



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA  
MECÁNICA ELÉCTRICA**

Diseño de plan de mantenimiento predictivo por termografía y vibración para mejorar la confiabilidad en electrobombas de un ingenio azucarero.

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
Ingeniero Mecánico Electricista**

**AUTOR:**

Rosales Vasquez, Alexis Enrique (orcid.org/0000-0002-2868-6740)

**ASESOR:**

Mgt. Sovero Lazo Nelly Roxana (orcid.org/0000-0001-5688-2258)

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Sistemas y Planes de Mantenimiento

**LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:**

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

**TRUJILLO - PERÚ**

2023

## DEDICATORIA

*Mi tesis está dirigida con mucho cariño a mi esposa Victoria por estar siempre apoyándome en no rendirme y lograr lo que se empezó.*

*A mi hija Alanna que con su llegada ha bendecido mi vida, sin duda ella es mi mayor motivación para seguir creciendo y luchando en la vida.*

*A mis padres Pedro e Irma por sus consejos, apoyo y motivación para seguir adelante.*

*A mis hermanos Johana y José quienes fueron un gran apoyo emocional durante el tiempo en que escribía esta tesis.*

*Para ellos es esta dedicatoria de tesis, pues es a ellos a quienes se las debo por su apoyo incondicional.*

## **AGRADECIMIENTO**

*Primeramente, agradecer a Dios por haberme dado salud y fortaleza, a mi familia por apoyarme en cada decisión y proyecto.*

*A la universidad que me brindó la oportunidad de seguir mi segunda carrera y concluir con mis estudios.*

*También quiero extender mi gratitud a todos mis profesores de educación superior, quienes me brindaron las herramientas para mi formación profesional.*



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**

**Declaratoria de Autenticidad del Asesor**

Yo, SOVERO LAZO NELLY ROXANA, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - TRUJILLO, asesor de Tesis titulada: "Diseño de plan de mantenimiento predictivo por termografía y vibración para mejorar la confiabilidad en electrobombas de un ingenio azucarero.", cuyo autor es ROSALES VASQUEZ ALEXIS ENRIQUE, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 9.00%, verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

TRUJILLO, 12 de Julio del 2023

Apellidos y Nombres del Asesor:	Firma
SOVERO LAZO NELLY ROXANA DNI: 20048561 ORCID: 0000-0001-5688-2258	Firmado electrónicamente por: NRSOVEROS el 20- 07-2023 10:49:42

Código documento Trilce: TRI - 0587751





**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**

**Declaratoria de Originalidad del Autor**

Yo, ROSALES VASQUEZ ALEXIS ENRIQUE estudiante de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - TRUJILLO, declaro bajo juramento que todos los datos e información que acompañan la Tesis titulada: "Diseño de plan de mantenimiento predictivo por termografía y vibración para mejorar la confiabilidad en electrobombas de un ingenio azucarero.", es de mi autoría, por lo tanto, declaro que la Tesis:

1. No ha sido plagiada ni total, ni parcialmente.
2. He mencionado todas las fuentes empleadas, identificando correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
3. No ha sido publicada, ni presentada anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de la información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

Nombres y Apellidos	Firma
ALEXIS ENRIQUE ROSALES VASQUEZ DNI: 45080848 ORCID: 0000-0002-2868-6740	Firmado electrónicamente por: AROSALESV88 el 12- 07-2023 19:35:52

Código documento Trilce: TRI - 0587750

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS	ii
ÍNDICE DE TABLAS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>II. MARCO TEÓRICO</b>	<b>5</b>
<b>III. METODOLOGÍA</b>	<b>11</b>
3.1. Tipo y diseño de investigación	11
3.2. Variables y operacionalización	12
3.3. Población, muestra y muestreo	12
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	13
3.5. Procedimientos	13
3.6. Método de análisis de datos	14
3.7. Aspectos éticos	14
<b>IV. RESULTADOS</b>	<b>15</b>
<b>V. DISCUSIÓN</b>	<b>19</b>
<b>VI. CONCLUSIONES</b>	<b>23</b>
<b>VII. RECOMENDACIONES</b>	<b>24</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>25</b>
ANEXOS	29

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Técnicas e instrumentos del estudio	13
Tabla 2. Estado actual del mantenimiento predictivo de las electrobombas	15
Tabla 3. Estado de la confiabilidad de las electrobombas	16
Tabla 4. Presupuesto económico para el plan de mantenimiento predictivo	18
Tabla 5. Matriz de operacionalización de variables	29
Tabla 6. Ficha de registro de análisis vibracional	30
Tabla 7. Ficha de registro de análisis termográfico	31
Tabla 8. Matriz de consistencia	32
Tabla 9. Valores de la temperatura de la electrobomba por nivel de carga	41
Tabla 10. Resumen de pruebas termográficas	41
Tabla 11. Datos técnicos y operativos de la bomba centrífuga	41
Tabla 12. Tiempos de reparación (TTR) de la electrobomba centrífuga	42
Tabla 13. Tiempo de reparación (TTR) inicial	42
Tabla 14. Tiempo nominal total (TNT) y tiempo entre fallas (TBF) inicial	44
Tabla 15. Tiempo medio para reparar (MTTR) y entre fallas (MTBF) inicial	45
Tabla 16. Tasa de operación (MOR) y Tasa de reparación (MRR) inicial	46
Tabla 17. Comparativo del TTR por fallas por empuje axial y diversas fallas	46
Tabla 18. TTR inicial y TTR estimado por desviación estándar	47
Tabla 19. TNT, TBF, MTBF, MTTR, MOR, MRR iniciales y estimados	49
Tabla 20 Simulación de la confiabilidad en el tiempo	50

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diseño de investigación	11
Figura 2. Confiabilidad de la electrobomba	17
Figura 3. Velocidad de vibración de rodamientos en el lado de la bomba	37
Figura 4. Velocidad de vibración de rodamientos en el lado del motor	38
Figura 5. Aceleración de vibración del eje de transmisión motor-bomba	39
Figura 6. Desplazamiento por vibración mecánica de la electrobomba	40
Figura 7. Tiempo de reparación de la electrobomba	45
Figura 8. Tiempo entre fallas de la electrobomba	45
Figura 9. Tiempo de reparación por fallas de temperatura y vibración	47
Figura 10. Simulación del TTR con la implementación del plan de mantenimiento predictivo	48
Figura 11. Simulación de la frecuencia con la implementación del plan de mantenimiento predictivo	48
Figura 12. Simulación de la confiabilidad con la implementación del plan de mantenimiento predictivo	50



## RESUMEN

El presente estudio de investigación, tuvo como objetivo: Diseñar un plan de mantenimiento predictivo por termografía y vibración para mejorar la confiabilidad en electrobombas de un ingenio azucarero. La metodología de la investigación fue aplicada con diseño no experimental. Se determinó el estado actual del mantenimiento predictivo de la electrobomba, mediante las técnicas predictivas: termografía y vibración, encontrando un mal estado con un 57%. Se estableció que el estado de la confiabilidad de la electrobomba del ingenio azucarero, tiene una condición mala con un porcentaje de 58%. Se determinó analíticamente la confiabilidad de la electrobomba por el método LogNormal con la implementación del mantenimiento predictivo encontrando que la confiabilidad aumento de 83.98% a un 94.24%, con un incremento de 10.26%. El cual es aceptable para la electrobomba y para la empresa. El presupuesto económico para la implementación del mantenimiento predictivo por termografía y vibración asciende a un monto de 28350.00 soles, de los cuales el 27% se designa en costos de análisis termográficos, el 35% en análisis vibracional y el 38% en costos de mano de obra, concluyendo que la implementación de un mantenimiento predictivo por termografía y vibración, incrementa la confiabilidad de la electrobomba.

**Palabras clave:** Termografía, vibración mecánica, mantenimiento predictivo, electrobombas, confiabilidad.

## ABSTRACT

The objective of this research study was: Design a predictive maintenance plan by thermography and vibration to improve the reliability of electric pumps in a sugar mill. The research methodology was applied with a non-experimental design. The current state of the predictive maintenance of the electric pump was determined, through predictive techniques: thermography and vibration, finding a poor state with 57%. It was established that the state of the reliability of the electric pump of the sugar mill, has a bad condition with a percentage of 58%. The reliability of the electric pump was analytically determined by the LogNormal method with the implementation of predictive maintenance, finding that the reliability increased from 83.98% to 94.24%, with an increase of 10.26%. Which is acceptable for the electric pump and for the company. The economic budget for the implementation of predictive maintenance by thermography and vibration amounts to an amount of 28350.00 soles, of which 27% is designated in thermographic analysis costs, 35% in vibration analysis and 38% in labor costs. work, concluding that the implementation of predictive maintenance by thermography and vibration, increases the reliability of the electric pump.

**Keywords:** Thermography, mechanical vibration, predictive maintenance, electric pumps, reliability.

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad internacional, el mantenimiento es la actividad industrial que define la competitividad, efectividad y productividad de una organización (Kumar, y otros, 2020), optimizando también de manera indirecta los recursos humanos, mientras se reducen las fallas en un equipo, máquina o elemento de máquina (Gazzar, y otros, 2018). El mantenimiento de hoy en día, no solo reduce los costos operativos, si no también se emplea como una forma de mitigación de accidentes y reducción del impacto ambiental (Amador, y otros, 2020). Pero muy a pesar de los grandes resultados positivos que genera la implementación de planes de mantenimiento en una organización, solo el 34% del sector industrial lo aplica eficientemente (Shengnan, y otros, 2020), porque la gran mayoría solo aplica únicamente un mantenimiento de proveedores, los cuales son eficientes durante los primeros años de funcionamiento del equipo (Wavel, y otros, 2022). Por tal razón las empresas que son consecuentes con la aplicación de un correcto mantenimiento, buscan técnicas que ayuden a reducir los impactos de fallas en sus equipos, como la termografía y vibración, siendo estas las técnicas más utilizadas del mantenimiento predictivo (Marinescu, y otros, 2020). Pero es preocupante que solo el 28% del sector industrial solo aplique dentro de su gestión de mantenibilidad la termografía (Jia, y otros, 2020) y 11% el análisis vibracional (Luo, y otros, 2021).

En toda empresa industrial es infaltable que, en su red de producción, no cuente con una bomba centrífuga, por lo cual este tipo de equipos para muchas empresas reflejan un equipo crítico y su productividad depende de su correcto funcionamiento (Yudhistira, y otros, 2018). En el sector agroindustrial, minero y petrolero, las bombas centrífugas son considerados como uno de los equipos de mayor jerarquía en las acciones y tareas de mantenimiento (Corley, 2020). Por tales razones estudios de ingeniería de mantenimiento han concluido que una bomba centrífuga dentro de sus planes de mantenimiento debe contar con una gestión de activos analizados mediante las técnicas de termografía y vibración (Kentpark, 2019). Donde de la totalidad de fallas que pueden producirse en una bomba centrífuga el 65% se deben a problemas por incrementos de temperatura en sus elementos y el 23% a fallas de desplazamiento vibracional y un 12% debido a fallas eléctricas (Hassan, y otros, 2020). Las bombas centrífugas en la

industrial actual, tienen una vida útil entre a 20 a 40 años (Sousa, y otros, 2019). En los primeros años de funcionamiento los indicadores de gestión como la disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad se mantienen dentro de los controles normales, es decir dentro del tiempo de garantía que el proveedor establece (Alshaari, y otros, 2021). Luego de pasado ese tiempo los indicadores de gestión, empiezan a decrecer porcentualmente, necesitando la intervención de una gestión inteligente de mantenimiento (Pitaloka, y otros, 2020), donde el principal indicador de gestión de mantenimiento que es afectado es la confiabilidad operacional (Olabisi, y otros, 2020). En empresas donde su productividad depende del buen desempeño de sus bombas centrifugas estas deben tener una confiabilidad operacional en el rango de 85 a 95%, según sea el caso de la organización (Oshurbekov, y otros, 2021).

La empresa agroindustrial Casa Grande S.A.A, ubicada en el distrito del mismo nombre, provincia de Ascope, departamento de La Libertad. En su proceso productivo cuenta con una red de 19 bombas centrifugas radiales de 30 HP, las cuales inyectan agua industrial continuamente a un condensador, para enfriar el vapor que es evacuado por turbinas de generación de energía eléctrica. Las bombas trabajan en conjunto con 7 torres de enfriamiento, las cuales refrigeran el agua para que éstas a su vez puedan enfriar el vapor. Luego el agua al pasar por el condensador se calienta y esta se enfría nuevamente al pasar por las torres, cumpliéndose de esta manera constantemente un ciclo termodinámico. Y es aquí la importancia que cumplen estas bombas, que cuando presentan fallas, no se puede enfriar eficientemente el vapor de escape de las turbinas, disminuyendo la capacidad de producción de energía eléctrica de dichas turbinas, afectando a todos los equipos que requieren de flujo eléctrico, trayendo pérdidas económicas a la empresa. Al suscitarse estos problemas la empresa se conecta al SEIN (Sistema Eléctrico Interconectado Nacional) para poder cumplir con la demanda eléctrica que requiere la planta, pagando entre 500 a 1000 \$/MWh consumido. Si el sistema de enfriamiento falla conlleva a una pérdida económica en promedio de 8000 \$/hora. La empresa ha registrado que el 70% de las fallas se deben a recalentamientos, el 20% a fallas vibracionales y el 10% restante a problemas de aislamiento y conductores. Pero a pesar que la empresa cuenta con estos reportes, no se toman las acciones pertinentes, no existiendo un análisis de gestión de mantenimiento en termografía y vibración.

Finalmente, este informe de investigación tiene como finalidad dar un aporte científico respecto a establecer una nueva metodología de análisis en conjunto de dos técnicas predictivas como la termografía y vibración, cuyas técnicas actualmente son empleadas en forma separadas en la gestión de mantenimiento de bombas centrífugas. Pero que sí, se gestionan en conjunto, pueden mitigar la gran cantidad de fallas mecánicas y eléctricas en cualquier equipo electromecánico.

La realidad problemática expuesta conlleva a plantear la siguiente **formulación del problema general**: ¿Cuál es el impacto de un plan de mantenimiento predictivo por termografía y vibración en la mejora de la confiabilidad en electrobombas de un ingenio azucarero? Y como problemas específicos tenemos: ¿Cuál es el estado del plan de mantenimiento predictivo de las electrobombas de un ingenio azucarero?, ¿Cuál es el estado actual de la confiabilidad de las electrobombas del ingenio azucarero?, ¿Cuánto sería la confiabilidad con la implementación del mantenimiento predictivo? ¿Cuál sería el presupuesto para la aplicación de un plan de mantenimiento predictivo en las electrobombas?

Para dar respuesta a la formulación del problema, se plantea la siguiente **hipótesis**: El Diseño de un plan de mantenimiento predictivo por termografía y vibración mejorará la confiabilidad en electrobombas de un ingenio azucarero. La investigación tiene **justificación** desde el enfoque *económico*, la confiabilidad operacional de las electrobombas está relacionada directamente con los costos de operación y mantenimiento, generando un beneficio útil para la empresa y para otras que cuenten con sistema de enfriamiento de vapor. Desde el enfoque *social*, se tendrá un mayor control y planificación del mantenimiento de las electrobombas, lo cual conlleva a tener un mejor clima laboral, asimismo reduciendo los posibles accidentes ocasionados por estos equipos. Desde el enfoque *institucional* contribuye a mejorar el sistema de enfriamiento en una empresa azucarera, empleando las técnicas: termografía y vibración, para dar solución a una problemática carente en este sector, sirviendo de base y sustento de investigación para futuros estudios, es decir el conocimiento científico que tiene como aporte esta investigación es la aplicación del análisis de la termografía y vibración como un conjunto de gestión de

mantenimiento, como una metodología unificada, generando una nueva metodología en el control de mantenimiento de bombas centrifugas industriales, para mantener en valores óptimos el indicador confiabilidad operacional. Desde el enfoque ambiental, una buena planificación del mantenimiento en las electrobombas, permite la reducción de las pérdidas de calor al medio ambiente. Para dar respuesta a la problemática, se plantea el siguiente **objetivo general**: Diseñar un plan de mantenimiento predictivo por termografía y vibración para mejorar la confiabilidad en electrobombas de un ingenio azucarero. Y para lograr el desarrollo del objetivo general, se proyectan los sucesivos **objetivos específicos**: (1) Determinar el estado actual del mantenimiento predictivo por termografía y vibración de la electrobomba de un ingenio azucarero (2) Determinar el estado de la confiabilidad de la electrobomba del ingenio azucarero. (3) Determinar la confiabilidad de la electrobomba por el método LogNormal con la implementación del mantenimiento predictivo. (4) Elaborar un presupuesto económico para la aplicación del plan de mantenimiento predictivo en la electrobomba.

## II. MARCO TEÓRICO

La investigación encuentra sustentación científica en los consecutivos **antecedentes** internacionales y nacional, los cuales son una recopilación de revistas indexadas y tesis de postgrado.

Los investigadores (Yudhistira, y otros, 2018), realizaron un diagnóstico de fallas a una bomba centrífuga mediante imágenes termográficas y análisis de Vibraciones. La metodología utilizada aplicada – experimental. La muestra fue una bomba centrífuga radial de 42 hp. Los autores determinaron mediante el análisis termográfico que las fallas por temperatura se deben a la mala selección de rodamientos, exceso de velocidad de rotación y potencia mecánica no adecuada, donde la temperatura crítica registrada fue de 54°C, donde el valor máximo permitido es 45°C. Y mediante el análisis de vibración se encontró una velocidad RMS de 3.9 mm/s, el cual no se encuentra en el rango de diseño de la bomba el cual contempla valores entre 1.6 a 3.1 mm/s, donde las fallas por vibración son ocasionadas por el empuje axial de la bomba, velocidad de rotación y mala selección de rodamientos.

