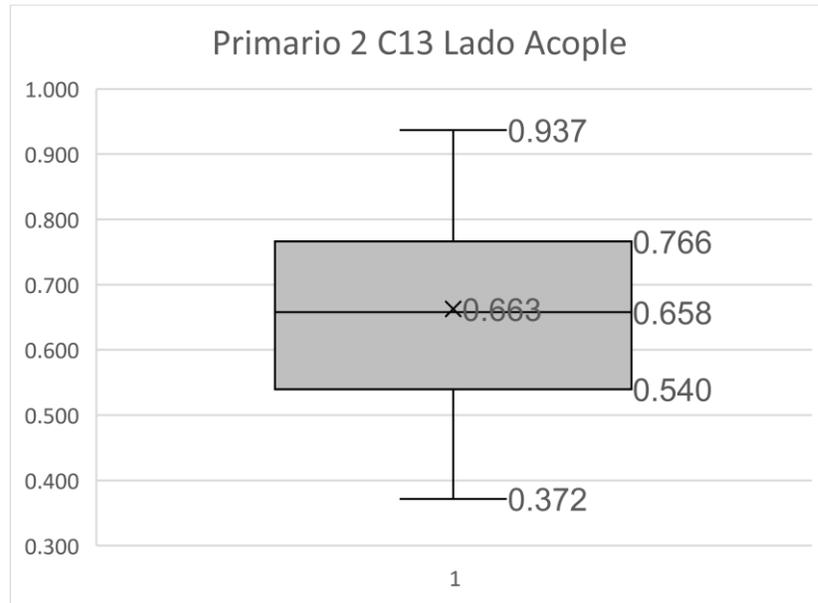
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. **Datos para análisis Boxplot primario 2 C13**

| Lado acople | | Lado Libre | |
|--------------|-------|--------------|-------|
| Mín. | 0.372 | Mín. | 0.357 |
| Q1 | 0.540 | Q1 | 0.496 |
| Q2 (Mediana) | 0.658 | Q2 (Mediana) | 0.596 |
| Q3 | 0.766 | Q3 | 0.697 |
| Máx. | 0.937 | Máx. | 0.862 |
| RIQ | 0.226 | RIQ | 0.201 |
| Mín. | 0.200 | Mín. | 0.195 |
| Máx. | 1.106 | Máx. | 0.997 |

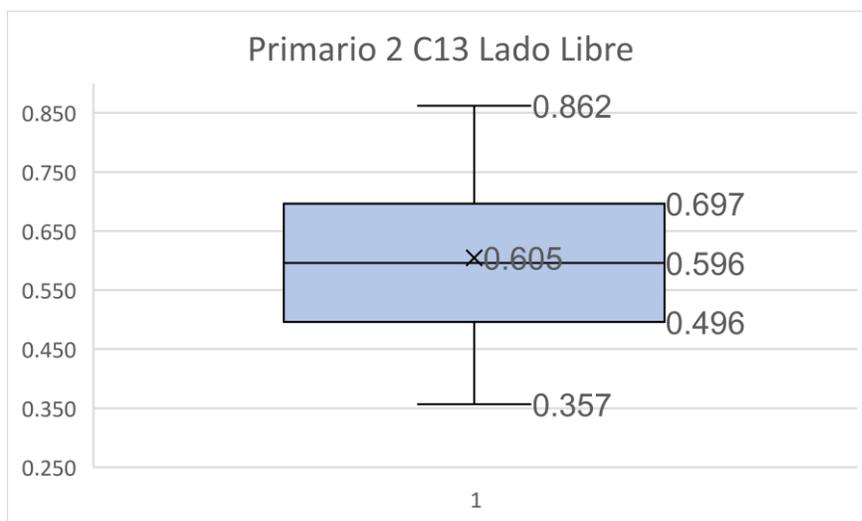
Fuente: elaboración propia

Figura 20. **Diagrama Boxplot primario 2 C13 lado acople**



Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Diagrama Boxplot primario 2 C13 lado libre**



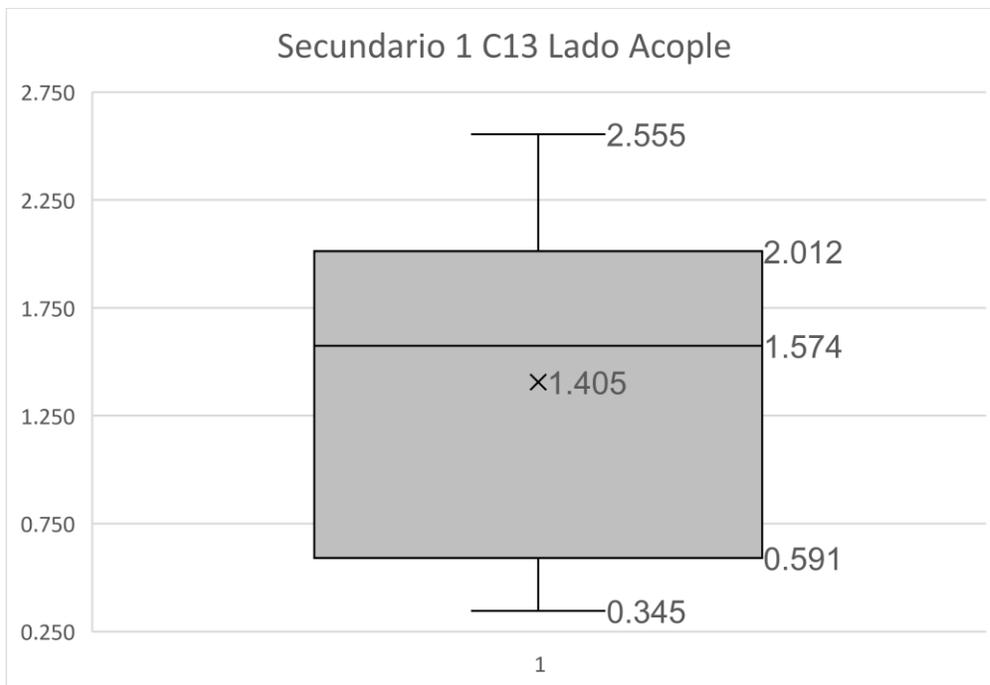
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. **Datos para análisis Boxplot secundario 1 C13**

| Lado acople | | Lado Libre | |
|--------------|--------|--------------|--------|
| Mín.. | 0.345 | Mín. | 0.319 |
| Q1 | 0.591 | Q1 | 0.626 |
| Q2 (Mediana) | 1.574 | Q2 (Mediana) | 1.151 |
| Q3 | 2.012 | Q3 | 1.476 |
| Máx. | 2.555 | Máx. | 2.575 |
| RIQ | 1.421 | RIQ | 0.850 |
| Mín. | -1.540 | Mín. | -0.649 |
| Máx. | 4.144 | Máx. | 2.752 |

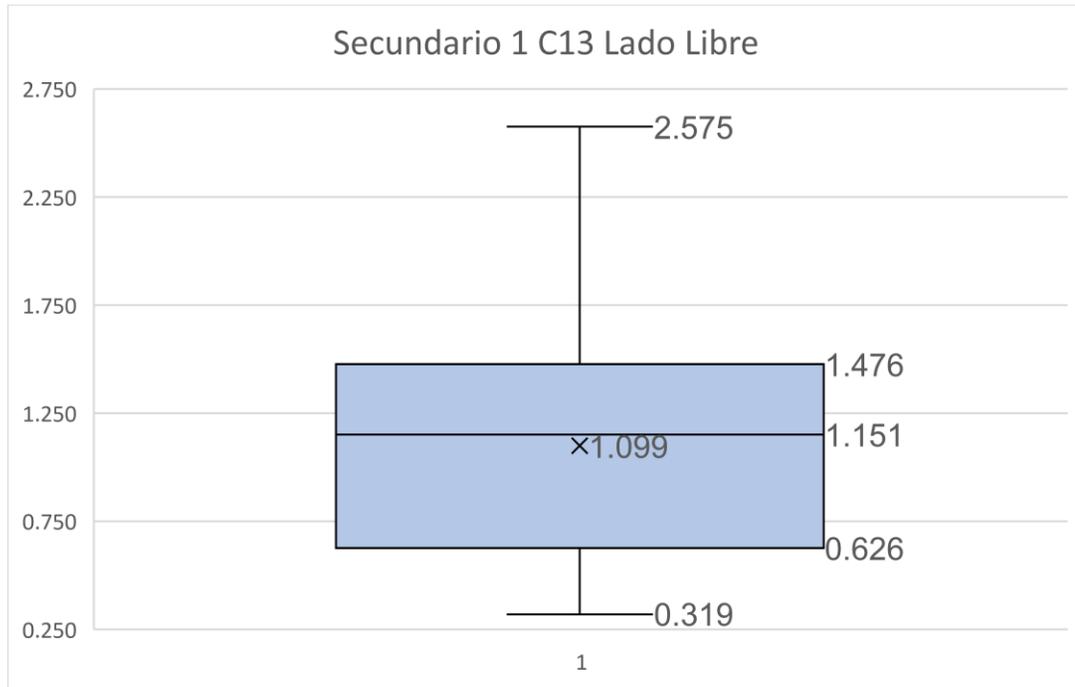
Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Diagrama Boxplot secundario 1 C13 lado acople**



Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Diagrama Boxplot secundario 1 C13 lado libre**



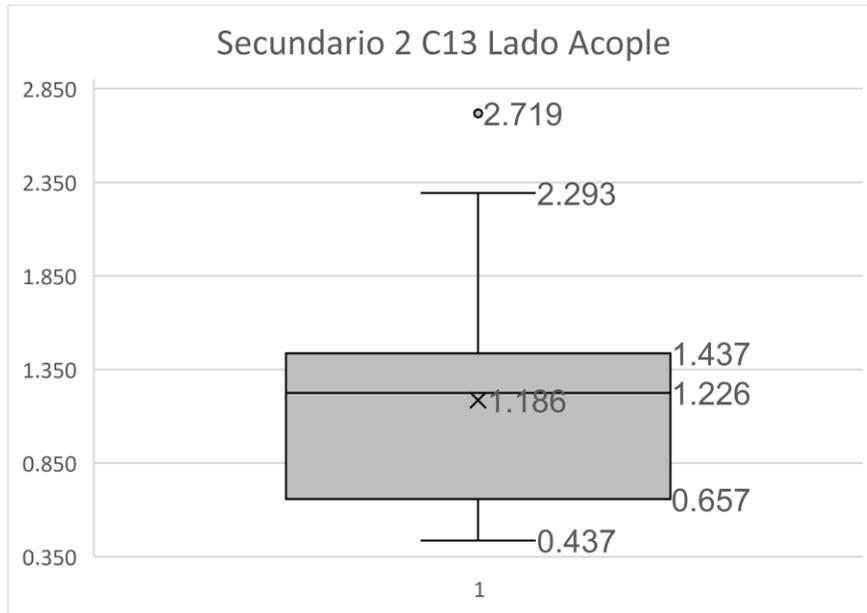
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. **Datos para análisis Boxplot secundario 2 C13**

| Lado acople | | Lado Libre | |
|--------------|--------|--------------|--------|
| Mín. | 0.437 | Mín. | 0.448 |
| Q1 | 0.657 | Q1 | 0.642 |
| Q2 (Mediana) | 1.226 | Q2 (Mediana) | 1.186 |
| Q3 | 1.437 | Q3 | 1.328 |
| Máx. | 2.719 | Máx. | 2.493 |
| RIQ | 0.779 | RIQ | 0.686 |
| Mín. | -0.511 | Mín. | -0.386 |
| Máx. | 2.605 | Máx. | 2.356 |
| Atípicos | 1 | Atípicos | 1 |

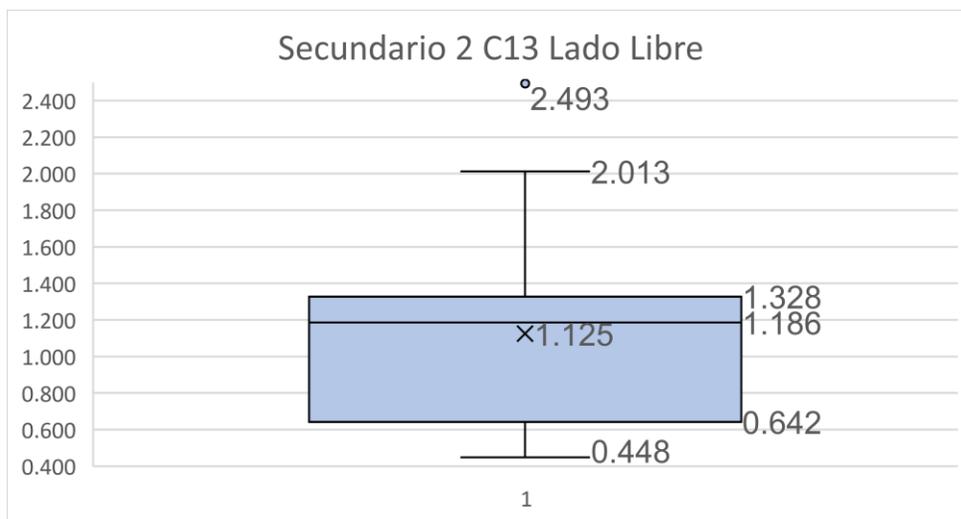
Fuente: elaboración propia.

Figura 24. Diagrama Boxplot secundario 2 C13 lado acople



Fuente: elaboración propia.

Figura 25. Diagrama Boxplot secundario 2 C13 lado libre



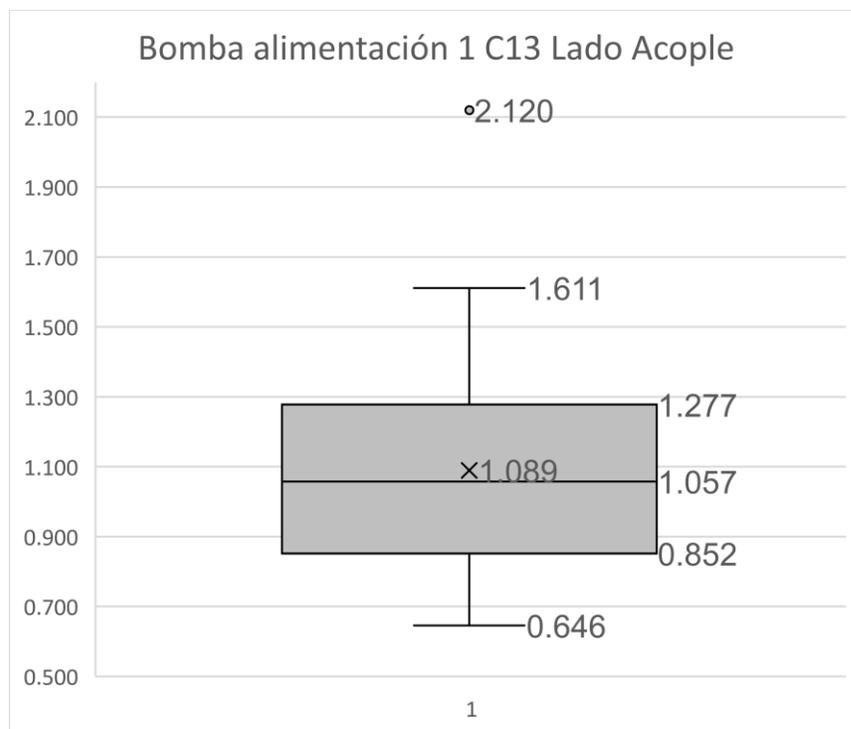
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVII. **Datos para análisis Boxplot bomba 1 C13**

| Lado acople | | Lado Libre | |
|--------------|-------|--------------|-------|
| Mín. | 0.646 | Mín | 0.741 |
| Q1 | 0.852 | Q1 | 0.970 |
| Q2 (Mediana) | 1.057 | Q2 (Mediana) | 1.076 |
| Q3 | 1.277 | Q3 | 1.204 |
| Máx. | 2.120 | Máx. | 2.139 |
| RIQ | 0.426 | RIQ | 0.234 |
| Mín. | 0.213 | Mín. | 0.619 |
| Máx. | 1.916 | Máx. | 1.554 |
| Atípicos | 1 | Atípicos | 1 |

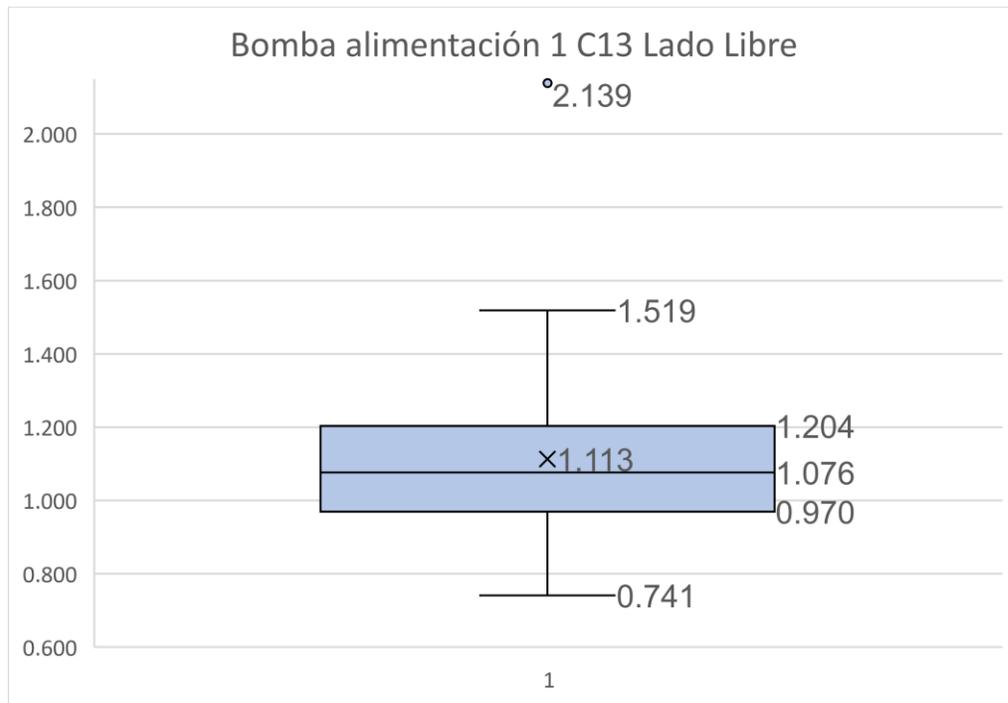
Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Diagrama Boxplot bomba alimentación 1 C13 lado acople**



Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Diagrama Boxplot bomba alimentación 1 C13 lado libre**



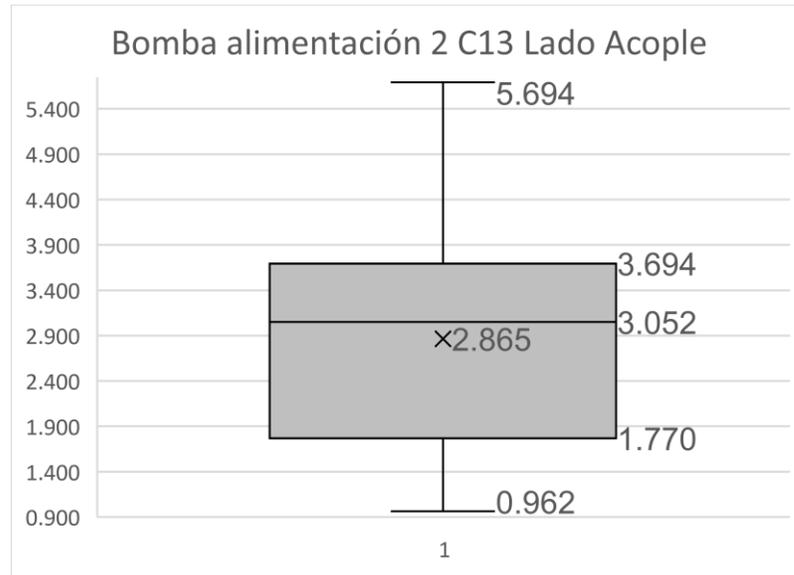
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Datos para análisis Boxplot bomba 2 C13**

| Lado acople | | Lado Libre | |
|--------------|--------|--------------|-------|
| Mín. | 0.962 | Mín. | 1.228 |
| Q1 | 1.770 | Q1 | 2.148 |
| Q2 (Mediana) | 3.052 | Q2 (Mediana) | 2.478 |
| Q3 | 3.694 | Q3 | 3.200 |
| Máx. | 5.694 | Máx. | 5.177 |
| RIQ | 1.925 | RIQ | 1.052 |
| Mín. | -1.118 | Mín. | 0.570 |
| Máx. | 6.582 | Máx. | 4.777 |
| | | Atípicos | 1 |

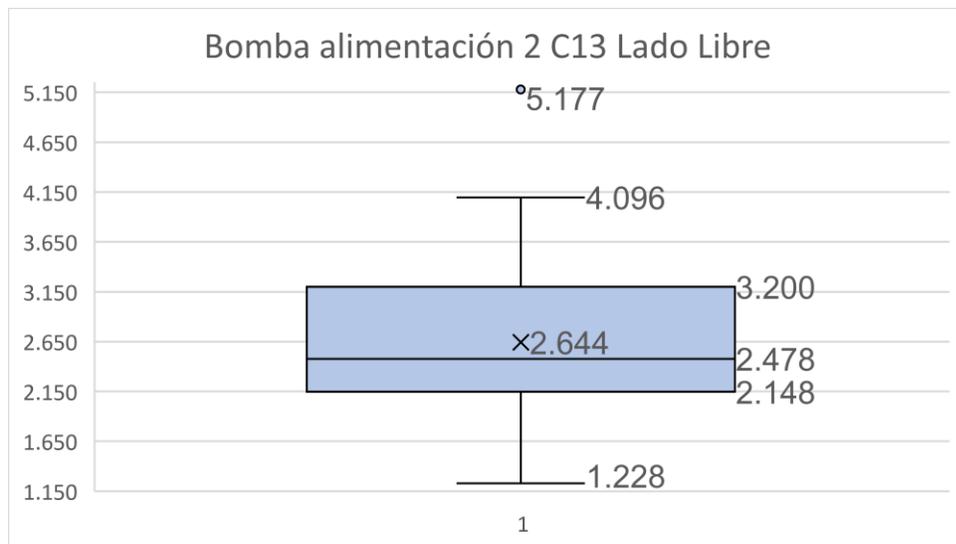
Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Diagrama Boxplot bomba alimentación 2 C13 lado acople**



Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Diagrama Boxplot bomba alimentación 2 C13 lado libre**



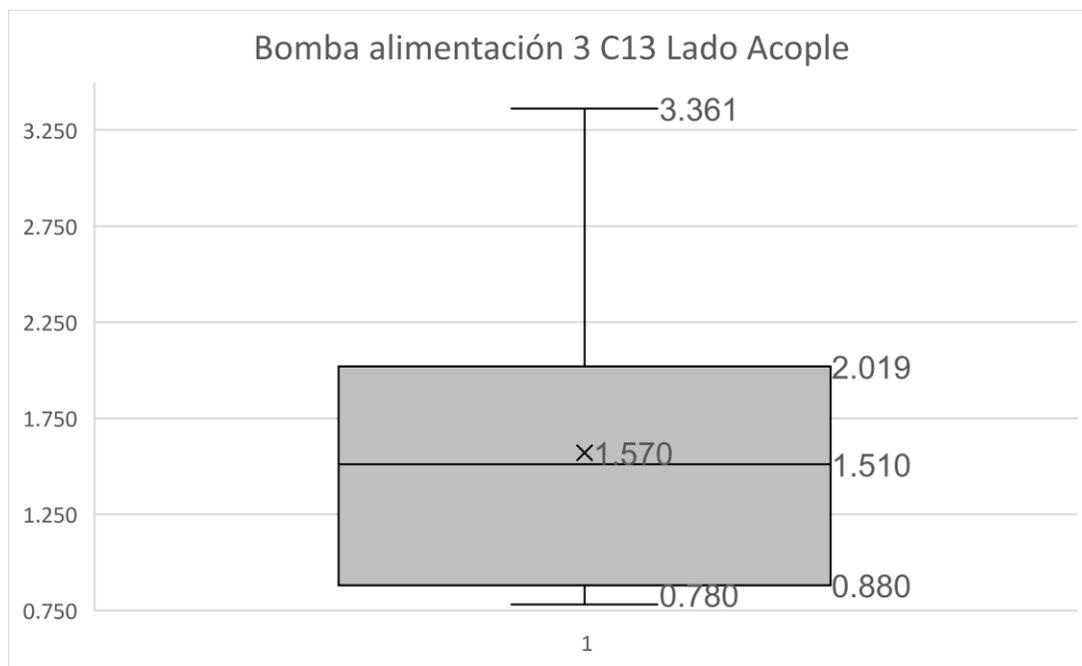
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIX. **Datos para análisis Boxplot bomba 3 C13**

| Lado acople | | Lado Libre | |
|--------------------|--------|-------------------|--------|
| Mín. | 0.780 | Mín. | 1.033 |
| Q1 | 0.880 | Q1 | 1.174 |
| Q2 (Mediana) | 1.510 | Q2 (Mediana) | 1.616 |
| Q3 | 2.019 | Q3 | 2.055 |
| Máx. | 3.361 | Máx. | 3.399 |
| RIQ | 1.139 | RIQ | 0.881 |
| Mín. | -0.829 | Mín. | -0.147 |
| Máx. | 3.728 | Máx. | 3.377 |
| | | Atípicos | 1 |

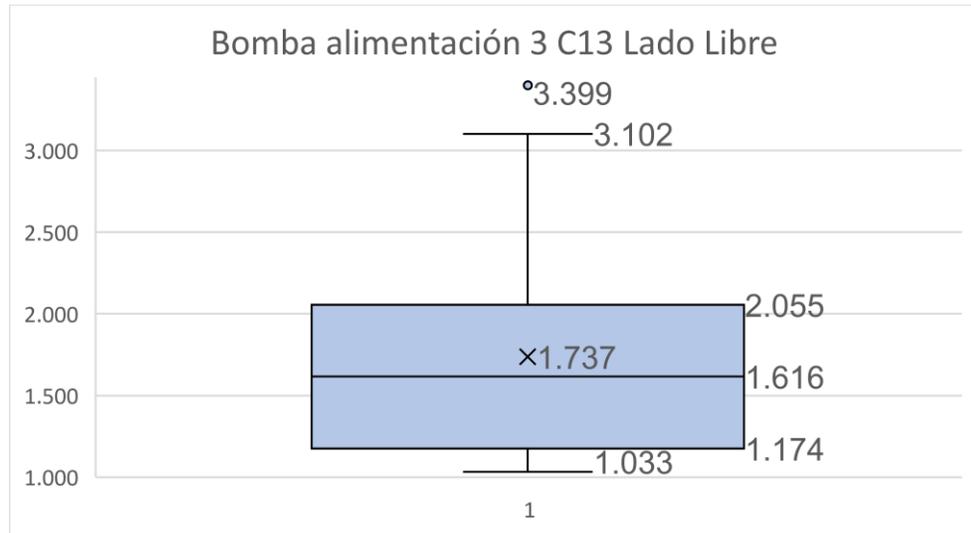
Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Diagrama Boxplot bomba alimentación 3 C13 lado acople**



Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Diagrama Boxplot bomba alimentación 3 C13 lado libre**



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con los resultados de los gráficos anteriores, se puede apreciar cierta estabilidad en los valores de vibraciones de los diferentes equipos. En algunos de ellos existen hasta 3 valores atípicos. Esto se debe a que en momentos puntuales del año operativo se tuvieron distintos eventos externos, que sometieron al bloque de generación y a sus equipos auxiliares a condiciones de operación extremas, por lo que dichos eventos pudieron afectar la medición realizada.

