



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
MECÁNICA ELÉCTRICA

Mantenimiento basado en condición por ultrasonido y vibración,
para mejorar la confiabilidad de ventilador de tiro forzado de una
caldera

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
Ingeniero Mecánico Electricista

AUTORES:

Ruiz Haro, Nixon Janer (orcid.org/0000-0003-0336-8946)

Yupanqui Avalos, Werner Neander (orcid.org/0000-0003-4123-9707)

ASESOR:

Dr. Luján López, Jorge Eduardo(orcid.org/0000-0003-1208-1242)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Sistemas y Planes de Mantenimiento

LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

TRUJILLO - PERÚ

2023

DEDICATORIA

*Los autores dedicamos a
Adiós, ante todo, el presente
informe de tesis. Por su
gracia infinita, por su guía en
este proceso de académico,
por ser nuestra fortaleza en
aquellas circunstancias de
debilidad.*

*Dedicamos este estudio a
nuestros padres, por creer en
nosotros, por su ayuda
constante y sobre todo por
sus consejos acertados, para
luchar por nuestras metas.*

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a los docentes de la Universidad César Vallejo sede Trujillo, de la escuela profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica por contribuir en nuestra formación profesional durante todo nuestro periodo académico.

Agradecemos a nuestro docente asesor de la presente investigación, por sus observaciones y críticas acertadas que han ayudado a enriquecer este trabajo de tesis, colocándolo a la altura de una investigación tecnológica y novedosa.

DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD DEL ASESOR



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

Declaratoria de Autenticidad del Asesor

Yo, LUJÁN LÓPEZ JORGE EDUARDO, 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: "Mantenimiento basado en condición por ultrasonido y vibración para mejorar la confiabilidad de ventilador de tiro forzado de una caldera.", cuyos autores son RUIZ HARO NIXON JANER, YUPANQUI AVALOS WERNER NEANDER, 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, 08 de Diciembre del 2023

Apellidos y Nombres del Asesor:	Firma
LUJÁN LÓPEZ JORGE EDUARDO DNI: 17897692 ORCID: 0000-0003-1208-1242	Firmado electrónicamente por: JLUJAN el 09-12- 2023 09:46:06

Código documento Trilce: TRI - 0688514

DECLARATORIA DE ORIGINALIDAD DE LOS AUTORES



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

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

Declaratoria de Originalidad de los Autores

Nosotros, RUIZ HARO NIXON JANER, YUPANQUI AVALOS WERNER NEANDER estudiantes de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - TRUJILLO, declaramos bajo juramento que todos los datos e información que acompañan la Tesis Completa titulada: "Mantenimiento basado en condición por ultrasonido y vibración para mejorar la confiabilidad de ventilador de tiro forzado de una caldera.", es de nuestra autoría, por lo tanto, declaramos que la Tesis Completa:

1. No ha sido plagiada ni total, ni parcialmente.
2. Hemos 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 asumimos la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de la información aportada, por lo cual nos sometemos a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

Nombres y Apellidos	Firma
NIXON JANER RUIZ HARO DNI: 46523994 ORCID: 0000-0003-0336-8946	Firmado electrónicamente por: NRUIZHA8 el 08-12- 2023 22:41:34
WERNER NEANDER YUPANQUI AVALOS DNI: 70219344 ORCID: 0000-0003-4123-9707	Firmado electrónicamente por: WNYUPANQUIA el 08- 12-2023 21:54:00

Código documento Trilce: TRI - 0688515

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Dedicatoria	ii
Agradecimiento.....	iii
Declaratoria de autenticidad del asesor	iv
Declaratoria de originalidad de los autores	v
Índice de contenidos.....	vi
Índice de tablas.....	vii
Índice de figuras	viii
Resumen	ix
Abstract	x
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	4
III. METODOLOGÍA	11
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. Procedimiento.....	13
3.6. Método de análisis de datos	14
3.7. Aspectos éticos	15
IV. RESULTADOS	16
4.1. Determinación de la confiabilidad del ventilador de tiro forzado del ingenio azucarero de La Libertad.	16
4.2. Simulación del mantenimiento basado en la condición mediante las técnicas predictivas de ultrasonido y vibración al ventilador de tiro forzado del ingenio azucarero de La Libertad.....	23
4.3. Determinar la confiabilidad del ventilador de tiro forzado con la implementación del mantenimiento basado en la condición del ingenio azucarero de La Libertad.	33
4.4. Evaluar el beneficio/costo para la implementación del mantenimiento basado en la condición del ventilador de tiro forzado del ingenio azucarero de La Libertad.	36
V. DISCUSIÓN	38
VI. CONCLUSIONES.....	42
VII. RECOMENDACIONES.....	43
REFERENCIAS	44
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Técnicas e instrumentos de recolección de datos de la investigación	13
Tabla 2. Datos técnicos y operativos del ventilador de tiro forzado	16
Tabla 3. Conceptualización, frecuencia, TTR y causa de la falla	17
Tabla 4. Frecuencia y TTR del ventilador de tiro forzado	20
Tabla 5. Tiempo nominal total y tiempo entre fallas del ventilador	21
Tabla 6. Tiempos medios del mantenimiento MTTR y MTBF	21
Tabla 7. Tasas operativas del mantenimiento MOR y MRR del ventilador	22
Tabla 8. Confiabilidad actual del ventilador de tiro forzado	22
Tabla 9. TTR y frecuencia por cada elemento en falla del ventilador	25
Tabla 10. Ponderaciones del análisis de criticidad	26
Tabla 11. Comparativo del TTR por fallas por vibración y otras fallas del VTF	27
Tabla 12. Resultados de la velocidad y aceleración de vibración del ventilador	28
Tabla 13. Acciones para la reducción de la vibración mecánica	30
Tabla 14. Resultados de la velocidad y aceleración en mejora del ventilador	31
Tabla 15. TBF, TTR y MTBF inicial y estimado del ventilador de tiro forzado	33
Tabla 16. MTTR, MOR y MRR inicial y estimado del ventilador de tiro forzado	34
Tabla 17. Confiabilidad inicial y estimada del ventilador de tiro forzado	34
Tabla 18. Costos para el mantenimiento basado en la condición	36
Tabla 19. Costo en inversión para mantenimiento basado en la condición	36
Tabla 21. Costo total para el mantenimiento basado en la condición	37
Tabla 20. Beneficio del mantenimiento basado en la condición	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Variación de la confiabilidad inicial del ventilador en el tiempo	23
Figura 2. Procedimiento para la simulación del MBC	24
Figura 3. Porcentaje de tiempo de reparación de vibraciones y otras averías	27
Figura 4. Porcentaje de frecuencia de fallas de vibraciones y otras averías	27
Figura 5. Resultados del desplazamiento vibracional actual en ventilador	28
Figura 6. Resultados del desplazamiento vibracional mejorado en ventilador	31
Figura 7. Simulación de la confiabilidad inicial y estimada por el ventilador	35
Figura 8. Matriz de criticidad de equipos	56
Figura 9. Valores de vibración y aceleración de la norma técnica ISO 10816	57
Figura 10. Simulación del TTR del ventilador de tiro forzado	60
Figura 11. Simulación de la frecuencia del ventilador de tiro forzado	60

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo, analizar el impacto del mantenimiento basado en la condición por ultrasonido y vibración, en la confiabilidad del ventilador de tiro forzado de una caldera, en ingenio azucarero de La Libertad. La metodología empleada fue de tipo aplicada con diseño preexperimental. Los resultados determinaron que la confiabilidad actual del ventilador de tiro forzado es 76.86%, con un tiempo de reparación de 433.45 horas pérdidas y 141 intervenciones, en 6 meses de evaluación del historial de mantenimiento. Para la simulación del mantenimiento basado en la condición por vibración y ultrasonido, se empleó el software ANSYS, encontrando una velocidad de vibración de 5.9822 mm/s y aceleración de 3.7695 g. Para revertir esta situación se propusieron distintas acciones a los elementos críticos como: aspas del ventilador, ejes, acoplamientos, rodamientos y cimientos/soportes. Obteniendo valores de velocidad de 1.4516 mm/s y aceleración de 0.3052 g, aceptables por la norma ISO 10816. La reducción de la vibración en el ventilador de tiro forzado permitió aumentar la confiabilidad a 82.96%, reduciendo el 69% del tiempo de reparación y el 74% de las intervenciones por vibración. Se concluye que la aplicación del mantenimiento basado en la condición es viable con un beneficio/costo de 17.

Palabras clave: *Vibración mecánica, ultrasonido, mantenimiento basado en la condición, ventilador de tiro forzado.*

ABSTRACT

The objective of this study was to analyze the impact of maintenance based on the condition by ultrasound and vibration, on the reliability of the forced draft fan of a boiler, in the sugar mill of La Libertad. The methodology used was applied with a pre-experimental design. The results determine that the current reliability of the forced draft fan is 76.86%, with a repair time of 433.45 hours lost and 141 interventions, in 6 months of evaluation of the maintenance history. For the maintenance simulation based on the vibration and ultrasound condition, the ANSYS software was implemented, finding a vibration speed of 5.9822 mm/s and an acceleration of 3.7695 g. To reverse this situation, different actions were proposed for critical elements such as: fan blades, shafts, couplings, bearings and foundations/supports. Obtaining speed values of 1.4516 mm/s and acceleration of 0.3052 g, acceptable by the ISO 10816 standard. The reduction of vibration in the forced draft fan allowed increasing reliability to 82.96%, reducing 69% of repair time and 74% of vibration interventions. It is concluded that the application of condition-based maintenance is viable with a benefit/cost of 17.

Keywords: *Mechanical vibration, ultrasound, condition-based maintenance, forced draft ventilator.*

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el mantenimiento es el centro de las operaciones de cualquier actividad industrial, debido a su relación directa con la productividad y competitividad laboral (Bautista *et al*, 2020). De manera global el mantenimiento industrial puede conceptualizarse como una combinación de técnicas y acciones necesarias para mantener el buen funcionamiento de un equipo en un proceso productivo, incrementando su vida útil (Wu *et al*, 2021). La misma necesidad de las empresas por mejorar el mantenimiento de sus equipos, dan cavidad a la aparición del mantenimiento basado en la condición (MBC), el cual tiene un enfoque superior al mantenimiento preventivo clásico (Wang *et al*, 2021). El MBC permite monitorear el activo físico constantemente, sin interrumpir su operación, para detectar errores o fallas en el futuro, con la finalidad de incrementar la confiabilidad de un equipo (Baokui *et al*, 2022).

En la actualidad el MBC en la industria se vienen aplicando a elementos rotatorios como alabes, lóbulos, impulsores y engranajes, consiguiendo resultados satisfactorios, reduciendo hasta el 60% de las fallas que puedan perjudicar la vida útil del equipo (Broek *et al*, 2021), conllevando a un aumento del 10% en la confiabilidad en promedio, por encima de su valor inicial (Manikandan *et al*, 2021). Cabe precisar que en forma general todo equipo rotatorio crítico, al llegar a fallar, pueden ocasionar la paralización total o parcial de la empresa, elevando los costos de mantenimiento y producción (Tingarikar *et al*, 2021).

De acuerdo a los sucesos encontrados, el MBC solo se viene enfocando en la técnica predictiva de vibración, pero escasos estudios lo enfocan en la combinación con el ultrasonido, permitiendo de esta manera reducir drásticamente los niveles de vibración mecánica. Esto sucede por el desconocimiento de la aplicación de la técnica de ultrasonido la cual es útil en el control y monitoreo de rodamientos. El poco interés por combinar las técnicas de vibración y ultrasonido, generan que aún el tema de vibración en equipos o elementos rotatorios sean una causa para que estos equipos no alcancen su vida útil (Acernese *et al*, 2021).

Asimismo, en la industria los ventiladores como equipos rotatorios, son considerados críticos, porque actúan en la inyección de aire en procesos de combustión, climatización y calefacción. Donde los ventiladores de tiro forzado

(VTF) presentan en un 80% fallas relacionadas con la vibración (desalineamiento y desequilibrio), donde el análisis de vibración no es suficiente para solucionar todos los problemas causados, debido a la exigencia que estos equipos tienen en el proceso productivo, trabajando 24 h/día como es el caso de ventiladores que operan en calderas acuotubulares.

Este problema no es indiferente en los ingenios azucareros nacionales, debido a que el VTF es considerado un equipo de clasificación crítica porque tiene un rol muy importante en la producción, porque este se encarga de la inyección de aire a la combustión, para la producción de vapor sobrecalentado, el cual es utilizado para mover un turbogenerador, permitiendo la generación de energía eléctrica para consumo interno de los equipos de la planta.

El ingenio azucarero Cartavio, cuenta con un VTF de 25 HP, el cual presenta una secuencia de fallas originadas por vibración mecánica, lo cual está trayendo problemas constantes a los departamentos de mantenimiento y producción, donde estos problemas limitan también la inyección de aire en un 65% respecto del flujo total, con una pérdida promedio de 72 horas operativas por mes, conllevando a tener una baja confiabilidad alrededor del 77%. El VTF instalado en la caldera acuotubular de la empresa Cartavio S.A.A, tiene un rol muy importante en la producción, porque este se encarga de la inyección de aire a la combustión, para la producción de vapor sobrecalentado, el cual es utilizado para mover un turbogenerador, permitiendo la generación de energía eléctrica para consumo interno de los equipos de la planta, por tal razón, al fallar el ventilador de tiro forzado el turbogenerador no produciría electricidad, necesitando que la empresa se conecte al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN), generando sobre costos, por lo cual es urgente su intervención mediante un plan de MBC por ultrasonido y vibración para mejorar su confiabilidad.

La realidad problemática presentada, permite plantear la siguiente formulación del **problema general**: ¿Cuál es el impacto del mantenimiento basado en la condición por ultrasonido y vibración, en la confiabilidad del ventilador de tiro forzado de una caldera, en ingenio azucarero de La Libertad? Y como **problemas específicos**: ¿Cuál es la confiabilidad del ventilador de tiro forzado del ingenio azucarero de La Libertad? ¿Cómo simular el mantenimiento basado en la condición mediante las técnicas predictivas de ultrasonido y vibración al ventilador de tiro forzado del

ingenio azucarero de La Libertad? ¿Cuál es la confiabilidad del ventilador de tiro forzado con la implementación del mantenimiento basado en la condición del ingenio azucarero de La Libertad? ¿Cuál es el beneficio/costo para la implementación del mantenimiento basado en la condición del ventilador de tiro forzado del ingenio azucarero de La Libertad?

La presente investigación se **justificó** respecto a la conveniencia, porque permite solucionar un problema de mantenimiento importante en el sector azucarero. Respecto a la justificación social favorece a mejorar el clima laboral y a reducir los accidentes. Desde la justificación práctica genera una solución al problema de mantenimiento que poseen actualmente los VTF. En la justificación teórica la gestión de las técnicas predictivas: ultrasonido y vibración direccionado por un MBC, permitirá mejorar el control de fallas mecánicas y eléctricas en VTF. Y desde la justificación metodológica la aplicación del MBC, en conjunto a las técnicas predictivas como el ultrasonido y vibración, permiten establecer nuevas bases del conocimiento científico en el análisis de vibraciones de ventiladores industriales.

En consecuencia, se plantea el siguiente **objetivo general**: Analizar el impacto del mantenimiento basado en la condición por ultrasonido y vibración, en la confiabilidad del ventilador de tiro forzado de una caldera, en ingenio azucarero de La Libertad. Y como **objetivos específicos**: (1) Determinar la confiabilidad del ventilador de tiro forzado del ingenio azucarero de La Libertad, (2) Realizar una simulación del mantenimiento basado en la condición mediante las técnicas predictivas de ultrasonido y vibración al ventilador de tiro forzado del ingenio azucarero de La Libertad, (3) Determinar la confiabilidad del ventilador de tiro forzado con la implementación del mantenimiento basado en la condición del ingenio azucarero de La Libertad, (4) Evaluar el beneficio/costo para la implementación del mantenimiento basado en la condición del ventilador de tiro forzado del ingenio azucarero de La Libertad.

La investigación en respuesta a la pregunta, plantea la siguiente **hipótesis general**: El impacto del mantenimiento basado en la condición por ultrasonido y vibración, incrementará la confiabilidad del ventilador de tiro forzado de una caldera, en ingenio azucarero de La Libertad.

II. MARCO TEÓRICO

La presente investigación se fundamenta en los siguientes **antecedentes**, los cuales son una síntesis de artículos científicos indexados de alto impacto de bases de datos como scopus, web of science, scielo y science direct respecto al tema de estudio.

Los investigadores Pratama *et al.* (2019) quienes, en su investigación realizada en el sector energético, realizaron un análisis de fallas a los rodamientos de un ventilador de tiro forzado a través de un mantenimiento basado en la condición. El estudio fue de tipo aplicado, con diseño pre-experimental. La muestra fue un ventilador de tiro forzado de 20 HP. Los instrumentos de recolección de datos fueron un cuestionario, ficha de registro y ficha de observación. Los autores encontraron como resultados, que el ventilador de tiro forzado tiene una baja confiabilidad del 78%, el cual es producto de fallas por vibración mecánica encontrando valores críticos entre 0.572 y 0.593 pulg/s, para lo cual se tomaron medidas, como la implementación de un plan de mantenimiento basado en la condición por vibración a los rodamientos, incrementando satisfactoriamente la confiabilidad en un 7.6% por encima de su valor actual, con valores aceptables de vibración de 0.066 a 0.084 pulg/s. Los autores concluyen que un ventilador de tiro forzado de una caldera acuotubular es un equipo crítico para una planta térmica o generación eléctrica, por lo cual un monitoreo constante de la vibración permitirá reducir el 45% de las fallas.