De la misma manera, los autores (Xiaohui , y otros, 2021), realizaron un análisis de las características vibratorias de bombas centrífugas. La metodología utilizada fue experimental. La muestra estuvo constituida por 14 bombas centrífugas de 25 hp. Los autores determinaron mediante un análisis causa – efecto, del diagrama de Ishikawa que el 39% de las fallas son producto de la vibración mecánica, y mediante el instrumento vibrómetro se encontró con valores de velocidad de vibración crítica entre 2.1 a 3.7 mm/s. Los autores propusieron medidas correctivas mediante 12 actividades predictivas, para obtener valores de vibración entre 1.2 a 3 mm/s por norma. Permitiendo de esta manera un ahorro del 22% de los costos de operación.

Mientras los investigadores (Jia, y otros, 2020), realizaron un diseño de optimización de una estación de bombeo, mediante el análisis termográfico para mejorar los costos de operación. La investigación fue experimental. La muestra estuvo constituida por 7 bombas centrífugas mixtas. Los autores determinaron que la reducción de la temperatura de operación del equipo depende de una

buena mantenibilidad de lubricación de los rodamientos y de una buena selección de rodamientos, según su capacidad dinámica, donde se tenga en cuenta la velocidad crítica de rotación del eje. Teniendo en cuenta que los autores encontraron una temperatura de operación excesiva de 68°C. Respecto al motor el calentamiento se debe a fallas en el termostato, el cual no resiste temperaturas sobre los 62°C. Los autores realizaron un plan de acciones predictivas contribuyendo a una reducción del 42% de las fallas.

Por otro lado, los investigadores (Alshaari, y otros, 2021) realizaron un análisis de la confiabilidad en bombas de agua. La metodología de la investigación fue aplicada-experimental. La muestra estuvo formada por 18 bombas centrífugas radiales. Los autores mediante el análisis de parámetros de Weibull determinaron que la confiabilidad operacional promedio de las bombas fue 85.41% y mediante la estimación LogNormal obtuvieron 84.91%, lo cual corrobora que la confiabilidad es crítica para la empresa. Para lo cual se realizó un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad basado en planes preventivos y predictivos, reduciendo las fallas en un 31%, lo cual permitió un incremento de la confiabilidad a un valor de 92.44%, valor que reduce en un 33% los costos de mantenimiento de las bombas centrífugas.

El autor (Corley, 2020), realizó un análisis a los problemas vibratorios en grandes bombas y motores eléctricos. La metodología de investigación fue preexperimental. La muestra estuvo comprendida por electrobombas axiales en el rango de potencias de 80 a 90 HP. El autor realizó un análisis causa – raíz a las diferentes fallas de las electrobombas, encontrando 17 fallas potenciales en la bomba y 12 fallas en los motores eléctricos, las cuales están relacionadas con la vibración mecánica. Donde las fallas potenciales críticas perjudican a los elementos como: eje de rotación, chumaceras, carcasa, termostato, empaquetaduras, estator, rotor y conductores eléctricos. Los cuales registran fallas a partir de una velocidad de vibración superior a 3 mm/s. Por tal razón el autor indicó que una buena selección de estos elementos dependiendo de los parámetros de operación de la bomba, conllevan a tener velocidad de vibración bajas, reduciendo hasta en 70% las fallas por vibración mecánica.



Los investigadores (Gazzar, y otros, 2018) realizaron un análisis de vibración y termografía infrarroja para evaluar problemas de desalineación en bombas. La metodología de investigación fue preexperimental. La muestra estuvo formada por bombas centrifugas axiales de 15 a 30 KW. Los autores determinaron que la temperatura inicial a la cual trabajan las bombas es 69.40°C, donde la temperatura permitida es de 50°C. Y en el análisis de vibración encontraron una velocidad RMS de 4.1 mm/s, donde el valor máximo permitido es 3.2 mm/s. Donde estos problemas están relacionados al alineamiento de los rodamientos. Por lo cual los autores plantearon la utilización de rodamientos rígidos de bolas, con factores de seguridad superiores a 4, donde la carga dinámica triple la capacidad de carga de trabajo en operación del rodamiento. Obteniendo de esta manera una reducción de la velocidad de vibración en un 74%, para evitar de esta manera drásticamente el desalineamiento.

Los autores (Hassan, y otros, 2020), realizaron un análisis termográfico a una electrobomba. La metodología de investigación fue aplicada experimental. La muestra estuvo formada por 1 bomba centrifuga radial de 20 hp. Los autores mediante la utilización de una cámara termográfica determinaron los puntos calientes de la superficie de la electrobomba, donde la temperatura mínima registrada fue 28°C y la máxima encontrada 66°C. La máxima registrada fue localizada en el área de trabajo de los rodamientos del motor eléctrico. Para lo cual se realizó un diagnóstico a los rodamientos de bolas de una hilera, los cuales fueron cambiados por rodamientos rígidos de bolas de dos hileras de mayor capacidad dinámica, conllevando a una reducción de la temperatura a valores entre 44 a 46°C. Reduciendo de esta manera el 28% de los costos de mantenimiento ocasionados por fallas de temperatura.

También (Kentpark, 2019), realizó un análisis a los problemas de desequilibrio en motores eléctricos y bombas centrifugas mediante la técnica de vibración. La metodología de investigación fue preexperimental. La muestra estuvo formada por bombas centrifugas radiales y mixtas entre las potencias de 20 a 40 Hp. El autor determinó que la velocidad de vibración RSM en la bomba es de 4.2 mm/s y en el motor eléctrico 3.6 mm/s, los cuales no se encuentran en el rango de diseño por norma el cual debe fluctuar entre 1.5 a 3.1 mm/s. Por lo cual el autor

procedió a realizar un recambio del diámetro del eje de transmisión, chumaceras y un control adecuado de los parámetros de operación: caudal y potencia. Logrando reducir la velocidad de vibración en la bomba a un valor promedio de 1.8 mm/s y en el motor 2.1 mm/s.

Mientras (Luo, y otros, 2021), realizó un análisis de vibración en sellos mecánicos de una bomba centrífuga bajo el grado de desgaste y daño. La metodología de investigación fue aplicada experimental. La muestra estuvo formada por 1 bomba centrífuga mixta de 25 hp. Los autores encontraron que una buena selección de los sellos mecánicos, contribuye a reducir en un 45% la vibración mecánica. Reduciendo en un 33% las fallas producidas por vibración mecánica. Y de esta manera proteger de los efectos excesivos de vibración a los elementos: eje de potencia, rotor, carcasa, estator y chumaceras. Los cuales representan en promedio el 45% de los costos de mantenimiento de una electrobomba.

Finalmente, los autores (Shaneza, y otros, 2019) realizaron una revisión del mantenimiento centrado en la confiabilidad de electrobombas centrífugas. La metodología de investigación fue preexperimental. La muestra estuvo formada por 14 bombas centrífugas de 30 hp. Los autores emplearon la herramienta LogNormal para determinar la confiabilidad inicial, encontrando un valor de 81.11%, valor crítico para la empresa. Para lo cual se tomaron medidas preventivas y predictivas, donde se plantearon 17 actividades principales, para reducir en un 46% la cantidad de fallas críticas. Lo cual conlleva a incrementar la confiabilidad a un valor promedio de 89.10%. De esta manera los autores estimaron que la empresa tendría una reducción del 39% de los costos de mantenimiento relacionados a las fallas de las electrobombas.

La termografía es una técnica que permite cuantificar los puntos calientes a una determinada distancia de un equipo, sin necesidad de paralizar ni tener contacto con el equipo (Hassan, y otros, 2020). Asimismo, también la termografía infrarroja se define como el mecanismo de utilizar como herramienta una cámara termográfica para lograr detectar el calor emitido por radiación de un sólido, y de esta manera se puede cuantificar la temperatura y se puede mostrar mediante una imagen de distribución de temperatura denominada termograma

(Kumar, y otros, 2020). La variable “Termografía” en electrobombas, tiene dimensiones como: emisividad, lubricación, velocidad de rotación, potencia operativa, temperatura en rodamientos y flujo volumétrico (en caso de equipos como bombas) (Caizaluisa, 2021).

La vibración mecánica, es aquella acción que permite cuantificar la velocidad y aceleración vibratoria que sufre una máquina o elemento rotatorio frente a la presencia de cargas o esfuerzos internos y externos (Corley, 2020). También la vibración mecánica es aquel movimiento de un sólido alrededor de su punto de estabilidad (equilibrio), lo cual conlleva a transmitir esta energía a otras partes de dicho sólido, lo cual puede conducir a daños o fallas (Kentpark, 2019). Las dimensiones de la “vibración mecánica” en electrobombas son: velocidad de vibración, frecuencia, aceleración de vibración, velocidad de rotación y geometría del eje de rotación (Camponogara, y otros, 2019).

Emisividad: es la cuantificación de medida de energía infrarroja emitida por un sólido, donde la energía infrarroja depende del flujo de calor (Baena, 2019).

Lubricación: es la operación para reducir la fricción entre dos sólidos, para evitar el desgaste entre ambas piezas, donde el indicador fundamental es la viscosidad (Caizaluisa, 2021).

Potencia mecánica: es la potencia producida en el eje de un motor, para producir movimiento en una máquina conducida, su valor depende de la potencia nominal (Pitaloka, y otros, 2020).

Velocidad de rotación: es la velocidad de giro de un eje o árbol de transmisión, está limitado a la resistencia del material y depende las RPM (revoluciones por minuto) máximas (Wavel, y otros, 2022).

Flujo volumétrico: es la cantidad de volumen de un líquido sobre un sección o superficie durante un determinado tiempo, donde el indicador principal es el caudal (Villamarin, 2022).

Velocidad y aceleración de vibración: es la variación longitudinal en un eje vertical, respecto al punto de equilibrio de un eje de rotación, teniendo como indicador a la longitud de onda (Pencue, y otros, 20210).

La confiabilidad operacional, de un equipo o sistema es un conjunto de acciones del mantenimiento que se aplican de manera sistemática, basadas en el análisis y diagnóstico, para que de esta manera los activos físicos puedan cumplir las tareas asignadas en un tiempo establecido (Alshaari, y otros, 2021). También es la probabilidad porcentual estadística para que un equipo trabaje continuamente sin interrupciones bajo ciertos parámetros de operación en un determinado tiempo (Olabisi, y otros, 2020). En el caso de la “confiabilidad operacional” para electrobombas tiene las siguientes dimensiones: frecuencia de averías, tiempo medio entre averías, tiempo medio en reparaciones y tiempo nominal requerido (tiempo estimado de operación) (Yudho, y otros, 2022). La confiabilidad operacional, se puede determinar mediante la siguiente expresión matemática (Yorlan, y otros, 2020):

$$C(t) = \left[ e^{-\frac{T}{100 * n * MTBF_{GLOBAL}}} \right] * 100\% \quad (1)$$

donde  $C(t)$  es la confiabilidad operacional (%),  $T$  es el tiempo nominal (h/año),  $n$  es la cantidad de equipos intervenidos y  $MTBF_{GLOBAL}$  es el tiempo medio global entre averías (h/avería).

$$MTBF_{GLOBAL} = \frac{TBF}{i} \quad (2)$$

donde  $i$  es la frecuencia de averías en un determinado tiempo nominal

Cabe precisar que la ecuación matemática  $C(t)$  para determinar la confiabilidad operacional, está basada en la metodología estadística LogNormal, la cual se aplica a equipos que trabajen en operación continua, sin interrupción (24h/día). Además, es el método más acertado para calcular la confiabilidad.

Tiempo nominal ( $T$ ): es el tiempo previsto para que un equipo trabaje sin que se genere ningún tipo de falla o avería, depende de dos tiempos en general: tiempo útil ( $TBF$ ) que es el tiempo de trabajo real de un equipo y tiempo entre fallas ( $TTR$ ) que es el tiempo de reparación (Shaneza, y otros, 2019).

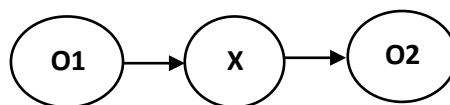
Tiempo medio entre fallas ( $MTBF_{GLOBAL}$ ): es un valor promedio que cuantifica matemáticamente el tiempo promedio en que un equipo está libre de fallas (Arata, 2018).

### III. METODOLOGÍA

#### 3.1. Tipo y diseño de investigación

La investigación es de tipo **aplicada** de nivel descriptiva, según (Hernández, y otros, 2018) este tipo de investigaciones se fundamenta en dar solución a un problema específico o puntual de un fenómeno, para lo cual se recurre a la utilización leyes y teorías científicas para su sustentación. Por lo consiguiente la investigación es aplicada porque busca solucionar un problema en específico del sector agroindustrial azucarero, como el aumento de la confiabilidad operacional en electrobombas por fallas relacionadas a exceso de temperatura y vibración, para lo cual se utilizarán las leyes y teorías de la ingeniería de mantenimiento.

El diseño de investigación es **no-experimental**, según (Baena, 2019) este tipo de diseños son el principio o base científica de una investigación, donde no se requiere manipular deliberadamente las variables de estudio, es decir se sustenta en la observación del fenómeno tal como sucede en su contexto real, para luego mediante un análisis científico de los sucesos, generar las primeras soluciones de la problemática. Por lo deducido el diseño es no-experimental, porque busca sustentar para base científica el análisis de las variables: “Análisis termográfico y vibracional” y “Confiabilidad operacional” para reducir los problemas de fallas relacionados al mantenimiento de las electrobombas en ingenios azucareros.



**Figura 1:** Diseño de investigación

Donde: O1 medición de la variable independiente, O2 medición de la variable dependiente, X2 variable independiente.

### **3.2. Variables y operacionalización**

**Variable independiente:** Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo es un conjunto de técnicas que se aplican a un activo físico o máquina, con la finalidad de detectar fallas prematuras, aumentando la vida útil, reduciendo costos económicos e incrementando la confiabilidad (Luo, y otros, 2021).

**Variable dependiente:** Confiabilidad

La confiabilidad operacional, es el principal indicador de gestión de mantenimiento industrial, es la probabilidad estadística que un activo físico o máquina desempeñe un determinado trabajo bajo ciertas condiciones especificaciones sin presentar alguna falla durante un determinado periodo de tiempo (Jia, y otros, 2020)

### **3.3. Población, muestra, muestreo, unidad de análisis**

**Población:**

Electrobombas del sistema de enfriamiento de ingenios azucareros de La Libertad.

**Criterios de inclusión:**

- Electrobombas que trabajen en área de enfriamiento de vapor de escape de turbinas de generación eléctrica de ingenios azucareros.
- Electrobombas de clasificación según su flujo: radial
- Electrobombas de operación continua (24 horas/día)
- Electrobombas con potencias superiores o iguales a 30 HP.
- Electrobombas que no hayan superado el límite de su vida de operación, según su fabricante o proveedor.
- Electrobombas que trabajen con fluidos incomprensibles.

**Criterios de exclusión:**

- Electrobombas de clasificación según el tipo de fluido: axial y Mixto
- Electrobombas de operación intermitente
- Electrobombas que trabajen con fluidos muy viscosos.

**Muestra:**

Electrobomba de 30 HP de flujo radial del sistema de enfriamiento de la empresa Casa Grande del departamento de La Libertad.

**Muestreo:**

La investigación contempla un muestreo no probabilístico (por conveniencia)

**Unidad de análisis:**

La unidad de análisis es una electrobomba radial de 30 HP de la empresa Casa Grande, el cual contempla el análisis de los elementos mecánicos y eléctricos que presenten fallas debido a factores producto de la temperatura y vibración.

**3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad**

*Tabla 1: Técnicas e instrumentos del estudio*

<b>Técnica</b>	<b>Instrumento</b>
Análisis documental	Fichas de Registro

*Fuente: Elaborado por el autor*

**3.5. Procedimiento**

La investigación contempla el siguiente procedimiento respecto a la recolección de la información mediante las técnicas e instrumentos de datos:

- Se solicitará permiso a la empresa Casa Grande, para la aplicación de los instrumentos de recolección de datos, mediante una solicitud dirigida al área de mantenimiento.
- Se solicitará el permiso a los ingenieros supervisores del área de mantenimiento, para la aplicación de las fichas de registro, la cual consta de las dimensiones de las variables, basándose en la recolección de datos de vibración y temperatura de las electrobombas. Adicionalmente a las fallas mecánicas y eléctricas de la bomba centrífuga de muestra, con sus correspondientes tiempos de mantenimiento y frecuencias de fallas.

### **3.6. Método de análisis de datos**

La investigación contempla la utilización de hojas de cálculo estadístico del software Excel, para el análisis de los datos que se recolecten por los instrumentos: ficha de observación y registro. Los datos recolectados serán presentados en tablas de frecuencia y gráficos estadísticos (circulares, barras y de dispersión de puntos), lo cual conllevará a presentar los resultados de cada objetivo específico de esta investigación de manera metódica y coherente para una mejor comprensión.