3.3. **Proyección predictiva de fallas**

Podemos considerar la toma de los datos del inciso 3.1. como la base para poder proyectar los niveles de vibración y así poder determinar el período de mantenimiento teórico para cada uno de los equipos considerados.

Para ello se utilizó un análisis de tendencia lineal con los datos obtenidos, se analizó para la semana 90, 135 y 180. Con el objetivo de determinar en qué momento corresponde el mantenimiento mayor de la unidad.

Tabla XL. **Ecuaciones y proyecciones predictivas**

| Equipo: | Punto: | Regresión lineal | S90 | S135 | S180 | Alarma |
|---------|--------|------------------------|--------------|--------------|--------------|--------|
| IDF1 | Acople | $y = 0.0096x + 1.107$ | 1.971 | 2.403 | 2.835 | 4.5 |
| | Libre | $y = 0.0085x + 0.9925$ | 1.758 | 2.140 | 2.523 | 4.5 |
| IDF2 | Acople | $y = 0.0417x + 0.9335$ | 4.687 | 6.563 | 8.440 | 4.5 |
| | Libre | $y = 0.0261x + 0.8933$ | 3.242 | 4.417 | 5.591 | 4.5 |
| FAF1 | Acople | $y = 0.0068x + 1.0477$ | 1.660 | 1.966 | 2.272 | 2.8 |
| | Libre | $y = 0.0003x + 0.4283$ | 0.455 | 0.469 | 0.482 | 2.8 |
| FAF 2 | Acople | $y = 0.001x + 0.6406$ | 0.731 | 0.776 | 0.821 | 2.8 |
| | Libre | $y = 0.0005x + 0.5936$ | 0.639 | 0.661 | 0.684 | 2.8 |
| SAF 1 | Acople | $y = 0.0399x + 0.4883$ | 4.079 | 5.875 | 7.670 | 2.8 |
| | Libre | $y = 0.0226x + 0.5792$ | 2.613 | 3.630 | 4.647 | 2.8 |
| SAF 2 | Acople | $y = 0.0072x + 1.0204$ | 1.668 | 1.992 | 2.316 | 2.8 |
| | Libre | $y = 0.007x + 0.9635$ | 1.594 | 1.909 | 2.224 | 2.8 |
| BFP 1 | Acople | $y = 0.0125x + 0.8006$ | 1.926 | 2.488 | 3.051 | 4.5 |
| | Libre | $y = 0.006x + 0.9746$ | 1.515 | 1.785 | 2.055 | 4.5 |
| BFP 2 | Acople | $y = 0.0542x + 1.6187$ | 6.497 | 8.936 | 11.375 | 4.5 |
| | Libre | $y = 0.0281x + 1.9969$ | 4.526 | 5.790 | 7.055 | 4.5 |
| BFP 3 | Acople | $y = 0.0375x + 0.7076$ | 4.083 | 5.770 | 7.458 | 4.5 |
| | Libre | $y = 0.0303x + 1.0395$ | 3.767 | 5.130 | 6.494 | 4.5 |

Fuente: elaboración propia

3.4. Análisis e interpretación de resultados

De acuerdo con los resultados obtenidos en la tabla XXXIX. Se puede establecer lo siguiente:

Para el período de mantenimiento 2020, será necesario realizar mantenimiento mayor a los siguientes equipos, ya que sobrepasan el límite permisible de alarma en el nivel de vibraciones: Inducido 2 lado acople, secundario 1 ambos lados, bomba de alimentación 2 ambos lados y bomba alimentación 3 lado acople.

Para el período de mantenimiento 2021, deberá de considerarse los siguientes equipos para intervenirlos con mantenimiento mayor: inducido 2 lado libre, bomba de alimentación 3 lado libre.

Para el período de mantenimiento 2022, serán considerados dentro de la rutina de mantenimiento mayor los siguientes equipos: ventilador secundario 2 ambos lados.

De esta manera se puede apreciar la reducción significativa en la utilización del recurso, ya que previo al análisis de la presente investigación, se realizaban trabajos de mantenimiento mayor a todas las unidades, año con año.

4. PROPUESTA DE PLAN DE PLAN DE MANTENIMIENTO Y METODOLOGÍA DE DIVULGACIÓN

Se presentan dos tipos de rutinas de mantenimiento propuestas para los equipos rotativos de generación de vapor, de acuerdo con los resultados obtenidos en el capítulo 3.

4.1. Plan de mantenimiento propuesto

El plan de mantenimiento que se propone para los equipos rotativos de generación de vapor en general consta de dos variantes. La primera, definida como rutina de mantenimiento menor, que aplica para los equipos que mantienen un nivel de vibraciones dentro del rango aceptable a lo largo del período operativo del equipo evaluado. La segunda, definida como rutina de mantenimiento mayor, considera actividades más invasivas como el cambio de algunos repuestos, puesto que se aplica en equipos que sobrepasan el rango aceptable del nivel de vibraciones durante el año operativo.

4.1.1. Plan de mantenimiento menor de equipos rotativos

Se propone el siguiente procedimiento como rutina de mantenimiento menor, para los equipos rotativos de generación de vapor, será aplicable cuando los valores de vibración de los equipos se encuentren dentro de un rango aceptable, no se realizarán trabajos invasivos a manera de optimizar la operación de mantenimiento.

Tabla XLI. **Plan de mantenimiento menor de equipos rotativos de generación de vapor**

| | |
|---|---|
| <p><u>OBJETIVO</u></p> | <p>Contar con una guía clara y sintetizada de las actividades que se deben desarrollar al intervenir un equipo rotativo de generación de vapor (ventiladores inducidos, forzados primarios, forzados secundarios, bombas de alimentación de agua). Este procedimiento se establece con la finalidad de intervenir los equipos de manera no invasiva, debido a que sus condiciones de operación son todavía óptimas.</p> |
| <p><u>ALCANCE</u></p> | <p>Se establece el alcance del presente procedimiento para todos los equipos rotativos de generación de vapor que sean parte del bloque núm. 7 de Ingenio Magdalena, los cuales cumplan con la premisa de que al final del año operativo, la proyección de vibraciones no supere el límite aceptable, de acuerdo con la tabla establecida para cada motor. Involucra al personal de operaciones y mantenimiento, para su correcta aplicación.</p> |
| <p style="text-align: center;"><u>EQUIPOS INVOLUCRADOS</u></p> | |
| <p style="text-align: center;">Núm.</p> | <p style="text-align: center;">Equipo</p> |
| <p style="text-align: center;">1.</p> | <p style="text-align: center;">Ventiladores de tiro inducido.</p> |
| <p style="text-align: center;">2.</p> | <p style="text-align: center;">Ventiladores de tiro forzado primario.</p> |
| <p style="text-align: center;">3.</p> | <p style="text-align: center;">Ventiladores de tiro forzado secundario.</p> |
| <p style="text-align: center;">4.</p> | <p style="text-align: center;">Bombas de alimentación de agua.</p> |

Continuación tabla XLI.

| <u>PERSONAL INVOLUCRADO</u> | | |
|------------------------------------|--|--|
| Núm. | Puesto | Competencia |
| 1. | Jefe de turno | Velar por que todas las actividades operativas se desarrollen de manera adecuada durante el turno correspondiente. |
| 2. | Supervisor de mantenimiento | Acompañar en rutinas de inspección y toma de datos de vibraciones en caso sea necesario. |
| 3. | Operador de turno | Registra parámetros de operación de equipos, reporta anomalías para su consideración. |
| 4. | Mecánico de mantenimiento | Interviene en rutinas de inspección de operación y registro de parámetros. Interviene los equipos cuando es necesario para garantizar su disponibilidad. |
| 5. | Técnico de mantenimiento predictivo | Encargado de realizar toma de datos de vibraciones, presentar informe, de acuerdo a programa semanal de toma de datos. |
| <u>EQUIPO DE SEGURIDAD</u> | | |
| Núm. | Equipo | |
| 1. | Casco dieléctrico tipo I clase E y G con barbiquejo. | |
| 2. | Botas de seguridad con punteras no metálicas. | |
| 3. | Lentes de seguridad. | |
| 4. | Guantes para actividades mecánicas. | |
| 5. | Bolsa de cinturón para acarreo de herramientas. | |
| <u>HERRAMIENTA</u> | | |
| Núm. | Herramienta | |
| 1. | Llaves hexagonales. | |