Asimismo, los autores Aziz *et al.* (2021) realizaron un análisis de señales de vibración para detección de fallas en ventiladores industriales. El estudio fue cuasi-experimental, tipo aplicado. La muestra fueron 12 ventiladores industriales de 10 HP. Las técnicas fueron la observación y encuesta. Los autores como resultados encontraron 29 fallas, de las cuales el 62% (18) de las fallas son producto de la vibración mecánica, donde las fallas más críticas se encuentran en los rodamientos, elipses, caja de transmisión de potencia y eje. Para tal fin se realizó un monitoreo constante con un sensor de aceleración, encontrando un valor de aceleración de 2.5 g, el cual es un valor por encima de lo normado ISO-10816, que establece que, para equipos de rotación como ventiladores no se debe superar los valores de vibración media de 1 g. Cuya solución fue el equilibrio de las masas de las elipses,

selección correcta de rodamientos y alineamiento de eje, concluyendo que el monitoreo constante de la vibración mecánica en ventiladores conlleva a reducir en un 21% los costos de mantenimiento.

También los investigadores Acernese *et al.* (2021), llevaron a cabo un estudio de mantenimiento basado en la condición a máquinas rotativas industriales como ventiladores y bombas centrífugas. La metodología de investigación fue de tipo Aplicada, diseño pre-experimental. La muestra fueron 3 ventiladores de tiro forzado de 15 HP y 2 bombas centrífugas de 50 HP. Los instrumentos empleados fueron: ficha de registro, ficha de observación y ficha de entrevista. Los autores encontraron que los ventiladores de tiro forzado, son los equipos más críticos frente a los efectos dinámicos de la vibración mecánica, requiriendo de un mantenimiento basado en la condición, para un monitoreo constante. La aplicación del MBC permitió un incremento del 5.5% en la disponibilidad y 9.2% en la confiabilidad, de donde para cuantificar estos indicadores de gestión se utilizó las ecuaciones estadísticas probabilísticas de Weibull y LogNormal. Los autores concluyen que la mejora de los planes de mantenimiento preventivo y predictivo, en la actualidad son reemplazados por sistemas de gestión inteligente como el mantenimiento basado en la condición. Donde las técnicas como el ultrasonido y vibración, actúan en conjunto limitando la frecuencia vibracional en máquinas rotativas, manteniendo la disponibilidad y confiabilidad en valores óptimos por encima del 95%.

Los autores Broek *et al.* (2021), realizaron un mantenimiento basado en la condición en equipos de producción industrial. El estudio fue de tipo aplicado, diseño experimental. Las técnicas utilizadas fueron la observación, análisis documental y encuesta. La muestra fue 1 ventilador de tiro forzado de 18 HP, un compresor de 5 HP y una bomba centrífuga de 20 HP. Los resultados encontrados respecto al ventilador de tiro forzado, fueron que las fallas provocadas por la vibración mecánica, generan desbalance en las aspas, lo cual conduce a una reducción del 25% del flujo de aire. Por lo cual los investigadores, realizaron un monitoreo constante, utilizando equipos de vibración y ultrasonido, permitiendo tomar las decisiones correctas respecto al cambio de accesorios (chumaceras, pernos, eje de potencia y engranajes de reducción de velocidad), para reducir el 32% del tiempo de reparación. Los autores concluyen que el mantenimiento basado en la

condición es una gran herramienta de la ingeniería de mantenimiento de equipos rotatorios como ventiladores industriales, reduciendo en promedio el 60% de las fallas que limitan la vida útil de los activos físicos.

De la misma manera, los investigadores Tingarikar *et al.* (2021), realizaron un análisis de amplitudes en vibración de rodamientos de ventiladores industriales. La metodología de investigación fue de tipo aplicada con diseño pre-experimental. La muestra estuvo constituida por 5 ventiladores de túneles de aire con una potencia nominal unitaria de 8 HP. Los instrumentos empleados fueron una ficha de registro, cuestionario y ficha de observación. Los autores para analizar las amplitudes de vibración de los ventiladores, realizaron un monitoreo constante, empleando ultrasonido para el sistema de rodamientos, y un vibrómetro para el alineamiento entre eje, base y masa de aspas. Encontrando una amplitud máxima de 5.13 mm/s, tomando acciones como un alineamiento general y dimensionamiento correcto de eje y rodamientos, para mantener una amplitud por debajo de 1 mm/s. Los autores concluyen que el análisis de vibración debe ser integrado a un sistema de mantenimiento basado en la condición con la finalidad de incrementar la disponibilidad y confiabilidad a valores promedios de 96%.

Los investigadores Baokui *et al.* (2022), plantearon una estrategia conjunta de optimización del mantenimiento basado en la condición en equipos industriales. El tipo de investigación fue aplicada – descriptiva, con diseño pre-experimental. Las técnicas empleadas fueron la encuesta y análisis documental. La muestra fueron equipos rotatorios, como 2 ventiladores industriales de 5 HP. Los autores aplicaron un MBC mediante el seguimiento de la vibración, logrando reducir los niveles de vibración RMS (Root Mean Square Amplitude) o media cuadrática de 0.12 pulg/s a 0.025 pulg/s. Los autores concluyen que el mantenimiento basado en la condición debe formar parte de todo sistema productivo crítico, ayudando de esta manera a reducir en promedio el 25% de los costos de mantenibilidad en los equipos rotatorios.

Así como también los investigadores Wang *et al.* (2021), realizaron un modelado del mantenimiento basado en condiciones para evaluar la confiabilidad en equipos industriales rotatorios. El estudio fue aplicado pre-experimental. Las técnicas empleadas fue el análisis documental y ficha de observación. La muestra estuvo

constituida por los equipos de rotación, entre ellos ventiladores de 8 y 10 HP. Los autores encontraron 12 fallas críticas en los ventiladores lo que generaba una confiabilidad de 88%, el cual es un valor crítico para la empresa. Por lo tanto, con el empleo de un ultrasonido se realizó un monitoreo en un tiempo de 30 días, para luego mediante un modelamiento matemático donde se han utilizado las ecuaciones de Weibull, LogNormal y Chi-cuadrado, se puede encontrar una relación proporcional entre la vibración media cuadrática y la confiabilidad, indicando que una confiabilidad superior al 95%, se logran cuando la vibración RMS está por debajo del valor de 1 mm/s. Los autores concluyen que el MBC permite incrementar la confiabilidad hasta en un 12%, a comparación del mantenimiento centrado en la confiabilidad que permite un incremento de hasta el 8%.

El investigador Tsarouhas (2021), realizaron un análisis a los indicadores de gestión: confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad, mediante un mantenimiento basado en la condición incluyendo un enfoque Six Sigma. La metodología fue aplicada – No experimental, Transversal. Se empleó como técnicas la encuesta y el análisis documental. El autor detalló que los indicadores de gestión de mantenimiento más relevantes son la mantenibilidad, disponibilidad y confiabilidad, siendo este último el indicador más significativo, es decir al incrementar la confiabilidad este recae positivamente también en el aumento de la disponibilidad y mantenibilidad. Donde el MBC es el adecuado para optimizar la confiabilidad.

Por otro lado, el investigador Tiboni (2021), realizó un monitoreo de las vibraciones por medio de un mantenimiento basado en la condición en equipos de rotación. El estudio fue aplicado pre-experimental. Como muestra se analizaron ventiladores industriales de 12.5 HP. Las técnicas utilizadas fueron la observación y entrevista. El autor encontró valores críticos de vibración media cuadrática entre 0.18 – 0.21 in/s. Para lo cual se planteó un MBC para reducir la vibración global a valores entre 0.035 – 0.041 in/s, para de esta manera cumplir con la norma ISO 10816. El autor concluye que el mantenimiento basado en la condición, aplicando las técnicas predictivas como ultrasonido y vibración, aumentan la confiabilidad de equipos dinámicos hasta en 95%, reduciendo el 70% de fallas y reduciendo los costos de mantenimiento en un 25%.

En relación a las **teorías relacionadas al tema y enfoques conceptuales**, respecto a las variables de estudio: mantenimiento basado en la condición, ultrasonido, ultrasonido y confiabilidad, tenemos:

El mantenimiento basado en la condición: Es una estrategia de mantenimiento, cuya finalidad es la de monitorear constantemente un equipo crítico, haciendo uso de técnicas predictivas (tintes penetrantes, termografía, vibración, ultrasonido, partículas magnéticas, análisis de aceites, entre otros) y actividades del mantenimiento preventivo (cambios de repuestos y lubricantes) (Baokui *et al*, 2022); con la finalidad de optimizar la confiabilidad, reduciendo drásticamente los tiempos de reparación (Teixeira *et al*, 2020).

El ultrasonido: Es una técnica predictiva, que permite medir vibraciones por encima del umbral de sensibilidad humana con frecuencias entre 20kHz a 10 GHz, es decir nos permite medir frecuencias altas y se puede medir mediante un sensor de ultrasonido. Esta técnica es empleada especialmente para monitorear las condiciones de funcionamiento de rodamientos, funcionando como la primera medida preventiva para evitar fallas prematuras por vibración (Ning *et al*, 2020). El ultrasonido tiene dimensiones como potencia mecánica, frecuencia mecánica, aceleración de vibración y voltaje (Feng *et al*, 2022).

La potencia mecánica, es la capacidad de trabajo que realiza una máquina en un periodo de tiempo y se mide en KW, asimismo, es una magnitud escalar y refleja la rapidez con la que se realiza un trabajo (Lei *et al*, 2020). La potencia mecánica tiene como indicadores el par de motor (torque) y velocidad de rotación (Saito *et al*, 2022), como se muestra en la ecuación 1.

$$P_m = \frac{T_m * \pi * n}{30} \quad (1)$$

Dónde, P_m es la potencia mecánica (kw), T_m es el torque (N.m) y n es la velocidad de rotación (rpm).

La frecuencia mecánica, es la cantidad de veces que vibra un objeto en un determinado periodo de tiempo y se mide en Hz. Y un Hertz (Hz) equivale a un ciclo por segundo (ciclo/s) (Ikeda *et al*, 2023). Las vibraciones producidas en equipos, es la mezcla de diferentes frecuencias (libres y forzadas, con y sin amortiguamiento)

(Garus *et al*, 2022). La frecuencia mecánica cuenta con indicadores como el periodo de tiempo, velocidad de onda y longitud de onda (Pravin, 2019), como se muestra en la ecuación 2.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{V}{\lambda} \quad (2)$$

Dónde, f es la frecuencia mecánica (Hz), T es el periodo (s), V es la velocidad de onda (m/s) y λ es la longitud de onda (m)

La aceleración de vibración, es la variación de la velocidad en un intervalo de tiempo, se mide en unidades g o mm/s² (Pozo *et al*, 2021). La aceleración de vibración tiene indicadores como la amplitud, variación de la velocidad, tiempo, fuerza de oscilación y masa del sólido (Matchonov *et al*, 2021), se determina según la ecuación 3.

$$a_v = \frac{A}{t^2} = \frac{\Delta V}{t} = \frac{F}{m} \quad (3)$$

Donde, a_v es la aceleración de la vibración (m/s), A amplitud del desplazamiento (m), t tiempo durante el desplazamiento máximo (s), ΔV variación de la velocidad, F fuerza de vibración (N) y m masa del sólido u objeto en vibración (Kg).

El voltaje de vibración: es el voltaje que se genera por la carga eléctrica, ya sea por compresión o tensión en el sensor piezoeléctrico, para luego cuantificar los niveles de vibración a los cuales está sometido un equipo (Sánchez *et al.*, 2021). El voltaje de vibración tiene como indicadores a la velocidad de rotación y el tiempo entre vibraciones (Arias *et al.*, 2020).

Vibración mecánica: Es la oscilación de una máquina alrededor de su propio eje de equilibrio, la cual origina desequilibrio, desalineamiento y holguras en los elementos de una máquina, y se mide mediante un vibrómetro o acelerómetro (Verellen *et al*, 2021). La vibración mecánica tiene dimensiones como potencia mecánica, geometría del elemento, velocidad de vibración y frecuencia mecánica (Feng *et al*, 2022). La geometría del elemento en vibración, depende de la forma del elemento, para elementos circulares, tendríamos la longitud y diámetro; y para elementos planos, la geometría se centraría en el largo, ancho y altura (Cho *et al*, 2023). La velocidad de vibración se mide en mm/s, y depende de la amplitud y el tiempo entre

vibraciones. La velocidad determinada en vibración es la media cuadrática RMS o valor eficaz (Yadav *et al*, 2022), se determina según la ecuación 4.

$$V_{RMS} = \frac{1}{\sqrt{2}} * A \quad (4)$$

Dónde, V_{RMS} es la velocidad de vibración eficaz y A es la amplitud pico.

Debemos ser precisos, en indicar que el ultrasonido calcula la vibración de una máquina por medio del valor de la aceleración porque es más sensible a las vibraciones de alta frecuencia superiores a 20kHz, por el contrario, el vibrómetro detecta la vibración mediante la velocidad porque es más sensible a las frecuencias más bajas inferiores a 20 kHz (Karki, 2022).

La confiabilidad: es un indicador de gestión de mantenimiento, expresado estadísticamente en porcentaje, el cual indica la probabilidad que un activo físico trabaje en un determinado tiempo, bajo condiciones específicas, sin producir fallo alguno (Prasetya *et al*, 2020). La confiabilidad es el indicador más relevante de la gestión de mantenimiento, el incremento o reducción de este valor, es directamente proporcional a la confiabilidad y mantenibilidad (Jehani, 2022). La confiabilidad en el mantenimiento tiene dimensiones como los tiempos del mantenimiento y la frecuencia de fallas o averías (Costantino, 2020).

Los tiempos de mantenimiento, son aquellos del cual depende una gestión de mantenimiento industrial, y son: tiempo para reparar (tiempo empleado en una falla), tiempo entre fallas (tiempo útil de operación del equipo) y tiempo global (tiempo total o pronosticado) (Nuno, 2020). Por otra parte, la frecuencia de fallas, es la cantidad de averías que tiene un activo físico o maquina respecto a un determinado tiempo. El aumento o reducción de este valor va a depender enteramente de un correcto plan de mantenimiento, ya que repercute en los costos de mantenimiento y producción (Simon *et al*, 2021), se determina según la ecuación 5.

$$R(t) = \left[e^{-\frac{0.01 * T}{MTBF}} \right] * 100\% = [e^{-0.01 * MOR * T}] \quad (5)$$

Dónde, T es el tiempo de intervalo de estudio (h/año) y $MTBF$ es el tiempo medio entre fallas (h/falla). El $MTBF$ es la razón del tiempo entre fallas TBF (fallas/año) con la frecuencia de fallas n (veces/año). Y MOR es la tasa de operación (falla/h).

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación

La investigación es de tipo **aplicada**, según Hernández *et al.* (2018), este tipo de estudios se centran en resolver un problema específico o característico de una determinada realidad problemática, para lo cual se hace uso de teorías y leyes científicas, incluyendo normas, para dar una respuesta o conclusión. La presente investigación es aplicada, porque busca solucionar un problema de mantenimiento en el ventilador de tiro forzado de una caldera en un ingenio azucarero, utilizando tecnología como el ultrasonido y vibración, para luego mediante las formulaciones y ecuaciones de la ingeniería de mantenimiento definir la confiabilidad.

El diseño de investigación es **preexperimental**, según Hernández *et al.* (2018) define a este tipo de diseño como el primer acercamiento a la solución de una problemática, donde se manipula una sola variable (independiente), y explicar en ella su impacto en la variable dependiente. El presente estudio de investigación es preexperimental porque busca en la variable independiente “Mantenimiento basado en la condición por ultrasonido y vibración” su correspondencia con la variable dependiente “Confiabilidad”, para establecer el impacto que tiene el MBC sobre el la confiabilidad del ventilador de tiro forzado.

La investigación tiene un enfoque **cuantitativo**, según Baena (2019) explica que, el enfoque cuantitativo se basa en la recolección de datos y en su correspondiente análisis, donde se refleja la necesidad de medir y estimar magnitudes de un problema específico. El presente estudio tiene enfoque cuantitativo, porque para medir y estimar el comportamiento de las variables de estudio se ha empleado instrumentos de recolección de datos como fichas de registros, donde se ha recogido datos numéricos, para dar respuesta a los objetivos de la investigación.

La investigación es nivel **explicativo**, según Baena (2019) expone que, son investigaciones que tienen relación causal, basándose en describir un problema específico, encontrando las causas del mismo. La investigación es de nivel **explicativo**, porque busca encontrar las causas de las fallas por vibración y ultrasonido del ventilador de tiro forzado y su incidencia en la confiabilidad.

3.2. Variables y operacionalización

Variable independiente: Mantenimiento basado en la condición por ultrasonido y vibración.

El mantenimiento basado en la condición: Es una estrategia de mantenimiento, cuya finalidad es la de monitorear constantemente un equipo crítico, haciendo uso de técnicas predictivas (tintes penetrantes, termografía, vibración, ultrasonido, partículas magnéticas, análisis de aceites, entre otros) y actividades del mantenimiento preventivo (cambios de repuestos y lubricantes) (Baokui *et al*, 2022).

Ultrasonido: Es una técnica predictiva, que permite medir vibraciones por encima del umbral de sensibilidad humana con frecuencias entre 20kHz a 10 GHz, es decir nos permite medir frecuencias altas y se puede medir mediante un sensor de ultrasonido. Esta técnica es empleada especialmente para monitorear las condiciones de funcionamiento de rodamientos, funcionando como la primera medida preventiva para evitar fallas prematuras por vibración (Ning *et al*, 2020).

Vibración: Es la oscilación de una máquina alrededor de su propio eje de equilibrio, la cual origina desequilibrio, desalineamiento y holguras en los elementos de una máquina, y se mide mediante un vibrómetro o acelerómetro (Verellen *et al*, 2021).

Variable dependiente: Confiabilidad

Confiabilidad: es un indicador de gestión de mantenimiento, expresado estadísticamente en porcentaje, el cual indica la probabilidad que un activo físico trabaje en un determinado tiempo, bajo condiciones específicas, sin producir fallo alguno (Prasetya *et al*, 2020).

En el anexo 1, se detalla la tabla de operacionalización de variables.

3.3. Población, muestra y muestreo

Población: 16 Ventiladores de tiro forzado de calderas acuotubulares de ingenios azucareros del departamento de La Libertad.