El software Excel se empleará para la simulación del cálculo del indicador de mantenimiento confiabilidad operacional, para cuantificar su valor inicial y en mejora. El mismo software también se utilizará en la elaboración de la propuesta económica para la viabilidad del análisis termográfico y vibracional en electrobombas.

### **3.7. Aspectos éticos**

El autor de esta investigación se compromete a respetar no incurrir en el plagio académico, respetando de esta manera la intelectualidad académica por otros autores, sometiéndose de esta manera a las normativas y dictámenes establecidos por la Universidad Cesar Vallejo filial Trujillo. También se compromete a proteger la confidencialidad de la información entregada por la empresa para la elaboración de la investigación.



## IV. RESULTADOS

**Objetivo específico 1:** Determinación el estado actual del mantenimiento predictivo por termografía y vibración de la electrobomba de un ingenio azucarero.

**Tabla 2**

*Estado actual del mantenimiento predictivo de las electrobombas*

Variable/dimensión	Estado	ni	%
Variable 1: Mantenimiento predictivo	Bueno	13	15%
	Regular	25	28%
	Malo	51	57%
Dimensión: Vibración mecánica	Bajo	6	13%
	Medio	13	29%
	Alto	26	58%
Dimensión: Temperatura infrarroja	Bajo	3	20%
	Medio	4	27%
	Alto	8	53%
Dimensión: Tipos de falla	Aceptable	4	14%
	Reducible	8	27%
	Inaceptable	17	59%

Nota. ni: número de pruebas predictivas

### **Interpretación:**

Según lo verificado el estado actual de mantenimiento predictivo de la electrobomba 125 - 315 Hidrostal, tiene un estado malo con un 57%. Asimismo, en la dimensión vibración mecánica se realizaron 15 pruebas con 3 resultados por cada prueba, teniendo un total de 45 pruebas, de lo cual se concluye que el estado de vibración es alto con un 58%. También respecto a la dimensión temperatura infrarroja se realizaron 15 pruebas de lo cual se puede concluir que la temperatura infrarroja es alta con un 53%. Finalmente, en cuanto a la dimensión tipos de fallas, se encontraron 29 fallas por vibración y temperatura, de los cuales el 14% son fallas aceptables, el 27% son reducibles y el 59% son de clasificación inaceptable.

**Objetivo específico 2:** Determinar el estado de la confiabilidad de la electrobomba del ingenio azucarero.

**Tabla 3**

*Estado de la confiabilidad de las electrobombas del ingenio azucarero.*

Variable/dimensión	Valor	Estado	ni	%
Variable 2: Confiabilidad	83.98%	Bueno	16	15%
		Regular	32	30%
		Malo	58	55%
Dimensión: Tiempo de mantenimiento	414.82 horas	Bajo	5	10%
		Medio	18	38%
		Alto	25	52%
Dimensión: Frecuencia de fallas	200 veces/año	Bajo	11	19%
		Medio	14	24%
		Alto	33	57%

Nota. ni: fallas en relación al tiempo y frecuencia

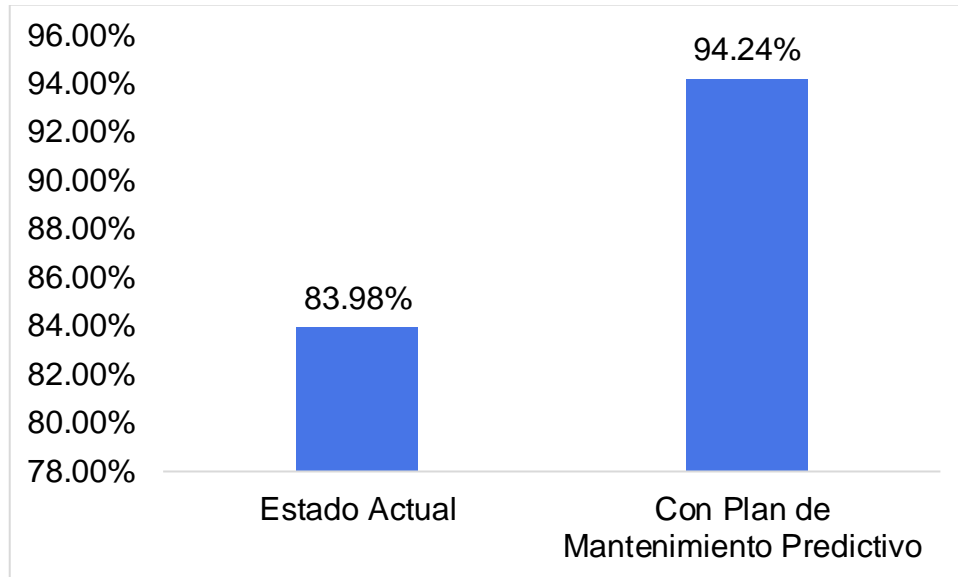
**Interpretación:**

Según lo verificado el estado actual de la confiabilidad de la electrobomba 125 - 315 Hidrostal, tiene una condición de mala con un porcentaje de 55%, representando una confiabilidad del 83.98%. Respecto a la dimensión tiempo de mantenimiento respecto al tiempo para reparar, útil y total, se considera malo con un 52%, lo cual se refleja en 414.82 horas perdidas al año. Y correspondiente a la dimensión frecuencia de fallas tiene una condición alta con un 57%, y esto se debe a la alta frecuencia de veces/año de ocurrencia de averías producto de la vibración y temperatura en los elementos principales de la bomba como eje de transmisión y rodamientos.

**Objetivo específico 3:** Determinar la confiabilidad de la electrobomba por el método LogNormal con la implementación del mantenimiento predictivo.

**Figura 2:**

*Confiabilidad de la electrobomba*



*Nota. La confiabilidad fue calculada mediante el método estadístico LogNormal*

**Interpretación:**

La confiabilidad actual de la electrobomba 125 - 315 Hidrostral, tiene una confiabilidad porcentual de 83.98%, pero con la implementación del mantenimiento predictivo esta mejoró en un 94.24%. Asimismo, la confiabilidad se calculó teniendo en cuenta que el plan de mantenimiento reducirá las fallas en condición inaceptable, frecuencia de fallas alta y tiempo de mantenimiento alto.

**Objetivo específico 4:** Elaborar un presupuesto económico para la aplicación del plan de mantenimiento predictivo de la electrobomba.

**Tabla 4**

*Presupuesto económico para la aplicación del plan de mantenimiento predictivo*

<b>Mantenimiento</b>	<b>Costo</b>	<b>%</b>
Mantenimiento termográfico	7730.00	27%
Mantenimiento vibracional	9820.00	35%
Costos de mano de obra	10800.00	38%
Total	28350.00	100%

**Interpretación:**

La implementación del plan de mantenimiento predictivo, tiene un presupuesto de 28350.00 soles, donde el mantenimiento termográfico se cotizó mediante una cámara infrarroja para detectar puntos calientes y para el mantenimiento vibracional se presupuestó las pruebas con un acelerómetro o vibrómetro. Asimismo, los costos de mano de obra son los más elevados con un 38% del presupuesto total, debido a que se requiere de personal calificado y certificado para la realizar de dichas pruebas.

## V. DISCUSIÓN

Se determinaron los requerimientos para el diseño del plan de mantenimiento predictivo por termografía y vibración de las electrobombas de un ingenio azucarero. Empezando, por el análisis de vibración el cual se dividió en velocidad y aceleración de vibración. La velocidad de vibración midió el balance y holguras en los rodamientos del lado del motor y del lado de la bomba. Mientras la aceleración se enfocó a la alineación del eje entre motor y bomba, es decir alineación entre rodamientos de la bomba y motor. También, los datos obtenidos fueron analizados y comparados a través de la Norma de vibración Internacional ADASH o ISO 10816. Donde dicha norma exige la prueba de 15 muestras o datos de vibración, con el equipo operando a la carga de trabajo (bajo condiciones normales de operaciones en el proceso productivo).

La Norma de vibración Internacional ADASH o ISO 10816, es la norma más actualizada para la comparación de los indicadores de velocidad y vibración, en equipos rotatorios. Esta norma reemplaza a las normas ISO 2372 e ISO 3945. Asimismo, esta norma solo se aplica a equipos rotatorios que superen los 15 KW de potencia nominal y tengan velocidades de rotación entre 120 a 15000 rpm. Respecto a la muestra de la presente investigación la electrobomba tiene una potencia nominal de 30 HP (22.40 KW) y con un velocidad de rotación de 1165 rpm. Estando dentro del margen de potencia y velocidad exigido por la norma.

La norma ISO 10816, indica 3 niveles de velocidad de vibración para equipos rotatorios que no superen los 1500 rpm: a) Velocidades de vibración aceptables de 0 a 1.5 mm/s, b) Velocidades de vibración media de 1.5 a 3 mm/s, c) Velocidades de vibración críticos de 3 a 6 mm/s. Y respecto a la aceleración de vibración: a) Aceleraciones de vibración aceptables de 0 a 0.3 g, b) Aceleraciones de vibración media de 0.3 a 0.5 g, c) Aceleraciones de vibración críticos de 0.5 a 3 g.

El análisis de vibración realizado en el lado de los rodamientos de la bomba, consto de 15 pruebas de vibración. Donde el sensor del instrumento vibrómetro, se ubicó en la carcasa (punto superior del mismo lado donde se ubican los rodamientos de la bomba). Las pruebas fueron realizadas en una operación continua de la bomba durante 24 horas. Donde cada prueba se realizó en un

rango de medición de frecuencia de 10 a 1000 Hz. Asimismo, en cada prueba realizada se obtuvo un valor promedio de la velocidad de vibración eficaz (RMS), entregado por el vibrómetro. Obteniendo que el valor de vibración más bajo es 2.6 mm/s y el más crítico 5.6 mm/s. Donde la norma indica que para valores superiores a 3 mm/s, la vibración se considera crítica y demanda de una intervención inmediata. De esta manera queda claro que la vibración en el lado de los rodamientos de la bomba, necesita de actividades de mantenimiento que ayuden a reducir estos valores críticos.

De la misma manera, se realizaron 15 pruebas de vibración. Ubicando el sensor del instrumento vibrómetro, en el punto superior de la carcasa del mismo lado donde se ubican los rodamientos del motor. Las pruebas fueron realizadas en una operación continua del motor durante 24 horas. Donde cada prueba se realizó en un rango de medición de frecuencia de 10 a 1000 Hz. Asimismo, en cada prueba realizada se obtuvo un valor promedio de la velocidad de vibración eficaz (RMS), entregado por el vibrómetro. También cabe precisar que el sensor del vibrómetro se ubicó en la carcasa en tres ángulos distintos (0°, 45° y 90°) respecto a los rodamientos, obteniendo 5 pruebas por cada ángulo, como lo exige la norma. Obteniendo un valor entre 2.9 y 4.7 mm/s. Como ya se indicó, para valores superiores a 3 mm/s, la vibración se considera crítica y demanda de una intervención inmediata. También cabe indicar, que los niveles de vibración en el motor son menores a los encontrados en el lado de la bomba, pero que ambos tienen clasificación crítica.

Luego para medir la vibración eficazmente en el eje, generada por el desalineamiento, se empleó como medida la vibración. En este elemento de máquina la norma indica no medir la velocidad RMS, si no, la aceleración, debido a que, en este elemento la velocidad es cambiante en intervalos de tiempo muy pequeños, cambiando en intervalos de décimas de segundo. Por lo cual la aceleración es el indicador más viable para medir la vibración en el eje de transmisión. Para la medición se ubicaron los sensores del vibrómetro en dos puntos: En el lado de la carcasa del motor y en el lado de la carcasa de la bomba. La cantidad de pruebas y la frecuencia fue la misma. Los resultados de la aceleración de vibración del eje, arrojaron un valor mínimo de 0.48 g y un máximo de 1.15 g. Donde la norma ISO 10816, especifica que para valores superiores a

0.5 g, se considera crítico. Por lo cual podemos indicar que la vibración generada en el eje de transmisión de la electrobomba en estudio requiere de una intervención de actividades de mantenimiento que ayuden a minimizar estos valores.

De la misma manera, para medir la vibración en términos de desplazamiento en milímetros, en las direcciones “x”, “y” y “z”, fue necesario colocar dos sensores de vibración en la carcasa del motor y la bomba, a la altura de los rodamientos. Los sensores fueron ubicados a un ángulo de 45° en ambas carcasas respecto al eje de transmisión, para una obtener una medición resultante del desplazamiento. Los resultados del desplazamiento vibracional, indicaron un que en la dirección horizontal (dirección en “y”), se origina el mayor desplazamiento vibracional con un valor mínimo de 1 mm y un máximo de 1.34 mm. También, el desplazamiento máximo que se origina en la dirección “x” es 0.89 mm y en la dirección “z” es 0.29 mm.

Por otro lado, el análisis termográfico, permitió obtener los puntos calientes o críticos de la electrobomba. Para lo cual fue necesario tomar 3 muestras, como lo exige la norma ISO 18434-1:2008. La muestras se realizan con la bomba en carga mínima, promedio y carga máxima, para obtener un valor de temperatura por cada estado de potencia. El instrumento utilizado fue una cámara termográfica. Donde la temperatura de la electrobomba depende la potencia, velocidad de rotación y corriente eléctrica, y esta varía dependiendo de la carga a la que está expuesta. Los resultados indicaron que a medida que la carga de la electrobomba aumenta, también lo hace la temperatura. Asimismo, se demuestra que la potencia, velocidad del motor y tensión, son proporcionales directas con la temperatura. Obteniendo una temperatura mínima de 38°C (la electrobomba trabaja el 5% en este estado), un promedio de 58°C (la electrobomba trabaja el 20% en este estado) y una temperatura máxima de 61°C (la electrobomba trabaja el 75% del tiempo en esta condición). La Norma indica que la temperatura adecuada en equipos rotatorios como electrobombas no debe superar los 50°C. Y esto se debe a los efectos causados por la vibración en los rodamientos, donde la fricción genera el incremento de temperatura. También cabe precisar que los puntos calientes fueron encontrados en los rodamientos, tanto del motor y de la bomba. La temperatura aumenta, debido a

los efectos de fricción entre el rodamiento y el eje de transmisión, donde el lubricante no es suficiente para equilibrar la temperatura y la fuerza de rozamiento, debido a los efectos de la vibración.

La investigación encuentra similitud con los investigadores Yudhistira et al. (2018), por que encontraron velocidades de vibración críticas superiores a 3.9 mm/s y una temperatura a máxima carga de 54°C, para una electrobomba de 42 HP. Donde en la presente tesis se encontró vibraciones críticas en el rango de 4.7 a 5.6 mm/s, y una temperatura máxima de 61°C, para la electrobomba de 30 HP.

La investigación también tiene similitud con el investigador Kentpark (2019), el cual analizó la vibración de electrobombas en el rango de potencia de 20 a 40 HP, obteniendo un valor máximo en el lado de la bomba de 4.2 mm/s y en el lado del motor 3.6 mm/s. En comparación a la presente investigación se obtuvo una velocidad de vibración en el lado de la bomba de 5.6 mm/s y en el lado del motor 4.7 mm/s.

De la misma manera, la investigación encuentra similitud con los investigadores Hassan et al. (2020), los cuales encontraron en las bombas centrifugas analizadas una temperatura de 66°C debido a los efectos de vibración, reflejando un valor crítico para la empresa, donde esta temperatura se registró en el punto de ubicación de los rodamientos. En comparación al presente estudio la temperatura máxima fue de 61°C, la cual se localizó en el punto de funcionamiento de los rodamientos y también es causa de la vibración mecánica.



## VI. CONCLUSIONES

- 6.1. Se determinó el estado actual del mantenimiento predictivo de la electrobomba, mediante las técnicas predictivas: termografía y vibración, encontrando un mal estado con un 57%. Asimismo, en la dimensión vibración mecánica el estado es alto con un 58%. También respecto a la dimensión temperatura infrarroja es alta con un 53%. Finalmente, en cuanto a la dimensión tipos de fallas, se encontró un 14% de fallas aceptables, el 27% son reducibles y el 59% son inaceptables.
- 6.2. Se estableció que el estado de la confiabilidad de la electrobomba del ingenio azucarero, tiene una condición mala con un porcentaje de 58%, lo cual representa una confiabilidad del 83.98%. Respecto a la dimensión tiempo de mantenimiento se considera malo con un 52%, debido a 414.82 horas pérdidas al año. Y correspondiente a la dimensión frecuencia de fallas tiene una condición alta con un 57%, y esto se debe a la alta frecuencia de veces/año de ocurrencia de averías producto de la vibración y temperatura en los elementos principales de la bomba como eje de transmisión y rodamientos.
- 6.3. Se determinó analíticamente la confiabilidad de la electrobomba por el método LogNormal con la implementación del mantenimiento predictivo encontrando que la confiabilidad aumento de 83.98% a un 94.24%, con un incremento de 10.26%. El cual es aceptable para la electrobomba y para la empresa.
- 6.4. El presupuesto económico para la implementación del mantenimiento predictivo por termografía y vibración asciende a un monto de 28350.00 soles, de los cuales el 27% se designa en costos de análisis termográficos, el 35% en análisis vibracional y el 38% en costos de mano de obra.