Continuación tabla XLI.

| | |
|---|--|
| 2. | Llaves tipo Allen. |
| 3. | Llaves de golpe. |
| 4. | Llaves de corona. |
| 5. | Juego de copas y maneral. |
| 6. | Herramienta manual (martillo, alicate, llave ajustable, entre otros). |
| 7. | Equipo para medición de vibraciones. |
| <u>MATERIALES</u> | |
| Núm. | Material |
| 1. | Grasa Polirex EM-Esso. |
| 2. | Aceite Teresstic 46. |
| 3. | Solvente mineral. |
| 4. | Wipe de algodón. |
| <u>REPUESTOS</u> | |
| Núm. | Repuesto |
| 1. | N/A |
| <u>PROCEDIMIENTO DE INTERVENCIÓN MENOR</u> | |
| 1. | Verificar proyección de vibraciones en rango para aplicar rutina de mantenimiento menor. |
| 2. | Asegurar bloqueo y etiquetado. |
| 3. | Desacoplar el equipo del motor. |
| 4. | Destapar cajas de chumaceras. |
| 5. | Eliminar lubricante usado. |
| 6. | Inspeccionar sello de cajas de chumaceras. |
| 7. | Revisar alineamiento de alojamientos. |
| 8. | Revisar ajuste de holguras de rodamientos. |

Continuación tabla XLI.

| | | |
|--|---|----------------------|
| 9. | Colocar lubricante nuevo. | |
| 10. | Tapar cajas de chumaceras. | |
| 11. | Revisar alineación con el motor. | |
| 12. | Revisión estructural. | |
| 13. | Acoplar el equipo con el motor. | |
| 14. | Limpieza del área. | |
| 15. | Quitar bloqueo y etiquetado. | |
| 16. | Realizar pruebas de arranque. | |
| <u>PRUEBAS FINALES</u> | | |
| Posterior a las pruebas de arranque se deberá garantizar lo siguiente: | | |
| 1. | Revisar rotación correcta del equipo. | |
| 2. | Revisar consumo de corriente del equipo. | |
| 3. | Realizar corrida de vibraciones de verificación previo a iniciar período operativo. | |
| <u>INFORME DE ACTIVIDADES</u> | | |
| 1. | Realizado por el supervisor de mantenimiento, de acuerdo con el cuadro de verificación correspondiente. | |
| 2. | Deberá registrar todas las observaciones adicionales correspondientes. | |
| 3. | El registro deberá archivar adecuadamente para su historial. | |
| VERIFICACIÓN DE RUTINA DE MANTENIMIENTO MENOR | | |
| Equipo: | Fecha de intervención: | |
| Ubicación: | Supervisor: | |
| Descripción de actividad | Estatus | Observaciones |
| Verificar nivel de vibración final. | | |
| Bloqueo y etiquetado. | | |

Continuación tabla XLI.

| | | |
|--|--|--|
| Inspeccionar sello de cajas de chumaceras. | | |
| Revisar alineamiento de alojamientos. | | |
| Revisar ajuste de holguras de rodamientos. | | |
| Cambio de lubricante. | | |
| Revisar alineación con el motor. | | |
| Revisión estructural. | | |
| Acoplar el equipo con el motor. | | |
| Quitar bloqueo y etiquetado. | | |
| Realizar pruebas de arranque. | | |
| Limpieza del área. | | |

Fuente: elaboración propia.

4.1.2. Plan de mantenimiento mayor para equipos rotativos

Para intervenciones mayores, cuando el nivel de vibraciones con el que los equipos finalizan el período operativo supera el nivel aceptable, se propone el siguiente procedimiento como rutina de mantenimiento mayor, se realizan actividades invasivas y se genera indisponibilidad del equipo mientras dure dicha intervención.

Tabla XLII. **Plan de mantenimiento mayor para equipos rotativos de generación de vapor**

| | | |
|------------------------------------|--|--|
| <u>OBJETIVO</u> | <p>Contar con una guía clara y sintetizada de las actividades que se deben desarrollar al intervenir un equipo rotativo de generación de vapor (ventiladores inducidos, primarios, secundarios, bombas de alimentación d). Las actividades consideradas son totalmente invasivas y tienen la finalidad de corregir fallas identificadas durante el período operativo.</p> | |
| <u>ALCANCE</u> | <p>Se establece el alcance del presente procedimiento para todos los equipos rotativos de generación de vapor que sean parte del bloque No. 7 de Ingenio Magdalena, los cuales cumplan con la premisa de que al final del año operativo, la proyección de vibraciones superó el límite aceptable, de acuerdo a la tabla establecida para cada motor. Involucra al personal de operaciones y mantenimiento, para su correcta aplicación. Al aplicar este procedimiento, se provoca la indisponibilidad total del equipo durante el tiempo que dure la intervención.</p> | |
| <u>EQUIPOS INVOLUCRADOS</u> | | |
| Núm. | Equipo | |
| 1. | Ventiladores de tiro inducido. | |
| 2. | Ventiladores de tiro forzado primario. | |
| 3. | Ventiladores de tiro forzado secundario. | |
| 4. | Bombas de alimentación de agua. | |
| <u>PERSONAL INVOLUCRADO</u> | | |
| Núm. | Puesto | Competencia |
| 1. | Jefe de turno | Velar por que todas las actividades operativas se desarrollen de manera adecuada durante el turno correspondiente. |

Continuación tabla XLII.

| | | |
|-----------------------------------|--|--|
| 2. | Supervisor de mantenimiento | Acompañar en rutinas de inspección y toma de datos de vibraciones en caso sea necesario. |
| 3. | Operador de turno | Registra parámetros de operación de equipos, reporta anomalías para su consideración. |
| 4. | Mecánico de mantenimiento | Interviene en rutinas de inspección de operación y registro de parámetros. Interviene los equipos cuando es necesario para garantizar su disponibilidad. |
| 5. | Técnico de mantenimiento predictivo | Encargado de realizar toma de datos de vibraciones, presentar informe, de acuerdo con programa semanal de toma de datos. |
| <u>EQUIPO DE SEGURIDAD</u> | | |
| Núm. | Equipo | |
| 1. | Casco dieléctrico tipo I clase E con barbiquejo. | |
| 2. | Botas de seguridad con punteras no metálicas. | |
| 3. | Lentes de seguridad. | |
| 4. | Guantes para actividades mecánicas. | |
| 5. | Bolsa de cinturón para acarreo de herramientas. | |
| <u>HERRAMIENTA</u> | | |
| Núm. | Herramienta | |
| 1. | Llaves hexagonales. | |
| 2. | Llaves tipo Allen. | |
| 3. | Llaves de golpe. | |
| 4. | Llaves de corona. | |
| 5. | Juego de copas y maneral. | |
| 6. | Extractores para cojinetes y acoplamientos. | |

Continuación tabla XLII.

| | |
|---|--|
| 7. | Herramienta manual (martillo, alicate, llave ajustable, entre otros). |
| 8. | Equipo para medición de vibraciones. |
| <u>MATERIALES</u> | |
| Núm. | Material |
| 1. | Grasa Polirex EM-Esso. |
| 2. | Aceite Teresstic 46. |
| 3. | Solvente mineral. |
| 4. | Wipe de algodón. |
| <u>REPUESTOS</u> | |
| Núm. | Repuesto |
| 1. | Rodamientos según el equipo intervenido. |
| <u>PROCEDIMIENTO DE INTERVENCIÓN MAYOR</u> | |
| 1. | Verificar proyección de vibraciones fuera de rango para aplicar rutina de mantenimiento mayor. |
| 2. | Asegurar bloqueo y etiquetado. |
| 3. | Desacoplar el equipo del motor. |
| 4. | Destapar cajas de chumaceras. |
| 5. | Eliminar lubricante usado. |
| 6. | Inspeccionar sello de cajas de chumaceras. |
| 7. | Revisar alineamiento de alojamientos. |
| 8. | Reemplazar rodamiento. |
| 9. | Calibración de holguras de rodamiento. |
| 10. | Calibración de holguras de alojamiento. |
| 11. | Colocar lubricante nuevo. |
| 12. | Tapar cajas de chumaceras. |
| 13. | Revisar alineación con el motor. |

Continuación tabla XLII.