Criterios de inclusión:

- Ventiladores de tiro forzado de flujo radial.
- Ventiladores de tiro forzado con caja reductora de velocidad por engranajes helicoidales o cónicos.

Criterios de exclusión:

- Ventiladores de tiro forzado de flujo axial y mixto.
- Ventiladores de tiro forzado con reducción de velocidad por fajas V, cadenas, etc.

Muestra: Un ventilador de tiro forzado de 25 HP de la caldera acuotubular del ingenio azucarero Cartavio, del departamento La Libertad.

Muestreo: No probabilístico (Muestreo no aleatorio por conveniencia)

Unidad de análisis: Lo constituye un ventilador de tiro forzado con una potencia de 25 HP, al cual se le realizará un análisis por ultrasonido y vibración.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Tabla 1. *Técnicas e instrumentos de recolección de datos de la investigación*

Técnica	Instrumento
Análisis documental	Ficha de Registro
Observación	Ficha de observación

Fuente: Elaborado por los autores

El análisis documental, mediante fichas de registro permitió recolectar la información de manera ordenada de cada dimensión de las variables, con sus correspondientes indicadores. Es decir, se obtuvo la potencia mecánica, frecuencia mecánica, aceleración de vibración, voltaje, geometría del elemento, velocidad de vibración, tiempos del mantenimiento y frecuencia de fallas.

La técnica de la observación, mediante fichas de observación nos permitió constatar el estado del ventilador de tiro forzado, su ubicación, potencia, dimensión, estado de lubricación, tipos de rodamientos, fallas mecánicas y fallas eléctricas.

3.5. Procedimiento

Para el procedimiento de la recolección de la información, se procedió de la siguiente manera:

- Se solicitó permiso al ingenio azucarero Cartavio, para aplicar las fichas de registro, las cuales contemplan los datos de operación y mantenimiento del ventilador de tiro forzado de la caldera acuotubular.

- Se solicitó permiso al área de mantenimiento del caldero acuatubular para recolectar información del historial de fallas mecánicas, eléctricas u otras, producto de la vibración mecánica del ventilador.
- Se aplicó la ficha de registro del ventilador de tiro forzado, en su área de operación y con ayuda de los técnicos e ingeniero supervisor, se recolectó la respectiva información.
- La información recolectada por los instrumentos, permitieron evaluar todas las fallas que tiene el ventilador de tiro forzado, para de esta manera obtener las fallas por vibración mecánica.
- Las fallas por vibración mecánica, se sometieron a un análisis de criticidad, según el elemento o activo físico donde ocurrían. Obteniendo los elementos críticos que fallan por vibración.
- Los activos físicos críticos del ventilador se separaron, en elementos que requieren análisis de vibración y en elementos que requieren ultrasonido. Para luego mediante los parámetros de operación del ventilador, evaluar los mencionados elementos por ANSYS para obtener los valores actuales de vibración.
- De acuerdo a los valores de vibración obtenidos por el software de simulación ANSYS, se realizaron propuestas según el mantenimiento basado en la condición por ultrasonido y vibración mecánica para cada elemento crítico.
- Las propuestas del mantenimiento basado en la condición por ultrasonido y vibración, se sometieron a una nueva evaluación en el simulador ANSYS, obteniendo valores de velocidad, aceleración y desplazamiento de vibración de acuerdo a lo estipulado por la norma ISO 10816.

3.6. Método de análisis de datos

La información recolectada de los instrumentos (fichas de registro) fue tabulada en tablas de frecuencia y en gráficos estadísticos de barras, dispersión de puntos y gráficos circulares, mediante el empleo del software Excel. Para de esta manera organizar las dimensiones por cada objetivo específico. Asimismo, para determinar la confiabilidad mediante el método estadístico LogNormal se utilizó hojas de cálculo del mismo programa.

3.7. Aspectos éticos

Los autores del presente estudio, se comprometieron a respetar la intelectualidad académica, sin la necesidad de incurrir en el plagio. Asimismo, se comprometen a respetar la información obtenida por la empresa Cartavio, no divulgando o compartiéndola, empleándola solo para el fin que persigue esta investigación. También se protegió la identidad de las personas que participan en los instrumentos de recolección de información. Los autores cumplen con presentar un informe académico según la norma ISO 690 y con un porcentaje de turnitin mínimo, según la normativa académica de investigación de la Universidad César Vallejo.

IV. RESULTADOS

4.1.DETERMINACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DEL VENTILADOR DE TIRO FORZADO DEL INGENIO AZUCARERO DE LA LIBERTAD.

Para determinar la confiabilidad actual del ventilador forzado, del ingenio azucarero, fue necesario conocer sus datos técnicos de operación y nominales, los cuales se muestran en la tabla 2. Encontrando que el ventilador trabaja al 83.33% de su potencia nominal, y que debido a las diversas fallas por vibración el ventilador solo entrega el 73.61% del flujo nominal para el cual fue diseñado, causando deficiencias en el sistema de combustión del caldero acuotubular.

Tabla 2. Datos técnicos y operativos del ventilador de tiro forzado

Equipo	Ventilador de tiro forzado de caldera acuotubular
Potencia nominal	30 hp
Potencia operativa	25 hp
% carga de trabajo	83.33%
Velocidad de rotación	1190 rpm
Flujo volumétrico nominal	47546.00 m3/h
Flujo volumétrico operación	35000.00 m3/h
% Flujo de trabajo	73.61%
Vida operativa	6 años
Vida nominal	30 años
% vida consumida	20.00%
Modelo/serie	CMX 900/6P

Fuente: Elaborado por los autores

De la misma manera, el análisis de la confiabilidad por la estadística lognormal, requirió la evaluación de los últimos 6 meses (desde 01 de enero al 30 de junio del 2023), para un correcto cálculo de esta variable, según lo requerido por la metodología estadística Lognormal. Encontrando que el tiempo para reparar y la frecuencia de intervenciones por cada mes, como se detalla en la tabla 3. Por ejemplo, en el mes de enero el ventilador de tiro forzado perdió 77.75 horas en 22 intervenciones de mantenimiento debido a fallas por vibración mecánica, conductores eléctricos, bobinado en el motor eléctrico, aislamiento eléctrico, estator del motor y enfriamiento del motor.

Tabla 3. Conceptualización, frecuencia, TTR y causa de la falla

Periodo	Conceptualización técnica de la falla	Frecuencia (vez/mes)	TTR (hora)	Causa de falla
Enero	Elevación de la temperatura en conductores eléctricos de alimentación al motor eléctrico	1	5.30	Conductores eléctricos
	Holgura excesiva entre el rodamiento del lado del ventilador de tiro forzado	2	6.30	Vibración mecánica
	Desequilibrio axial del eje de transmisión ventilador de tiro forzado y motor eléctrico	2	7.40	Vibración mecánica
	Desequilibrio en masa de aspas del ventilador de tiro forzado	2	7.30	Vibración mecánica
	Holgura excesiva entre el rodamiento del lado del motor eléctrico	3	6.30	Vibración mecánica
	Desgaste de la cara lateral del rodamiento del lado del motor eléctrico	2	12.00	Vibración mecánica
	Excesiva elevación de la temperatura generando deposición en aislante del motor eléctrico	1	4.00	Bobinado del motor eléctrico
	Desequilibrio entre base del motor eléctrico y el ventilador de tiro forzado	1	7.25	Vibración mecánica
	Corto circuito en el campo de las espiras del motor eléctrico	1	4.30	Aislamiento eléctrico
	Problemas con el arrollamiento estático a masa	1	5.20	Estator del motor eléctrico
	Desgaste prematuro de los rodamientos del lado del motor eléctrico	3	7.40	Vibración mecánica
	Deficiencias en el nivel de flujo de aire en el sistema de enfriamiento	1	3.00	Enfriamiento del motor eléctrico
	Líneas eléctricas sobrecalentadas por continuidad	2	2.00	Conductores eléctricos
SUBTOTAL		22	77.75	
Febrero	Excesiva vibración en la base de soporte del motor eléctrico	2	11.25	Vibración mecánica
	Desalineación entre espiras del ventilador y el eje mecánico de rotación	3	6.20	Vibración mecánica
	Problemas con el arrollamiento estático a masa en motor eléctrico	1	6.00	Bobinado del motor eléctrico
	Holguras entre el eje de transmisión y rodamientos del motor eléctrico	3	4.25	Vibración mecánica
	Mala lubricación del sistema de transmisión para la reducción de velocidad del ventilador	1	6.50	Enfriamiento del motor eléctrico
	Cortocircuito en conductores de alimentación del motor eléctrico	1	4.00	Bobinado del motor eléctrico
	Fisuras en el sistema de transmisión por engranajes por mala alineación entre ejes	3	9.35	Vibración mecánica
	Fisuras en las caras de los engranajes helicoidales del sistema de transmisión del ventilador	3	8.40	Vibración mecánica
Mal estado del aislamiento en el motor eléctrico	1	2.00	Aislamiento	
Sobrecalentamiento de los conductores de alimentación	1	6.00	Conductores eléctricos	

	Desalineación entre ejes de rotación motor eléctrico y ventilador de tiro forzado	2	7.30	Vibración mecánica
SUBTOTAL		21	71.25	
	Fisuras en el sistema de transmisión por engranajes por mala alineación entre ejes	3	7.30	Vibración mecánica
	Desequilibrio de las aspas de rotación del ventilador de tiro forzado	3	6.30	Vibración mecánica
	Holguras entre el eje de transmisión y rodamientos del motor eléctrico	2	6.40	Vibración mecánica
	Fugas de aceite del sistema de reducción de velocidad	1	3.30	Lubricación del sistema de reducción de velocidad
	Fisuras en engranajes del sistema de reducción de velocidad	2	4.50	Vibración mecánica
	Vibración excesiva en el sistema de reducción de velocidad	3	8.45	Vibración mecánica
Marzo	Temperatura excesiva del motor eléctrico	1	7.00	Temperatura del motor eléctrico
	Ruido excesivo originado por vibración en impulsor del ventilador de tiro forzado	3	7.50	Vibración mecánica
	Desgaste prematuro de los engranajes del sistema de reducción de velocidad por vibración	3	5.20	Vibración mecánica
	Cortocircuito en bobinado del motor eléctrico	1	4.00	Tablero de alimentación
	Cortocircuito en el sub tablero de alimentación del motor eléctrico del ventilador	1	6.00	Bobinado del motor eléctrico
	Fluctuación de la tensión de alimentación al motor eléctrico del ventilador	1	5.00	Tensión de alimentación
SUBTOTAL		24	70.95	
	Desequilibrio en masa de aspas del ventilador de tiro forzado	1	5.50	Vibración mecánica
	Líneas eléctricas sobrecalentadas por continuidad	1	5.00	Conductores eléctricos
	Desgaste prematuro de los rodamientos del lado del motor eléctrico	3	8.50	Vibración mecánica
	Mala lubricación del sistema de transmisión para la reducción de velocidad del ventilador	2	5.00	Lubricación del sistema de reducción de velocidad
Abril	Holgura excesiva entre el rodamiento del lado del ventilador de tiro forzado	3	7.50	Vibración mecánica
	Fisuras en el sistema de transmisión por engranajes por mala alineación entre ejes	3	6.30	Vibración mecánica
	Desgaste prematuro de los engranajes del sistema de reducción de velocidad por vibración	2	7.20	Vibración mecánica
	Corto circuito en el campo de las espiras del motor eléctrico	1	5.00	Aislamiento eléctrico

	Sobrecalentamiento de los conductores de alimentación	1	4.00	Conductores eléctricos
	Desequilibrio axial del eje de transmisión ventilador de tiro forzado y motor eléctrico	4	9.20	Vibración mecánica
	Deficiencias en el nivel de flujo de aire en el sistema de enfriamiento	1	7.00	Enfriamiento del motor eléctrico
	SUBTOTAL	22	70.20	
Mayo	Cortocircuito en bobinado del motor eléctrico	1	3.00	Bobinado del motor eléctrico
	Ruido excesivo originado por vibración en impulsor del ventilador de tiro forzado	3	8.40	Vibración mecánica
	Fluctuación de la tensión de alimentación al motor eléctrico del ventilador	1	2.00	Tensión de alimentación
	Desequilibrio axial del eje de transmisión ventilador de tiro forzado y motor eléctrico	3	8.00	Vibración mecánica
	Líneas eléctricas sobrecalentadas por continuidad	2	3.00	Conductores eléctricos
	Fisuras en el sistema de transmisión por engranajes por mala alineación entre ejes	3	3.30	Vibración mecánica
	Desgaste prematuro de los rodamientos del lado del motor eléctrico	3	6.40	Vibración mecánica
	Holgura excesiva entre el rodamiento del lado del ventilador de tiro forzado	2	5.00	Vibración mecánica
	Desgaste prematuro de los engranajes del sistema de reducción de velocidad por vibración	3	7.00	Vibración mecánica
	Corto circuito en el campo de las espiras del motor eléctrico	1	4.00	Aislamiento eléctrico
	Desalineación entre ejes de rotación motor eléctrico y ventilador de tiro forzado	1	7.00	Vibración mecánica
	Mala lubricación del sistema de transmisión para la reducción de velocidad del ventilador	1	3.30	Lubricación del sistema de reducción de velocidad
	Problemas con el arrollamiento estático a masa	2	2.20	Estator del motor eléctrico
	Desequilibrio en masa de aspas del ventilador de tiro forzado	1	7.00	Vibración mecánica
	Temperatura excesiva del motor eléctrico	1	1.50	Temperatura del motor eléctrico
	SUBTOTAL	28	71.10	
Junio	Fisuras en el sistema de transmisión por engranajes por mala alineación entre ejes	2	6.20	Vibración mecánica
	Deficiencias en el nivel de flujo de aire en el sistema de enfriamiento	1	3.30	Enfriamiento del motor eléctrico
	Ruido excesivo originado por vibración en impulsor del ventilador de tiro forzado	2	8.20	Vibración mecánica
	Líneas eléctricas sobrecalentadas por continuidad	1	5.00	Conductores eléctricos

Desequilibrio axial del eje de transmisión ventilador de tiro forzado y motor eléctrico	1	5.30	Vibración mecánica
Desgaste prematuro de los engranajes del sistema de reducción de velocidad por vibración	3	9.20	Vibración mecánica
Desalineación entre ejes de rotación motor eléctrico y ventilador de tiro forzado	3	7.00	Vibración mecánica
Excesiva elevación de la temperatura generando deposición en aislante del motor eléctrico	1	4.00	Bobinado del motor eléctrico
Desgaste prematuro de los rodamientos del lado del motor eléctrico	3	7.30	Vibración mecánica
Cortocircuito en bobinado retórico	2	3.40	Tensión de alimentación
Holgura excesiva entre el rodamiento del lado del ventilador de tiro forzado	2	5.00	Vibración mecánica
Fisuras en las caras de los engranajes helicoidales del sistema de transmisión del ventilador	3	8.30	Vibración mecánica
SUBTOTAL	24	72.20	

Fuente: Elaborado por los autores

En la tabla 4, se muestra un resumen de la tabla 3, encontrando que, durante el periodo de evaluación de 6 meses (desde 01 de enero al 30 de junio del 2023), el tiempo de reparación total fue 433.45 horas y la frecuencia de intervenciones del mantenimiento 141.

Tabla 4. Frecuencia y TTR del ventilador de tiro forzado

Periodo	Frecuencia (vez/mes)	TTR (horas)
Enero	22	77.75
Febrero	21	71.25
Marzo	24	70.95
Abril	22	70.20
Mayo	28	71.10
Junio	24	72.20
Total	141	433.45

Fuente: Elaborado por los autores

En la tabla 5, se detalla que el tiempo nominal total (TNT) establecido para el ventilador de tiro forzado es 675 horas/mes. Cabe precisas que el TNT es el periodo de tiempo estimado y requerido por la empresa, esperando que el ventilador en este periodo no ofrezca fallas. Asimismo, se muestra el tiempo entre fallas (TBF), el cual indica el tiempo útil libre de averías. Por ejemplo, en el mes de enero se pronosticó por el departamento de mantenimiento que el ventilador trabaje 675

horas, pero debido a las fallas, trabajó 597.25 horas útiles. Para obtener el valor del TBF en el mes de enero se restó 675 horas/mes (Tabla 5) con el valor de 77.75 horas/mes (Tabla 4).

Tabla 5. *Tiempo nominal total y tiempo entre fallas del ventilador de tiro forzado*

Periodo	Tiempo nominal total (TNT) (h/mes)	Tiempo entre fallas (TBF) inicial (h/mes)
Enero	675	597.25
Febrero	675	603.75
Marzo	675	604.05
Abril	675	604.80
Mayo	675	603.90
Junio	675	602.80

Fuente: Elaborado por los autores

En la tabla 6, se observa el tiempo medio para reparar (MTTR) por cada mes. Por ejemplo, para el mes de enero se obtuvo que el MTTR fue de 3.53 horas pérdidas por cada falla que interrumpió la operación del ventilador. Para el mes de enero se calculó dividiendo 77.75 horas con su frecuencia de 22 fallas (Tabla 4), es decir: $77.75 \text{ horas} / 22 \text{ fallas} = 3.53 \text{ horas/falla}$. Asimismo, el tiempo medio entre fallas (MTBF) indicó que en el mes de enero cada 27.15 horas en promedio ocurrió una falla en el ventilador. Para mencionado mes, se determinó dividiendo 597.25 horas (Tabla 5) entre su frecuencia de 22 fallas (Tabla 4), por lo tanto, $597.25 \text{ horas} / 22 \text{ fallas} = 27.15 \text{ horas/falla}$.

Tabla 6. *Tiempos medios del mantenimiento MTTR y MTBF*

Periodo	Tiempo medio para reparar (MTTR) (h/falla)	Tiempo medio entre fallas (MTBF) (h/falla)
Enero	3.53	27.15
Febrero	3.39	28.75
Marzo	2.96	25.17
Abril	3.19	27.49
Mayo	2.54	21.57
Junio	3.01	25.12
Global	3.07	25.65

Fuente: Elaborado por los autores

En la tabla 7, se observa las tasas de mantenimiento de operación (MOR) y reparación (MRR), los cuales son los valores inversos del tiempo del MTBF y MTTR respectivamente. Los cuales indican que existe cierto grado de similitud de la MOR por cada mes, pero una variabilidad significativa respecto a la MRR. Es decir, existe mayor estabilidad del TBF en el tiempo, en comparación al TTR. Para el mes de enero la MOR se calculó dividiendo 1/27.15 h/falla (Tabla 6), obteniendo 0.037 fallas/h. Y para la MRR se divide 1/3.53 h/falla (Tabla 6), resultando 0.283 fallas/h.