## VII. RECOMENDACIONES

- 7.1. Se recomienda realizar capacitaciones al personal de mantenimiento del área de enfriamiento de las electrobombas de la empresa Casa Grande, respecto al manejo de instrumentos y beneficios de las técnicas predictivas, vibración y termografía.
- 7.2. Se recomienda mantener los niveles de vibración mecánica de la electrobomba teniendo en consideración los rangos aceptables descritos en la norma de vibración internacional ADASH o ISO 10816.
- 7.3. Se recomienda mantener la temperatura infrarroja electrobomba, bajo los valores aceptables expuestos en la Norma de Supervisión del estado y diagnóstico de las máquinas por termografía ISO 18434-1:2008
- 7.4. Se recomienda un análisis de mantenimiento predictivo que incluya a todas las electrobombas de todas las áreas de la empresa Casa Grande, para proyectar de esta manera un mayor beneficio económico.

## BIBLIOGRAFÍA

ALSHAARI, H y Nor, M. 2021. *Reliability Analysis on Water Pumps in Water Supply System in Johor*. Batu Pahat, Malasia : Journal of Physics: Conference Series, 2021. pág. 8. ISSN: 1874 - 0120.

AMADOR, Luis, Martínez, José y Brown, Oscar. 2020. *New focus for the energy-economic analysis in the selection of the pressurized pipes*. Habana, Cuba : Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría", 2020. pág. 7. ISSN: 0215-2145.

ARATA, Alessio. 2018. *Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales*. Tercera. Nueva York : RIL Editores, 2018. pág. 521. Vol. II. ISBN: 9789562846585.

BAENA, Guillermina. 2019. *Metodología de la Investigación*. [ed.] 3. México : Grupo Editorial Patria, 2019. 9786077447481.

BUKOWITZ, David. 2018. *Análisis de Vibraciones en Máquinas: 15 Casos de Estudio*. Segunda. Madrid : CreateSpace Independent Publishing Platform, 2018. pág. 172. ISBN: 9781463568382.

CAIZALUISA, A. 2021. *Parameterization of a pump operating as a turbine "obtaining geometric model and planes*. Sevilla, España : Springer, 2021. ISSN: 856-895.

CAMPONOGARA, Giovani, y otros. 2018. *Dimensionless curves of centrifugal pumps for water supply systems: development and case study*. Madrid, España : Reed-Elsevier, 2018. ISSN: 785-010.

CAÑADA, Soriano y Royo, Pastor. 2019. *Termografía Infrarroja. Nivel II (Ensayos no destructivos - AEND)*. Tercera. Madrid, España : FC Editorial, 2019. pág. 520. Vol. III. ISBN: 978-8416671106.

CORLEY, J. 2020. *Vibrational problems of large vertical pumps and motors*. Saudi Arabia, Dhahran : Aramco's, 2020. ISSN: 1895-1121.

EJARANO, Daniel y Flóres, Camila. 2021. *Modification of the design of a centrifugal pump to reduce vibrations caused by turbulence*. Ciudad Real : Taylor & Francis, 2021. ISSN: 458-120.

FERRER, Eduardo. 2022. *Design and installation of a centrifugal pump system for the efficient irrigation of the mixed surface of a baseball field*. Sevilla, España : Reed-Elsevier, 2022. ISSN: 125-001.

FORERO, Jorge, Hernández, Brando y Sánchez, José. 2020. *CFD analysis of turbulent flows transported by centrifugal pumps under low Re numbers*. Granada : Reed-Elsevier, 2020. ISSN 0112-2154.

GAZZAR, Dalia y Hashim, Mofreh. 2018. *Vibration analysis and infrared thermography technique for evaluating misalignment problem*. Londres, Reino Unido : European Centre for Research Training and Development UK, 2018. pág. 18. ISSN: 2055-6551.

GUIMARAES, Roberto , Moreira, Ivenio y Pardal , Juan. 2022. *Energy and Exergy Analysis in a Centrifugal Pump Driven by a Diesel Engine Using Soybean Biodiesel and Mixtures with Diesel*. Barcelona : Reed-Elsevier, 2022. ISSN 4586-1085.

HASSAN, Abdelrahman, y otros. 2020. *Thermodynamic analysis of high-temperature pumped thermal energy storage systems: Refrigerant selection, performance and limitations*. Valencia, España : Elsevier Energy Reports, 2020. pág. 13. ISSN: 147–159.

HERNÁNDEZ, Roberto, Fernández, Carlos y Baptista, Pilar. 2018. *Metodología de la Investigación*. [ed.] 4. México : McGraw-Hill, 2018. ISBN:9781456223960.

JIA, Mingxing, Zhang, Jialun y Xu, Yuemei. 2020. *Optimization Design of Industrial Water Supply Pump Station Considering the Influence of Atmospheric Temperature on Operation Cost*. Shenyang, China : IEEE Access, 2020. pág. 11. ISSN: 021-304.

KENTPARK, S. 2019. *Determination of Imbalance Problem in Electric Motor and Centrifugal Pump by Vibration Analysis*. Turquía, Sakarya : Acta Physica Polonica, 2019. pág. 5. ISSN: 130-487.

KUMAR, Vinay y Ramana, V. 2020. *A review of methods on Condition Monitoring and Fault Diagnosis using IR Thermography—An Expert System approach*. India, Telangana : IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. pág. 8. ISSN: 042027.

LEITE, Jandecy, y otros. 2018. *Procedure to energetic analysis of centrifugal pumping systems*. Madrid, España : Reed-Elsevier, 2018. ISSN 0012-7353.

LING, Bai, y otros. 2019. *Vibration in a Multistage Centrifugal Pump under Varied Conditions*. China, Zhenjiang : Elsevier, 2019. ISSN: 2057031.

LUENGO, Jairo. 2021. *Creation of a graphic application for the characterization of a centrifugal pump with educational use*. Zamora : Wiley-Blackwell, 2021. ISSN 120-456.

LUO, Yin, y otros. 2021. *Analysis of Vibration Characteristics of Centrifugal Pump Mechanical Seal under Wear and Damage Degree*. China, Shenzhen : Hindawi Shock and Vibration, 2021. pág. 9. ISSN:6670-7410.

MARINESCU, Alexandru, Costinel, Teodor y Popescu, Alina. 2020. *Innovative, clean and non-invasive technology for infrared thermographic investigations applied to cylinders and pumps within hydrostatic drive systems*. Rumania,

Bucharest: Hydraulics and Pneumatics Research Institute, INOE 2000-IHP, 2020. pág. 9. ISSN:1020-1779.

NOROÑA, Bryan. 2020. *Parameterization of a pump operating as a turbine: creation of the mathematical model for loss analysis using python*. Girona : Reed-Elsevier, 2020. ISSN 489-662.

OLABISI, Sijibomi, Ukpaka, Chukwuemeka y Nkoi, Barinyima. 2020. *Application of Reliability Techniques to Evaluate Maintainability of Centrifugal Pump used for Petroleum*. Rivers State, Nigeria : Journal of Newviews in Engineering and Technology (JNET), 2020. pág. 11. ISSN:1574-5011.

OSHURBEKOV, Safarbek, y otros. 2021. *Improving Reliability and Energy Efficiency of Three Parallel Pumps by Selecting Trade-Off Operating Points*. Ekaterimburgo, Rusia : MDPI - Publisher of Open Access Journals, 2021. pág. 19. ISSN: 1297.

PENCUE, F, Potosi, A y León, J. 20210. *Thermographic analysis for the determination of critical points in mechanical and electrical equipment*. Zaragoza : Reed-Elsevier, 20210. ISSN: 0120-4211.

PITALOKA, Dewi y Koeshardono, Fachri. 2020. *Reliability and Life Data Analysis on the Components of Pump*. Bandung, Indonesia : Atlantis Press B.V, 2020. pág. 6. ISSN: 7815-5612.

SHANEZA, Fatma, Trika, Pitana y Nurhadi, Siswantoro. 2019. *Reviewing the Reliability-Centered Maintenance on Cooling Water Pump of LNG Production Company*. Surabaya, Indonesia : International Journal of Marine Engineering Innovation and Research, 2019. pág. 10. ISSN: 2548-1479.

SHENGNAN, Tang, y otros. 2020. *An Integrated Deep Learning Method towards Fault Diagnosis of Hydraulic Axial Piston Pump*. Zhenjiang, China : MDPI - Publisher of Open Access Journals, 2020. pág. 20. ISSN: 20-6576.

SOUSA, Paula, Santos, Ricardo y Kepler, Alexandre. 2019. *Multiobjective optimization of the operation of water distribution systems with variable speed pumps*. Brasilia, Brasil : Engenharia Sanitaria e Ambiental, 2019. pág. 14.

USQUIZA, Buenaventura. 2022. *Performance of a prototype hydraulic pump at different pipe diameters and singularities*. Palencia : Reed-Elsevier, 2022. ISSN 5689-8510.

VILLAMARIN, Edison . 2022. *Parameterization of a pump operating as Turbine: Simulation of the impeller and volute in stable state using OpenFOAM*. Badajoz : Reed-Elsevier, 2022. ISSN 5698-5621.

WAVEL, J y Ruggiero, T. 2022. *Condition Monitoring for Pumps*. EE. UU, Nueva Jersey : Proceedings of the ASME/NRC 2022, 2022. pág. 3. ISSN:2305-4511.

XIAOHUI , Luo, Jie, Yang y Li , Songa. 2021. *Analysis and research on vibration characteristics of nuclear centrifugal pumps at low flow rates*. Sanya, China : Elsevier Science Direct, 2021. pág. 16. ISSN: 1273-1282.

YORLAN, G, Borges, J y Alvarez, C. 2020. *Hydraulic evaluation of the seawater pumping system towards the white shrimp parent bank *Litopenaeus vannamei* in the UEB Yaguacam*. Zamora : Reed-Elsevier, 2020. ISSN 256-8956.

YUDHISTIRA, Agung, Widodo, Achmad y Haryadi, Gunawan. 2018. *Fault Diagnostic System Bearing Centrifugal Pump Using K-Means Method For Thermography Image And Signal Analysis Vibrations*. Indonesia, Semarang : MATEC Web of Conferences, 2018. pág. 6. ISSN: 8512-2202.

YUDHO, Eduardo, y otros. 2022. *A stable neuro-controller in real time to reduce the energy consumption in a centrifugal pump when faced with disturbances*. Almería : Wiley-Blackwell, 2022. ISSN 368-8952.

## ANEXOS

### Anexo 1.

#### Matriz de operacionalización de variables

Tabla 5.

#### Matriz de operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición Operacional	Dimensión	Indicador	Escala de medición
<b>Variable independiente:</b>  Mantenimiento predictivo	<b>El Mantenimiento Predictivo</b> es un conjunto de técnicas que se aplican a un activo físico o máquina, con la finalidad de detectar fallas prematuras, aumentando la vida útil, reduciendo costos económicos e incrementando la confiabilidad (Luo, y otros, 2021)	El mantenimiento predictivo por termografía y vibración, requiere de una serie de procedimientos metodológicos, ordenados y sincronizados, basados en un análisis vibracional, termográfico, de índice de riesgo para clasificación de fallas y criticidad de elementos de máquinas (Ejarano, y otros, 2021)	Vibración mecánica	Velocidad vibracional	De Razón
				Aceleración vibracional	
				Desplazamiento vibracional en X, Y y Z	
			Temperatura infrarroja	Potencia mecánica del motor	
				Velocidad del motor	
				Corriente eléctrica del motor	
Tipos de fallas	Nivel de criticidad	De razón			
	Nivel de riesgo				
	Nivel de MTTR				
<b>Variable dependiente:</b>  Confiabilidad	<b>La confiabilidad</b> , es el principal indicador de gestión de mantenimiento industrial, es la probabilidad estadística que un activo físico o máquina desempeñe un determinado trabajo bajo ciertas condiciones especificaciones sin presentar alguna falla durante un determinado periodo de tiempo (Jia, y otros, 2020)	La confiabilidad en electrobombas está relacionada con la frecuencia de averías, tiempo medio entre averías, tiempo medio en reparaciones y tiempo nominal requerido (tiempo estimado de operación) (Yudho, y otros, 2022).	Tiempo de mantenimiento	Tiempo para reparar	De Razón
				Tiempo útil	
				Tiempo total	
			Frecuencia de fallas	Frecuencia de reparaciones	
				Frecuencia de mantenimiento	
				Frecuencia no productiva	

**Anexo 2.**

**Instrumentos de recolección de datos**

**Tabla 6.**

**Ficha de registro de análisis vibracional**

<b>ORGANIZACIÓN/EMPRESA:</b> Ingenio Azucarero Casa Grande																
<b>EQUIPO:</b> Electrobomba centrífuga de flujo radial de 30 HP																
<b>ÁREA DE APLICACIÓN:</b> Bomba del sistema de Enfriamiento																
<b>MODELO:</b> 125 - 315 Hidrostal																
<b>VELOCIDAD DE ROTACIÓN:</b> 1165 rpm																
<b>CAUDAL NOMINAL (m<sup>3</sup>/h):</b> 80 lt/s																
<b>MASA DE LA ELECTROBOMBA (Kg):</b> 157 Kg																
ÍTEM	PARÁMETRO DE DISEÑO	MUESTRA														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	Velocidad de vibración RMS (mm/s) Lado de rodamientos de la bomba	3.2	3.6	3.4	3.8	4.2	3.8	3.9	4.3	2.6	4.6	4.9	5.2	5.6	4.9	5.10
2	Velocidad de vibración RMS (mm/s) Lado de rodamientos de del motor	2.9	3.10	3.6	3.7	3.9	4.2	4.6	4.5	4.4	4.7	4.1	3.9	4.2	4.7	3.8
3	Aceleración de vibración RMS (g)	0.48	0.51	0.49	0.53	0.82	0.78	0.81	0.79	0.62	1.10	1.15	0.87	1.13	1.15	0.88
4	Desplazamiento de la vibración del conjunto motor – bomba en el eje “X” (mm)	0.88	0.87	0.88	0.86	0.89	0.80	0.88	0.87	0.88	0.89	0.86	0.87	0.88	0.86	0.87
5	Desplazamiento de la vibración del conjunto motor – bomba en el eje “Y” (mm)	1.11	1.13	1.00	1.15	1.13	1.11	1.00	1.16	1.18	1.19	1.22	1.15	1.21	1.22	1.34
6	Desplazamiento de la vibración del conjunto motor – bomba en el eje “Z” (mm)	0.19	0.21	0.16	0.15	0.18	0.29	0.25	0.22	0.16	0.18	1.17	0.19	0.16	0.18	0.19



**Tabla 7.**

**Ficha de registro de análisis termográfico**

<b>ORGANIZACIÓN/EMPRESA:</b> Ingenio Azucarero Casa Grande				
<b>EQUIPO:</b> Electrobomba centrífuga de flujo radial de 30 HP				
<b>ÁREA DE APLICACIÓN:</b> Bomba del sistema de Enfriamiento				
<b>MODELO:</b> 125 - 315 Hidrostal				
<b>VELOCIDAD DE ROTACIÓN:</b> 1165 rpm				
<b>CAUDAL NOMINAL (m<sup>3</sup>/h):</b> 80 lt/s				
<b>MASA DE LA ELECTROBOMBA (Kg):</b> 157 Kg				
ÍTEM	PARÁMETRO DE DISEÑO	MUESTRA		
		M1: Carga Mínima	M2: Carga Promedio	M3: Carga máxima
1	Potencia de la electrobomba (HP)	5	15	30
2	Velocidad del motor (rpm)	500	750	1165
3	Corriente eléctrica (A) Para una tensión de 380 V y factor de potencia de 0.85	6.7	20	40
Temperatura por cada muestra		38	58	61

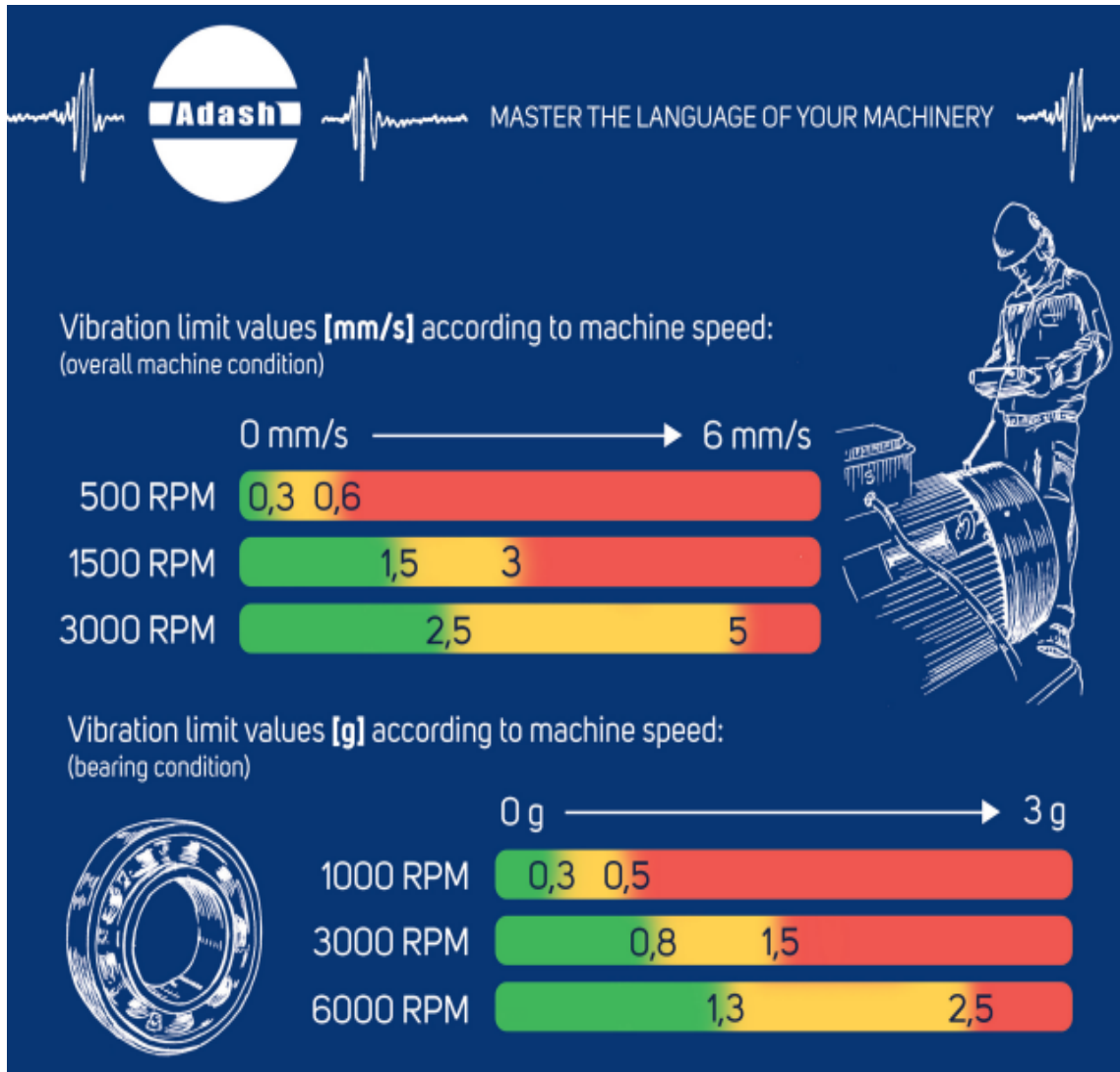
Anexo 4.