| | | |
|--|---|----------------------|
| 14. | Revisión estructural. | |
| 15. | Acoplar el equipo con el motor. | |
| 16. | Quitar bloqueo y etiquetado. | |
| 17. | Realizar pruebas de arranque. | |
| 18. | Limpieza del área. | |
| <u>PRUEBAS FINALES</u> | | |
| Posterior a las pruebas de arranque se deberá garantizar lo siguiente: | | |
| 1. | Revisar rotación correcta del equipo. | |
| 2. | Revisar consumo de corriente del equipo. | |
| 3. | Realizar corrida de vibraciones de verificación previo a iniciar período operativo. | |
| 4. | Realizar balanceo dinámico del equipo. | |
| <u>INFORME DE ACTIVIDADES</u> | | |
| 1. | Realizado por el supervisor de mantenimiento, de acuerdo con el cuadro de verificación correspondiente. | |
| 2. | Deberá registrar todas las observaciones adicionales correspondientes. | |
| 3. | El registro deberá archivar adecuadamente para su historial. | |
| VERIFICACIÓN DE RUTINA DE MANTENIMIENTO MAYOR | | |
| Equipo: | Fecha de intervención: | |
| Ubicación: | Supervisor: | |
| Descripción de actividad | Estatus | Observaciones |
| Verificar nivel de vibración final. | | |
| Bloqueo y etiquetado. | | |
| Inspeccionar sello de alojamientos. | | |

Continuación tabla XLII.

| | | |
|---|--|--|
| Revisar alineamiento de alojamientos. | | |
| Reemplazar rodamiento. | | |
| Revisar ajuste de holguras de rodamientos. | | |
| Revisar ajuste de holguras de alojamientos. | | |
| Cambio de lubricante. | | |
| Revisar alineación con el motor. | | |
| Revisión estructural. | | |
| Acoplar el equipo con el motor. | | |
| Quitar bloqueo y etiquetado. | | |
| Realizar pruebas de arranque. | | |
| Balanceo dinámico. | | |
| Limpieza del área. | | |

Fuente: elaboración propia.

4.2. Metodología de divulgación

El alcance que cubre la divulgación considera únicamente al personal de uno de los bloques de generación de energía, tanto a nivel coordinación, supervisión y operarios, tanto del personal de producción de energía como de mantenimiento. Esto debido a que el alcance de la investigación se centró únicamente en el bloque de generación número 7.

Tabla XLIII. **Personal para divulgación de información**

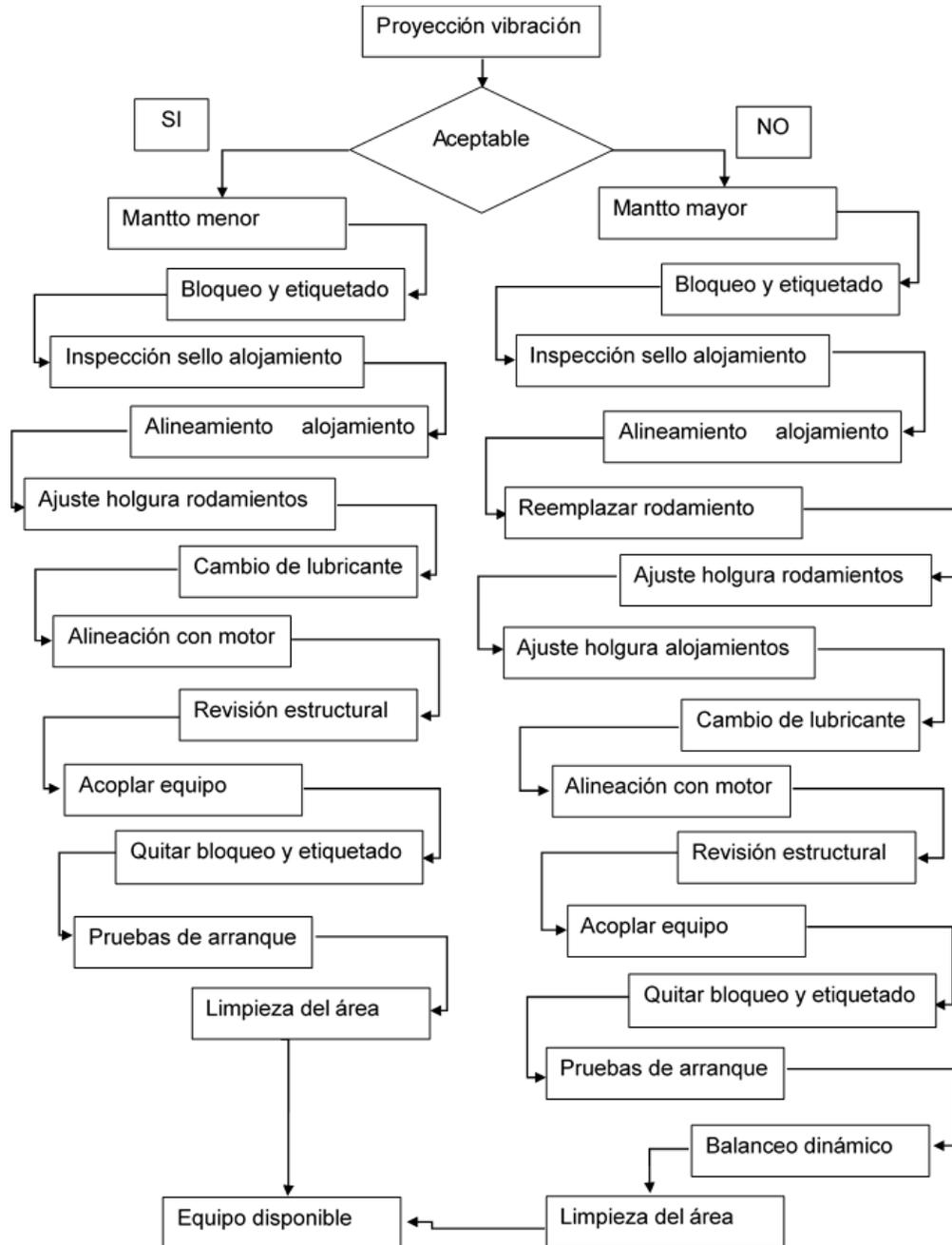
| Descripción del puesto | Nivel | Cantidad |
|-------------------------------|---------------|-----------------|
| Coordinador de operaciones | Jefatura | 3 |
| Supervisor de operaciones | Supervisión | 3 |
| Operador de turno | Operativo | 3 |
| Mecánico de turno | Operativo | 3 |
| Auxiliares de turno | Operativo | 3 |
| Mecánicos de mantenimiento | Mantenimiento | 2 |

Fuente: elaboración propia.

Para facilitar el manejo y la comprensión de la información, se diseñó un documento a manera de diagrama de flujo, que sintetiza la información que es necesaria dar a conocer.

En este diagrama, se detalla información sobre la toma de decisiones que debe de considerar el personal, para saber si se debe intervenir el equipo de forma invasiva o de forma no invasiva. También se detallan los pasos a seguir en cualquiera de los dos casos anteriores.

Figura 32. Diagrama de flujo plan de mantenimiento



Fuente: elaboración propia.

4.3. Análisis externo

Los resultados obtenidos en los análisis de vibraciones aplicados a los equipos de generación de vapor son concluyentes, ya que como indica Tejaxún (2019), la herramienta para medición de vibraciones es bastante confiable y precisa. Para la presente investigación los análisis de vibraciones sirvieron como base para sustentar análisis posteriores, en este caso en particular, para poder realizar proyecciones predictivas precisas a través de la utilización de una regresión lineal. Esto permitió diferenciar el modelo de gestión de mantenimiento por dos vías: rutinas de mantenimiento menor y rutinas de mantenimiento mayor, aplicables solo bajo condiciones sumamente necesarias, optimizando la gestión del mantenimiento.

La idea de proyectar las variables de estudios en la presente investigación, para determinar el momento más adecuado para planificar la intervención de los equipos rotativos de generación de vapor, concuerda con el estudio de Quiroga y Oviedo (2011), en donde se concluyó que la detección temprana de fallas a través de simuladores de cargas fue de mucha importancia para planificar la intervención de los equipos. Para esta investigación se fue más allá, utilizando el método de regresión lineal, se pudo evaluar el comportamiento de las vibraciones para los siguientes tres períodos operativos y hacer más eficiente aún la gestión del mantenimiento.

Para esta investigación, se realizó un análisis de criticidad en los equipos rotativos de generación de vapor, a través de este análisis se seleccionaron los equipos rotativos que verdaderamente impactan en la generación de energía (bajas de producción, paros no programados, regulación de molienda), tal como lo indica (Penkova, 2007). Esto permitió centrar el análisis en los equipos de mayor impacto en la producción de energía, cuya disponibilidad es

completamente necesaria a lo largo del año operativo, sin dejar de lado el hecho de intervenirlos cuando sea necesario.

Al realizar los análisis de vibraciones en los equipos seleccionados, se aplicó el procedimiento recomendado por Royo, Rabanaque y Torres (2000), esto para aumentar la confiabilidad de las mediciones y tener una guía estándar para la recopilación de todos los datos. Los rangos de vibración aceptables se establecieron en función del tamaño del motor y de la información obtenida en la norma ISO 10816-3 (2003).

4.4. Análisis interno

Esta investigación logró demostrar, la importancia de aprovechar las tecnologías predictivas en cualquier industria. Particularmente en este caso, el análisis de vibraciones.

