



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**ANÁLISIS DE VIBRACIONES COMO MANTENIMIENTO PREDICTIVO A LAS
TURBINAS DE SUCCIÓN DE AGUA DEL INGENIO TRINIDAD, SAN DIEGO, S.A.**

José Luis Puac García

Asesorado por el Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda

Guatemala, abril de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE VIBRACIONES COMO MANTENIMIENTO PREDICTIVO A LAS
TURBINAS DE SUCCIÓN DE AGUA DEL INGENIO TRINIDAD, SAN DIEGO, S.A.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JOSÉ LUIS PUAC GARCÍA

ASESORADO POR EL ING. EDWIN ESTUARDO SARCEÑO ZEPEDA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, ABRIL DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br Christian Moisés de La Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Carlo Humberto Pérez Rodríguez,
EXAMINADOR	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma
EXAMINADOR	Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez.

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**ANÁLISIS DE VIBRACIONES COMO MANTENIMIENTO PREDICTIVO A LAS
TURBINAS DE SUCCIÓN DE AGUA DEL INGENIO TRINIDAD, SAN DIEGO, S.A.**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 24 de octubre de 2019.

José Luis Puac García

Guatemala, 12 de octubre de 2020
REF.EPS.DOC.339.10.2020.

Ing. Oscar Argueta Hernández
Director Unidad de EPS
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero Argueta Hernández.

Por este medio atentamente le informo que como Asesor-Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), del estudiante universitario **José Luis Puac García** de la Carrera de Ingeniería Mecánica, con carné No. 201513788, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **ANÁLISIS DE VIBRACIONES COMO MANTENIMIENTO PREDICTIVO A LAS TURBINAS DE SUCCIÓN DE AGUA EN LOS POZOS DEL INGENIO TRINIDAD, SAN DIEGO, S.A.**

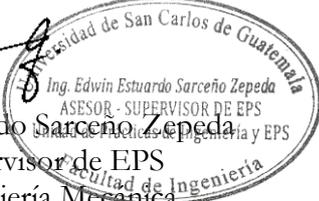
En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda
Asesor-Supervisor de EPS
Área de Ingeniería Mecánica



c.c. Archivo
EDSZ/ra

Guatemala, 12 de octubre de 2020
REF.EPS.D.158.10.2020

Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza
Director Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero Morales Baiza:

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado: **ANÁLISIS DE VIBRACIONES COMO MANTENIMIENTO PREDICTIVO A LAS TURBINAS DE SUCCIÓN DE AGUA EN LOS POZOS DEL INGENIO TRINIDAD, SAN DIEGO, S.A.**, que fue desarrollado por el estudiante universitario **José Luis Puac García** quien fue debidamente asesorado y supervisado por el Ingeniero Edwin Estuardo Sarceño Zepeda.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte del Asesor - Supervisor de EPS, en mi calidad de Director apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,
"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Oscar Argueta Hernández
Director Unidad de EPS

OAH/ra



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
Edificio T-7, Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica
Teléfono directo: (502) 2418-9133
<http://emecanica.ingenieria.usac.edu.gt/sitio/>
Correo electrónico: emecanica@ing.usac.edu.gt

Guatemala, 5 de abril de 2021

REF

Ingeniero
Gilberto Enrique Morales Baiza
Director de Escuela
Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ing. Morales Baiza:

Por este medio atentamente le informo que procedí a revisar el informe final titulado: **ANÁLISIS DE VIBRACIONES COMO MANTENIMIENTO PREDICTIVO A LAS TURBINAS DE SUCCIÓN DE AGUA DEL INGENIO TRINIDAD, SAN DIEGO, S.A.** del estudiante universitario de la escuela de ingeniería mecánica, **José Luis Puac García**, Registro Académico 201513788.

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Ing. Herbert S. Figueroa A.
Ingeniero Mecánico
Col. 10108

Ing. Herbert Samuel Figueroa Avendaño
Área Diseño
Escuela de Ingeniería Mecánica.



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.EIM.154.2020

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor-Supervisor y del Director de la Unidad de EPS, al trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS DE VIBRACIONES COMO MANTENIMIENTO PREDICTIVO A LAS TURBINAS DE SUCCIÓN DE AGUA EN LOS POZOS DEL INGENIO TRINIDAD, SAN DIEGO, S.A.** del estudiante **José Luis Puac García, CUI 2963076960108**, Reg. Académico o **201513788** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

“Id y Enseñad a Todos”



Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica

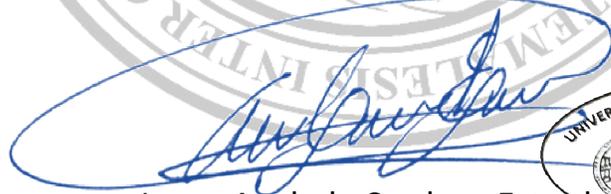
Guatemala, noviembre de 2020

/aej

DTG. 131.2021.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS DE VIBRACIONES COMO MANTENIMIENTO PREDICTIVO A LAS TURBINAS DE SUCCIÓN DE AGUA DEL INGENIO TRINIDAD, SAN DIEGO, S.A.**, presentado por el estudiante universitario: **José Luis Puac García**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, abril de 2021.

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por todas las bendiciones otorgadas a mi familia y a mí, por darme sabiduría y fuerzas para culminar mi carrera.
- Mi padre** Francisco Puac Pérez, por su apoyo incondicional y su constante esfuerzo por sacar adelante a sus hijos.
- Mi madre** Julia Mercedes García Tax de Puac, por su amor, cariño, inteligencia y comprensión. Por todo el apoyo que siempre brinda a sus hijos.
- Mis hermanos** Francisco, Roberto, Alejandro, Guillermo y Miguel Puac, por su confianza, consejos, apoyo incondicional y por toda la ayuda en momentos difíciles.
- Mis hermanas** Ángela, Julia, Cristina, Maribel y Mariela Puac, por las alegrías y todo el esfuerzo que realizan para sacar adelante a la familia además de darme la oportunidad de culminar la carrera.
- Mis amigos** Rodvin Ical, Kevin Santizo, Guillermo Pineda y Graciela Estrada, por su apoyo, amistad y constante ayuda en todo momento.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la casa de estudios que me permitió formarme como profesional.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme los conocimientos y habilidades para desempeñarme como profesional.
Ingenio Trinidad	Por permitirme realizar el Ejercicio Profesional Supervisado dentro de sus instalaciones.
Víctor Morales	Por su apoyo, consejos y amistad durante mi estadía en la empresa.
Ing. Luis Dávila	Por el apoyo y conocimientos brindados en el proceso del proyecto.
Ing. Edwin Sarceño	Por el apoyo en el avance del proyecto y las correcciones realizadas.
Amigos de la Facultad	Por su amistad, ayuda y todos los momentos vividos durante la carrera.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Descripción de la empresa	1
1.1.1. Ubicación.....	1
1.1.2. Historia	1
1.1.3. Misión	2
1.1.4. Visión.....	2
1.1.5. Política de gestión	2
1.1.6. Organigrama del taller	3
1.1.7. Descripción del problema	3
1.2. Definiciones fundamentales.....	4
1.2.1. ¿Qué es zafra?	4
1.2.2. Sistemas de riego	4
1.2.2.1. Goteo.....	5
1.2.2.2. Avance frontal.....	5
1.2.2.3. Pivote central.....	6
1.2.3. Bombas verticales tipo turbina.....	7
1.2.3.1. Tazones.....	7
1.2.4. Cabezales de riego.....	8