**Tabla 8.**  
**Matriz de consistencia**

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Dimensiones	Indicadores	Metodología
¿Cuál es el impacto de un plan de mantenimiento predictivo por termografía y vibración en la mejora de la confiabilidad en electrobombas de un ingenio azucarero?	<p><b>General:</b> Diseñar un plan de mantenimiento predictivo por termografía y vibración para mejorar la confiabilidad en electrobombas de un ingenio azucarero.</p> <p><b>Específicos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinar el estado actual del mantenimiento predictivo por termografía y vibración de la electrobomba de un ingenio azucarero.</li> <li>• Determinar el estado de la confiabilidad de la electrobomba del ingenio azucarero.</li> <li>• Determinar la confiabilidad de la electrobomba por el método LogNormal con la implementación del mantenimiento predictivo.</li> <li>• Elaborar un presupuesto económico para la aplicación del plan de mantenimiento predictivo en la electrobomba.</li> </ul>	El aumento de la confiabilidad operacional en electrobombas del sistema de enfriamiento de un ingenio azucarero, se logrará mediante la aplicación del análisis termográfico y vibracional.	<b>Variable independiente:</b> Mantenimiento predictivo	D1: Vibración mecánica	Velocidad vibracional. Aceleración vibracional. Desplazamiento vibracional en X, Y y Z.	<p><b>Enfoque de la investigación:</b> Cuantitativa.</p> <p><b>Tipo de investigación:</b> Aplicada</p> <p><b>Nivel de investigación:</b> Descriptiva</p> <p><b>Diseño de investigación:</b> No experimental.</p> <p><b>Población:</b> Electrobombas en sistema de enfriamiento de ingenios azucareros del departamento de La Libertad.</p> <p><b>Muestra:</b> Electrobomba de 30 HP de flujo radial de la empresa Casa Grande del departamento de La Libertad.</p> <p><b>Técnicas:</b> Análisis documental</p> <p><b>Instrumentos:</b> Ficha de registro</p>
				D2: Temperatura infrarroja	Potencia mecánica del motor. Velocidad del motor. Corriente eléctrica del motor.	
				D3: Tipos de fallas	Nivel de criticidad. Nivel de riesgo. Nivel de MTTR.	
			<b>Variable dependiente:</b> Confiabilidad operacional	D1: Tiempo de mantenimiento	Tiempo para reparar. Tiempo útil. Tiempo total.	
				D2: Frecuencia de fallas	Frecuencia de reparaciones. Frecuencia de mantenimiento. Frecuencia no productiva.	

## Anexo 5.

### NORMA DE VIBRACIÓN INTERNACIONAL ADASH O ISO 10816



## Norma ISO 10816

Establece las condiciones y procedimientos generales para la medición y evaluación de la vibración, utilizando mediciones realizadas sobre partes no rotativas de las máquinas. El criterio general de evaluación se basa tanto en la monitorización operacional como en pruebas de validación que han sido establecidas fundamentalmente con objeto de garantizar un funcionamiento fiable de la máquina a largo plazo. Esta norma reemplaza a las ISO 2372 e ISO 3945, que han sido objeto de revisión técnica. Este estándar consta de cinco partes:

- **Parte 1:** Indicaciones generales.
- **Parte 2:** Turbinas de vapor y generadores que superen los 50 MW con velocidades típicas de trabajo de 1500, 1800, 3000 y 3600 RPM.
- **Parte 3:** Maquinaria industrial con potencia nominal por encima de 15 kW y velocidades entre 120 y 15000 RPM.
- **Parte 4:** Conjuntos movidos por turbinas de gas excluyendo las empleadas en aeronáutica.
- **Parte 5:** Conjuntos de máquinas en plantas de hidrogenación y bombeo (únicamente disponible en inglés).

Este nuevo estándar evalúa la severidad de la vibración de maquinaria rotativa a través de mediciones efectuadas en planta en partes no giratorias de las mismas. Engloba y amplía los estándares citados anteriormente.

Los criterios de vibración de este estándar se aplican a un conjunto de máquinas con potencia superior a 15 kW y velocidad entre 120 RPM y 15.000 RPM. Los criterios son sólo aplicables para vibraciones producidas por la propia máquina y no para vibraciones que son transmitidas a la máquina desde fuentes externas. El valor eficaz (RMS) de la velocidad de la vibración se utiliza para determinar la condición de la máquina. Este valor se puede determinar con casi todos los instrumentos convencionales para la medición de vibración.

Se debe prestar especial atención para asegurar que los sensores estén montados correctamente y que tales montajes no degraden la precisión de la medición. Los puntos de medida típicamente son tres, dos puntos ortogonales en la dirección radial en cada caja de descanso y un punto en la medición axial.

Las mediciones deben realizarse cuando el rotor y los descansos principales han alcanzado sus temperaturas estacionarias de trabajo y con la máquina funcionando bajo condiciones nominales o específicas (por ejemplo de velocidad, voltaje, flujo, presión y carga).

En máquinas con velocidad o carga variable, las mediciones deben realizarse bajo todas las condiciones a las que se espera que la máquina trabaje durante períodos prolongados de tiempo. Los valores máximos medidos, bajo estas condiciones, serán considerados representativos de la vibración. Si la vibración es superior a lo que el criterio permite y se sospecha de excesiva vibración de fondo, las mediciones se deben realizar con la máquina detenida para determinar el grado de influencia de la vibración externa. Si con la máquina detenida excede el 25% de la vibración medida con la máquina operando, son necesarias acciones correctivas para reducir el efecto de la vibración de fondo. En algunos casos el efecto de la vibración de fondo se puede anular por análisis espectral o eliminando las fuentes externas que provocan las vibraciones de fondo.

La severidad de la vibración se clasifica conforme a los siguientes parámetros:

- Tipo de máquina.
- Potencia o altura de eje.
- Flexibilidad del soporte.

### **Clasificación de acuerdo al tipo de máquina, potencia o altura de eje**

Las significativas diferencias en el diseño, tipos de descanso y estructuras soporte de la máquina, requieren una división en grupos. Las máquinas de estos grupos pueden tener eje horizontal, vertical o inclinado y además pueden estar montados en soportes rígidos o flexibles.

- **Grupo 1:** Máquinas rotatorias grandes con potencia superior 300 kW. Máquinas eléctricas con altura de eje  $H \geq 315$  mm.
- **Grupo 2:** Máquinas rotatorias medianas con potencia entre 15 y 300 kW. Máquinas eléctricas con altura de eje  $160 \leq H \leq 315$  mm.
- **Grupo 3:** Bombas con impulsor de múltiples álabes y con motor separado (flujo centrífugo, axial o mixto) con potencia superior a 15 kW.
- **Grupo 4:** Bombas con impulsor de múltiples álabes y con motor integrado (flujo centrífugo, axial o mixto) con potencia superior a 15 kW.

## **Anexo 6.**

### **PRUEBAS DE VIBRACIÓN Y TERMOGRÁFIA A LA ELECTROBOMBA 125 - 315 HIDROSTAL**

#### **ANÁLISIS DE VIBRACIÓN**

El análisis de vibración se divide en velocidad y aceleración de vibración. La velocidad de vibración mide balance y holguras en los rodamientos del lado del motor y del lado de la bomba. Mientras la aceleración se enfoca a la alineación del eje entre motor y bomba, es decir alineación entre rodamientos de la bomba y motor. También, los datos obtenidos son analizados y comparados a través de la Norma de vibración Internacional ADASH o ISO 10816. Donde dicha norma exige la prueba de 15 muestras o datos de vibración, con el equipo operando a la carga de trabajo (bajo condiciones normales de operaciones en el proceso productivo).

#### **a) Velocidad de vibración – Lado: Rodamientos de la bomba**

El análisis de vibración realizado en el lado de los rodamientos de la bomba, consto de 15 pruebas de vibración. Donde el sensor del instrumento vibrómetro, se ubicó en la carcasa (punto superior del mismo lado donde se ubican los rodamientos de la bomba). Las 15 pruebas fueron realizadas en una operación continua de la bomba durante 24 horas. Donde cada prueba se realizó en un rango de medición de frecuencia de 10 a 1000 Hz. Asimismo, en cada prueba realizada se obtuvo un valor promedio de la velocidad de vibración eficaz (RMS), entregado por el vibrómetro.

En la figura 3, se muestran los resultados promedios por cada una de las 15 muestras, tal como lo exige la norma ISO 10816. Obteniendo que el valor de vibración más bajo es 2.6 mm/s y el más crítico 5.6 mm/s. Donde la norma indica que para valores superiores a 3 mm/s, la vibración se considera crítica y demanda de una intervención inmediata. De esta manera queda claro que la vibración en el lado de los rodamientos de la bomba, necesita de actividades de mantenimiento que ayuden a reducir estos valores críticos.

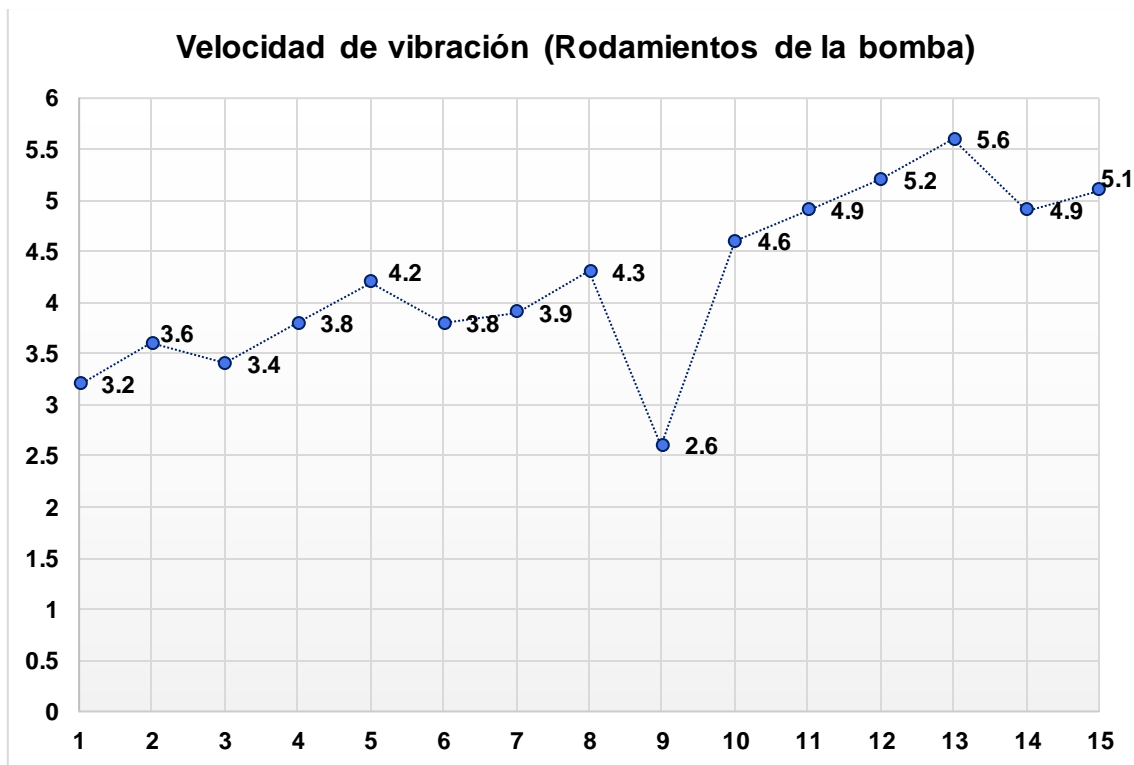


Figura 3. Velocidad de vibración de rodamientos en el lado de la bomba.

#### b) Velocidad de vibración – Lado: Rodamientos del motor

De la misma manera, se realizaron 15 pruebas de vibración. Ubicando el sensor del instrumento vibrómetro, en el punto superior de la carcasa del mismo lado donde se ubican los rodamientos del motor. Las 15 pruebas fueron realizadas en una operación continua del motor durante 24 horas. Donde cada prueba se realizó en un rango de medición de frecuencia de 10 a 1000 Hz. Asimismo, en cada prueba realizada se obtuvo un valor promedio de la velocidad de vibración eficaz (RMS), entregado por el vibrómetro. También cabe precisar que el sensor del vibrómetro se ubicó en la carcasa en tres ángulos distintos (0°, 45° y 90°) respecto a los rodamientos, obteniendo 5 pruebas por cada ángulo, como lo exige la norma.

En la figura 4, se muestran los resultados de la velocidad de vibración, obteniendo un valor entre 2.9 y 4.7 mm/s. Como ya que se indicó, para valores superiores a 3 mm/s, la vibración se considera crítica y demanda de una intervención inmediata. También cada indicar, que los niveles de vibración en el motor son menores a los encontrados en lado de la bomba, pero que ambos tienen clasificación crítica.

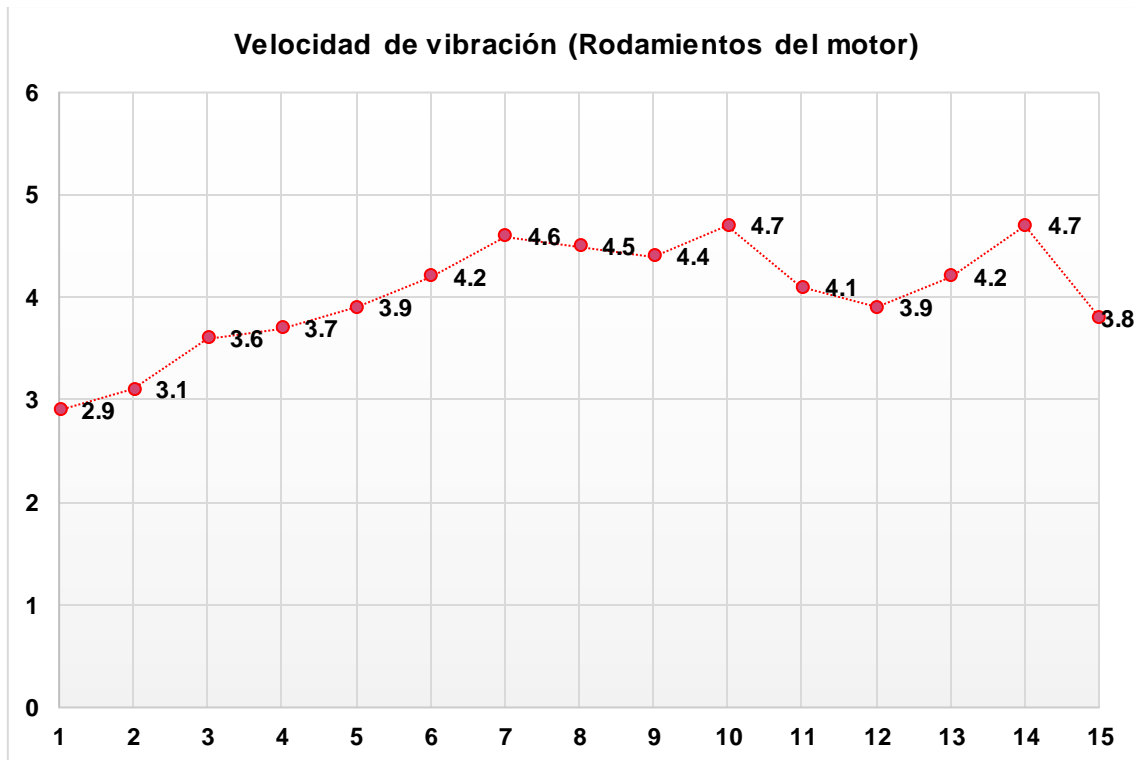


Figura 4. Velocidad de vibración de rodamientos en el lado del motor.