La variable del nivel de vibraciones en cualquier equipo en movimiento es de suma importancia, ya que proporciona información relevante en todo momento, la cual puede utilizarse para predecir acontecimientos futuros que pueden ser catastróficos. Pero también puede utilizarse para analizar el estado en el que se encuentran los equipos que son objeto de estudio, esta información también es de mucha importancia, ya que pueden optimizarse los recursos como mano de obra, repuestos e insumos y utilizarlos cuando verdaderamente es necesario, haciendo más eficiente la gestión del mantenimiento.

Para el caso analizado en esta investigación, en donde se realizó un inventario técnico de equipos, luego una categorización de estos equipos de acuerdo a su criticidad e impacto en la operación y fueron seleccionados los equipos más críticos y analizados durante un período operativo determinado (45

semanas operativas), no hay validez interna, ya que la muestra no es aleatoria ni representativa para todos los equipos rotativos de generación de vapor, debido también a que la mayoría tiene características muy distintas.

Sin embargo, el mismo análisis puede ser replicado a los demás bloques de generación de energía, esto a discreción de la gerencia correspondiente.

CONCLUSIONES

1. Se realizó el inventario técnico de los equipos rotativos de generación de vapor del bloque de generación de energía que fue objeto de estudio en esta investigación. Se categorizó los equipos de acuerdo con su criticidad e impacto en la operación utilizando una matriz ponderada, de tal manera que los equipos críticos identificados son: ventiladores de tiro inducido, ventiladores de tiro forzado primario, ventiladores de tiro forzado secundario y bombas de alimentación de agua.
2. Utilizando la medición de vibraciones, se logró registrar y tabular 45 semanas operativas consecutivas. Debido a que la medición realizada se obtuvo en 3 ejes cartesianos, se utilizó la raíz media cuadrática para obtener valores globales de vibración y poder realizar una proyección utilizando regresión lineal como método de análisis predictivo.
3. De acuerdo con las proyecciones realizadas, se logró establecer 2 programas de mantenimiento: rutina de mantenimiento menor, para equipos dentro del rango de vibración aceptable y rutina de mantenimiento mayor, para equipos con nivel de vibración fuera de rango.
4. Para facilitar la comprensión de los conceptos generales sobre la nueva metodología propuesta, así como del procedimiento a seguir para la toma de decisiones, se generó un diagrama de flujo que sintetiza la información y facilita su divulgación a todo el equipo involucrado, desde operarios de producción, operarios de mantenimiento, personal de supervisión y jefaturas involucradas.

RECOMENDACIONES

1. Ampliar el inventario técnico de equipos para toda la planta, categorizarlo de acuerdo con su criticidad e impacto en la operación, se espera que la metodología aplicada para listar los equipos para esta investigación sea adaptada para las demás áreas de influencia, así como también la utilización de la matriz de criticidad ponderada.
2. El análisis de vibración, demostró ser una herramienta muy útil al ser utilizada como base para un estudio de monitoreo por condición. Esta metodología deberá aplicarse constantemente, para poder mantener actualizada la base de datos históricos y poder realizar predicciones más precisas para los siguientes períodos operativos.
3. Los planes de mantenimiento propuestos para los equipos rotativos de generación de vapor pueden servir como base para ampliar esta metodología a otras áreas funcionales de la planta generadora, como turbinas de vapor, torres de enfriamiento, laboratorio de aguas industriales, con la finalidad de contar con una operación de mantenimiento adecuada y óptima.
4. Al tener los planes de mantenimientos diseñados, el documento para registro de actividades y el flujograma para el desarrollo de las tareas de mantenimiento, es conveniente dar seguimiento y solicitar retroalimentación de los involucrados, para evaluar posibles mejoras y afinar aún más la técnica aplicada durante el desarrollo de la investigación.

REFERENCIAS

1. Abarca, P. (2005). Descripción de Calderas y Generadores de Vapor. *ACHS*, 26.
2. Borroto, A., y Rubio, A. (2007). *Combustión y Generación de Vapor*. Cuatro Caminos , Cienfuegos, Cuba: Universo SUR.
3. Botero, C. (1991). *Mantenimiento Preventivo*. Colombia: Servicio Nacional de Aprendizaje SENA.
4. Castellanos , M., y Sánchez, M. (2005). *Programa de mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones en equipos críticos de la industria azucarera*. San Salvador, El Salvador: Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas".
5. Estévez, M. (3 de diciembre de 2013). *Estudio de un sistema de mantenimiento predictivo basado en análisis de vibraciones implantado en instalaciones de bombeo y generación*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
6. Franck, F., Golato, M., Morales, W., Cruz, C., y Paz, D. (2011). *Rendimiento térmico de calderas bagaceras modernas en Tucumán, R. Argentina*. Tucumán, Argentina.
7. García, S. (2003). *Organización y gestión integral de mantenimiento*. (Primera ed.). Madrid: Ediciones Díaz de Santos, S.A.

8. García, S. (2009). *Centrales termoeléctricas de biomasa*. Madrid, España: Renovotec.
9. International Organization for Standardization. (2009). *ISO 10816-3: Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts*. Switzerland.
10. Martínez , L. (2014). *Metodología para la definición de tareas de mantenimiento basado en confiabilidad, condición y riesgo aplicada a equipos del sistema de transmisión nacional*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
11. Mora, A. (2009). *Mantenimiento, planeación, ejecución y control*. (Primera ed.). México: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.
12. Navarro, L., Pastor, A., y Mugaburu, J. (1997). *Gestión integral de mantenimiento*. Barcelona: Marcombo.
13. Neto, E. (marzo de 2008). *Mantenimiento Industrial*. Macas, Ecuador.
14. Olarte , W., Botero , M., y Cañon, B. (2010). Análisis de vibraciones: Una herramienta clave en el mantenimiento predictivo. *Scientia Et Technica*, 219-222.
15. Penkova, M. (Octubre de 2007). Mantenimiento y análisis de vibraciones. *Ciencia y Sociedad*, XXXII(4), 6668-678. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87032407>

16. Quiroga, J., y Oviedo, S. (agosto de 2011). Implementación de un mantenimiento basado en la condición usando modelado y simulación: caso de estudio de un motor sin-crónico de imanes permanentes. *Ingeniería e Investigación*, 31(2), 28. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64322334003>
17. Royo, J., Rabanaque, G., y Torres, F. (2000). Análisis de vibraciones e interpretación de datos. *DIDYF, Universidad de Zaragoza*, 15.
18. Ruíz, A. (2012). Modelo para la implementación de mantenimiento predictivo en las facilidades de producción de petróleo. *Monografía de Grado Especialista en Gerencia de Mantenimiento*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
19. Sánchez, A. (2017). *Técnicas de mantenimiento predictivo. Metodología de aplicación en las organizaciones*. Bogotá, Colombia: Universidad Católica de Colombia.
20. Sánchez, E. (2014). Comprobación del diseño mecánico del ventilador de tiro forzado (VTF-B) de la empresa termoeléctrica "Lidio Ramón Pérez).
21. SKF, USA Inc. (2013). Manual de usuario: SKF @ptitude analyst para SKF microlog analyzer. Viewridge Court, San Diego, California, USA.
22. Tejaxún, C. (abril de 2019). *Desarrollo de un modelo de gestión de mantenimiento a través del monitoreo de condición, utilizando ensayos no destructivos, bajo la Norma ISO 17359:2011 para la conservación*

de equipos críticos en la industria avícola. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.

23. Toapanta, O. (2009). *Implementación de un análisis de mantenimiento basado en condición de los compresores recíprocos y de tornillo.* Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
24. White, G. (2010). *Introducción al Análisis de Vibraciones.* Woburn, Massachusetts, U.S.A.: Azima DLI.
25. Yañez, M., Perdomo, J., y Gomez, H. (2006). Ingeniería de Confiabilidad; Pilar Fundamental del Mantenimiento. *Fiabilidad y Gestión del Riesgo*, 17.