1.2.5.	Vibraciones mecánicas.....	9
1.3.	Mantenimiento.....	9
1.3.1.	Tipos de mantenimiento	10
1.3.1.1.	Mantenimiento correctivo	10
1.3.1.2.	Mantenimiento preventivo	10
1.3.1.3.	Mantenimiento predictivo.....	11
1.3.1.4.	Mantenimiento proactivo	11
1.4.	Análisis de vibraciones.....	12
1.5.	Amplitud de vibración	13
1.5.1.	Unidades de amplitud.....	13
1.6.	Toma de datos de vibraciones	15
1.6.1.	Pasos por seguir para la toma de datos	16
1.7.	Técnicas para la interpretación de datos.....	18
1.7.1.	Análisis de onda	18
1.7.2.	Análisis espectral	19
1.7.3.	Análisis de fase	21
1.8.	Sensores de vibraciones.....	22
1.8.1.	Sensor de desplazamiento	22
1.8.2.	Sensor de velocidad	23
1.8.3.	Sensor de aceleración.....	23
1.9.	Tipos de montaje del sensor	23
1.10.	Determinación del estado de la máquina	25
1.10.1.	Evaluación usando valores límites de guías o normas	26
1.10.2.	Evaluación utilizando valores recomendados por el fabricante.....	30
1.10.3.	Evaluación de máquinas utilizando la tendencia	31

2.	FASE DE INVESTIGACIÓN	33
2.1.	Análisis de la situación actual.....	33
2.1.1.	Análisis de gastos.....	35
2.1.2.	Fallas recurrentes en equipos de riego.....	36
2.1.3.	Puntos críticos de los equipos de riego	41
2.2.	Beneficios de análisis de vibraciones	42
2.3.	Inversión para adquirir el equipo para analizar vibraciones.....	43
2.3.1.	Equipos analíticos.....	43
2.3.2.	Equipos genéricos o convencionales.....	44
2.4.	Comparativa de inversión contra los costos de reparación.	46
3.	FASE TÉCNICO PROFESIONAL	51
3.1.	Plan de acción para la implementación del análisis de vibraciones	51
3.1.1.	Características de diseño y funcionamiento	51
3.1.2.	Finalidad de las mediciones.....	52
3.1.3.	Selección de los parámetros por medir	53
3.1.4.	Posición y orientación de mediciones.....	53
3.1.5.	Selección del equipo por utilizar	54
	3.1.5.1. Características del equipo recomendado.....	54
3.2.	Toma de datos de vibraciones.....	55
3.3.	Formato de toma de datos.....	56
3.3.1.	Creación del formato para la toma de datos.....	56
3.3.2.	Formato para la interpretación de los resultados....	58
3.4.	Determinación del estado de la máquina.....	60
3.4.1.	Evaluación del estado de la máquina por medio de tendencias.	62
	3.4.1.1. Interpretación de resultados	64

4.	FASE DE DOCENCIA.....	73
4.1.	Efectos del mantenimiento predictivo.....	73
4.2.	Plan de capacitación	74
4.2.1.	Beneficios del análisis de vibraciones	74
4.2.2.	Vibración global.....	74
4.2.3.	Mediciones	75
4.2.4.	Almacenamiento de datos	75
4.2.5.	Costos	76
4.3.	Presentación de capacitación	78
	CONCLUSIONES.....	81
	RECOMENDACIONES	83
	BIBLIOGRAFÍA.....	85
	APÉNDICE	87
	ANEXOS.....	89

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Organigrama del taller.....	3
2.	Avance frontal	5
3.	Pivote central	6
4.	Torres para pivote central y avance frontal	7
5.	Bomba vertical tipo turbina.....	8
6.	Cabezal de riego	9
7.	Amplitud de onda	14
8.	Sentido de toma de datos	17
9.	Comparación de onda de tiempo frente onda de frecuencia.....	18
10.	Generación del espectro de frecuencias	19
11.	Obtención de un espectro de frecuencias	21
12.	Ondas desfazadas	22
13.	Tipos de montaje para sensores de vibración.....	25
14.	Norma ISO 10816-3.....	28
15.	Norma VDI 2056	29
16.	NORMA ISO 10816-6.....	29
17.	Diagrama de una turbina vertical	34
18.	Historial de fallas recurrentes zafra 16-17.....	36
19.	Historial de fallas recurrentes zafra 17-18.....	39
20.	Historial de fallas recurrentes zafra 18-19.....	39
21.	Puntos críticos de medición	39
22.	Unidades de medida para vibraciones	49
23.	Puntos de medición.....	55

24.	Datos de identificación del equipo	57
25.	Formato para la toma de datos	57
26.	Observaciones del técnico	58
27.	Ingreso de los datos a Excel	58
28.	Botones de Excel	59
29.	Gráfica de tendencia CC 29076.....	59
30.	Selector de centro de costo	56
31.	Ajuste en la alineación del CC 29076	58
32.	Gráfica de tendencia C.C. 29076.....	59
33.	Puntos de vibración del C.C. 29076.....	61
34.	Puntos de vibración C.C. 29077	65
35.	Gráfica de tendencia C.C. 29077	66
36.	Puntos de vibración C.C. 29085	67
37.	Gráfica de tendencia C.C. 29085.....	67
38.	Puntos de vibración C.C. 29078	68
39.	Gráfica de tendencia C.C. 29078.....	69
40.	Puntos de vibración C.C. 29090	65
41.	Gráfica de tendencia C.C. 29090.....	66
42.	Mano de obra.....	76
43.	Tiempo muerto.....	77
44.	Repuestos utilizados.....	77
45.	Presentación de capacitación al gerente de taller.....	79

TABLAS

I.	Unidades de medición para vibración	15
II.	Relación del tipo de montaje y frecuencias aceptables y naturales	24
III.	Monto total del mantenimiento correctivo zafra 16-17	38
IV.	Monto total del mantenimiento correctivo zafra 17-18	39

V.	Monto total del mantenimiento correctivo zafra 18-19.....	37
VI.	Gastos totales en los tres periodos de zafras	38
VII.	Piezas con más incurrencias en fallas	42
VIII.	Diagnóstico de fallas típicas.....	42
IX.	Cotización A	43
X.	Inversión con la cotización A.....	44
XI.	Cotización B	45
XII.	Inversión con la cotización B.....	45
XIII.	Cotización del sensor magnético	46
XIV.	ISO 10816-3 Grupo 2 y 4	57

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
g	Aceleración de la gravedad
HP	Caballo de fuerza
Hz	Hercio o ciclos por segundo
%	Porcentaje
Q.	Quetzales

GLOSARIO

Aceleración	Magnitud utilizada para medir el aumento de la velocidad de la vibración mecánica.
Acelerómetro	Sensor de vibración que detecta la aceleración con que una superficie se mueve.
Alineamiento	Proceso en el cual dos ejes son alineados, es decir, los ejes de rotación de ambos ejes formarán una sola línea.
Amplitud	Distancia que existe entre el pico más positivo y el fondo más negativo de una onda de vibración.
BCU	Unidad de condición de rodamientos.
C.C.	Centro de costo.
CPM	Ciclos por minuto.
Desbalance	Distribución desigual de peso en un cuerpo, respecto de su eje de rotación. Los ejes de inercia y rotación no coinciden.
Disponibilidad	Representa el porcentaje de tiempo durante el cual un equipo se encuentra apto para su uso y operatividad.