### c) Aceleración de vibración

La aceleración permite medir eficazmente la vibración generada por el desalineamiento del eje, que comparten el motor y la bomba, para la transmisión de potencia mecánica. En este elemento de máquina la norma indica no medir la velocidad RMS, si no, la aceleración, debido a que, en este elemento la velocidad es cambiante en intervalos de tiempo muy pequeños, cambiando en intervalos de décimas de segundo. Por lo cual la aceleración es el indicador más viable para medir la vibración en el eje de transmisión.

Para la medición se ubicaron los sensores del vibrómetro en dos puntos: En el lado de la carcasa del motor y en el lado de la carcasa de la bomba. La cantidad de pruebas y la frecuencia fue la misma.

En la figura 5, se muestran los resultados de la aceleración de vibración del eje, obteniendo un valor mínimo de 0.48 g y un máximo de 1.15 g. Donde la norma ISO 10816, especifica que para valores superiores a 0.5 g, se considera crítico. Por lo cual podemos indicar que la vibración generada en el eje de transmisión de la



electrobomba en estudio requiere de una intervención de actividades de mantenimiento que ayuden a minimizar estos valores.

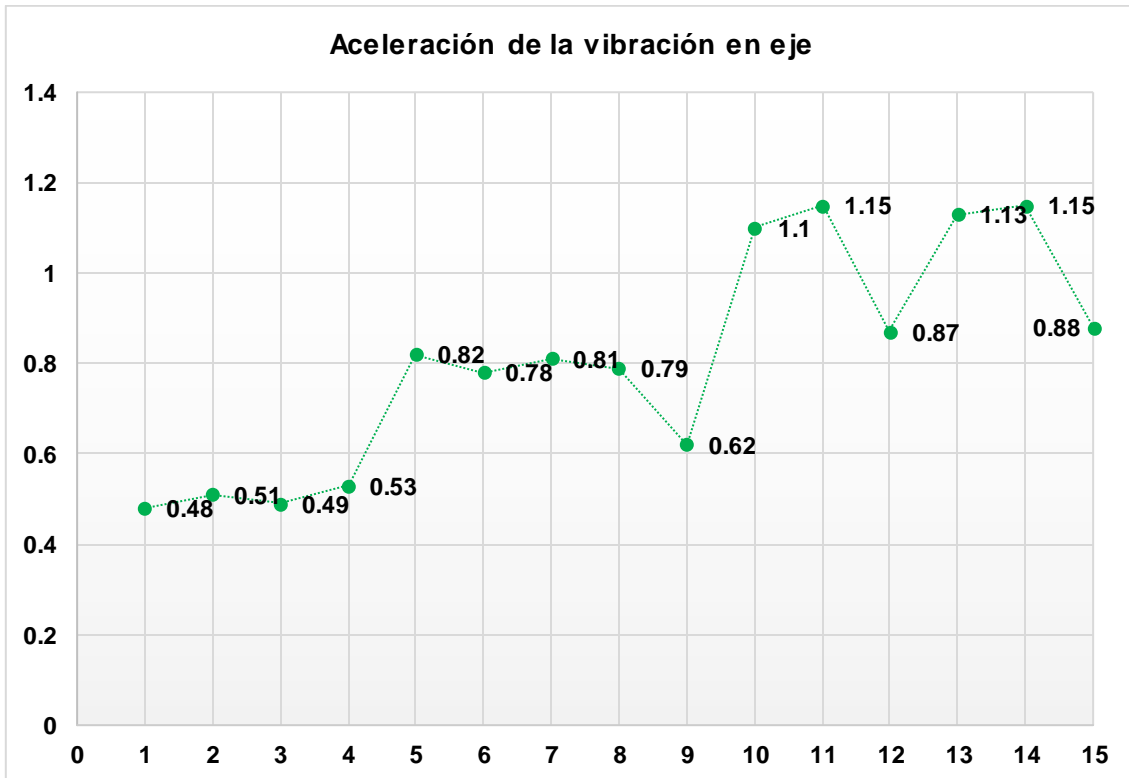


Figura 5. Aceleración de vibración del eje de transmisión motor-bomba.

#### d) Desplazamiento vibracional de la electrobomba

Para medir la vibración en términos de desplazamiento en milímetros, en las direcciones “x”, “y” y “z”, es necesario colocar dos sensores de vibración en la carcasa del motor y la bomba, a la altura de los rodamientos. Los sensores fueron ubicados a un ángulo de 45° en ambas carcasas respecto al eje de transmisión, para una obtener una medición resultante del desplazamiento. Se realizaron 15 pruebas, obteniendo por cada prueba un valor promedio respecto a cada dirección.

En la figura 6, se muestran los resultados del desplazamiento vibracional, observando que en la dirección horizontal (dirección en “y”), se origina el mayor desplazamiento vibracional con un valor mínimo de 1 mm y un máximo de 1.34 mm. Asimismo, el desplazamiento máximo que se origina en la dirección “x” es 0.89 mm y en la dirección “z” es 0.29 mm.

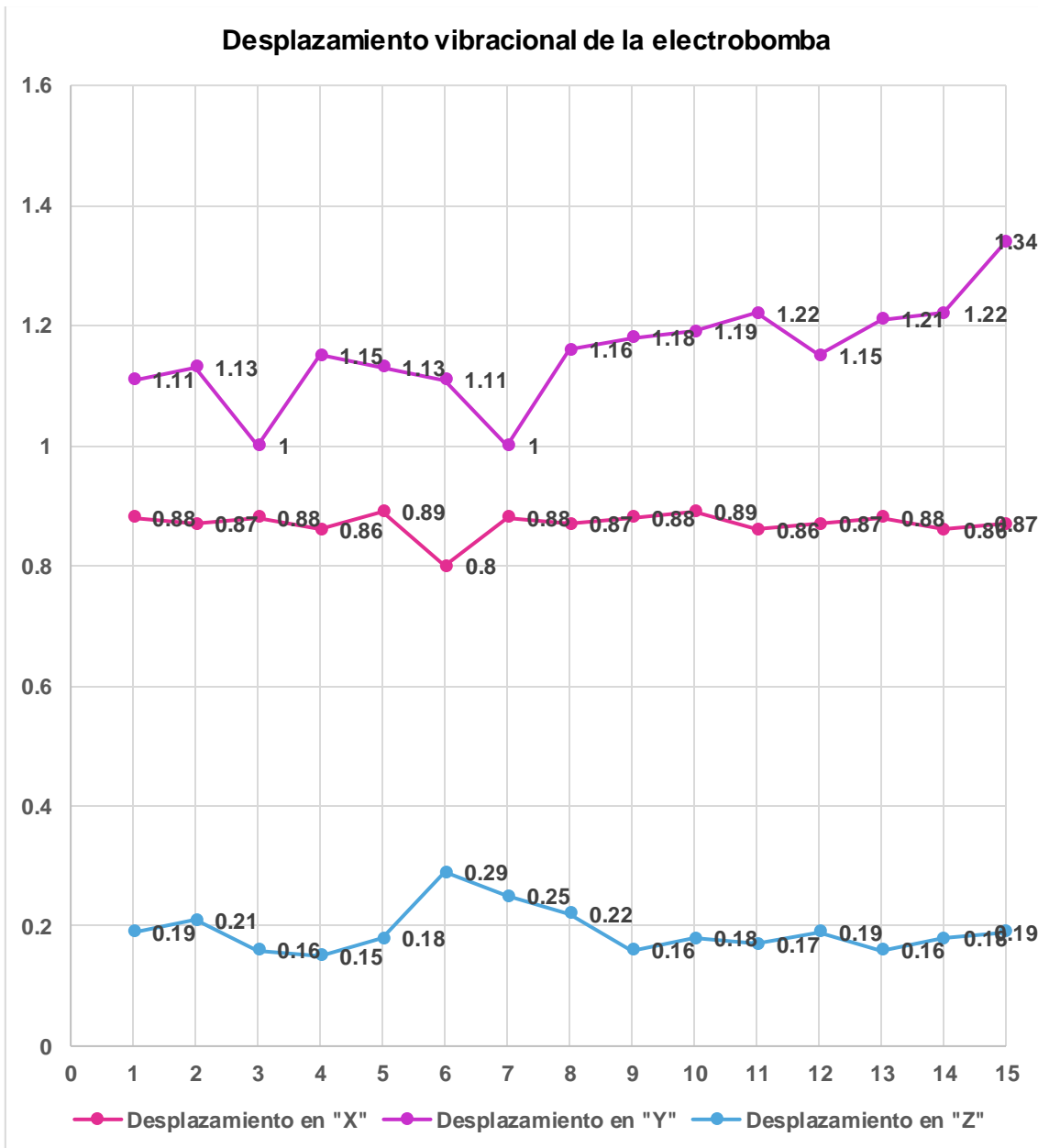


Figura 6. Desplazamiento por vibración mecánica de la electrobomba en "x", "y" y "z"

### ANÁLISIS TERMOGRÁFICO

El análisis termográfico, permite obtener los puntos calientes o críticos de la electrobomba. Para lo cual fue necesario tomar 3 muestras, como lo exige la norma ISO 18434-1:2008. La muestras se realizan con la bomba en carga mínima, promedio y carga máxima, para obtener un valor de temperatura por cada estado de potencia. El instrumento utilizado fue una cámara termográfica. Donde la temperatura de la electrobomba depende la potencia, velocidad de rotación y corriente eléctrica, y esta varía dependiendo de la carga a la que está expuesta.

En la tabla 9, se muestran los resultados del análisis termográfico, donde se puede observar que a medida que la carga de la electrobomba aumenta, también lo hace la temperatura. Asimismo, se demuestra que la potencia, velocidad del motor y tensión, son proporcionales directas con la temperatura. Obteniendo una temperatura mínima de 38°C (la electrobomba trabaja el 5% en este estado), un promedio de 58°C (la electrobomba trabaja el 20% en este estado) y una temperatura máxima de 61°C (la electrobomba trabaja el 75% del tiempo en esta condición). La Norma indica que la temperatura adecuada en equipos rotatorios como electrobombas no debe superar los 50°C. Y esto se debe a los efectos causados por la vibración en los rodamientos, donde la fricción genera el incremento de temperatura. También cabe precisar que los puntos calientes fueron encontrados en los rodamientos, tanto del motor y de la bomba.

De la misma manera, como ya se indicó la temperatura aumenta, debido a los efectos de fricción entre el rodamiento y el eje de transmisión, donde el lubricante no es suficiente para equilibrar la temperatura y la fuerza de rozamiento, debido a los efectos de la vibración. Asimismo, en la tabla 9, los valores de carga mínimo, promedio y máximo, dependen de cada equipo, y estos fueron extraídos del proveedor de la electrobomba, para bajo estos parámetros determinar la temperatura en los tres niveles.

**Tabla 9.**  
**Valores de la temperatura de la electrobomba según el nivel de carga**

Parámetro	Carga Mínima	Carga Promedio	Carga máxima
Potencia de la electrobomba (HP)	5	15	30
Velocidad del motor (rpm)	500	750	1165
Corriente eléctrica (A), para una tensión de 380 V y factor de potencia de 0.85	6.7	20	40
<b>Temperatura</b>	<b>38</b>	<b>58</b>	<b>61</b>

**Tabla 10.**  
**Resumen de pruebas termográficas**

Temperatura	Menor a 50°C	Próximo a 50°C	Mayor a 50°C
Pruebas	3	4	8

## Anexo 7.

### ANÁLISIS DE LA CONFIABILIDAD OPERACIONAL DE LA ELECTROBOMBA MEDIANTE EL MÉTODO LOGNORMAL

**Tabla 11.**  
**Datos técnicos y operativos de la bomba centrífuga**

<b>EQUIPO</b>	:	<b>Bomba Centrífuga de flujo radial</b>
POTENCIA NOMINAL (HP)	:	30
POTENCIA OPERATIVA (HP)	:	25
% CARGA DE TRABAJO	:	83.33%
VELOCIDAD DE ROTACIÓN (RPM)	:	1760
FLUJO VOLUMÉTRICO NOM. (L/S)	:	80.00
FLUJO VOLUMÉTRICO OPE. (L/S)	:	75.00
% FLUJO DE TRABAJO	:	93.75%
VIDA OPERATIVA (AÑOS)	:	11
VIDA NOMINAL (AÑOS)	:	40
% VIDA CONSUMIDA	:	27.50%
MODELO	:	125-315 Hidrostral
EMPRESA	:	Ingenio Azucarero Casa Grande
ÁREA DE PRODUCCIÓN	:	Sistema de Enfriamiento
PERIODO DE LA DATA	:	Desde 11 de julio al 30 de diciembre del 2022 - Periodo de mayor producción

**Tabla 12.**  
**Tiempos de reparación (TTR) de la electrobomba centrífuga**

PERIODOS	CONCEPTUALIZACIÓN TÉCNICA DE LA FALLA	FRECUENCIA (Vez/mes)	TTR (horas)	CAUSA DE FALLO	
Mes 01	Julio	Degradación progresiva del aislamiento en las espiras del bobinado	3	5.25	TEMPERATURA
		Desequilibrio del eje de transmisión del motor eléctrico	3	7.35	VIBRACIÓN
		Exceso de holguras entre eje y rodamientos de la bomba centrífuga	2	6.40	VIBRACIÓN
		Desequilibrio del eje de transmisión del lado axial de la bomba centrífuga	3	4.25	VIBRACIÓN
		Golpeteo por fricción entre cara lateral de rodamientos y eje de la bomba centrífuga	2	6.35	VIBRACIÓN
		Vibración excesiva entre superficie (soporte) y conjunto electrobomba	3	9.40	VIBRACIÓN
		Bobina del motor cortocircuitada	3	4.00	TEMPERATURA
		Desbalance entre electrobomba y la carga de accionamiento	3	5.00	VIBRACIÓN
		Carbonización de las puntas de las bobinas ocurrida en las fases	2	4.50	TEMPERATURA
		Bobinas presentando bajo aislamiento	2	5.50	TEMPERATURA
		Desalineamiento entre los ejes de rotación motor eléctrico y bomba centrífuga	2	6.55	VIBRACIÓN
		Sobrecalentamiento en conductores eléctrico con fuga a tierra	3	3.44	TEMPERATURA
		Aislamiento quemado por sobretensión	3	2.50	TEMPERATURA
SUBTOTAL		34	70.49		
Mes 02	Agosto	Rotura del acoplamiento que une los ejes de rotación del lado de la bomba y motor	2	4.50	VIBRACIÓN
		Desequilibrio del eje de transmisión del motor eléctrico	2	7.20	VIBRACIÓN
		Degradación progresiva del aislamiento en las espiras del bobinado	3	5.30	TEMPERATURA

		Desalineamiento entre los ejes de rotación motor eléctrico y bomba centrífuga	3	4.50	VIBRACIÓN
		Elevada temperatura en los rodamientos del motor eléctrico	3	7.10	TEMPERATURA
		Aislamiento quemado por sobretensión	3	3.80	TEMPERATURA
		Golpeteo por fricción entre cara lateral de rodamientos y eje de la bomba centrífuga	2	2.40	VIBRACIÓN
		Desbalance entre electrobomba y la carga de accionamiento	3	6.25	VIBRACIÓN
		Sobrecalentamiento en conductores eléctrico con fuga a tierra	2	5.20	TEMPERATURA
		Bobinas presentando bajo aislamiento	3	6.50	TEMPERATURA
		Desgaste prematuro del lado de las bandas de los rodamientos de la bomba	3	2.35	VIBRACIÓN
SUBTOTAL			29	55.10	
Mes 03	Septiembre	Vibración excesiva entre superficie (soporte) y conjunto electrobomba	3	3.50	VIBRACIÓN
		Desbalance entre electrobomba y la carga de accionamiento	3	6.44	VIBRACIÓN
		Desequilibrio del eje de transmisión del motor eléctrico	3	5.50	VIBRACIÓN
		Elevada temperatura en los rodamientos del motor eléctrico	2	8.20	TEMPERATURA
		Desgaste de rodamientos por excesiva fricción	4	5.70	VIBRACIÓN
		Desalineamiento entre los ejes de rotación motor eléctrico y bomba centrífuga	2	5.20	VIBRACIÓN
		Aislamiento quemado por sobretensión	3	11.20	TEMPERATURA
		Desequilibrio del eje de transmisión del lado axial de la bomba centrífuga	5	3.30	VIBRACIÓN
		Exceso de holguras entre eje y rodamientos de la bomba centrífuga	4	4.50	VIBRACIÓN
		Elevada temperatura en los rodamientos de la bomba centrífuga	4	4.25	TEMPERATURA
		Deficiencia en la circulación del aire de enfriamiento en el motor	3	6.25	TEMPERATURA
		Bobinas presentando bajo aislamiento	2	7.40	TEMPERATURA
SUBTOTAL			38	71.44	
Mes 04	Octubre	Golpeteo por fricción entre cara lateral de rodamientos y eje de la bomba centrífuga	5	6.50	VIBRACIÓN
		Bobina del portor cortocircuitada	3	3.25	TEMPERATURA
		Desequilibrio del eje de transmisión del motor eléctrico	2	7.40	VIBRACIÓN
		Carbonización de las puntas de las bobinas ocurrida en las fases	2	9.30	TEMPERATURA
		Exceso de holguras entre eje y rodamientos de la bomba centrífuga	3	3.40	VIBRACIÓN
		Desequilibrio del eje de transmisión del lado axial de la bomba centrífuga	2	9.20	VIBRACIÓN
		Desbalance entre electrobomba y la carga de accionamiento	2	7.00	VIBRACIÓN
		Sobrecalentamiento en conductores eléctrico con fuga a tierra	2	5.45	TEMPERATURA
		Degradación progresiva del aislamiento en las espiras del bobinado	3	6.35	TEMPERATURA
		Desalineamiento entre los ejes de rotación motor eléctrico y bomba centrífuga	3	8.40	VIBRACIÓN
		Aislamiento quemado por sobretensión	3	6.30	TEMPERATURA
SUBTOTAL			30	72.55	
Mes 05	Noviembre	Elevada temperatura en los rodamientos del motor eléctrico	1	9.00	TEMPERATURA
		Vibración excesiva entre superficie (soporte) y conjunto electrobomba	2	2.25	VIBRACIÓN
		Bobinas presentando bajo aislamiento	3	9.30	TEMPERATURA
		Desequilibrio del eje de transmisión del motor eléctrico	1	3.35	VIBRACIÓN
		Carbonización de las puntas de las bobinas ocurrida en las fases	4	6.40	TEMPERATURA
		Desbalance entre electrobomba y la carga de accionamiento	3	7.30	VIBRACIÓN
		Desgaste de rodamientos por excesiva fricción	3	6.25	VIBRACIÓN
		Desalineamiento entre los ejes de rotación motor eléctrico y bomba centrífuga	3	4.25	VIBRACIÓN