APÉNDICE

Apéndice 1. Matriz de consistencia de la investigación

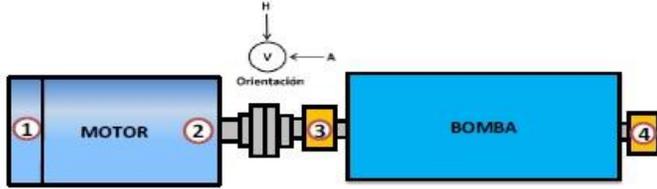
| MATRIZ DE CONSISTENCIA DE LA INVESTIGACIÓN | | | |
|---|--|---|--|
| | TÍTULO | PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO BASADO EN CONDICIÓN UTILIZANDO EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES PARA LOS EQUIPOS ROTATIVOS DE GENERACIÓN DE VAPOR DE UNA PLANTA GENERADORA DE ENERGÍA UBICADA EN LA COSTA SUR | |
| Num. | OBJETIVOS | CONCLUSIONES | RECOMENDACIONES |
| OBJETIVO GENERAL | Proponer un plan de mantenimiento preventivo basado en condición, utilizando la herramienta de análisis de vibraciones, para los equipos rotativos de generación de vapor de un bloque de generación de energía. | Se elaboró un plan de mantenimiento preventivo, basando la toma de decisiones sobre la manera y el momento en el que es más conveniente intervenir los equipos, utilizando tecnología predictiva, como respaldo técnico. Esto favorece en cuanto a la eficiencia de las actividades y el orden en que se lleva a cabo cada intervención. Ya no se intervienen los equipos sin razones concretas sino, cuando la condición de los mismos lo amerita. | Los resultados obtenidos demuestran la factibilidad de ampliar este proyecto a la totalidad de los equipos con los que dispone la planta y en un futuro, poder establecer la metodología de mantenimiento por condición a toda el área industrial de la empresa, con la visión de eficientar las tareas de mantenimiento a todo nivel. |
| | Realizar un inventario técnico de los equipos rotativos de generación de vapor para categorizarlos de acuerdo con su criticidad e impacto en la operación anual de un bloque de generación de energía. | Se realizó el inventario técnico de los equipos rotativos de generación de vapor del bloque de generación de energía que fue objeto de estudio en esta investigación. Se categorizó los equipos de acuerdo con su criticidad e impacto en la operación utilizando una matriz ponderada, de tal manera que los equipos críticos identificados son: ventiladores de tiro inducido, ventiladores de tiro forzado primario, ventiladores de tiro forzado secundario y bombas de alimentación de agua. | Ampliar el inventario técnico de equipos para toda la planta, categorizarlo de acuerdo a su criticidad e impacto en la operación, se espera que la metodología aplicada para listar los equipos para esta investigación sea adaptada para las demás áreas de influencia, así como también la utilización de la matriz de criticidad ponderada. |

Continuación apéndice 1.

| | | | |
|------------------------------|---|--|---|
| OBJETIVOS ESPECÍFICOS | <p>Determinar el estado operacional de los equipos rotativos de generación de vapor a través del análisis de vibraciones, como herramienta de recolección de información, análisis y proyección de continuidad operativa.</p> | <p>Utilizando la medición de vibraciones, se logró registrar y tabular 45 semanas operativas consecutivas. Debido a que la medición realizada se obtuvo en 3 ejes cartesianos, se utilizó la raíz media cuadrática para obtener valores globales de vibración y poder realizar una proyección utilizando regresión lineal como método de análisis predictivo.</p> | <p>El análisis de vibración, demostró ser una herramienta muy útil al ser utilizada como base para un estudio de monitoreo por condición. Esta metodología deberá aplicarse constantemente, para poder mantener actualizada la base de datos históricos y poder realizar predicciones más precisas para los siguientes periodos operativos.</p> |
| | <p>Establecer rutinas de mantenimiento con base en las condiciones operativas de los equipos y su forma de documentación para garantía de ejecución.</p> | <p>De acuerdo con las proyecciones realizadas, se logró establecer 2 programas de mantenimiento: rutina de mantenimiento menor, para equipos dentro del rango de vibración aceptable y rutina de mantenimiento mayor, para equipos con nivel de vibración fuera de rango.</p> | <p>Los planes de mantenimiento propuestos para los equipos rotativos de generación de vapor, pueden servir como base para ampliar esta metodología a otras áreas funcionales de la planta generadora, como turbinas de vapor, torres de enfriamiento, laboratorio de aguas industriales, con la finalidad de contar con una operación de mantenimiento adecuada y óptima.</p> |
| | <p>Establecer una metodología para la divulgación del procedimiento propuesto para todo el personal involucrado, a través de la distribución sintetizada de la información.</p> | <p>Para facilitar la comprensión de los conceptos generales sobre la nueva metodología propuesta, así como del procedimiento a seguir para la toma de decisiones, se generó un diagrama de flujo que sintetiza la información y facilita su divulgación a todo el equipo involucrado, desde operarios de producción, operarios de mantenimiento, personal de supervisión y jefaturas involucradas.</p> | <p>Al tener los planes de mantenimiento diseñados, el documento para registro de actividades y el flujograma para el desarrollo de las tareas de mantenimiento, es conveniente dar seguimiento y solicitar retroalimentación de los involucrados, para evaluar posibles mejoras y afinar aún más la técnica aplicada durante el desarrollo de la investigación.</p> |

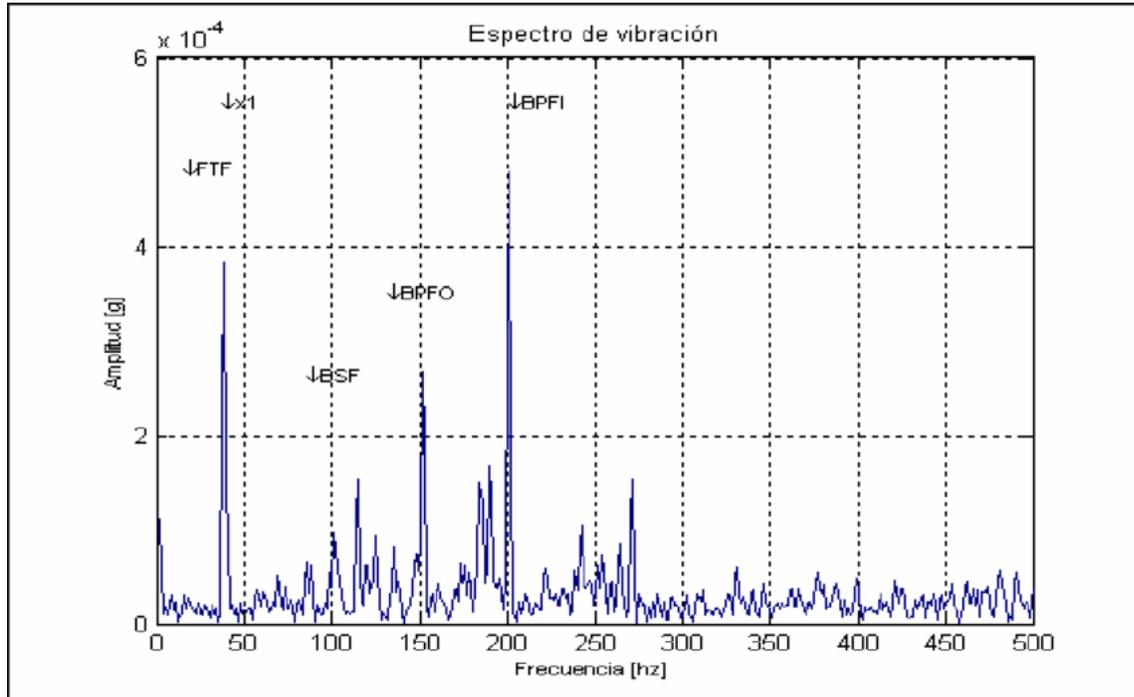
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Reporte de toma de datos de vibraciones

|  | | ANÁLISIS DE VIBRACIONES | | Código AV-FR-2020-0118 |
|--|---|--------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Mantenimiento Industrial | | | | |
| FECHA TOMA DE MEDICIÓN | 06/07/2020 | HORA | 11:50:00 hrs | |
| FECHA EMISIÓN DE INFORME | 06/07/2020 | HORA | 13:00:00 hrs | |
| MÁQUINA | Bomba de alimentación #2_caldera #12 | | | |
| COMPONENTE | Motor eléctrico/Bomba | | | |
| CLIENTE | Eddy Ottoniel Giron | | | |
| ANALISTA | Jorge Mario Quej | | | |
| DESCRIPCIONES DEL EQUIPO | | | | |
| ANALIZADOR | FABRICANTE | SENSOR | FABRICANTE | |
| Microlog | SKF | Acelerómetro CMSS2200 | SKF | |
| UNIDADES | TIPO DE MEDICIÓN | VELOCIDAD (RPM) | | |
| mm/s | RMS | 3,500 | | |
|  | | | | |
| Nombre de Maquina | Nombre de Punto | Último Valor unidad RMS | Último Valor unidad g's | Orientación |
| Motor electrico | 1HV | 1.60 | 1.08 | Horizontal |
| Motor electrico | 1VV | 0.63 | 1.11 | Vertical |
| Motor electrico | 1AV | 1.38 | 1.14 | Axial |
| Motor electrico | 2HV | 1.63 | 0.86 | Horizontal |
| Motor electrico | 2VV | 1.50 | 1.00 | Vertical |
| Motor electrico | 2AV | 1.87 | 0.67 | Axial |
| Bomba Lado/Acoplamient | 3HV | 5.04 | 1.32 | Horizontal |
| Bomba Lado/Acoplamient | 3VV | 5.72 | 1.65 | Vertical |
| Bomba Lado/Acoplamient | 3AV | 2.09 | 1.76 | Axial |
| Bomba Lado/Libre | 4HV | 3.63 | 1.24 | Horizontal |
| Bomba Lado/Libre | 4VV | 5.54 | 1.67 | Vertical |
| Bomba Lado/Libre | 4AV | 1.60 | 1.66 | Axial |
| DIAGNOSTICO | Holguras Chumacera Lado Acople | | | |
| COMENTARIO | Los espectros tomados en chumacera lado acople muestran una serie de armónicos a la velocidad de giro a (3,476 RPM), característico de Holguras | | | |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Ejemplo espectro de vibraciones



Fuente: elaboración propia.