Tabla 7. *Tasas operativas del mantenimiento MOR y MRR del ventilador de tiro forzado.*

Periodo	Tasa de operación (MOR) (falla/h)	Tasa de reparación (MRR) (falla/h)
Enero	0.037	0.283
Febrero	0.035	0.295
Marzo	0.040	0.338
Abril	0.036	0.313
Mayo	0.046	0.394
Junio	0.040	0.332
Global	0.0390	0.325

Fuente: Elaborado por los autores

En la tabla 8, se observa los resultados de la confiabilidad por cada mes y la confiabilidad global. Para el mes de enero se determinó aplicando la ecuación general de la confiabilidad por Lognormal (Simon et al, 2021): $e^{-0.01 \cdot \text{MOR} \cdot \text{TNT}} = e^{-0.01 \cdot 0.037 \cdot 675} = 77.99\%$. Encontrando una confiabilidad global de 76.86%, valor crítico para el departamento de mantenimiento del ingenio azucarero.

Tabla 8. *Confiabilidad actual del ventilador de tiro forzado*

Periodo	Confiabilidad inicial
Enero	77.99%
Febrero	79.07%
Marzo	76.48%
Abril	78.23%
Mayo	73.13%
Junio	76.43%
Global	76.86%

Fuente: Elaborado por los autores

En la figura 1, se observa la variabilidad de la confiabilidad, durante los 6 meses de evaluación (desde 01 de enero al 30 de junio del 2023), lo cual resultó que durante este periodo ningún mes tuvo un valor de confiabilidad aceptable, y esto se debe a la gran cantidad de fallas e intervenciones que sufre el ventilador de tiro forzado. También cabe precisar que el valor más bajo de la confiabilidad se registró en el mes de mayo con un valor de 73.13%. Esto se debe a que durante este mes el ventilador estuvo sometido a una exigencia máxima respecto al flujo volumétrico de aire, lo cual elevó el tiempo de reparación debido a las fallas por vibración. Lo cual refleja que el ventilador no puede trabajar a su carga máxima tanto en potencia y en flujo volumétrico, porque al incrementa la velocidad y la aceleración de vibración, desencadena una serie de fallas en los activos fijos como las aspas del ventilador, ejes de transmisión, rodamientos y cimientos/soportes.

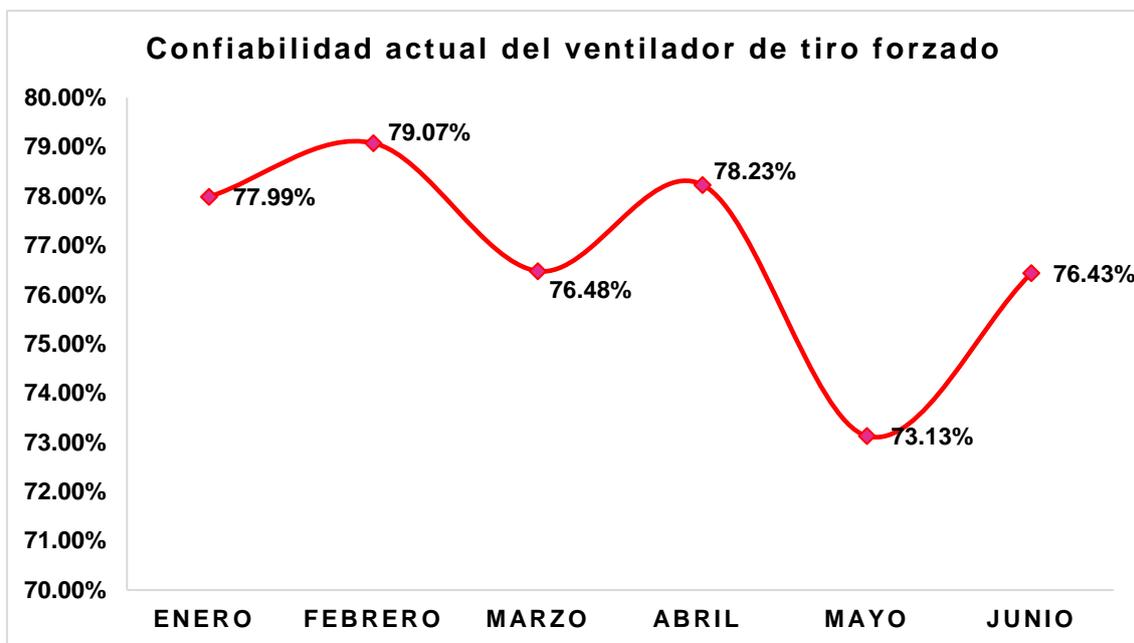


Figura 1. Variación de la confiabilidad inicial del ventilador de tiro forzado de 25 HP, enero – junio del 2023.

4.2.SIMULACIÓN DEL MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONDICIÓN MEDIANTE LAS TÉCNICAS PREDICTIVAS DE ULTRASONIDO Y VIBRACIÓN AL VENTILADOR DE TIRO FORZADO DEL INGENIO AZUCARERO DE LA LIBERTAD.

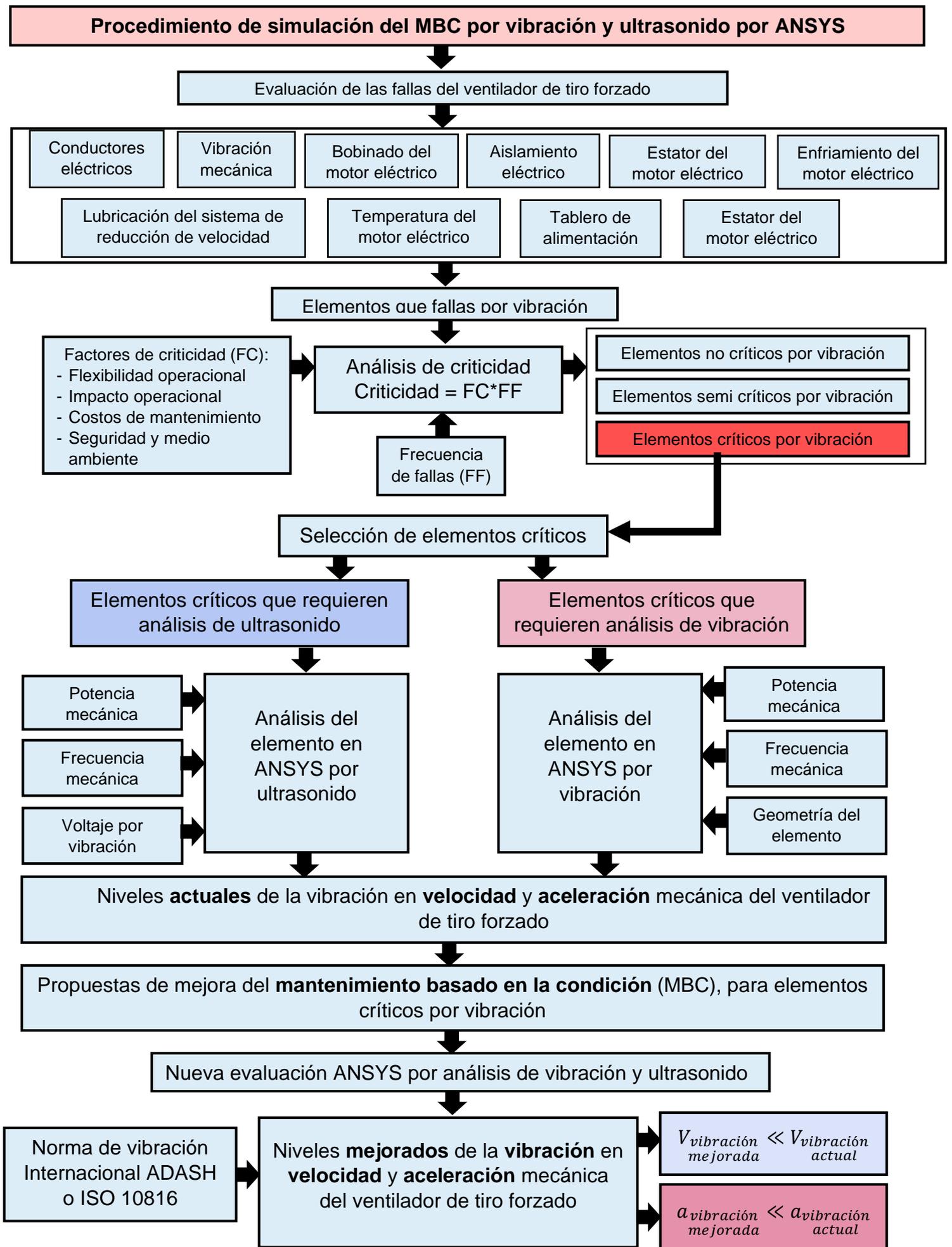


Figura 2. Procedimiento para la simulación del MBC

Para un análisis de las fallas ocurridas en plena operación del ventilador de tiro forzado, fue necesario determinar el TTR y la frecuencia de fallas por cada elemento, como se detalla en la tabla 9. Encontrando que las fallas por vibración tienen los valores de TTR y frecuencia más altos, con un valor de 299.15 horas y 104 fallas respectivamente, respecto del total de 433.45 horas y 141 intervenciones. Lo cual refleja que las fallas por vibración son las que definen el nivel de confiabilidad del ventilador de tiro forzado.

Tabla 9. TTR y frecuencia por cada elemento en falla del ventilador de tiro forzado

Fallas/elementos	TTR (horas)	Frecuencia (vez/mes)
Conductores eléctricos	30.30	9
Vibración mecánica en eje, rodamiento y soportes	299.15	104
Bobinado del motor eléctrico	27.00	6
Aislamiento eléctrico	15.30	4
Estator del motor eléctrico	7.40	3
Enfriamiento del motor eléctrico	19.80	4
Lubricación del sistema de reducción de velocidad	11.60	4
Temperatura en elementos del motor eléctrico	8.50	2
Tablero de alimentación	4.00	1
Tensión de alimentación en motor eléctrico	10.40	4
Total	433.45	141

Fuente: Elaborado por los autores

En la tabla 10, se muestran los resultados del análisis de frecuencia a los elementos críticos que generan fallas en el ventilador de tiro forzado. Para este análisis se empleó la norma internacional ISO JA1011 Y JA1012 para análisis de criticidad (Anexo 4). Encontrando que la vibración mecánica en los ejes, rodamientos y soportes son de característica crítica. Por ejemplo, para estos elementos la ponderación de fallas resultó 4 porque las intervenciones son 104. El impacto operacional es 10 porque al fallar paraliza las operaciones del caldero. La flexibilidad operacional es 4, porque no existe opción de repuesto. La ponderación de costos de mantenimiento es 2, debido a los altos costos de reparación que implican estos elementos. Respecto al impacto en seguridad y medio ambiente es 7, debido a que repercute contra la seguridad del personal de mantenimiento y daños al medio ambiente. La consecuencia (CO) es la adición del IO+FO+CM+ISMA, obteniendo un puntaje de 23. El valor de la criticidad es la

multiplicación de la CO*FF, obteniendo 92 puntos, valor que según la norma es considerado crítico.

Tabla 10. Ponderaciones del análisis de criticidad

Elementos	FF	IO	FO	CM	ISMA	CO	Criticidad del elemento
Conductores eléctricos.	4	4	2	1	1	8	32 Semicrítico
Vibración mecánica en eje, rodamiento y soportes.	4	10	4	2	7	23	92 Crítico
Bobinado del motor eléctrico.	3	4	2	1	3	10	30 Semicrítico
Aislamiento eléctrico.	2	10	2	2	3	17	34 Semicrítico
Estator del motor eléctrico.	2	10	2	1	1	14	28 No crítico
Enfriamiento del motor eléctrico.	2	7	4	2	3	16	32 Semicrítico
Lubricación del sistema de reducción de velocidad.	2	7	4	1	3	15	30 Semicrítico
Temperatura en elementos del motor eléctrico.	1	1	1	1	3	6	6 No crítico
Tablero de alimentación.	1	4	1	1	1	7	7 No crítico
Tensión de alimentación en motor eléctrico.	2	4	1	2	1	8	16 No crítico

Fuente: Elaborado por los autores

Nota: FF: Frecuencia de fallas, IO: Impacto operacional, FO: Flexibilidad operacional, CM: Costo de mantenimiento, ISMA Impacto en seguridad y medio ambiente y CO: Consecuencia.

En la tabla 11, se observa que el TTR y la frecuencia del ventilador de tiro forzado se deben en mayoría a las fallas por vibración, obteniendo que el 69% del TTR y el 74% de las intervenciones se deben a las fallas por vibración. Asimismo, el 31% del TTR y el 26% de las intervenciones se deben a otras fallas relacionadas a los elementos (conductores eléctricos, bobinado del motor eléctrico, aislamiento eléctrico, estator del motor eléctrico, enfriamiento del motor eléctrico, lubricación del sistema de reducción de velocidad, temperatura en elementos del motor eléctrico y tensión de alimentación en motor eléctrico)

Tabla 11. Comparativo del TTR por fallas por vibración mecánica y otras fallas del VTF

Fallas	frecuencia (vez/mes)	TTR (horas)	%Frecuencia	%TTR
Debido a vibraciones	104	299.15	74%	69%
Debido a otras fallas	37	134.30	26%	31%
Total	141	433.45	100%	100%

Fuente: Elaborado por los autores

En la figura 3, se observa que el tiempo para reparar por vibraciones es 69%, respecto al 31% debido a las diversas fallas (conductores eléctricos, bobinado del motor eléctrico, aislamiento eléctrico, estator del motor eléctrico, enfriamiento del motor eléctrico, lubricación del sistema de reducción de velocidad, temperatura en elementos del motor eléctrico y tensión de alimentación en motor eléctrico).

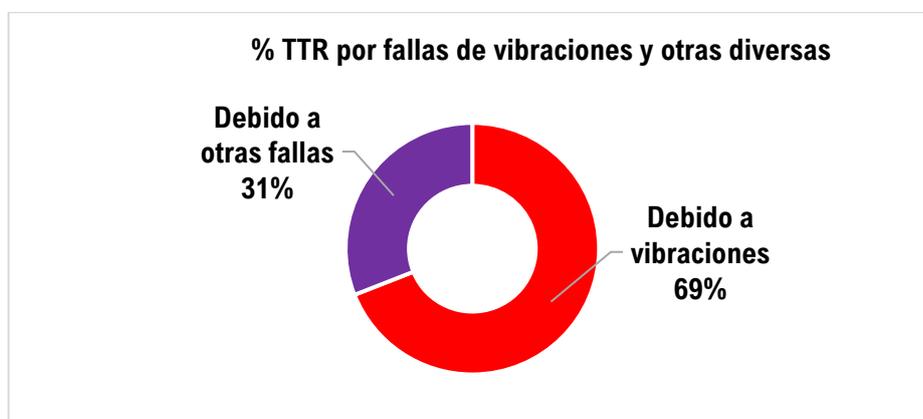


Figura 3. Porcentaje de tiempo de reparación respecto a vibraciones y otras averías.

Y en la figura 4, se observa que existe una mayor cantidad de intervenciones por fallas de vibración con un 74% respecto al total. Y debido a otras fallas se tiene el 26%.

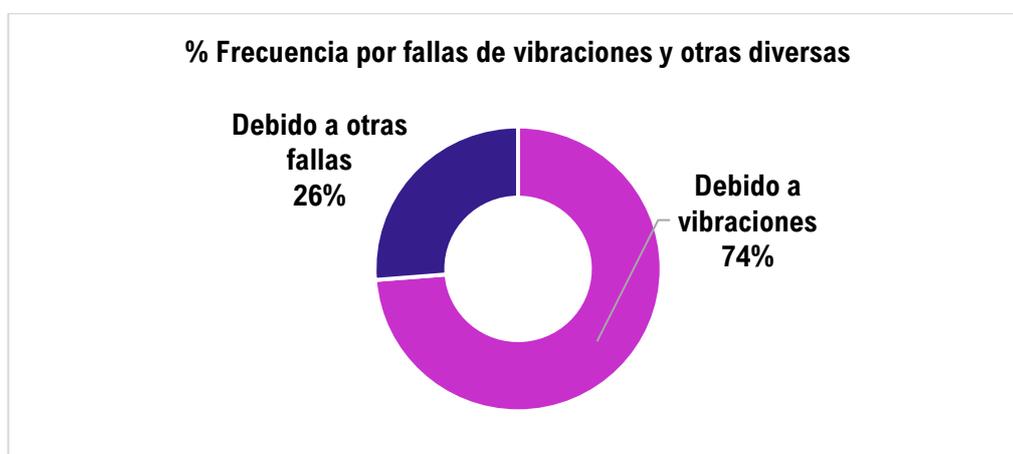


Figura 4. Porcentaje de frecuencia de fallas respecto a vibraciones y otras averías

Para el análisis por vibración y ultrasonido se empleó el software ANSYS, como se muestra en la figura 5. Resultando que el desplazamiento medio entre los ejes x, y, z es 4.3 mm, valor que genera que la velocidad RMS y la aceleración incrementen significativamente.