Excentricidad	Situación que ocurre cuando el centro geométrico de un cuerpo no coincide con el eje de rotación.
Frecuencia	Término empleado para indicar el número de veces que se repite el ciclo de una onda de vibración por unidad de tiempo.
Periodo	Cantidad de tiempo que transcurre para completar un ciclo de vibración armónica o periódica.
Procedimiento	Término sobre la acción que consiste en proceder, que significa actuar de una forma determinada.
RMS	Raíz cuadrada media.
RPM	Revoluciones por minuto.
Sensor	Dispositivo mediante el cual se convierte una señal de movimiento a una señal eléctrica que luego es interpretada por un transductor.
Tendencia	Rango de valores aceptables que indica que una máquina está operando en condiciones estables.
Transductor	Dispositivo que recibe una señal de entrada que puede ser de una naturaleza eléctrica, mecánica, acústica, entre otros, y la convierte modificada o no a una señal de salida.
Vibración absoluta	Tomada por el sensor de vibración desde un punto que no está en movimiento.

Vibración

Tomada por un sensor de vibración que se relativa encuentra apoyado en un punto que también vibra.

RESUMEN

El taller agrícola del Ingenio Trinidad, San Diego, S.A., busca constantemente la máxima disponibilidad de sus equipos, esto se logra por medio de la conservación de la maquinaria y el correcto mantenimiento, debido a que estos proporcionan información de su estado. Con la implementación del análisis de vibraciones como mantenimiento predictivo, se puede planificar de mejor manera los paros por mantenimiento, mejorando así, la disponibilidad de los equipos.

Se realizó un estudio del impacto económico de la implementación del análisis de vibraciones como mantenimiento predictivo en las turbinas de succión de agua. Se analizaron sus ventajas y desventajas, asimismo, se determinaron sus repercusiones y beneficios.

Se estableció el plan de acción para realizar para la implementación del análisis de vibraciones, además de establecer una tendencia del correcto funcionamiento de los equipos. También se generó un formato para la obtención de datos en las turbinas de succión, que funcione como reporte de su funcionamiento.

Por último, se tomaron medidas para la concientización y programas de capacitación del personal involucrado en la implementación del análisis de vibraciones, con el fin de realizar lecturas correctas, precisas y repetitivas, además de dar a conocer los cuidados que requiere el equipo por utilizar.

OBJETIVOS

General

Proporcionar un nuevo proceso con el cual se pueda notificar el estado de las bombas verticales tipo turbina del Ingenio Trinidad.

Específicos

1. Comparar los gastos de reparación, mano de obra y paro de las turbinas de succión de agua con la inversión para la implementación del análisis de vibraciones como mantenimiento predictivo.
2. Proporcionar un plan de acción para la implementación del análisis de vibraciones como mantenimiento predictivo en las turbinas de succión de agua.
3. Capacitar a los supervisores y personal de mantenimiento del uso adecuado del equipo de medición de vibraciones.
4. Elaborar un formato para la toma de datos para el análisis de vibraciones.

INTRODUCCIÓN

El Ingenio Trinidad, San Diego, S.A., está siempre en una mejora continua que disminuya los costos de producción sin afectar la calidad de sus productos. Dentro del taller, estas mejoras pueden ser por medio del adecuado mantenimiento de la maquinaria y la disminución de reparaciones.

Existen diversos tipos de mantenimiento, uno de ellos es el mantenimiento predictivo, este consiste en una serie de acciones y técnicas que al aplicarlas nos permiten detectar fallas o desperfectos de una máquina en etapas iniciales que podrían agravarse durante su funcionamiento. Esto evita que se ocasionen paros no programados y tiempos muertos, lo que genera un impacto financiero negativo. Una de las principales técnicas del mantenimiento predictivo es el análisis de vibraciones, este permite diagnosticar máquinas rotativas, ejes, cojinetes, rodamientos, entre otros.

Las turbinas de succión de agua del Ingenio Trinidad, son las encargadas de extraer el agua de los pozos y presentan un historial de cuatro a seis fallas por periodo de zafra en algunos de sus componentes. Debido a la recurrencia de las fallas y a que las turbinas no cuentan con un mantenimiento preventivo o periódico, se desea implementar el análisis de vibraciones para conocer su estado y el de sus componentes.

Este trabajo tiene como objetivo diagnosticar y presentar un informe del estado actual de las turbinas de succión de agua del Ingenio Trinidad, para determinar cuándo se necesita una intervención por mantenimiento a la

maquinaria, esto con el fin de no quedar propensos a paros imprevistos por reparación o pérdidas totales de las turbinas de succión de agua.

1. GENERALIDADES

1.1. Descripción de la empresa

San Diego, S.A. es una empresa líder en producción de azúcar y energía con base en Guatemala y con más de 130 años de operación.

Posee una capacidad de molienda de 2,5 millones de toneladas de caña de azúcar, produciendo más de 250 mil toneladas de azúcar al año para el mercado local y exportación alrededor del mundo. Cuenta con capacidad de producir 148 MW de energía eléctrica para el mercado regional. San Diego, además, actúa en el mercado de bienes raíces.

1.1.1. Ubicación

San Diego, S.A., es una institución no gubernamental, ubicada en el km 70,5 antigua carretera al Puerto San José, Masagua, Escuintla, Guatemala.

1.1.2. Historia

San Diego, S.A., llega a integrar más de 5 000 colaboradores que con un firme compromiso con la calidad y que busca a diario alcanzar mayores niveles de productividad, contribuyendo al crecimiento integral de la empresa y de Guatemala.

San Diego S.A., tiene sus oficinas centrales en la ciudad de Guatemala y cuenta con operaciones en los departamentos de Escuintla, Santa Rosa y

Jutiapa. Con una evolución constante, en 1987 adquiere Ingenio Trinidad, en Masagua, Escuintla, ubicando estratégicamente su sede industrial a solo 35 kilómetros de Expogranel, la terminal de embarque de azúcar en Puerto Quetzal y que produce azúcar inocua de alta calidad para brindar una mejor salud y lograr satisfacer las necesidades del mercado y de sus clientes mejorando la eficiencia de nuestros procesos de producción y la rentabilidad de la empresa.