		Exceso de holguras entre eje y rodamientos de la bomba centrífuga	3	9.25	VIBRACIÓN
		Bobina del motor cortocircuitada	1	2.44	TEMPERATURA
		Excesivo desplazamiento radial del eje de transmisión motor eléctrico y bomba centrífuga	4	3.40	VIBRACIÓN
		Aislamiento quemado por sobretensión	2	2.50	TEMPERATURA
		Degradación progresiva del aislamiento en las espiras del bobinado	4	4.00	TEMPERATURA
		Exceso de vibración por elevadas rpm (revoluciones por minuto)	2	3.00	VIBRACIÓN
		Sobrecalentamiento en conductores eléctrico con fuga a tierra	2	2.40	TEMPERATURA
<b>SUBTOTAL</b>			<b>38</b>	<b>75.09</b>	
Mes 06	Diciembre	Desgaste de rodamientos por excesiva fricción	3	6.20	VIBRACIÓN
		Carbonización de las puntas de las bobinas ocurrida en las fases	4	5.50	TEMPERATURA
		Golpeteo por fricción entre cara lateral de rodamientos y eje de la bomba centrífuga	2	7.40	VIBRACIÓN
		Sobrecalentamiento en conductores eléctricos	2	4.50	TEMPERATURA
		Desbalance entre electrobomba y la carga de accionamiento	2	6.25	VIBRACIÓN
		Desequilibrio del eje de transmisión del motor eléctrico	2	7.30	VIBRACIÓN
		Desequilibrio del eje de transmisión del lado axial de la bomba centrífuga	2	8.00	VIBRACIÓN
		Bobina del motor cortocircuitada	2	5.00	TEMPERATURA
		Exceso de holguras entre eje y rodamientos de la bomba centrífuga	3	6.20	VIBRACIÓN
		Bobinas presentando bajo aislamiento	2	4.20	TEMPERATURA
		Vibración excesiva entre superficie (soporte) y conjunto electrobomba	4	2.20	VIBRACIÓN
		Desalineamiento entre los ejes de rotación motor eléctrico y bomba centrífuga	3	7.40	VIBRACIÓN
<b>SUBTOTAL</b>			<b>31</b>	<b>70.15</b>	

**Tabla 13.**  
**Tiempo de reparación (TTR) inicial**

PERIODOS		FRECUENCIA (Vez/mes)	TTR (horas)
Mes 01	Julio	34	70.49
Mes 02	Agosto	29	55.10
Mes 03	Septiembre	38	71.44
Mes 04	Octubre	30	72.55
Mes 05	Noviembre	38	75.09
Mes 06	Diciembre	31	70.15
<b>TOTAL</b>		<b>200</b>	<b>414.82</b>

**APUNTE 1** : En el mes de julio la electrobomba registro 200 intervenciones de mantenimiento

**APUNTE 2** : El tiempo perdido por paralización de la electrobomba en el mes de julio fue de 70.49 horas

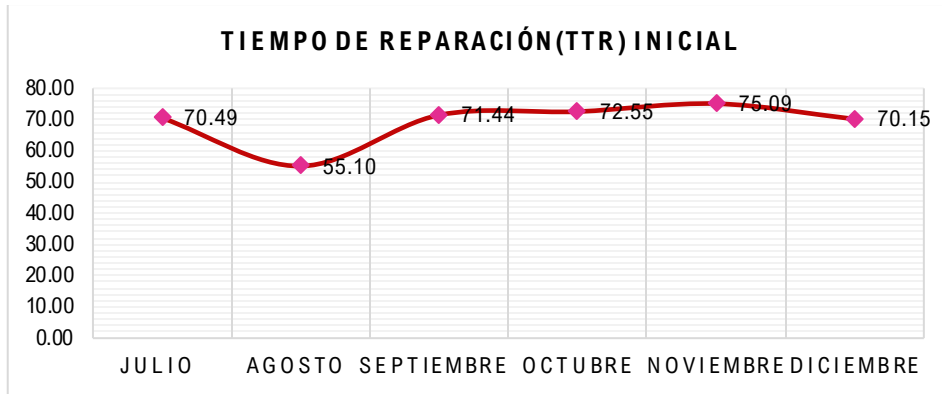


Figura 7. Tiempo de reparación de la electrobomba

**Tabla 14.**  
**Tiempo nominal total (TNT) y tiempo entre fallas (TBF) inicial**

PERIODOS		Tiempo nominal total (TNT) (h/mes)	Tiempo entre fallas (TBF) inicial (h/mes)
Mes 01	Julio	690	619.51
Mes 02	Agosto	690	634.90
Mes 03	Septiembre	690	618.56
Mes 04	Octubre	690	617.45
Mes 05	Noviembre	690	614.91
Mes 06	Diciembre	690	619.85

**APUNTE 1** : La empresa estima un tiempo nominal de trabajo de 690 horas al mes, sin presencia de fallas

**APUNTE 2** : En el mes de julio la electrobomba trabajo 603.85 horas libres de fallas

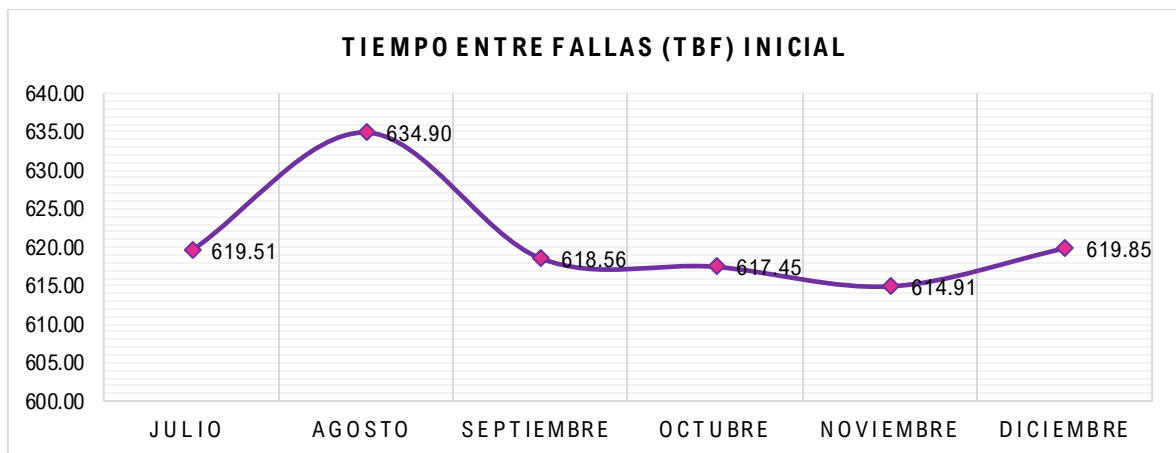


Figura 8. Tiempo entre fallas de la electrobomba

**Tabla 15.**

**Tiempo medio para reparar (MTTR) y tiempo medio entre fallas (MTBF) inicial**

PERIODOS		TIEMPO MEDIO PARA REPARAR (MTTR) (h/falla)	TIEMPO MEDIO ENTRE FALLAS (MTBF) (h/falla)
Mes 01	Julio	2.07	18.22
Mes 02	Agosto	1.90	21.89
Mes 03	Septiembre	1.88	16.28
Mes 04	Octubre	2.42	20.58
Mes 05	Noviembre	1.98	16.18
Mes 06	Diciembre	2.26	20.00
<b>GLOBAL</b>		<b>2.07</b>	<b>18.63</b>

**APUNTE 1** : En el mes de julio se emplearon en promedio 2.07 horas para reparar una falla de la electrobomba

**APUNTE 2** : En el mes de julio se produjo una falla cada 18.22 horas de operación de la electrobomba

**APUNTE 3** : En los últimos 6 meses (julio – diciembre 2022) el tiempo promedio para reparar una falla ha sido de 2.07 horas en la electrobomba

**APUNTE 4** : En los últimos 6 meses (julio – diciembre 2022) se ha producido una falla cada 18.63 oras en la electrobomba

**Tabla 16.**

**Tasa de operación (MOR) y Tasa de reparación (MRR) inicial**

PERIODOS		TASA DE OPERACIÓN (MOR) (falla/h)	TASA DE REPARACIÓN (MRR) (falla/h)
Mes 01	Julio	0.055	0.482
Mes 02	Agosto	0.046	0.526
Mes 03	Septiembre	0.061	0.532
Mes 04	Octubre	0.049	0.414
Mes 05	Noviembre	0.062	0.506
Mes 06	Diciembre	0.050	0.442
<b>GLOBAL</b>		<b>0.0537</b>	<b>0.482</b>

**Tabla 17.**

**Comparativo del TTR por fallas por empuje axial y diversas fallas**

Falla	FRECUENCIA (Vez/mes)	TTR (horas)	%FRECUENCIA	%TTR
Por Vibración	116	238.54	58%	58%
Por Temperatura	84	176.28	42%	42%
<b>TOTAL</b>	<b>200</b>	<b>414.82</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

**APUNTE 1** : El 58% de la cantidad fallas producidas en la electrobomba son por vibración

**APUNTE 2** : El 42% del tiempo que se emplea para reparar es debido a fallas por temperatura



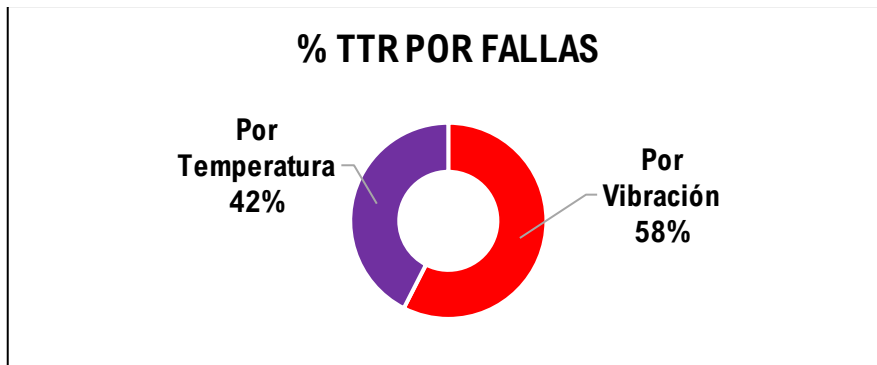


Figura 9. Tiempo de reparación por fallas de temperatura y vibración

**Tabla 18.**

**TTR inicial y TTR estimado por desviación estándar**

DESVIACIÓN ESTÁNDAR (TTR) INICIAL (+,-,+,-,.....)		7.103
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (TTR) FINAL (+,-,+,-,.....)		8.371
DESVIACIÓN ESTÁNDAR FRECUENCIA INICIAL (-,-,+,-,+,-,.....)		3.983
DESVIACIÓN ESTÁNDAR FRECUENCIA FINAL (-,-,+,-,+,-,.....)		3.266
MES	TTR INICIAL (horas/mes)	TTR ESTIMADO (horas/mes)
Jul-22	70.49	45.30
Ago-22	55.10	27.20
Sep-22	71.44	34.14
Oct-22	72.55	41.90
Nov-22	75.09	39.05
Dic-22	70.15	50.95
MES	TTR ESTIMADO (horas/mes)	TTR ESTIMADO (horas/mes)
Ene-23	77.59	53.67
Feb-23	48.00	18.83
Mar-23	78.54	42.51
Abr-23	65.45	33.53
May-23	82.19	47.42
Jun-23	63.05	42.58
TOTAL	829.64	477.08
MES	FRECUENCIA INICIAL (Vez/mes)	FRECUENCIA ESTIMADA (vez/mes)
Jul-22	34	18
Ago-22	29	15
Sep-22	38	24
Oct-22	30	17
Nov-22	38	21
Dic-22	31	21
MES	FRECUENCIA ESTIMADA (vez/mes)	FRECUENCIA ESTIMADA (vez/mes)
Ene-23	30	15
Feb-23	25	12
Mar-23	42	27
Abr-23	26	14
May-23	42	24
Jun-23	35	24
TOTAL	400	232

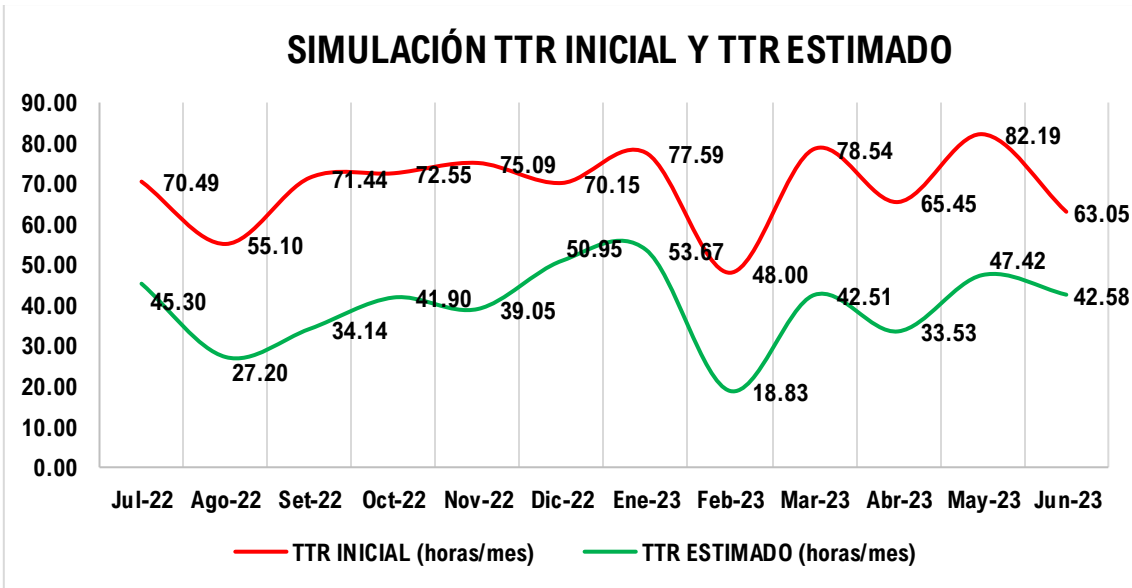


Figura 10. Simulación del TTR con la implementación del plan de mantenimiento predictivo

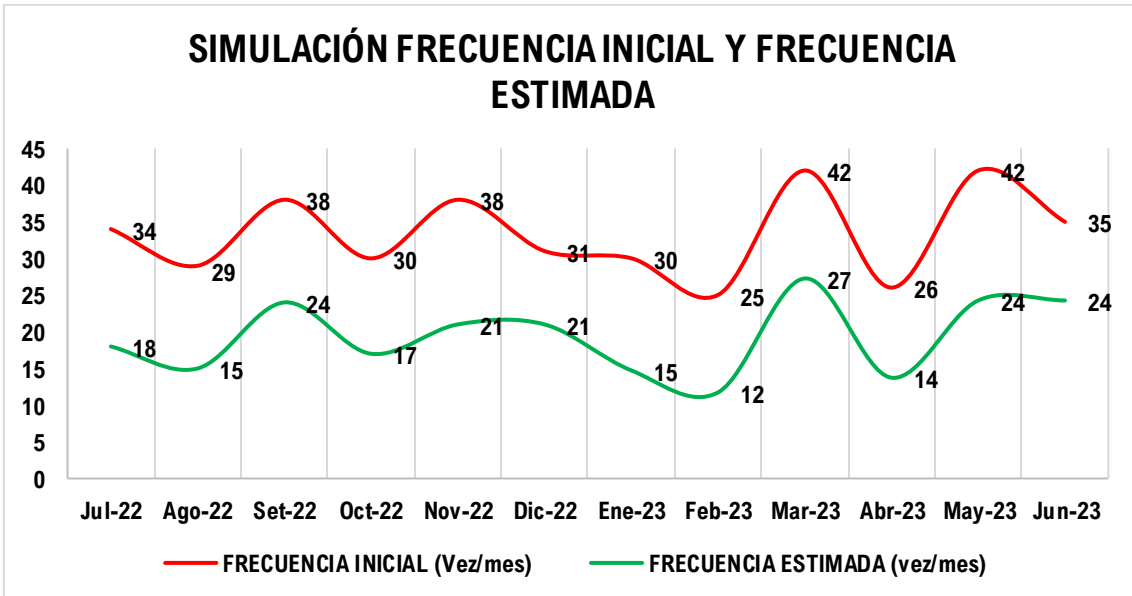


Figura 11. Simulación de la frecuencia con la implementación del plan de mantenimiento predictivo