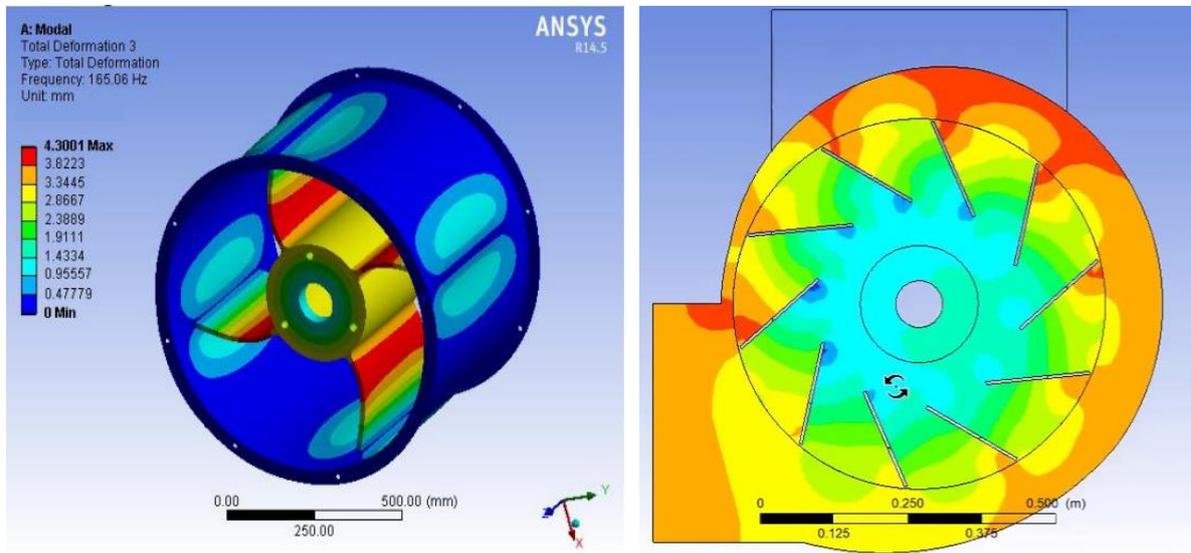


Figura 5. Resultados del desplazamiento vibracional actual en ventilador de tiro forzado

La tabla 12, muestra los resultados ANSYS, por análisis por vibración y ultrasonido (figura 5), considerando 100 muestras como lo estipula la norma ISO 10816. Encontrando una velocidad de vibración máxima promedio de 5.9822 mm/s y una aceleración de 3.7695 g, valores críticos según la norma internacional de vibración para un ventilador de 25 HP a una velocidad de 1190 rpm.

Tabla 12. Resultados de la velocidad y aceleración de vibración del ventilador

Sample	Average effective vibration speed, mm/s	Average vibration acceleration, g
S1	2.421	1.5255
S2	2.46	1.5501
S3	2.528	1.5929
S4	3.491	2.1997
S5	3.511	2.2124
S6	3.751	2.3636
S7	3.885	2.4480
S8	3.856	2.4297
S9	3.1782	2.0026
S10	3.2218	2.0301
S11	3.4578	2.1788
S12	3.4675	2.1849
S13	3.412	2.1500
S14	4.172	2.6289
S15	4.1782	2.6328
S16	4.8952	3.0846
S17	2.1647	1.3640
S18	2.1485	1.3538
S19	2.1879	1.3786
S20	5.3240	3.3548

S21	5.1217	3.2273
S22	5.1248	3.2292
S23	5.1246	3.2291
S24	5.1475	3.2435
S25	5.17982	3.2639
S26	5.2318	3.2967
S27	5.1785	3.2631
S28	5.3678	3.3824
S29	5.1489	3.2444
S30	5.1592	3.2509
S31	5.2113	3.2837
S32	5.1487	3.2443
S33	5.2369	3.2999
S34	5.1278	3.2311
S35	5.4689	3.4461
S36	5.2587	3.3136
S37	5.3681	3.3825
S38	5.1237	3.2285
S39	5.1248	3.2292
S40	5.9822	3.7695
S41	5.2228	3.2910
S42	5.1478	3.2437
S43	4.9875	3.1427
S44	4.8999	3.0875
S45	4.7846	3.0149
S46	4.8975	3.0860
S47	4.7956	3.0218
S48	4.5678	2.8783
S49	4.5896	2.8920
S50	4.7863	3.0159
S51	4.7862	3.0159
S52	4.7814	3.0129
S53	4.2587	2.6835
S54	4.3612	2.7481
S55	4.8975	3.0860
S56	3.4876	2.1976
S57	3.7856	2.3854
S58	3.7895	2.3878
S59	3.4786	2.1919
S60	3.9856	2.5114
S61	4.1238	2.5985
S62	4.1596	2.6210
S63	4.1257	2.5997
S64	4.5896	2.8920
S65	3.4578	2.1788
S66	3.4675	2.1849
S67	3.412	2.1500
S68	4.172	2.6289
S69	4.1782	2.6328
S70	4.8975	3.0860
S71	3.4876	2.1976
S72	3.7856	2.3854
S73	3.7895	2.3878
S74	3.4786	2.1919
S75	3.9856	2.5114
S76	4.1238	2.5985
S77	5.2587	3.3136
S78	5.3681	3.3825
S79	5.1237	3.2285
S80	5.1248	3.2292
S81	5.9822	3.7695
S82	5.2228	3.2910
S83	5.1478	3.2437
S84	4.9875	3.1427
S85	4.8999	3.0875
S86	4.7846	3.0149
S87	4.8975	3.0860
S88	3.4675	2.1849
S89	3.412	2.1500
S90	4.172	2.6289
S91	4.1782	2.6328
S92	4.8975	3.0860
S93	3.4876	2.1976
S94	3.7856	2.3854

S95	3.7895	2.3878
S96	3.4786	2.1919
S97	3.9856	2.5114
S98	4.1238	2.5985
S99	5.2587	3.3136
S100	5.3681	3.3825
Maximum existing value	5.9822	3.7695
Minimum existing value	2.14850	1.35381

Fuente: Elaborado por los autores, mediante los resultados de ANSYS

Debido a los valores críticos encontrados respecto a la velocidad de vibración y aceleración, se propuso acciones para los componentes críticos (ventilador, ejes, acoplamientos, rodamientos y cimientos/soportes), como se detallan en la tabla 13.

Tabla 13. *Acciones para la reducción de la vibración mecánica*

Ítem	Componente	Actividad
1	Ventilador	Reducir la velocidad de rotación. El ventilador actualmente trabaja a su rotación máxima de 1190 rpm. Pero puede trabajar a 900 rpm (requerido por el proceso).
2	Eje	Alinear el cuerpo del ventilador con su eje de transmisión. Incrementar el flujo de aire de 35000 m ³ /h a 45000 m ³ /h, para obtener inestabilidad entre el peso del cuerpo del ventilador y la fuerza de empuje del aire. Regular el juego rotacional entre el eje y rodamientos, este no debe exceder de 0.1 mm.
3	Acoplamiento	Alinear los ejes de rotación del motor y ventilador de tiro forzado. Ajustar acoplamiento entre ejes, mediante acoplamientos dentados. Debido a que actualmente se emplea acoplamientos de pernos y barriletes.
4	Rodamiento	Emplear rodamientos rígidos espalda contra espalda de contacto angular para minimizar la fuerza axial y con ello la vibración. Debido a que actualmente se emplean rodamiento de rodillos cilíndricos.
5	Cimientos/soportes	Alinear los rodamientos del motor y ventilador de tiro forzado. Ajustar los soportes del motor y ventilador a sus bases o cimientos. Mediante soporte de empotramiento.

Fuente: Elaborado por los autores

En la figura 6, se muestra el análisis de vibración y ultrasonido realizado al ventilador de tiro forzado, sometido a las nuevas mejoras o acciones para reducir la vibración mecánica (Tabla 13). Resultando que el desplazamiento vibracional se reduce significativamente a 1.3837 mm.

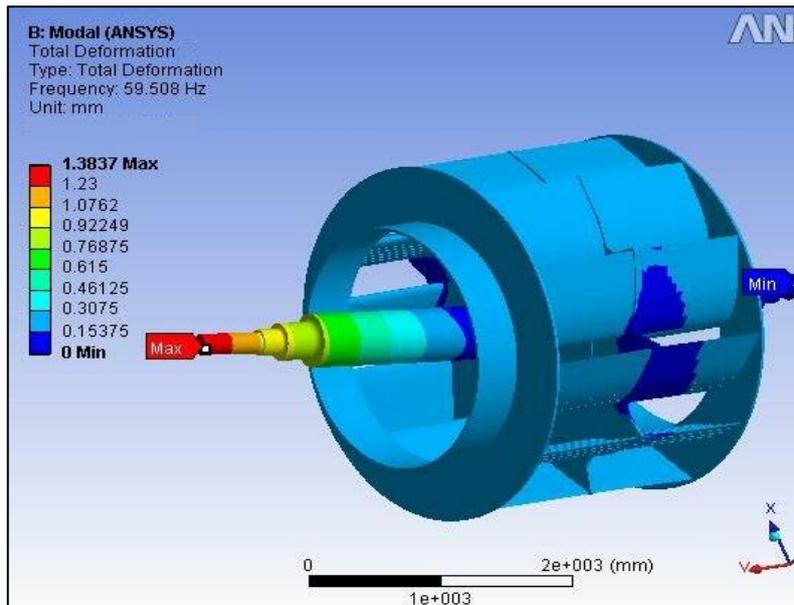


Figura 6. Resultados del desplazamiento vibracional mejorado en ventilador de tiro forzado

En la tabla 14, se observa que la velocidad RMS y la aceleración, disminuyen significativamente con valores máximos promedios de 1.4516 mm/s y 0.3052 g. Valores aceptables por la norma internacional de vibración ISO 10816. Que indica que, para un ventilador de 25 HP y velocidad de 1190 rpm, la velocidad debe ser inferior a 1.5 mm/s y la aceleración debe tener un valor alrededor de 0.3 g.

Tabla 14. Resultados de la velocidad y aceleración de vibración en mejora del ventilador

Sample	Average effective vibration speed, mm/s	Average vibration acceleration, g
S1	0.5875	0.1235
S2	0.5969	0.1255
S3	0.6134	0.1290
S4	0.8471	0.1781
S5	0.8520	0.1791
S6	0.9102	0.1914
S7	0.9427	0.1982
S8	0.9357	0.1967
S9	0.7712	0.1622
S10	0.7818	0.1644
S11	0.8391	0.1764
S12	0.8414	0.1769
S13	0.8280	0.1741
S14	1.0124	0.2129
S15	1.0139	0.2132
S16	1.1879	0.2498
S17	0.5253	0.1104
S18	0.5214	0.1096
S19	0.5309	0.1116
S20	1.2919	0.2716
S21	1.2428	0.2613
S22	1.2436	0.2615
S23	1.2435	0.2615
S24	1.2491	0.2626
S25	1.2569	0.2643
S26	1.2695	0.2669
S27	1.2566	0.2642
S28	1.3025	0.2739
S29	1.2494	0.2627
S30	1.2519	0.2632

S31	1.2646	0.2659
S32	1.2494	0.2627
S33	1.2708	0.2672
S34	1.2443	0.2616
S35	1.3271	0.2790
S36	1.2761	0.2683
S37	1.3026	0.2739
S38	1.2433	0.2614
S39	1.2436	0.2615
S40	1.4516	0.3052
S41	1.2674	0.2665
S42	1.2492	0.2626
S43	1.2103	0.2545
S44	1.1890	0.2500
S45	1.1610	0.2441
S46	1.1884	0.2499
S47	1.1637	0.2447
S48	1.1084	0.2331
S49	1.1137	0.2342
S50	1.1614	0.2442
S51	1.1614	0.2442
S52	1.1603	0.2440
S53	1.0334	0.2173
S54	1.0583	0.2225
S55	1.1884	0.2499
S56	0.8463	0.1779
S57	0.9186	0.1931
S58	0.9196	0.1933
S59	0.8441	0.1775
S60	0.9671	0.2034
S61	1.0007	0.2104
S62	1.0094	0.2122
S63	1.0011	0.2105
S64	1.1137	0.2342
S65	0.8391	0.1764
S66	0.8414	0.1769
S67	0.8280	0.1741
S68	1.0124	0.2129
S69	1.0139	0.2132
S70	1.1884	0.2499
S71	0.8463	0.1779
S72	0.9186	0.1931
S73	0.9196	0.1933
S74	0.8441	0.1775
S75	0.9671	0.2034
S76	1.0007	0.2104
S77	1.2761	0.2683
S78	1.3026	0.2739
S79	1.2433	0.2614
S80	1.2436	0.2615
S81	1.4516	0.3052
S82	1.2674	0.2665
S83	1.2492	0.2626
S84	1.2103	0.2545
S85	1.1890	0.2500
S86	1.1610	0.2441
S87	1.1884	0.2499
S88	0.8414	0.1769
S89	0.8280	0.1741
S90	1.0124	0.2129
S91	1.0139	0.2132
S92	1.1884	0.2499
S93	0.8463	0.1779
S94	0.9186	0.1931
S95	0.9196	0.1933
S96	0.8441	0.1775
S97	0.9671	0.2034
S98	1.0007	0.2104
S99	1.2761	0.2683
S100	1.3026	0.2739
Maximum existing value	1.4516	0.3052
Minimum existing value	0.5214	0.1096

Fuente: Elaborado por los autores, mediante los resultados de ANSYS

4.3. DETERMINAR LA CONFIABILIDAD DEL VENTILADOR DE TIRO FORZADO CON LA IMPLEMENTACIÓN DEL MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONDICIÓN DEL INGENIO AZUCARERO DE LA LIBERTAD.

La tabla 15, muestra que con la aplicación del mantenimiento basado en la condición el tiempo entre fallas aumenta, y el tiempo para reparar se reduce, generando que todos los indicadores de mantenimiento mejoren significativamente. Asimismo, esta tabla muestra la simulación de la confiabilidad en el periodo de un año, donde el tiempo para reparar se reduce de 866.90 horas/año a 598.30 horas/año.

Tabla 15. TBF, TTR y MTBF inicial y estimado del ventilador de tiro forzado

Mes	TBF	TBF	TTR	TTR	MTBF	MTBF
	Inicial	Estimado	Inicial	Estimado	Inicial	Estimado
Ene-23	597.25	636.05	77.75	53.95	27.15	42.40
Feb-23	603.75	643.25	71.25	46.75	28.75	40.20
Jul-22	604.05	644.35	70.95	45.65	25.17	33.91
Ago-22	604.80	645.80	70.20	44.20	27.49	40.36
Set-22	603.90	637.90	71.10	52.10	21.57	33.57
Oct-22	602.80	633.50	72.20	56.50	25.12	33.34
Nov-22	609.48	631.04	80.52	58.96	31.27	48.03
Dic-22	621.52	648.26	68.48	41.74	33.61	45.85
Ene-23	616.28	639.34	73.72	50.66	23.25	30.65
Feb-23	622.57	650.81	67.43	39.19	31.94	46.03
Mar-23	616.13	632.89	73.87	57.11	20.19	30.34
Abr-23	620.57	638.51	69.43	51.49	23.41	30.61
Global	7323.10	7681.70	866.90	598.30	25.97	36.93

Fuente: Elaborado por los autores

La tabla 16, muestra el comportamiento de las tasas de mantenimiento y los tiempos medios de reparación, los cuales han mejorado con la implementación del mantenimiento basado en la condición. Reduciéndose el MTTR de 3.07 horas/falla a 2.88 horas/falla.

Tabla 16. *MTTR, MOR y MRR inicial y estimado del ventilador de tiro forzado*

Mes	MTTR	MTTR	MOR	MOR	MRR	MRR
	Inicial	Estimado	Inicial	Estimado	Inicial	Estimado
Ene-23	3.53	3.60	0.037	0.024	0.283	0.278
Feb-23	3.39	2.92	0.035	0.025	0.295	0.342
Jul-22	2.96	2.40	0.040	0.029	0.338	0.416
Ago-22	3.19	2.76	0.036	0.025	0.313	0.362
Set-22	2.54	2.74	0.046	0.030	0.394	0.365
Oct-22	3.01	2.97	0.040	0.030	0.332	0.336
Nov-22	4.13	4.49	0.032	0.021	0.242	0.223
Dic-22	3.70	2.95	0.030	0.022	0.270	0.339
Ene-23	2.78	2.43	0.043	0.033	0.360	0.412
Feb-23	3.46	2.77	0.031	0.022	0.289	0.361
Mar-23	2.42	2.74	0.050	0.033	0.413	0.365
Abr-23	2.62	2.47	0.043	0.033	0.382	0.405
Global	3.07	2.88	0.039	0.027	0.325	0.348

Fuente: Elaborado por los autores

La aplicación del mantenimiento basado en la condición por vibración y ultrasonido, conllevó a que, la confiabilidad operacional del ventilador incrementa a 82.96%, valor aceptable por el departamento de mantenimiento a cargo de la dirección y operación del ventilador de tiro forzado, como se detalla en la tabla 17.

Tabla 17. *Confiabilidad inicial y estimada del ventilador de tiro forzado*

Mes	Confiabilidad inicial	Confiabilidad estimada
Ene-23	77.56%	84.98%
Feb-23	78.66%	84.23%
Mar-23	76.02%	81.59%
Abr-23	77.80%	84.29%
May-23	72.62%	81.42%
Jun-23	75.98%	81.31%
Jul-23	80.20%	86.62%
Ago-23	81.44%	86.03%
Set-23	74.32%	79.84%
Oct-23	80.57%	86.08%
Nov-23	71.06%	79.66%
Dic-23	74.47%	79.82%
Global	76.67%	82.96%

Fuente: Elaborado por los autores

En la figura 7, se observa la variabilidad de la confiabilidad inicial (sin la aplicación del mantenimiento basado en la condición) y la confiabilidad estimada (con la aplicación del mantenimiento basado en la condición).