1.1.3. Misión

Somos un grupo empresarial guatemalteco, guiados por principios claros, que transformamos la caña de azúcar en productos energéticos que proporcionan bienestar. Con un equipo profesional, buscamos y desarrollamos oportunidades de crecimiento integral y alta rentabilidad. Generamos un mejor nivel de vida para todos los miembros de la organización y confirmamos nuestro compromiso por un mejor país.

1.1.4. Visión

Ubicarnos dentro de los tres ingenios más eficientes y de más bajos costos de la región centroamericana.

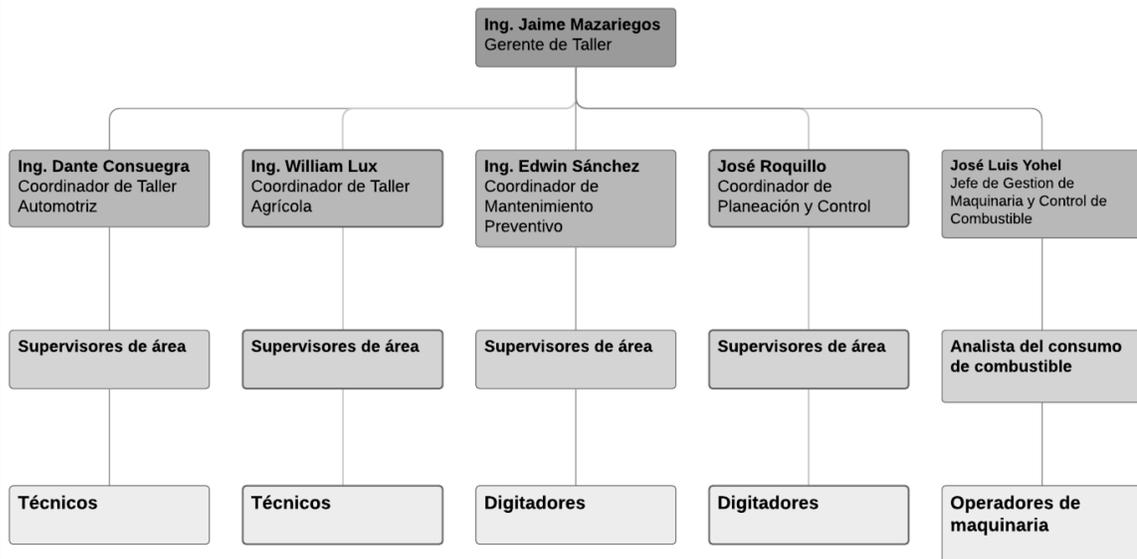
1.1.5. Política de gestión

Producimos azúcar inocua y energía con calidad, cumpliendo estándares internacionales, requisitos legales y de nuestros clientes. Mejorando continuamente los niveles de productividad y optimizando los recursos disponibles, manteniendo condiciones seguras de trabajo y cuidados al medio ambiente.

1.1.6. Organigrama del taller

A continuación, se presenta el organigrama del taller.

Figura 1. Organigrama del taller



Fuente: elaboración propia, empleando Lucid Chart Online.

1.1.7. Descripción del problema

Las turbinas de succión de agua presentan ciertas deficiencias en cuanto a disponibilidad debido a varios motivos, uno de ellos es la falta de seguimiento a los mantenimientos y, por lo consiguiente, se desconoce el estado de las turbinas. El área de campo, quienes son los encargados de velar por el mantenimiento, hace uso únicamente del mantenimiento correctivo, lo cual aumenta la probabilidad de paros no programados que afectan la disponibilidad de las turbinas de succión, sobreesfuerzos en los motores, desalineación de ejes; así como también en los procesos de riego al cultivo de la caña.

1.2. Definiciones fundamentales

Para una mejor comprensión del documento, se deben tener claros los siguientes conceptos:

1.2.1. ¿Qué es zafra?

La zafra azucarera en Guatemala es un período en la cosecha de caña de azúcar, intensivo en cuanto a mano de obra en el país centroamericano. Esta se realiza mayoritariamente por trabajadores temporales. En general, la cosecha se realiza durante la época seca y tiene una duración de seis meses, de noviembre a mayo. La zafra se puede realizar de manera mecánica pero también a mano, y durante este periodo, la caña cortada se procesa en los ingenios durante las 24 horas del día.

1.2.2. Sistemas de riego

Son de gran utilidad para el cultivo de la caña, debido a que este suministra el agua necesaria para la sobrevivencia de los cultivos.

Los sistemas de riego están compuestos por varias estructuras que permiten impulsar el agua de un lugar a otro, existen dos principales tipos de riego de agua.

El primero es conocido como riego superficial, el cual utiliza gran cantidad de agua y el segundo, llamado riego por aspersión, utiliza un mecanismo para lanzar el agua y que se asemeja a la lluvia. Entre los principales sistemas de riego por aspersión, se encuentran:

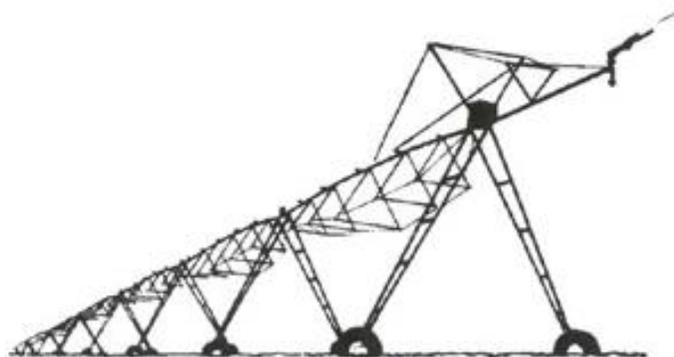
1.2.2.1. Goteo

Este sistema se utiliza para humedecer los alrededores de las plantas a través de gotas, utiliza el agua necesaria y es una de las técnicas más eficaces de riego.

1.2.2.2. Avance frontal

Es una máquina autopropulsada con una cobertura del 98 % de la superficie, consta de estructuras galvanizadas, compuesta por tubería y tirantes (span's), con un largo desde los 113 pies hasta los 201 pies. Cada span es soportado por otra estructura de perfiles angulares o torres, que le proporcionan la altura necesaria para su paso por encima de los cultivos, dicha torre está equipada con dos ruedas con transmisión y un motor central eléctrico o hidráulico con el cual adquiere su movimiento.

Figura 2. Avance frontal



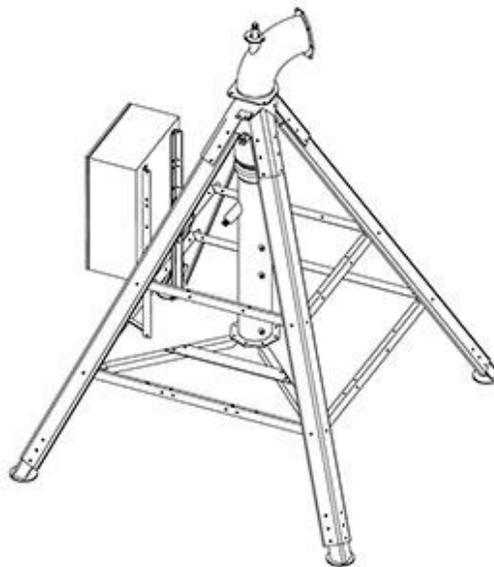
Fuente: Traxco. *Pivote Central*. <https://www.traxco.es/blog/wp-content/uploads/2013/02/dibujopivot-central.jpg>. Consulta: noviembre de 2019.