**Tabla 19.**

**TNT, TBF, MTBF, MTTR, MOR, MRR iniciales y estimados en el tiempo**

Mes	TNT	TBF INICIAL	TBF ESTIMADO	TTR INICIAL	TTR ESTIMADO	MTBF INICIAL	MTBF ESTIMADO	MTTR INICIAL	MTTR ESTIMADO	MOR INICIAL	MOR ESTIMADO	MRR INICIAL	MRR ESTIMADO
Jul-22	690	619.51	644.70	70.49	45.30	18.22	35.82	2.07	2.52	0.055	0.028	0.482	0.397
Ago-22	690	634.90	662.80	55.10	27.20	21.89	44.19	1.90	1.81	0.046	0.023	0.526	0.551
Jul-22	690	618.56	655.86	71.44	34.14	16.28	27.33	1.88	1.42	0.061	0.037	0.532	0.703
Ago-22	690	617.45	648.10	72.55	41.90	20.58	38.12	2.42	2.46	0.049	0.026	0.414	0.406
Set-22	690	614.91	650.95	75.09	39.05	16.18	31.00	1.98	1.86	0.062	0.032	0.506	0.538
Oct-22	690	619.85	639.05	70.15	50.95	20.00	30.43	2.26	2.43	0.050	0.033	0.442	0.412
Nov-22	690	612.41	636.33	77.59	53.67	20.40	43.19	2.59	3.64	0.049	0.023	0.387	0.275
Dic-22	690	642.00	671.17	48.00	18.83	25.66	57.20	1.92	1.60	0.039	0.017	0.521	0.623
Ene-23	690	611.46	647.49	78.54	42.51	14.56	23.75	1.87	1.56	0.069	0.042	0.535	0.641
Feb-23	690	624.55	656.47	65.45	33.53	24.01	47.80	2.52	2.44	0.042	0.021	0.398	0.410
Mar-23	690	607.81	642.58	82.19	47.42	14.48	26.48	1.96	1.95	0.069	0.038	0.511	0.512
Abr-23	690	626.95	647.42	63.05	42.58	17.92	26.68	1.80	1.75	0.056	0.037	0.555	0.570
<b>GLOBAL</b>	<b>690</b>	<b>7450.36</b>	<b>7802.92</b>	<b>829.64</b>	<b>477.08</b>	<b>18.63</b>	<b>33.63</b>	<b>2.07</b>	<b>2.06</b>	<b>0.054</b>	<b>0.030</b>	<b>0.482</b>	<b>0.486</b>

**Tabla 20.**

Simulación de la confiabilidad en el tiempo

Mes	CONFIABILIDAD INICIAL	CONFIABILIDAD ESTIMADA
Jul-22	89.78%	93.43%
Ago-22	92.01%	96.06%
Set-22	89.65%	95.05%
Oct-22	89.49%	93.93%
Nov-22	89.12%	94.34%
Dic-22	89.83%	92.62%
Ene-23	88.75%	92.22%
Feb-23	93.04%	97.27%
Mar-23	88.62%	93.84%
Abr-23	90.51%	95.14%
May-23	88.09%	93.13%
Jun-23	90.86%	93.83%
<b>GLOBAL</b>	<b>83.98%</b>	<b>94.24%</b>

<b>APUNTE 1</b>	La confiabilidad esperada es <b>94.24%</b> , con un incremento de <b>10.26%</b> respecto al valor inicial
-----------------	---

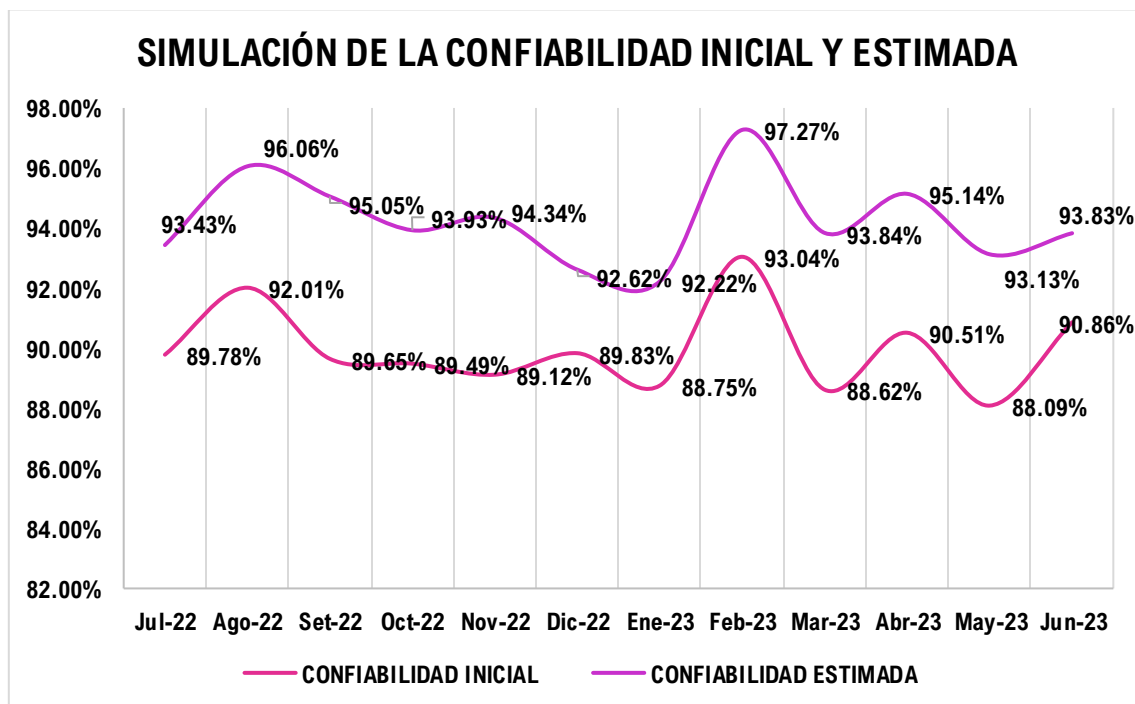


Figura 12. Simulación de la confiabilidad con la implementación del plan de mantenimiento predictivo

Anexo 8.

**VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO**

**CERTIFICADO DE VALIDEZ DE CONTENIDO DEL INSTRUMENTO**

**Certificado de validez por especialistas, del título profesional:** “Diseño de plan de mantenimiento predictivo por termografía y vibración para mejorar la confiabilidad en electrobombas del sistema de enfriamiento de un ingenio azucarero”.

**Los certificados validados corresponden a los siguientes instrumentos:**

**Instrumento 1°:** Ficha de registro de datos

ÍTEM	CRITERIOS A EVALUAR						Observaciones (Si debe eliminarse o modificarse un ítem por favor indique)
	Pertinencia <sup>1</sup>		Relevancia <sup>2</sup>		Claridad <sup>3</sup>		
	Si	No	Si	No	Si	No	
Intrumento 1°	FICHA DE REGISTRO						
1 – 10	x		x		x		El instrumento es preciso, y contiene las variables y dimensiones
<b>Aspectos Generales</b>					<b>Si</b>	<b>No</b>	
El instrumento contiene introducciones claras y precisas para responder el cuestionario					x		El instrumento si contiene una introducción clara.
Los ítems permiten el logro del objetivo de la investigación					x		El instrumento si permite desarrollar los objetivos específicos.
El número de ítems es suficiente para recoger la información. En caso ser negativa su respuesta, sugiera los ítems a añadir.					x		El instrumento si contiene el número de ítem suficientes.
<b>VALIDEZ</b>							
APLICABLE			x	NO APLICABLE			
APLICA ATENDIENDO A LAS OBSERVACIONES							

<sup>1</sup>**Pertinencia:** El ítem corresponde al concepto teórico formulado de la variable y/o dimensión.

<sup>2</sup>**Relevancia:** El ítem es apropiado para representar el indicador de la dimensión y la variable.

<sup>3</sup>**Claridad:** Se entiende sin dificultad alguna el enunciado del ítem, es conciso, exacto y directo.

**DATOS GENERALES DEL EXPERTO**

Apellido y nombres: Cáceres Cruz Elin G.

Profesión: Ingeniero Mecánico Electricista

Especialidad: Mantenimiento Industrial

Elin G. Cáceres Cruz  
ING. MECÁNICO ELECTRICISTA  
CIP: 239340

**CERTIFICADO DE VALIDEZ DE CONTENIDO DEL INSTRUMENTO**

**Certificado de validez por especialistas, del título profesional:** “Diseño de plan de mantenimiento predictivo por termografía y vibración para mejorar la confiabilidad en electrobombas del sistema de enfriamiento de un ingenio azucarero”.

**Los certificados validados corresponden a los siguientes instrumentos:**

**Instrumento 1°:** Ficha de registro de datos

ÍTEM	CRITERIOS A EVALUAR						Observaciones (Si debe eliminarse o modificarse un ítem por favor indique)
	Pertinencia <sup>1</sup>		Relevancia <sup>2</sup>		Claridad <sup>3</sup>		
	Si	No	Si	No	Si	No	
Intrumento 1°	FICHA DE REGISTRO						
1 – 10	x		x		x		El instrumento 1°. Es conforme y preciso
<b>Aspectos Generales</b>					<b>Si</b>	<b>No</b>	
El instrumento contiene introducciones claras y precisas para responder el cuestionario					x		El instrumento es claro
Los ítems permiten el logro del objetivo de la investigación					x		El instrumento permite el logro del objetivo general
El número de ítems es suficiente para recoger la información. En caso ser negativa su respuesta, sugiera los ítems a añadir.					x		El instrumento contiene la cantidad de ítems necesarios. Es conforme
<b>VALIDEZ</b>							
APLICABLE			x	NO APLICABLE			
APLICA ATENDIENDO A LAS OBSERVACIONES							

<sup>1</sup>**Pertinencia:** El ítem corresponde al concepto teórico formulado de la variable y/o dimensión.

<sup>2</sup>**Relevancia:** El ítem es apropiado para representar el indicador de la dimensión y la variable.

<sup>3</sup>**Claridad:** Se entiende sin dificultad alguna el enunciado del ítem, es conciso, exacto y directo.

**DATOS GENERALES DEL EXPERTO**

Apellido y nombres: Diaz Martínez, Juan Leandro

Profesión: Ingeniero Mecánico Electricista

Especialidad: Mantenimiento Industrial



-----  
**JUAN LEANDRO  
 DIAZ MARTINEZ**  
 Ingeniero Mecánico Electricista  
 CIP N° 261954

## ANEXO 9

### ACTIVIDADES DEL PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO POR TERMOGRAFÍA Y VIBRACIÓN PARA INCREMENTAR LA CONFIABILIDAD DE LA ELECTROBOMBA CENTRIFUGA RADIAL DE 30 HP

PLAN PREDICTIVO				
<b>Empresa</b>	Casa Grande S. A. A			
<b>Equipo</b>	Electrobomba centrifuga radial de 30 HP			
<b>Modelo</b>	125 - 315 Hidrostral			
<b>Elaborado</b>	Rosales Vásquez, Alexis Enrique			
N°	Componente	Actividad	Frecuencia	Responsable
1	Eje de transmisión	Realizar 3 pruebas de vibración en el eje transmisión, en ángulos de 0°, 45° y 90°. (No se debe superar los 3 mm/s)	Diaria	Ingeniero/Técnico. (Especialista en vibración)
2		Verificar el estado de rotación del eje de transmisión (Precisar y regular juego rotacional).	Diaria	Técnico
3		Verificar el estado de acoplamiento del eje (Realizar ajustes de ser necesarios)	Diaria	Técnico
4		Verificar el estado de rotación del eje de transmisión. (Debe trabajar a 1760 rpm, para evitar desequilibrio)	Semanal	Ingeniero/Técnico de mantenimiento
5		Verificar el montaje del eje sobre los rodamientos del motor y bomba.	Semanal	Ingeniero/Técnico de mantenimiento
6		Verificar alineamiento de la línea axial del eje, respecto a la superficie base de la electrobomba (Deben ser paralelas, para evitar vibración)	Semanal	Técnico de mantenimiento
7		Verificar la holgura entre el eje de transmisión y el aro interior del cojinete. (Ajustar si el valor es mayor a 0.010 mm, recomendado por diseñadores de electrobombas).	Mensual	Técnico de mantenimiento

8	Rodamientos	Verificar mediante la termografía, que la temperatura del lubricante en los rodamientos no supere los 50°C (3 pruebas/día). Para evitar sobrecalentamientos.	Diaria	Ingeniero/Técnico. (Especialista en termografía)
9		Comprobar el estado de alineamiento entre la línea axial de los rodamientos y la base, mediante una prueba de vibración. No debe superar la vibración de 0.8 g.	Diaria	Ingeniero/Técnico. (Especialista en vibración)
10		Verificar corrosión por rozamiento entre eje y aro interior de los rodamientos.	Mensual	Técnico de mantenimiento
11		Verificar posible erosión eléctrica en rodamientos, lo cual causa desbalance crítico.	Mensual	Técnico de mantenimiento
12		Verificar el montaje de los rodamientos del motor y bomba, para evitar desbalanceo.	Mensual	Técnico de mantenimiento
13		Verificar posibles fisuras en el aro interior de los rodamientos del motor y bomba.	Mensual	Técnico de mantenimiento
14		Verificar el estado de lubricante en los rodamientos del motor y bomba.	Mensual	Técnico de mantenimiento
15		Aislamiento	Verificar la temperatura del aislamiento en las espiras del bobinado (1 prueba por día), no debe superar los 50°C.	Diaria
	Verificar el flujo de corriente entre conductores (No se debe superar los 40 A, para evitar sobrecalentamientos)		Diaria	Técnico de mantenimiento
16	Verificar posible contaminación del bobinado.		Trimestral	Técnico de mantenimiento



		Verificar la condición del aislamiento de las espiras del bobinado. Puede causar distorsión armónica y con ello vibración excesiva.	Trimestral	Técnico de mantenimiento
17	Motor	Verificar la temperatura del bobinado (No debe superar los 40°C) (1 prueba por día)	Diaria	Ingeniero/Técnico. (Especialista en termografía)
18		Realizar 3 pruebas/día de la temperatura superficial del motor eléctrico en el lado donde se ubican los rodamientos (No debe superar la temperatura máxima de 50°C)	Diaria	Ingeniero/Técnico. (Especialista en termografía)
19		Verificar la vibración del motor eléctrico, respecto a su base de apoyo. (No debe superar los 3 mm/s)	Diaria	Ingeniero/Técnico. (Especialista en vibración)
20		Verifique que el motor no trabaje sobre la potencia mecánica permitida. (Valor que se verifica mediante la intensidad y tensión)	Diaria	Ingeniero/Técnico.
21		Comprobar desbalance, entre eje de transmisión del motor y su base, midiendo vibración en posiciones de 0°, 45° y 90°.	Diaria	Ingeniero/Técnico. (Especialista en vibración)
22		Verificar Interrupción de algunas fase, porque puede generar recalentamientos en el motor.	Diaria	Ingeniero/Técnico.
23		Verificar estado de ajuste del motor eléctrico con su superficie (Ajustar pernos correctamente, para evitar vibraciones)	Mensual	Técnico de mantenimiento
24		Comprobar el estado del rotor, para evitar corto circuitos y sobrecargas, evitando sobrecalentamientos, que puedan dañar los	Semestral	Técnico de mantenimiento

		rodamientos ubicados en el lado del motor.		
25	Bomba	Medición de la vibración entre el eje de la bomba y el impulsor (No se debe superar los 1.5 mm/s). 1 prueba por día de 5 minutos.	Diaria	Ingeniero/Técnico. (Especialista en vibración)
26		Medir desbalance del impulsor (No debe superar los 3 mm/s) para evitar daños en los rodamientos del lado de la bomba.	Semanal	Ingeniero/Técnico. (Especialista en vibración)
27		Medir el flujo volumétrico de trabajo de la bomba en el lado de succión, para evitar sobrecargas, y de esta no generar desequilibrio en el eje.	Diaria	Ingeniero/Técnico.
28		Verificar el estado de alineamiento de la bomba con su superficie de apoyo (No debe superar los 0.8 g)	Diaria	Ingeniero/Técnico. (Especialista en vibración)
29		Verificar el estado de prensaestopas, estopas y carcasa, para reducir los efectos de vibración en el impulsor.	Bimestral	Ingeniero/Técnico en mantenimiento
30		Revisar el estado de los anillos de desgaste, bujes y sellos hidráulicos, para evitar la fuerza axial que genera vibración en el cuerpo de la bomba.	Semestral	Técnico de mantenimiento
30	Conductores eléctricos	Revisar sobrecargas en los conductores eléctricos (mediante la corroboración del amperaje respecto a la superficie transversal del cable).	Semanal	Ingeniero/Técnico en mantenimiento
31		Verificar interrupciones de alguna fase, fases invertidas, para evitar paros intempestivo, que puedan dañar la electrobomba.	Semanal	Ingeniero/Técnico en mantenimiento