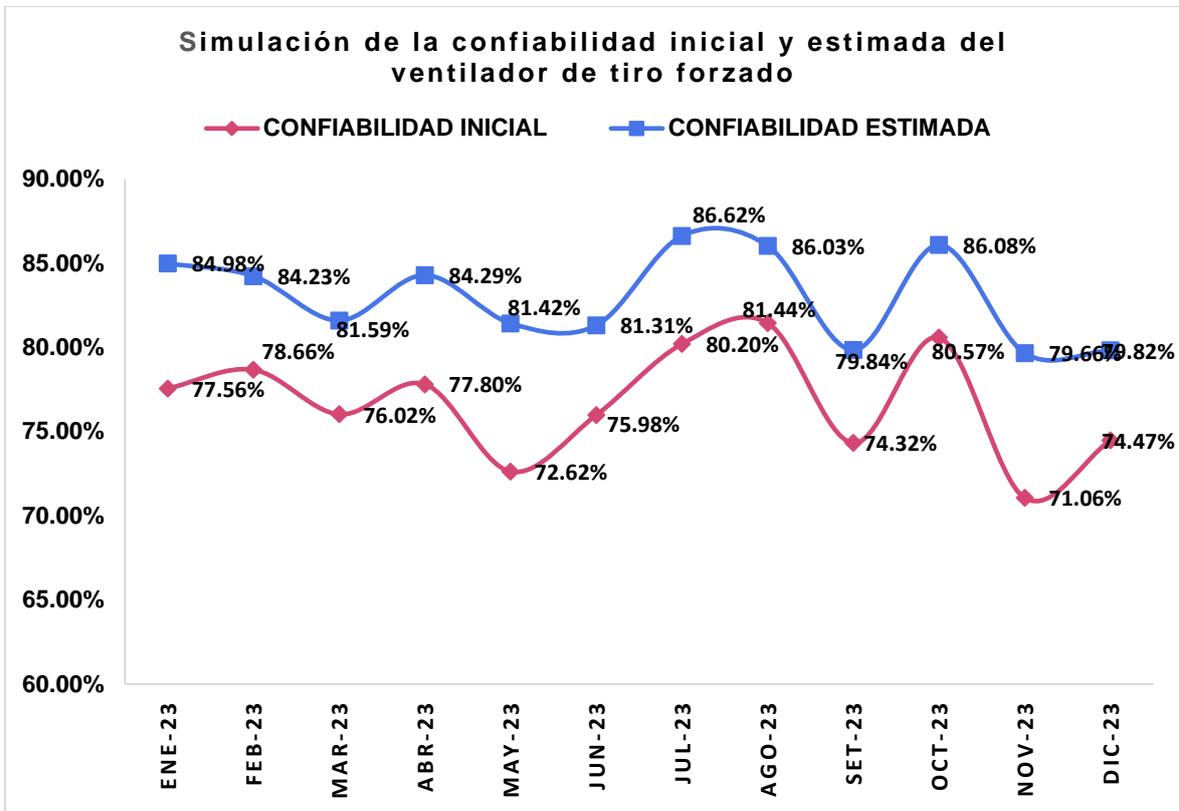


Figura 7. Simulación de la confiabilidad inicial y estimada por el ventilador de tiro forzado

4.4.EVALUAR EL BENEFICIO/COSTO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONDICIÓN DEL VENTILADOR DE TIRO FORZADO DEL INGENIO AZUCARERO DE LA LIBERTAD.

En la tabla 18, se observa los costos operativos en los cuales incurre la aplicación del mantenimiento basado en la condición por ultrasonido y vibración, resultando un costo 100240.75 soles/año.

Tabla 18. Costos para el mantenimiento basado en la condición

Descripción	Cantidad	Valor unitario	Costo total (Soles/año)
Pruebas predictivas de vibración (masa del ventilador, bases del motor y ventilador).	3285 pruebas/año (9 pruebas/día)	5.50 soles/prueba	18067.00
Pruebas predictivas por ultrasonido (Alineamiento de ejes y holguras en rodamientos).	3285 pruebas/año (9 pruebas/día)	6.75 soles/prueba	22173.75
Personal para el análisis del MBC del VTF.	2	2500.00 soles/mensual	60000.00
Total			100240.75

En la tabla 19, se detallan los costos en inversión en la adquisición de equipo vibrómetro y sensor de ultrasonido con un costo de 28420.00 soles.

Tabla 19. Costo en inversión para mantenimiento basado en la condición

Descripción	Cantidad	Costo total (Soles)
Vibrómetro para medición de velocidad RMS y desplazamiento Lutron VB8213, frecuencia: 10 Hz -10 KHz	1	12550.00
Sensor de ultrasonido Scan Plan Interactivo del WAVE Sonatest, frecuencia: 20 KHz - 10 GHz.	1	15870.00
Total		28420.00

La tabla 20, muestra los costos totales para la aplicación del mantenimiento basado en la condición por ultrasonido y vibración, obteniendo un costo total de 128660.75 soles/año.

Tabla 20. Costo total para el mantenimiento basado en la condición

Descripción	Costo total (Soles/año)
Costo de mantenimiento operativo	100240.75
Costo de mantenimiento por inversión de equipos	28420.00
	128660.75

La aplicación del mantenimiento basado en la condición por ultrasonido y vibración, conlleva a una reducción de 268.60 horas/año, lo cual se traduce en un ahorro para la empresa de 2181032.00 soles/año. Cabe mencionar que la empresa pierde 8120 soles por cada hora que paraliza el ventilador de tiro forzado en plena operación.

Tabla 21. Beneficio en la implementación del mantenimiento basado en la condición

TTR inicial	TTR mejorado	ΔTTR	Valor unitario	Beneficio (soles/año)
866.90	598.30	268.60	8120.00 soles/hora	2181032.00

Por lo consiguiente el **beneficio/costo**, seria:

$$B/C = 2181032.00 / 128660.75 = 17$$

Por lo consiguiente, por cada sol invertido se obtiene una utilidad de 17 soles, lo cual indica que el estudio es viable económicamente.

V. DISCUSIÓN

Se planteó como primer objetivo específico el determinar la confiabilidad del ventilador de tiro forzado del ingenio azucarero de La Libertad, esto en base a los aportes de los autores Prasetya *et al.* (2020), Tingarikar *et al.* (2021) y Broek *et al.* (2021), sostienen que la confiabilidad es un indicador de gestión de mantenimiento, expresado estadísticamente en porcentaje, el cual indica la probabilidad que un activo físico trabaje en un determinado tiempo, bajo condiciones específicas, sin producir fallo alguno, donde esta variable influye directamente en la operación de un equipo rotatorio, respecto al tiempo perdido y la cantidad de intervenciones, limitando su vida útil, elevando los costos de mantenimiento y producción. Considerando esto, en la presente investigación se analizó la información recolectada, basada en 6 meses de evaluación del historial de mantenimiento del ventilador de tiro forzado, encontrando que existe relación entre los tiempos de reparación y frecuencia de fallas con la confiabilidad operacional, encontrando un valor para la confiabilidad de 76.86%, valor crítico para el departamento de ingeniería del ingenio azucarero. Estos resultados coinciden con lo encontrado por Pratama *et al.* (2019) quienes, analizaron la confiabilidad de un ventilador de tiro forzado, encontrando un valor de 78%, indicando que este valor se debe al incremento de los tiempos de reparación y la cantidad de averías, producto de la vibración mecánica. Así también los resultados coinciden con Aziz *et al.* (2021) indicaron que la confiabilidad operacional es consecuencia de la cantidad de averías y tiempo improductivos que tiene ventilador de tiro forzado, donde para equipos de operación constante se requiere la confiabilidad sea superior al valor de 80%, donde cada valor unitario porcentual, repercute en los costos de mantenimiento. También coinciden con Acernese *et al.* (2021), quienes indicaron que la confiabilidad se relaciona con los tiempos del mantenimiento y su frecuencia operativa, que limitan que un ventilador de tiro forzado logre llegar a su valor nominal de confiabilidad del 95%. Con esto se evidencia que la confiabilidad de un ventilador de tiro forzado tiene relación con sus parámetros de operación como el tiempo de reparación y la cantidad de intervenciones que se originan durante su operación, tal como lo proponen Prasetya *et al.* (2020), Tingarikar *et al.* (2021) y Broek *et al.* (2021).

Se planteó como segundo objetivo específico el realizar una simulación del mantenimiento basado en la condición mediante las técnicas predictivas de ultrasonido y vibración al ventilador de tiro forzado del ingenio azucarero de La Libertad, esto en base a los aportes de los autores Ning *et al.* (2020) y Verellen *et al.* (2021), quienes sostienen que el mantenimiento basado en la condición (MBC) es una metodología de la gestión del mantenimiento, empleada especialmente para monitorear las condiciones de funcionamiento de elementos rotatorios, respecto al MBC por ultrasonido es empleado especialmente para monitorear las condiciones de funcionamiento de rodamientos, funcionando como la primera medida preventiva para evitar fallas prematuras por vibración de frecuencias altas y en concordancia al MBC por análisis de vibración, este permite medir las oscilaciones de una máquina alrededor de su propio eje de equilibrio, la cual origina desequilibrio, desalineamiento y holguras en los elementos, para evitar fallas por vibraciones bajas. Considerando esto, en la presente investigación se realizó la simulación del MBC por vibración y ultrasonido, empleando el software ANSYS, resultando que en estado actual el ventilador tiene una velocidad de vibración RMS de 5.9822 mm/s y aceleración de 3.7695 g, los cuales son valores críticos. Para revertir esta situación se propusieron acciones para la reducción de la vibración en los componentes críticos encontrados (aspas del ventilador, ejes, acoplamientos, rodamientos y cimientos/soportes), resultando una velocidad de 1.4516 mm/s y aceleración de 0.3052 g, valores aceptables por la norma técnica de vibración de ISO 10816, la cual indica que, la velocidad de vibración no debe superar el valor de 1.5 mm/s y con respecto a la aceleración debe poseer un valor alrededor de 0.3 g, para un ventilador de 25 HP con una velocidad de 1190 rpm. Estos resultados son coincidentes con lo encontrado por Pratama *et al.* (2019), quien mediante un análisis experimental mediante un vibrómetro determinaron que las fallas del ventilador de tiro forzado tienen relación directa con la vibración mecánica, encontrando un pico máximo de velocidad RMS de 15.0622 mm/s, pero mediante un plan de acciones para el MBC, se redujo la velocidad a 2.1336 mm/s, valor aceptable para un ventilador de 20 HP a 2800 rpm, donde la norma específica no debe superar los 2.5 mm/s. Asimismo, los resultados de la presente investigación coinciden con Aziz *et al.* (2021) mediante un análisis experimental en campo determinó mediante el MBC por ultrasonido, que los niveles de aceleración de

vibración fueron 2.5 g, el cual es un valor por encima de lo normado ISO-10816, que establece que, para equipos de rotación como ventiladores de 10 HP a 3000 rpm, no se debe superar los valores de vibración media de 1 g. Con esto se evidencia que el MBC por ultrasonido y vibración, tienen una significancia positiva en la reducción de los niveles de velocidad y aceleración de vibración en un ventilador de tiro forzado, tal como lo explican Ning *et al.* (2020) y Verellen *et al.* (2021).

Se planteó como tercer objetivo específico el determinar la confiabilidad del ventilador de tiro forzado con la implementación del mantenimiento basado en la condición del ingenio azucarero de La Libertad, esto en base a los aportes de Manikandan *et al.* (2021), Broek *et al.* (2021) y Acernese *et al.* (2021), quienes explican que el MBC en la industria es aplicable a elementos rotatorios, consiguiendo resultados satisfactorios, reduciendo hasta el 60% de la frecuencia de fallas, conllevando a un aumento máximo del 10% en la confiabilidad en promedio, por encima de su valor inicial. Considerando esto en la presente investigación, la aplicación del mantenimiento basado en la condición por vibración y ultrasonido, conllevó a que, la confiabilidad operacional del ventilador incremente a 82.96% de un valor inicial de 76.86%, es decir con un incremento del 6.1%, lo cual implicó que el tiempo para reparar por vibraciones se reduzca en 69%, y 31% debido otras fallas (conductores eléctricos, bobinado del motor eléctrico, aislamiento eléctrico, estator del motor eléctrico, enfriamiento del motor eléctrico, lubricación del sistema de reducción de velocidad, temperatura en elementos del motor eléctrico y tensión de alimentación en motor eléctrico). Cabe mencionar que el cálculo de la confiabilidad se realizó mediante el análisis estadístico Lognormal. Estos resultados son coincidentes con los obtenidos por Wang *et al.* (2021), quienes, mediante los métodos de Weibull, LogNormal y Chi-cuadrado determinó la confiabilidad de ventiladores de 8 a 10 HP, encontrando una confiabilidad inicial de 88%, para lo cual se aplicó un MBC permitiendo un incremento en la confiabilidad del 7%. Asimismo, se coincide con Pratama *et al.* (2019), quienes reafirman que la aplicación del MBC permitió un incremento en la confiabilidad de un ventilador de tiro forzado en un valor del 7.6%, logrando reducir el 45% de las fallas. También se coincide con Acernese *et al.* (2021), quienes al aplicar el MBC por vibración en un

ventilador obtuvieron un incremento de la confiabilidad de 9.2%, para lo cual se empleó el método lognormal y Weibull. De la misma manera, coinciden con Broek *et al.* (2021), quienes indican que el MBC permite reducir el 60% de las fallas que limitan la vida útil de los activos físicos por vibración. Con esto se evidencia que el MBC por vibración y ultrasonido, tiene una relación de significancia con el aumento de la confiabilidad, y va de acuerdo a lo propuesto por los autores Manikandan *et al.* (2021), Broek *et al.* (2021) y Acernese *et al.* (2021).

Se planteó como cuarto y último objetivo específico, evaluar el beneficio/costo para la implementación del mantenimiento basado en la condición del ventilador de tiro forzado del ingenio azucarero de La Libertad, esto en base a los aportes de Tingarikar *et al.* (2021), quienes sostienen que el MBC aplicado a equipos rotatorios, permite reducir los costos de mantenimiento, lo cual es consecuencia de un monitoreo constante del equipo mediante técnicas predictivas. En la presente investigación, resultó que el MBC por vibración y ultrasonido aplicado al ventilador de tiro forzado es viable económicamente con un beneficio/costo de 17, lo cual indica que por cada sol invertido se obtienen una utilidad de 17 soles, donde el MBC tiene un costo de 128660.75 soles y un beneficio de 2181032.00 soles, la viabilidad del estudio se sostuvo debido a que, el ventilador de tiro forzado es un equipo crítico, para el ingenio azucarero que al llegar a fallar paraliza la operación del caldero acuotubular y en simultáneo la producción de energía eléctrica, por lo consiguiente la aplicación del MBC redujo en un 30% los costos de mantenimiento. Estos resultados son coincidentes con Aziz *et al.* (2021), quienes explicaron que el monitoreo constante de la vibración mecánica en ventiladores conlleva a reducir en un 21% los costos de mantenimiento. También coinciden con Baokui *et al.* (2022) quienes determinaron que el mantenimiento basado en la condición debe formar parte de todo sistema productivo crítico, ayudando de esta manera a reducir en promedio el 25% de los costos de mantenibilidad en los equipos rotatorios. Con esto se evidencia que el MBC mediante un monitoreo constante, reduce significativamente los costos de mantenimiento, tal como lo propone Tingarikar *et al.* (2021).

VI. CONCLUSIONES

1. Se determinó la confiabilidad del ventilador de tiro forzado del ingenio azucarero de La Libertad, encontrando un valor actual de 76.86%. Para lo cual se evaluaron 6 meses del historial del mantenimiento del ventilador, obteniendo 433.45 horas perdidas y 141 intervenciones de mantenimiento.
2. Para la simulación del mantenimiento basado en la condición mediante las técnicas predictivas de ultrasonido y vibración al ventilador de tiro forzado, se empleó el software ANSYS, resultando que en estado actual el ventilador tiene una velocidad de vibración RMS de 5.9822 mm/s y aceleración de 3.7695 g, los cuales son valores críticos. Para revertir esta situación se propusieron acciones para la reducción de la vibración en los componentes críticos encontrados (aspas del ventilador, ejes, acoplamientos, rodamientos y cimientos/soportes), resultando una velocidad de 1.4516 mm/s y aceleración de 0.3052 g, valores aceptables por la norma técnica de vibración de ISO 10816, la cual indica que, para un ventilador de tiro forzado con una potencia operativa de 25 HP y una velocidad de rotación 1190 rpm, la velocidad de vibración no debe superar el valor de 1.5 mm/s y con respecto a la aceleración debe poseer un valor alrededor de 0.3 g.
3. Se determinó la confiabilidad del ventilador de tiro forzado con la implementación del mantenimiento basado en la condición del ingenio azucarero de La Libertad, obteniendo un valor aceptable de 82.96%. Para lo cual se empleó el método Lognormal, para una estimación de la confiabilidad en el tiempo, según la reducción de los niveles de velocidad y aceleración de vibración, lo cual condujo a reducir el tiempo de reparación en un 69% y el 74% de las intervenciones por vibración.
4. El presente estudio es viable económicamente con un beneficio/costo de 17, lo cual indica que por cada sol invertido se obtienen una utilidad de 17 soles. Asimismo, el MBC tiene un costo de 128660.75 soles y un beneficio de 2181032.00 soles.

VII. RECOMENDACIONES

Se recomienda al ingenio azucarero, diseñar un sistema de gestión de mantenimiento que involucre la caldera acuotubular, turbina de vapor y generador eléctrico, los cuales son equipos que trabajan en función al ventilador de tiro forzado, para optimizar la confiabilidad operacional de la planta fuerza del ingenio azucarero.

Proponer un estudio de sonometría en estado actual y después de la aplicación del mantenimiento basado en la condición al ventilador de tiro forzado, para medir los niveles de presión sonora, y de esta manera poder establecer si se cumplen con los estándares o límites permisibles de nivel sonoro para un área de trabajo industrial. Lo cual contribuye a mejorar el confort de los operarios de mantenimiento.

Capacitar al personal de mantenimiento encargado del ventilador de tiro forzado, sobre los beneficios y manejo del mantenimiento basado en la condición por vibración y ultrasonido. Lo cual incluye instruirlos en el uso de los equipos vibrómetro digital y sensor de ultrasonido.

Elaborar una gráfica de la evolución del proyecto (diagrama de Gantt), para organizar las tareas del mantenimiento basado en la condición, que se basan en medir constantemente la vibración mecánica del ventilador de tiro forzado, analizando los niveles de velocidad RMS y aceleración, para predecir fallas prematuras.