1.2.2.3. Pivote central

Los sistemas de pivote central riegan superficies de grandes dimensiones de forma circular. Se emplean en sitios donde el agua es un factor fuertemente limitante o donde se debe de extraer de pozos. También se usa en campos donde se desea aumentar la eficiencia del riego, aprovechando mejor el agua y aumentando fuertemente los rendimientos de los cultivos. La eficiencia en el riego por pivote es de un 85 % a 90 %.

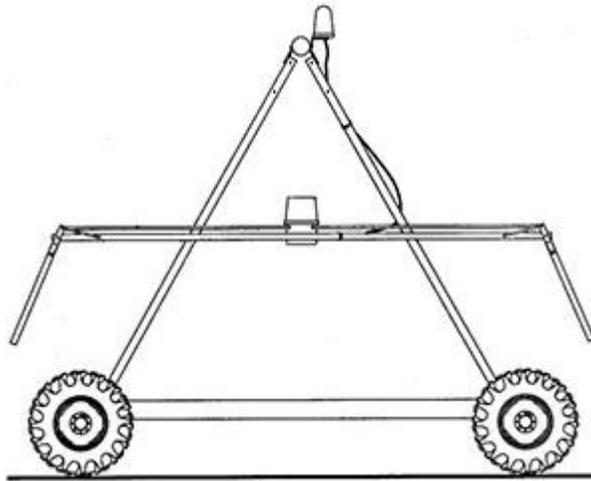
Este tipo de sistema de riego consta principalmente de un motor de combustión interna o eléctrico, una bomba vertical tipo turbina o sumergible, una sección de torres galvanizadas y un cabezal.

Figura 3. Pivote central



Fuente: Traxco. *Pivote Central*. <https://www.traxco.es/media/centro-pivot.jpg>. Consulta: noviembre de 2019.

Figura 4. **Torres para pivote central y avance frontal**



Fuente: Traxco. *Autoreversa*. <https://www.traxco.es/media/kit-autoreversa-ultima-torre.jpg>.
Consulta: noviembre de 2019.

1.2.3. **Bombas verticales tipo turbina**

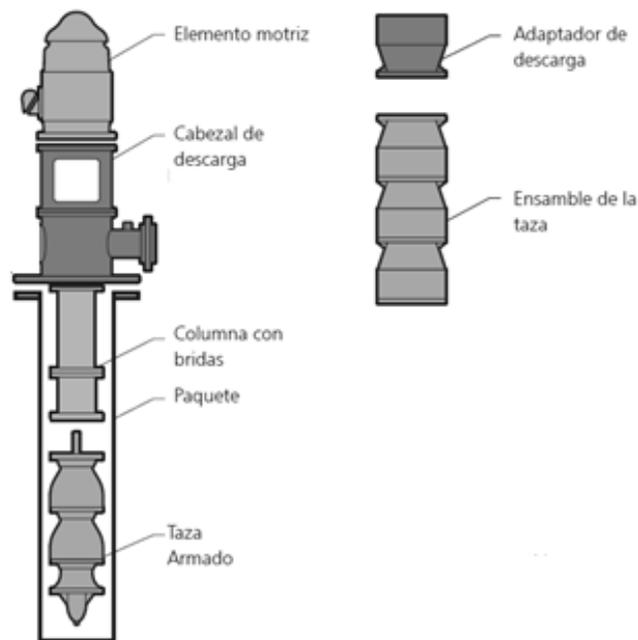
Las bombas verticales tipo turbina están diseñadas para aplicaciones de bombeo con líquidos limpios o ligeramente contaminados. La sección hidráulica está sumergida en el líquido por bombear, con el motor montado en seco en la parte superior del pozo. La descarga se produce a través de la columna de descarga común, donde se encuentra el eje de la bomba. Las bombas verticales de turbina tienen un eje vertical con cojinetes deslizantes lubricados por el líquido bombeado.

1.2.3.1. **Tazones**

Tiene como función impulsar el líquido hacia arriba para su extracción. Al conjunto de tazón e impulsor se les conoce como etapas.

Las bombas verticales pueden tener una o varias etapas, cada una con una capacidad de succión diferente. Cabe resaltar que las etapas sirven para brindar la presión necesaria a la turbina vertical, no funciona para aumentar el caudal.

Figura 5. **Bomba vertical tipo turbina**



Fuente: Gould's Pumps an ITT Brand. *Bombas de turbinas verticales* p.2.

1.2.4. **Cabezales de riego**

La función del cabezal es cambiar la dirección del caudal desde vertical a horizontal y acoplar la bomba a la tubería del sistema, además de soportar y alinear el elemento motor.

Figura 6. **Cabezal de riego**



Fuente: Reductores Cunat. *Cabezales de bomba.*

<http://www.reductorescunat.es/images/portfolio/cabezales/ng.jpg>. Consulta: noviembre 2019.

1.2.5. Vibraciones mecánicas

Toda máquina consta de diferentes elementos con diferentes funciones y de diferentes movimientos que provocan fuerzas dinámicas que generan vibraciones mecánicas. Esto significa que es normal que toda máquina vibre, pero no toda vibración es normal; por lo tanto, existen niveles de vibración normales o aceptables y niveles de vibración fuera de rango o no aceptables; estos niveles pueden ser dados por el fabricante, a través de normas internacionales o por medio de tendencias.

1.3. Mantenimiento

El mantenimiento se define como el conjunto de acciones o actividades, como comprobaciones, mediciones, reemplazos, ajustes y reparaciones, necesarias para mantener o reparar una unidad funcional de forma que esta pueda cumplir sus propósitos.

El mantenimiento debe realizarse de manera continua y permanente a través de programas con fines, metas y objetivos definidos.

1.3.1. Tipos de mantenimiento

Se presentan a continuación los principales tipos de mantenimiento que se utilizan en la industria.

1.3.1.1. Mantenimiento correctivo

Por mucho tiempo fue la forma dominante de mantenimiento y este se realiza únicamente cuando ocurre una falla en la máquina. Es decir, si no ocurre algún desperfecto en la máquina, el mantenimiento será nulo. Los costos son relativamente elevados, debido a los tiempos de inactividad no programados, maquinaria dañada, y gastos de tiempo extra.

De esta manera, la gerencia y el departamento de mantenimiento son controlados por las fallas de sus máquinas y el estado actual de las máquinas del ingenio no se conoce de manera precisa. Esto hace casi imposible planificar las necesidades de mantenimiento, y lo que es peor, predecir el estado general de disponibilidad del sistema.

1.3.1.2. Mantenimiento preventivo

Este mantenimiento está destinado a garantizar la fiabilidad de equipos en funcionamiento antes de que pueda producirse un accidente o avería por algún deterioro. Su misión es tener un nivel de servicio determinado en los equipos para programar las intervenciones en el momento más oportuno. Se interviene, aunque el equipo no haya dado ningún síntoma de tener un problema.

Las actividades de este mantenimiento se pueden planificar con base en un programa por tiempo calendario, distancia recorrida, horas de operación, cantidad de partes producidas, entre otras. Aunque este tipo de mantenimiento hace un uso ineficiente de los recursos para la mayoría de las máquinas, hay casos cuando se le puede usar con buenos resultados.

1.3.1.3. Mantenimiento predictivo

La técnica se basa en el hecho de que las partes de las máquinas darán un tipo de aviso antes que fallen. Para percibir estos síntomas en las máquinas existen varias técnicas como el análisis de vibraciones, la termografía, el ultrasonido, entre otros. El uso de estas técnicas para determinar el estado de las máquinas dará como resultado un mantenimiento mucho más eficiente, en comparación con los tipos de mantenimiento anteriores.

El mantenimiento predictivo permite que se tenga el control de las máquinas y de los programas de mantenimiento. Cuando se usa el mantenimiento predictivo, el estado de las máquinas se conoce en cualquier momento; por esta razón es posible una planificación más precisa.

Su técnica más importante es el análisis de vibraciones, debido a que proporciona la cantidad de información más importante sobre el funcionamiento interno de una máquina, aunque lo ideal es combinar más de una técnica.

1.3.1.4. Mantenimiento proactivo

Es una técnica enfocada en la identificación y corrección de las causas que originan las fallas en equipos y componentes, esta técnica se basa en soluciones que afectan la causa de los problemas y no los efectos.

Para identificar las causas que originan las fallas es indispensable el uso de las técnicas del mantenimiento predictivo. Por ello, al mantenimiento proactivo, se le conoce como la conjunción de los tres tipos de mantenimiento mencionados con anterioridad, debido a que después del uso de las técnicas de mantenimiento predictivo, se pueden tomar acciones preventivas o correctivas.

Este mantenimiento tiene un impacto indiscutible en el aspecto económico de la planta, ya que se deben implementar muchos equipos tecnológicos y capacitaciones al personal, acciones que se verán reflejadas en la disponibilidad de la maquinaria y al evitarse paros no programados resolviendo los problemas antes que se presenten.

1.4. Análisis de vibraciones

Es el estudio de las vibraciones mecánicas producidas por una máquina a causa de un problema o circunstancia para obtener información necesaria sobre su estado en tiempo real, sin necesidad de detener su operación y mucho menos tener que desarmarlas. El objetivo de todo análisis de vibraciones es detectar posibles fallos específicos en edades tempranas para tomar acciones preventivas o correctivas de acuerdo con las necesidades, encontrar soluciones prácticas a los problemas de vibraciones excesivas y adelantarse a corregir las fallas antes que sean más graves.

El análisis de vibraciones es la técnica de mantenimiento predictivo más utilizada y la que ofrece mejores resultados a la hora de supervisar y diagnosticar los problemas en las máquinas. Además, es la única capaz de darnos la oportunidad de hacer un análisis de causa raíz de la forma de fallo. Una correcta interpretación de las medidas de vibraciones en la maquinaria industrial permite minimizar las averías incontroladas y reducir los costes de las reparaciones. El

análisis de vibraciones se viene aplicando con total eficacia y buenos resultados en la supervisión y diagnóstico de fallos mecánicos en máquinas rotativas desde la década de los ochenta.

1.5. Amplitud de vibración

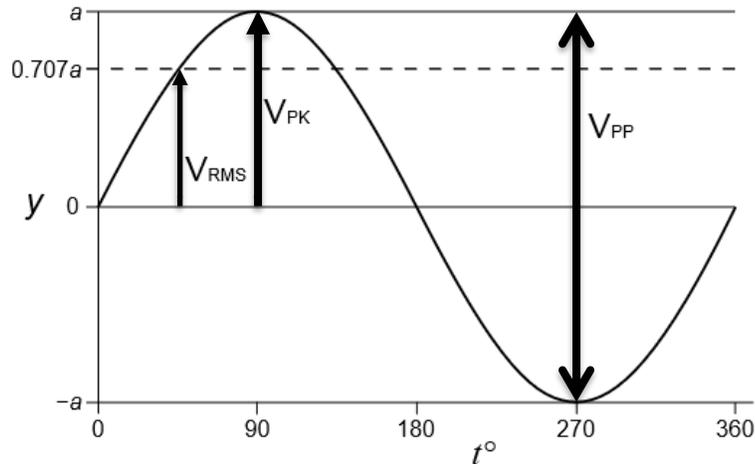
La amplitud de la vibración es la medida de la magnitud del movimiento dinámico o vibración que ocurre en la máquina o en partes de ella. En la figura 6, se muestra una onda de vibración armónica. La amplitud se puede expresar de varias formas, como se verá a continuación.

1.5.1. Unidades de amplitud

Cuando consideramos la amplitud, en vibraciones, se debe conocer los siguientes términos: amplitud pico a pico (pp), amplitud cero a pico (pk) y amplitud rms. La amplitud pico a pico es la cantidad medida entre el fondo de la onda o parte más baja y el máximo valor que alcanza el pico, tal como se puede observar en la figura 6. La amplitud cero a pico es la cantidad medida entre el cero y el máximo valor del pico.

La amplitud RMS, por sus siglas en inglés (*Root Mean Square*) es considerada como un verdadero valor eficaz y es la raíz cuadrada del promedio aritmético de los valores instantáneos al cuadrado de la onda. Para una onda estrictamente armónica, el valor de rms es $0,707 \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)$ veces el valor cero a pico. En una vibración real de vibración, esto no se cumplirá.

Figura 7. **Amplitud de onda**



Fuente: GIRÓN CHEW, Ariel. *Propuesta de procedimientos e instructivo para la estandarización en servicio de análisis de vibraciones*. p. 13.

Las unidades para cuantificar la vibración son: desplazamiento, aceleración y velocidad.

- Desplazamiento: es el cambio de posición de un cuerpo desde su reposo y se relaciona con estrés o esfuerzo excesivo. Es usado para determinar el movimiento relativo entre un eje y su cojinete. Sus unidades de medición son micras pico a pico y milésimas de pulgada pico a pico.
- Velocidad: es el cambio de posición respecto del tiempo y se relaciona con la fatiga en los componentes de las máquinas, lo que provoca desgaste prematuro. Sus unidades de medición son pico a pico o rms, en mm/s o pulgadas/s.

- **Aceleración:** es el cambio de velocidad en un tiempo determinado y se relaciona con la fuerza ejercida sobre los componentes de las máquinas, además, es la medida dominante para altas frecuencias. Sus unidades de medición son el valor rms en mm/s^2 , $pulg/s^2$ o $g's$.

Tabla I. **Unidades de medición para vibración**

Parámetro de medición	Unidades de medida
Desplazamiento	$\mu m, mm$
Velocidad	$mm/s, pulg/s$
Aceleración	$mm/s^2, pulg/s^2$ o $g's$

Fuente: elaboración propia, empleando Word 2019.