Medir los niveles de vibración, respecto a la velocidad con el vibrómetro 9 veces al día y en relación a la aceleración con el sensor de ultrasonido medir también la misma cantidad de veces, como muestras mínimas según lo recomendado por la norma técnica internacional de vibración ISO 10816, la cual es una norma aplicable en la industria peruana.

Medir mensualmente los indicadores del tiempo de reparación (TTR) y frecuencia de intervenciones, para definir el beneficio económico que se logra con la implementación del mantenimiento basado en la condición por vibración y ultrasonido.

REFERENCIAS

ALI, Ahad. Condition-Based Monitoring and Maintenance: State of the Art Review [online]. India: MDPI, (2):12, 2022. [Consultation date: September 15, 2023]. Available in <https://doi.org/10.3390/app12020688> ISSN: 1202-0688

ALSHAARI, H y NOR, M. Reliability Analysis on Water Pumps in Water Supply System in Johor [online]. Batu Pahat, Malasia: Journal of Physics: Conference Series, (4):8, 2021. [Consultation date: May 16, 2023]. Available in <https://doi:10.1088/1742-6596/1874/1/012021> ISSN: 1874 - 0120.

ARIAS, Ricardo, CUNHA, Alecir y RAMIREZ, Alejandro. Teaching of mechanical vibration concepts using the computational simulation [online]. Brasil: IEEE Latin America Transactions, (3):7, 2020. [Consultation date: April 21, 2023]. Available in <https://doi: 10.1109/tla.2020.9082208> ISSN:1548-0992.

BAENA, Guillermina. Metodología de la Investigación. [ed.] 3. [En línea]. México: Grupo Editorial Patria, (3):19, 2019. [Fecha de consulta: 05 de mayo de 2023]. Disponible en <http://www.biblioteca.cij.gob.mx> ISBN: 9786077447481.

BASIC Study on Mechanical Vibration Suppression System Using 2-Degree-of-Freedom Vibration Analysis por Ikeda Keigo [et al]. [online]. China: MDPI, (1):6, 2023. [Consultation date: May 22, 2023]. Available in <https://doi.org/10.3390/vibration6020025>

BAUTISTA, José y NUNES, Maria. Component Mode Synthesis Method Applied to Acoustic Resonators in Ducts for Structural Vibration Analysis. [online]. Brasil: International Journal of Acoustics & Vibration, (1):6, 2020. [Consultation date: April 18, 2023]. Available in <https://doi.org/ 10.20855/ijav.2020.25.41638>

CHO, Seunghyeon, JEON, Kyunghun y KIM, Chang. Vibration analysis of electric motors considering rotating rotor structure using flexible multibody dynamics-electromagnetic-structural vibration coupled analysis. [online]. Corea del Sur: Journal of Computational Design and Engineering, (1):10, 2023. [Consultation date: April 18, 2023]. Available in <https://doi.org/10.1093/jcde/qwad012> ISBN: 9786077447481.

CONDITION-based maintenance: an industrial application on rotary machines by ACERNESE, Antonio [et al]. Italia: Emerald Publishing, 2021. (1): 565-585, 2021. ISSN: 1355-2511.

CORLEY, J. Vibrational problems of large vertical pumps and motors. Saudi Arabia, Dhahran: Aramco's, (1):8, 2020. ISSN: 1895-1121.

COSTANTINO, Francesco. Mantenimiento basado en la condición: una extensa revisión de literatura. Italia: MDPI, (1): 52, 2020.

CURRAN, K. Predictive Maintenance for Vibration-Related Failures in the Semi-Conductor Industry. [online]. China: Journal of Computer Engineering & Information Technology, (1):7, 2019. [Consultation date: April 18, 2023]. Available in <https://doi.org/10.4172/2324-9307.1000215>

ESTRATEGIA conjunta de optimización del mantenimiento basado en la condición y pedido de repuestos para equipos degradados no lineales bajo mantenimiento imperfecto por Baokui Yang [*et al*]. China: MPDI, (1):11, 2022.

FENG, Cambiando y CHEN, Pang. Investigación sobre vibración de sistemas mecánicos basada en MATLAB. China: Conferencia Internacional sobre Transporte Inteligente, Energía y Potencia, (1):8, 2022.

FRANAS, E y MAREK, K. Vibrodiagnostics as a predictive maintenance tool in the operation of turbo generators of a small hydropower plant. [online]. India: Article Reuse Guidelines, (1):14, 2022. [Consultation date: April 28, 2023]. Available in <https://doi.org/10.1177/16878132221101023>.

GARUS, Sebastian y BŁACHOWSKI, Bartłomiej. Vibraciones mecánicas: tendencias recientes y aplicaciones de ingeniería. Polonia: Bulletin of the poland academy of sciences, (1):12, 2022.

HERNÁNDEZ, R, FERNÁNDEZ, C y BAPTISTA, P. Metodología de la Investigación. [ed.] 4. México: Editorial Mc Graw Hill Education, (1): 714, 2018. ISBN: 9781456260965.

INYANG, Udeme y PETRUNIN, Ivan. Diagnosis of Multiple Faults in Rotating Machinery Using Ensemble Learning. China: MDPI, (1):15, 2023.

JEHANI, Ahmed. Reliability Centered Maintenance Applied on HVAC System. [online]. Arabia Saudita: International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), (2):12, 2022. [Consultation date: April 21, 2023]. Available in <https://doi.org/10.17577/ijertv11IS070073>

KARKI, S. Effect of Mechanical Vibration in a Power House Located in the Nepal Himalaya. [online]. India: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, (1):12, 2022. [Consultation date: April 21, 2023]. Available in <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1037/1/012065>.

KREBS, V. An analysis of machine learning algorithms in rotating machines maintenance. China: IFAC, (1):9, 2022.

LEI, Xinjun y WU, Yunxin. Research on mechanical vibration monitoring based on wireless sensor network and sparse Bayes. [online]. China: EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, (1):13, 2020. [Consultation date: April 21, 2023]. Available in <https://doi.org/10.1186/s13638-020-01836-9>.

MANIKANDAN, S y DURAIVELU, K. Diagnóstico de fallas de varios equipos rotativos utilizando enfoques de aprendizaje automático: una revisión. India: Revista de Ingeniería Mecánica de Procesos, (1):15, 2021.

MANTENIMIENTO conjunto basado en la condición y optimización de la producción basada en la condición por Broek [et al]. Países Bajos: Ingeniería de confiabilidad y seguridad del sistema, (1):17, 2021.

MATCHONOV, O y ABUBAKIROV, A. Sistema de medida y análisis de vibraciones en motores electricos de instalaciones de riego. Uzbekistán: IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, (1):7, 2021.

MODELADO de mantenimiento basado en condiciones y evaluación de confiabilidad para sistemas de componentes múltiples con dependencia estructural bajo garantía extendida por Wang Rongcai [et al]. China: Hindawi, (1):12, 2021.

NING, Fuda y CONG, Weilong. Ultrasonic Vibration-Assisted (UV-A) Manufacturing Processes: State of the Art and Future Perspectives. [online]. Estados Unidos: Journal of Manufacturing Processes, (3):46, 2020. [Consultation date: May 20, 2023]. Available in <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.028>

NITHIN, S. Importance of condition monitoring in mechanical domain. India: Materials Today: Proceedings, (1):11, 2022.

NONNA, Taleb. Vibration analysis of rotating machines for an optimal preventive maintenance. China: Mining Science, (1):8, 2021.

NUNO, Humberto. Implementación del mantenimiento basado en la condición: una revisión de la literatura. Portugal: Elsevier, (1):7, 2020.

OGUZ, Girit. Data Analysis for Predictive Maintenance of Servo Motors. [online]. China: Hindawi, (1):16, 2021. [Consultation date: May 29, 2023]. Available in <https://doi.org/10.1155/2020/8826802>

PARVELO, Alvar. Ultrasonido y vibración: investigación de la combinación de dos tecnologías para determinar el estado de la maquinaria rotativa. Estonia: TalTech – Tallinn University of Technology, (1):44, 2019.

POZO, Francesc y TIBADUIZA, Diego. Sensors for Structural Health Monitoring and Condition Monitoring. España: MDPI, (1):21, 2021.

PRASETYA, Hendrik, NURISMA, Radina y MUQUAUWIM, Muhammad. Análisis del intervalo de mantenimiento óptimo en el ventilador de identificación mediante el mantenimiento centrado en la confiabilidad. Indonesia: Simposio internacional de electrónica (IES), (1):48, 2020.

PRATAMA, Edward y HADI, Fadlu. Análisis de fallas de rodamientos en el ventilador de tiro forzado de la caja de engranajes en la planta de GNL. Indonesia: Journal Of Science & Technology, (1):98, 2019.
ISSN: 2527-8045.

PRAVIN, Singh. Investigation on the effect of mechanical vibration in mild steel weld pool. [online]. India: Manufacturing, (1):13, 2019. [Consultation date: June 11, 2023]. Available in <https://doi.org/10.1051/mfreview/2019020>

SAID, Haggag. Vibration analysis for predictive maintenance and improved reliability of rotating machines in ETRR-2 research reactor. China: From the journal Kerntechnik, (1):15, 2020.

SAITO, Akira y TATSUYA, Suzuki. Forced response vibration analysis of induction motor stators induced by electromagnetic forces. Japón: IFAC, (1):8, 2022.

SIMON, Henrik y SCHOENHOF, Sascha. Enhancing the diagnostic performance of condition based maintenance through the fusion of sensor with maintenance data. Alemania: Annual Conference of the PHM Society, (1):21, 2021. [Consultation date: June 11, 2023]. Available in <https://doi.org/10.36001/phmconf.2021.v13i1.2981>

SOLUCIONES difusas interactivas para problemas de vibraciones mecánicas por Sánchez Daniel [et al]. Chile: Modelado Matemático Aplicado, (1):17, 2021.

STASZEWSKI, Wiktor, GUDRA, Tadeusz y OPIELINSKI, Krzysztof. Application of the Ultrasonic Ring Array Used in UTT for the Reflection Method Examinations of Structures. Polonia: Polish Academy of Sciences, (1):122-135, 2021.
ISSN: 0137-5075.

TEIXEIRA, Humberto y LOPES, Isabel. Implementación del mantenimiento basado en la condición: una revisión de la literatura. Portugal: Fabricación de procedimientos, (1):7, 2020.

THERMODYNAMIC analysis of high-temperature pumped thermal energy storage systems: Refrigerant selection, performance and limitations by Hassan Abdelrahman [et al]. Valencia, España: Elsevier Energy Reports, (1):13, 2020. [Consultation date: June 04, 2023]. Available in <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.05.010> ISSN: 147-159.

TIBONI, Mónica. A review on vibration-based condition monitoring of rotating machinery. Italia: MDPI, (1):172, 2021.
ISSN: 1203-0972.

TINGARIKAR, Govardhan y CHOUDHURY, Achintya. Amplitudes of components in vibration spectra of rolling bearings with localized defects under harmonic loads. India: Journal of Vibration and Control, (1):8, 2021.

TSAROUHAS, Panagiotis. Reliability, availability, and maintainability analysis of an industrial plant based on Six Sigma approach: a case study in plastic industry. Grecia: The Handbook of Reliability, Maintenance, and System Safety through Mathematical Modeling, (1):17, 2021.

VERELLEN, Thomas, VERBELEN, Florian y STOCKMAN, Kurt. Beamforming Applied to Ultrasound Analysis in Detection of Bearing Defects. Bélgica: National Center for Biotechnology, (1):14, 2021.
ISSN: 3469-6016.

VIBRATION based condition monitoring of rotating part using spectrum analysis: A case study on milling machine by Kumar [et al]. India: Elsevier Ltd., (1):744-747, 2021.

ISSN: 2214-7853.

VIBRATION Signal Analysis towards Early Detection of Machine Faults by Aziz Sumair [et al]. [online]. Arabia Saudita: IEEE, (1):119, 2021. [Consultation date: May 07, 2023]. Available in <https://doi.org/10.1109/smart-tech49988.2020.00034> ISSN: 2027-8095.

WU, Zhongyi, LIU, Weidong y NIE, Ywenbin. Revisión de la literatura y perspectiva del desarrollo y aplicación de FMEA en la industria manufacturera. China: La Revista Internacional de Tecnología de Fabricación Avanzada, (1):112, 2021.

ISSN: 1409–1436.

YADAV, Siddharth y TEWARI, S. Effects of mechanical vibration on the physical, metallurgical and mechanical properties of cast A308 (LM21) aluminum alloy. [online]. India: International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, (1): 24, 2022. [Consultation date: June 22, 2023]. Available in <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2209-7> ISSN: 1206-1215.

ANEXOS

Anexo 1. Tabla de operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicador	Escala de medición
Mantenimiento basado en la condición por ultrasonido y vibración.	El mantenimiento basado en la condición por ultrasonido es una técnica predictiva, que permite medir vibraciones por encima del umbral de sensibilidad humana, es decir nos permite medir frecuencias altas. Esta técnica es empleada especialmente para monitorear las condiciones de funcionamiento de rodamientos, funcionando como la primera medida preventiva para evitar fallas prematuras por vibración, se mide mediante un sensor de ultrasonido (Ning <i>et al</i> , 2020).	El ultrasonido depende de la potencia mecánica, frecuencia mecánica, aceleración de vibración y voltaje (Parvelo, 2019).	Potencia mecánica	Velocidad de rotación (rpm)	De razón
				Par motor (N.m)	
				Flujo volumétrico (m ³ /s)	
			Frecuencia mecánica	Periodo de tiempo (s)	
				Velocidad de onda (mm/s)	
				Longitud de onda (mm)	
			Aceleración de vibración	Amplitud (mm)	
				Variación de velocidad (mm/s)	
				Tiempo de vibración (s)	
				Fuerza de oscilación (N)	
	Voltaje	Masa del sólido (kg)			
		Velocidad de rotación (rpm)			
		Tiempo entre vibraciones (s)			
	El mantenimiento basado en la condición por vibración permite definir las oscilaciones de una máquina alrededor de su propio eje de equilibrio, la cual origina desequilibrio, desalineamiento y holguras en los elementos de una máquina, y se mide mediante un vibrómetro o acelerómetro. Esta técnica es ideal para medir frecuencias bajas (Verellen <i>et al</i> , 2021).	La vibración mecánica depende de la potencia mecánica, geometría del elemento, velocidad de vibración y frecuencia mecánica (Feng <i>et al</i> , 2022).	Potencia mecánica	Par motor (N.m)	De razón
Velocidad de rotación (rpm)					
Flujo volumétrico (m ³ /s)					
Geometría del elemento			Longitud (m)		
			Diámetro (m)		
Velocidad de vibración			Amplitud (mm)		
			Tiempo entre vibraciones (s)		
Frecuencia mecánica			Periodo de tiempo (s)		
	Velocidad de onda (mm/s)				
	Longitud de onda (mm)				

Confiabilidad	La confiabilidad es un indicador de gestión de mantenimiento, expresado estadísticamente en porcentaje, el cual indica la probabilidad que un activo físico trabaje en un determinado tiempo, bajo condiciones específicas, sin producir fallo alguno (Prasetya <i>et al</i> , 2020).	La confiabilidad en el mantenimiento está relacionada a los tiempos del mantenimiento y la frecuencia de fallas o averías (Costantino, 2020).	Tiempos del mantenimiento	Tiempo entre fallas (h/año)	De Razón
				Tiempo parar reparar (h/año)	
				Tiempo global (h/año)	
			Frecuencia de fallas	Cantidad de averías (veces/año)	
				Tiempo de averías (h)	

Anexo 2. Instrumentos de recolección de datos

FICHA DE REGISTRO

INGENIO AZUCARERO:		Fecha: ____ / ____ /2023		
EQUIPO:				
MODELO:				
ÁREA:				
ÍTEM	PARÁMETRO		MUESTRA	DATO
1	POTENCIA MECÁNICA DE ULTRASONIDO Y VIBRACIÓN	Velocidad de rotación (rpm)	M1	
			M2	
			M3	
			M4	
			M5	
		Par motor (N.m)	M1	
			M2	
			M3	
			M4	
			M5	
		Flujo volumétrico (m ³ /s)	M1	
			M2	
			M3	
			M4	
			M5	
2	FRECUENCIA MECÁNICA DE ULTRASONIDO	Periodo de tiempo (s)	M1	
			M2	
			M3	
			M4	
			M5	
		Velocidad de onda (mm/s)	M1	
			M2	
			M3	
			M4	
			M5	
		Longitud de onda (mm)	M1	
			M2	
			M3	
			M4	
			M5	
3	ACELERACIÓN DE VIBRACIÓN	Amplitud (mm)	M1	
			M2	
			M3	
			M4	
			M5	
		Variación de velocidad (mm/s)	M1	
			M2	
			M3	
			M4	
			M5	
		Tiempo de vibración (s)	M1	
			M2	
			M3	
			M4	
			M5	
Fuerza de oscilación (N)	M1			
	M2			

			M3	
			M4	
			M5	
		Masa del sólido (kg)	M1	
4	VOLTAJE	Velocidad de rotación (rpm)	M1	
			M2	
			M3	
			M4	
			M5	
		Tiempo entre vibraciones (s)	M1	
			M2	
			M3	
			M4	
			M5	
5	GEOMETRÍA DEL ELEMENTO	Longitud (m)	M1	
			M2	
			M3	
			M4	
			M5	
		Diámetro (m)	M1	
			M2	
			M3	
			M4	
			M5	
6	VELOCIDAD DE VIBRACIÓN	Amplitud (mm)	M1	
			M2	
			M3	
			M4	
			M5	
		Tiempo entre vibraciones (s)	M1	
			M2	
			M3	
			M4	
			M5	
7	FRECUENCIA MECÁNICA DE VIBRACIÓN	Periodo de tiempo (s)	M1	
			M2	
			M3	
			M4	
			M5	
		Velocidad de onda (mm/s)	M1	
			M2	
			M3	
			M4	
			M5	
		Longitud de onda (mm)	M1	
			M2	
			M3	
			M4	
			M5	
8	TIEMPOS DEL MANTENIMIENTO	Tiempo entre fallas (h/año)	M1	
			M2	
			M3	
			M4	
			M5	
		Tiempo parar reparar (h/año)	M1	
			M2	
			M3	

			M4	
			M5	
		Tiempo global (h/año)	M1	
9	FRECUENCIA DE FALLAS	Cantidad de averías (veces/año)	M1	
			M2	
			M3	
			M4	
			M5	
		Tiempo de averías (h)	M1	
			M2	
			M3	
			M4	
			M5	

FICHA DE OBSERVACIÓN

 UNIVERSIDAD CESAR VALLEJO	Mantenimiento basado en la condición por ultrasonido y vibración, para mejorar la confiabilidad de ventilador de tiro forzado de una caldera, en ingenio azucarero de La Libertad.
OBJETIVO: Verificar la condición actual del mantenimiento del ventilador de tiro forzado de la empresa azucarera Cartavio	
CRITERIOS	OBSERVACIONES
¿Cuál es el estado actual del sistema de descarga (aire expulsado para combustión de caldera) del ventilador de tiro forzado?	
¿Cuál es el estado del sistema de transmisión de potencia del ventilador de tiro forzado respecto a la vibración mecánica?	
¿Cuál es el estado de los rodamientos del ventilador y motor eléctrico respecto a la vibración mecánica?	
¿El ventilador de tiro forzado tiene un plan de mantenimiento de acuerdo a las fallas de vibración?	
¿El lubricante utilizado en los rodamientos del ventilador y motor es el adecuado?	
¿Cuáles son las técnicas predictivas actualmente utilizadas en el ventilador de tiro forzado?	
¿Cuál es el estado del alineamiento del eje de potencia, motor eléctrico y ventilador?	
¿Cuál es el estado del balanceo del conjunto motor eléctrico y ventilador?	
¿Cuándo el ventilador de tiro forzado falla en plena operación, que ocurre con la producción y la operación de la caldera?	
¿Cuáles son las principales fallas que paralizan la operación del ventilador de tiro forzado?	
¿La empresa cuenta con repuestos disponibles, según las fallas que presenta actualmente el ventilador?	