1.6. Toma de datos de vibraciones

Es un punto primordial para el análisis de vibraciones, dado que este análisis consta de dos etapas: adquisición e interpretación de los datos obtenidos al medir las vibraciones.

La toma de datos consiste en recolectar las lecturas necesarias de vibraciones en una máquina, para posteriormente interpretar los resultados y diagnosticar su estado.

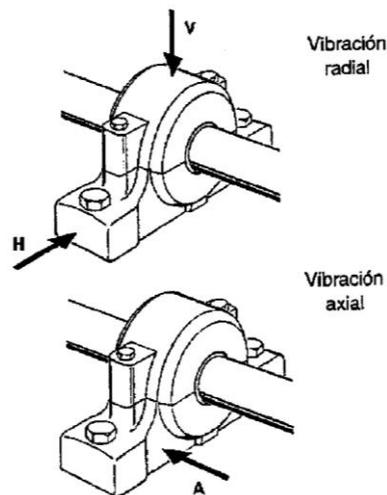
Se debe tomar en cuenta que para la adquisición de datos es necesario conocer diferentes parámetros como: tipos de sensores, puntos de medición de una máquina, fijación del sensor, entre otros.

1.6.1. Pasos por seguir para la toma de datos

- Determinación de las características de diseño y funcionamiento de la máquina: se debe conocer la velocidad de rotación de la máquina, tipo de rodamiento, engranaje, tipo de apoyo, acoplamientos, entre otros.
- Determinación de la finalidad de la vibración: en esta se incluyen medidas de rutina para detectar posibles fallas, así como también medidas para crear un histórico de datos y con este obtener un valor de base o tendencia, sobre el que estará el valor de vibración que deba tener la máquina cuando sus condiciones de trabajo sean normales.
- Selección de los parámetros de medición: desplazamiento, velocidad, aceleración. Ellos determinarán el sensor por utilizar.
- Toma de datos antes y después de una reparación: la primera medida pondrá de manifiesto el problema o elemento defectuoso y será más eficaz su reparación. Después de la reparación se tomarán medidas que indiquen la evolución del elemento sustituido o la corrección del defecto existente.
- Determinación de posición y dirección de las medidas con los sensores: la vibración se tomará generalmente en rodamientos de la máquina, puntos donde sea más probable un fallo por acoplamiento, equilibrio o puntos donde se transmitan las fuerzas vibratorias. Los tres sentidos principales en una medición son horizontal, vertical y axial, como se observa en la figura 6.
- Selección del instrumento de medición y sensores.

- Determinación del tipo específico de datos requeridos para la interpretación de las medidas realizadas: así se ahorrará tiempo para realizar las medidas y con ellas se obtendrá información más útil en el análisis. Los datos obtenidos pueden ser: espectro de frecuencias, amplitud-frecuencia, amplitud-tiempo para vibraciones transitorias rápidas o vibraciones muy lentas en rodamientos, engranajes y problemas de cavitación.

Figura 8. **Sentido de toma de datos**



Fuente: ROYO, Jesús; RABANAQUE, Gloria. *Análisis de vibraciones e interpretación de datos*.
p. 74.

- Al momento de la adquisición de datos es importante tener en cuenta los siguientes aspectos.
 - Secuencias de medición, tomar datos correctos y lo más rápido posible, evita tiempo perdido.
 - El lugar de toma de datos siempre será el mismo, con el sensor unido de una forma firme, para la veracidad de los datos.

- Atender tendencias inesperadas. Estar preparado para tomar más datos, medidas cuando pueda haber signos de algún problema.
- Comparar con máquinas similares y en igual forma de trabajo.

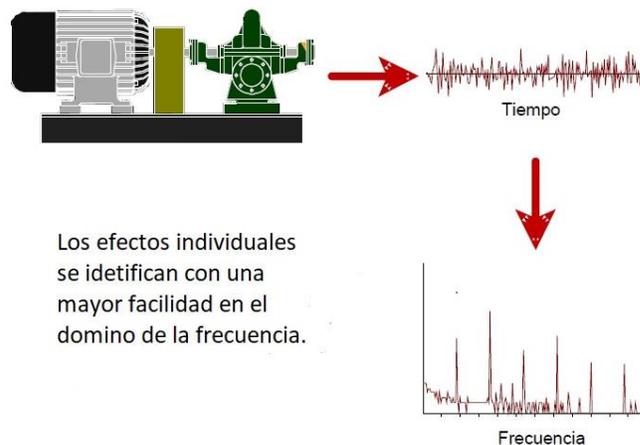
1.7. Técnicas para la interpretación de datos

A continuación, se presentan las principales técnicas para la interpretación de datos y realización de un diagnóstico en base al análisis de vibraciones:

1.7.1. Análisis de onda

El análisis de onda analiza la magnitud de vibración en el dominio del tiempo. Sin embargo, debido a que contiene mucha información suele ser muy compleja de analizar.

Figura 9. **Comparación de onda de tiempo vs onda de frecuencia**



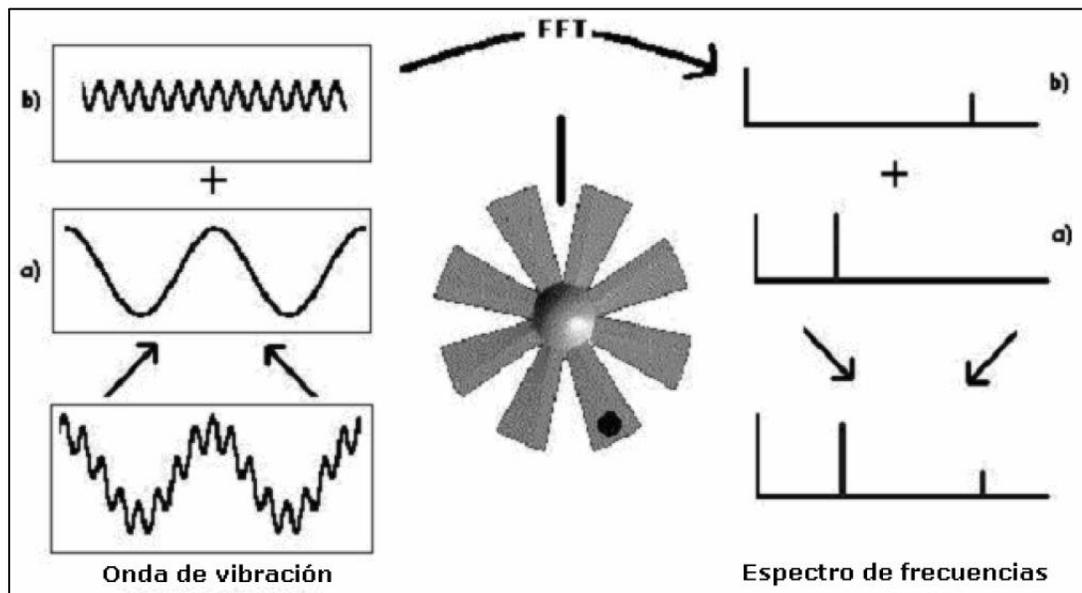
Fuente: WHITE, Glen. *Introducción al análisis de vibraciones*. p. 34.