Anexo 4. Normas internacionales ISO JA1011 Y JA1012 para análisis de criticidad.

Puntaje	Frecuencia de fallas (F.F)
4	Alto, Mayor a 6 fallas/año.
3	Promedio, de 5-6 fallas/año
2	Buena, de 3-4 falla/año
1	Excelente, menos de 3 falla/ año.
Puntaje	Impacto operacional (I.O)
10	Paraliza todo el equipo o empresa
7	Paraliza un sector de la línea productiva.
4	Impacta los niveles de producción y calidad.
1	No genera ningún efecto significativo sobre producciones y operación.
Puntaje	Flexibilidad operacional (F.O)
4	No existe opción de producción y no existe función de respaldo/repuesto.
2	Existe opción de repuesto compartido/almacén.
1	Existe opción de respaldo/repuesto disponible.
Ponderación	Costos de mantenimiento (C.M)
2	Mayor o igual a 800.00 soles
1	Inferior a 800.00 soles
Ponderación	Impacto de seguridad y medio ambiente (I.S.M.A)
8	Afecta la seguridad humana tanto externa como interna.
7	Afecta al medio ambiente produciendo daños severos.
5	Afecta las instalaciones causando daños severos.
3	Provoca daños menores (Seguridad - ambiente).
1	No provoca ningún daño a las personas, instalaciones ni ambiente.

Matriz de criticidad

		CRITICIDAD																								
FRECUENCIA (FF)	5	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125				
	4	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60	64	68	72	76	80	84	88	92	96	100				
	3	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60	63	66	69	72	75				
	2	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50				
	1	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25				
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25				
		CONSECUENCIA (CO)																								

Figura 8. Matriz de criticidad de equipos

Nota: rojo "Crítico", amarillo "Semicrítico" y verde "No crítico"

Anexo 5. Norma técnica de vibración ADASH - ISO 10816

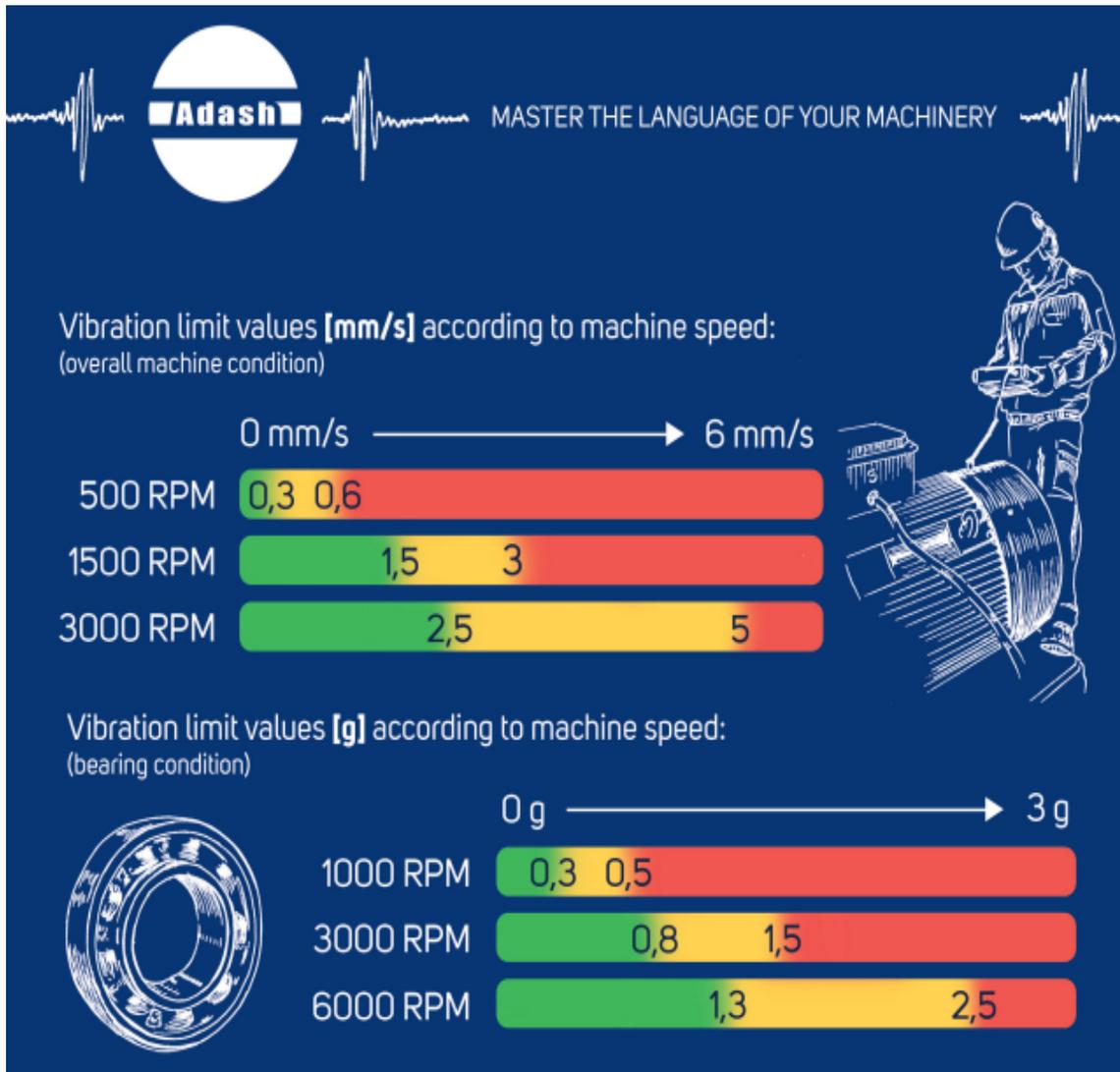


Figura 9. Valores de vibración y aceleración de la norma técnica ISO 10816

Anexo 6. Análisis estadístico de la desviación estándar del TTR y frecuencia inicial

<i>Desviación estándar del TTR inicial</i>			<i>Desviación estándar de la frecuencia inicial</i>		
Xi = TTR (horas) INICIAL	Xi - Media	(Xi - Media)^2	Xi = FRECUENCIA INICIAL	Xi - Media	(Xi - Media)^2
77.75	5.51	30.342	22.00	-1.50	2.250
71.25	-0.99	0.983	21.00	-2.50	6.250
70.95	-1.29	1.668	24.00	0.50	0.250
70.20	-2.04	4.168	22.00	-1.50	2.250
71.10	-1.14	1.303	28.00	4.50	20.250
72.20	-0.04	0.002	24.00	0.50	0.250
433.45		38.467	141.00		31.500
Media	72.24		Media	23.50	
Datos (N)	6		Datos (N)	6	
Desviación Estándar (Sx)	2.774		Desviación Estándar (Sx)	2.510	
APUNTE 1 : El tiempo para reparar inicial tiene una variabilidad de 2.774 horas/mes respecto a su promedio de 72.24 horas/mes.			APUNTE 1 : La frecuencia inicial tiene una variabilidad de 2.510 vez/mes respecto a su promedio de 23.50 vez/mes.		
<i>Desviación estándar del TTR final</i>			<i>Desviación estándar de la frecuencia final</i>		
Xi = TTR (horas) FINAL	Xi - Media	(Xi - Media)^2	Xi = FRECUENCIA FINAL	Xi - Media	(Xi - Media)^2
53.95	4.09	16.742	15.00	-2.33	5.444
46.75	-3.11	9.662	16.00	-1.33	1.778
45.65	-4.21	17.710	19.00	1.67	2.778
44.20	-5.66	32.017	16.00	-1.33	1.778
52.10	2.24	5.025	19.00	1.67	2.778
56.50	6.64	44.112	19.00	1.67	2.778
299.15		125.267	104.00		17.333
Media	49.86		Media	17.33	
Datos (N)	6		Datos (N)	6	
Desviación Estándar (Sx)	5.005		Desviación Estándar (Sx)	1.862	
APUNTE 1 : El tiempo para reparar inicial tiene una variabilidad de 5.005 horas/mes respecto a su promedio de 49.86 horas/mes.			APUNTE 1 : La frecuencia inicial tiene una variabilidad de 1.862 vez/mes respecto a su promedio de 17.33 vez/mes.		
APORTE GENERAL 1	: La variabilidad del TTR inicial y TTR final es baja del VTF, lo que indica que los datos tienen una dispersión común entre el conjunto de datos de la muestra analizada del historial de mantenimiento que comprendió una data de 6 meses. Por lo tanto, se puede predecir la variabilidad del TTR en el transcurso de un periodo de tiempo, para su simulación.				
APORTE GENERAL 2	: La variabilidad de la frecuencia inicial y final es baja del VTF, lo que indica que los datos tienen una dispersión común entre el conjunto de datos de la muestra analizada del historial de mantenimiento que comprendió una data de 6 meses. Por lo tanto, se puede predecir la variabilidad de la FRECUENCIA en el transcurso de un periodo de tiempo, para su simulación.				

Anexo 7. Resultados para la desviación estándar del TTR y frecuencia inicial del ventilador de tiro forzado.

TTR inicial y TTR estimado por desviación estándar		
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (TTR) INICIAL (+,-,+,-,....)		2.774
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (TTR) FINAL (+,-,+,-,....)		5.005
DESVIACIÓN ESTÁNDAR FRECUENCIA INICIAL (-,-,+,-,+,-,....)		2.510
DESVIACIÓN ESTÁNDAR FRECUENCIA FINAL (-,-,+,-,+,-,....)		1.862
MES	TTR INICIAL (horas/mes)	TTR ESTIMADO (horas/mes)
Ene-23	77.75	53.95
Feb-23	71.25	46.75
Mar-23	70.95	45.65
Abr-23	70.20	44.20
May-23	71.10	52.10
Jun-23	72.20	56.50
MES	TTR ESTIMADO (horas/mes)	TTR ESTIMADO (horas/mes)
Jul-23	80.52	58.96
Ago-23	68.48	41.74
Set-23	73.72	50.66
Oct-23	67.43	39.19
Nov-23	73.87	57.11
Dic-23	69.43	51.49
TOTAL	866.90	598.30
MES	FRECUENCIA INICIAL (Vez/mes)	FRECUENCIA ESTIMADA (vez/mes)
Ene-23	22	15
Feb-23	21	16
Mar-23	24	19
Abr-23	22	16
May-23	28	19
Jun-23	24	19
MES	FRECUENCIA ESTIMADA (vez/mes)	FRECUENCIA ESTIMADA (vez/mes)
Jul-23	19	13
Ago-23	18	14
Set-23	27	21
Oct-23	19	14
Nov-23	31	21
Dic-23	27	21
TOTAL	282	208

Anexo 8. Simulación del TTR y frecuencia inicial y estimado

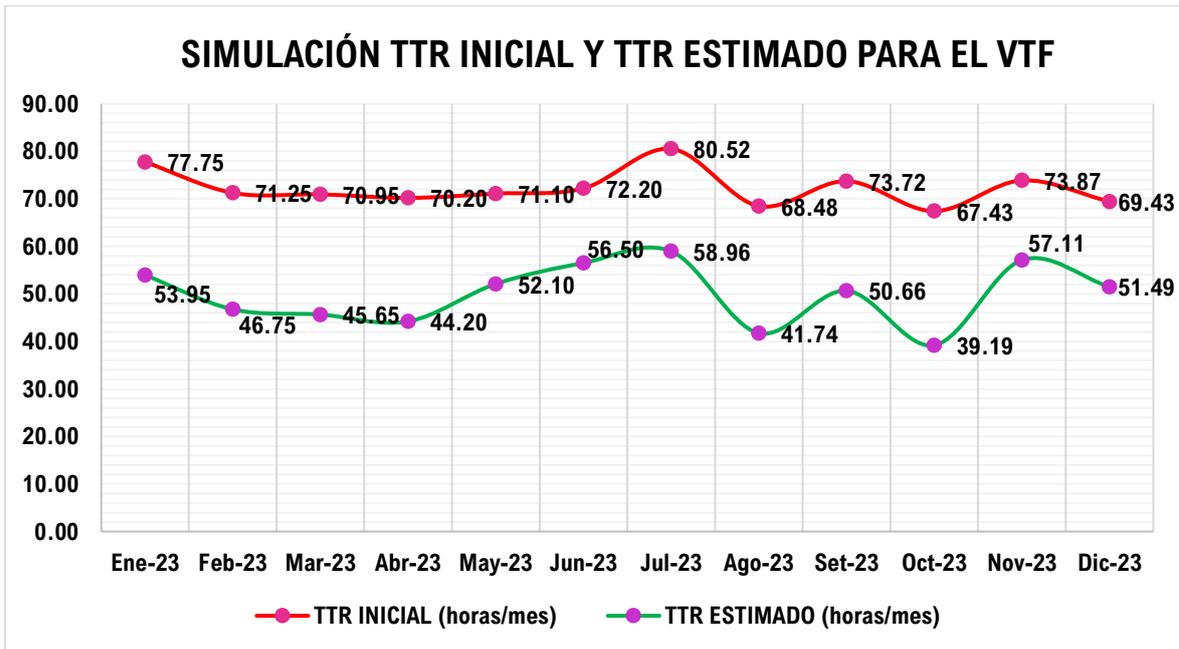


Figura 10. Simulación del TTR del ventilador de tiro forzado

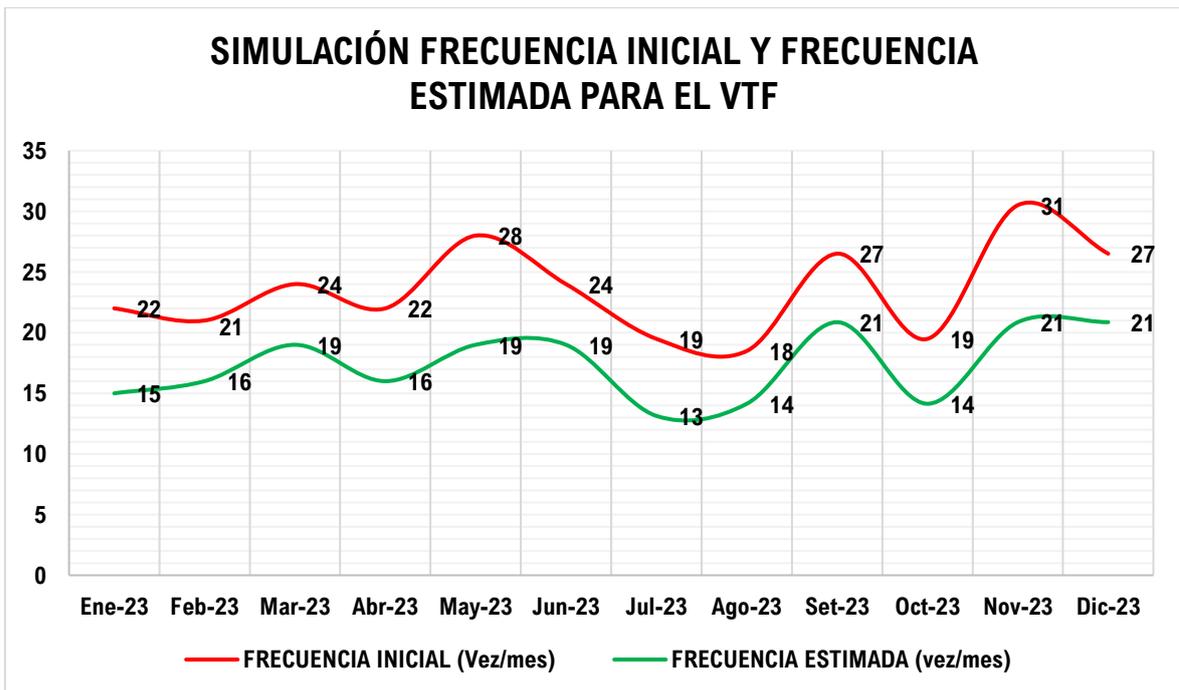


Figura 11. Simulación de la frecuencia del ventilador de tiro forzado