1.7.2. Análisis espectral

Consiste en el análisis de la magnitud de vibración en el dominio de la frecuencia. Este se obtiene transformando la onda de vibración en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, lo que permite tener una gráfica de mejor comprensión para el analizador.

Por medio de la siguiente gráfica se muestra el proceso de la generación del espectro de frecuencias por medio de la Transformada Rápida de Fourier, o FFT, por sus siglas en inglés (*Fast Fourier Transformation*). No se demuestra el procedimiento matemático, pues este desviaría el tema central del trabajo de graduación, además, los equipos analizadores realizan esta acción al instante.

Figura 10. **Generación del espectro de frecuencias**



Fuente: VELÁSQUEZ AGUILAR, Luis. *Diagnóstico de problemas mediante análisis de vibraciones*. p. 21.

Analizando inicialmente con la onda de vibración, en la parte izquierda de la figura 9, se obtiene lo siguiente:

- La onda componente señalada con la letra “a”, tiene una frecuencia baja, pero amplitud alta. Esta onda se origina debido al peso agregado a una de las ocho aspas del ventilador.
- La onda componente señalada con la letra “b”, tiene una frecuencia más alta que la anterior, pero de menor amplitud. Y esta es producida debido a impactos ligeros en cada una de las aspas del ventilador cuando está en funcionamiento.
- La frecuencia de vibración generada por el objeto “b”, es ocho veces mayor que la generada por el objeto “a”.

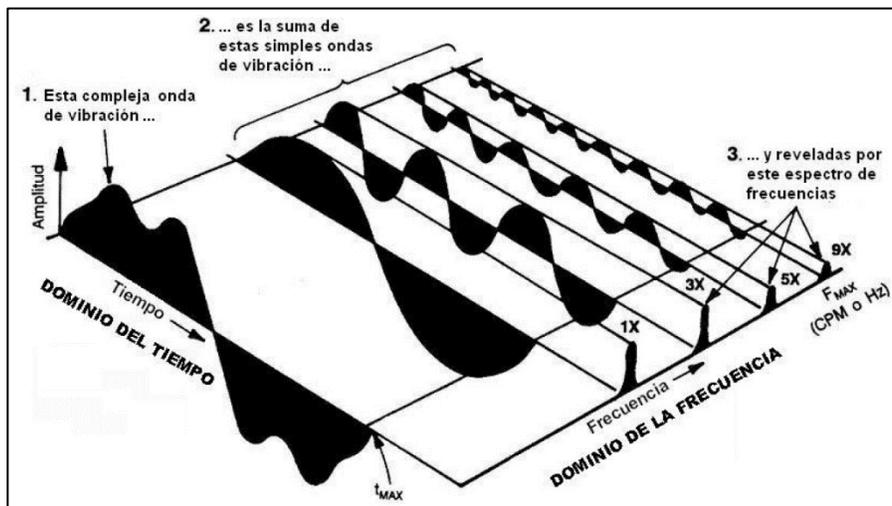
Del lado derecho de la figura 9, tenemos el espectro de frecuencias mediante la aplicación de la transformada rápida de Fourier, y de esta obtenemos lo siguiente:

- La gráfica señalada con la letra “a” representa la transformación del dominio tiempo al dominio de frecuencia de la onda de vibración que se produce por el peso agregado en una de las aspas. La onda se representa por una línea que posee la frecuencia y amplitud de la onda original.
- La gráfica señalada con la letra “b” muestra la transformación de la onda de vibración que se genera por el choque entre un objeto y las ocho aspas del ventilador. Se observa que la línea que representa esta onda es de amplitud más baja y frecuencia más alta que la anterior.

- Al superponer estas dos gráficas, como ocurre en la suma de las vibraciones, veremos que el resultado es un espectro de frecuencias.

La figura 11 ayudará a reforzar este concepto, al representar gráficamente el procedimiento de la transformación de Fourier.

Figura 11. **Obtención de un espectro de frecuencias**

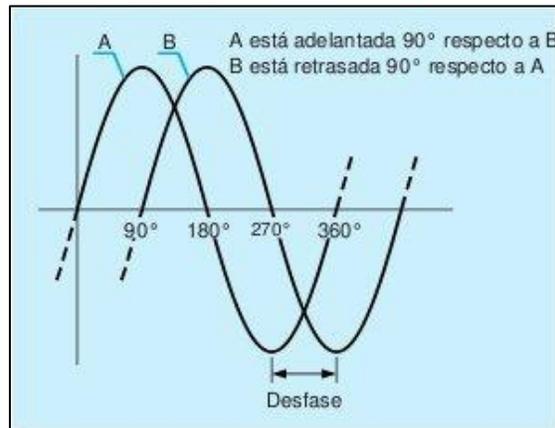


Fuente: VELÁSQUEZ AGUILAR, Luis. *Diagnóstico de problemas mediante análisis de vibraciones*. p. 22.

1.7.3. Análisis de fase

Es el tiempo de adelanto o retraso que tiene una onda vibratoria respecto de otra de igual período o respecto de una marca de referencia; esto indica el desfase que existe entre una señal y otra.

Figura 12. **Ondas desfasadas**



Fuente: GIRÓN CHEW, Ariel. *Propuesta de procedimientos e instructivo para la estandarización en servicio de análisis de vibraciones*. p. 10.

1.8. **Sensores de vibraciones**

El sensor de vibración tiene la función de convertir las vibraciones mecánicas en señales eléctricas analógicas para ser procesadas a un colector para luego ser analizadas. Existen sensores de desplazamiento, velocidad y aceleración, cada uno para diferente tipo de aplicación en la industria.

1.8.1. **Sensor de desplazamiento**

Son usados para medir el movimiento entre el eje y sus cojinetes, (vibración relativa) especialmente utilizado en cojinetes de deslizamiento; su montaje suele ser de instalación fija (baja portabilidad). Son utilizados para el monitoreo permanente y análisis de órbita. Su rango de frecuencia límite es de aproximadamente 1 000 Hz.

1.8.2. Sensor de velocidad

Utilizados para medir la vibración de la máquina en sí (vibración absoluta). Su montaje puede ser fijo o eventual. Requiere de frecuente calibración y su rango límite de frecuencia es de aproximadamente 2 000 Hz.

1.8.3. Sensor de aceleración

Empleados para medir la vibración de la máquina en general (vibración absoluta). Su montaje puede ser fijo o eventual, usualmente utilizado para análisis de vibraciones por su fácil portabilidad. Mantiene su calibración por largo tiempo y tienen un rango de frecuencia amplio y uniforme que va de 1 Hz a 20 000 Hz.

1.9. Tipos de montaje del sensor

Existen diversas formas de como montar el sensor, cada uno con diferentes cualidades. La forma de montaje del sensor en la máquina determina el límite de alta frecuencia que el transductor podrá tomar, ya que el contacto del sensor con la máquina actúa como un filtro mecánico. Los tipos de montaje se muestran en la tabla II.

Tabla II. **Relación del tipo de montaje y frecuencias aceptables y naturales**

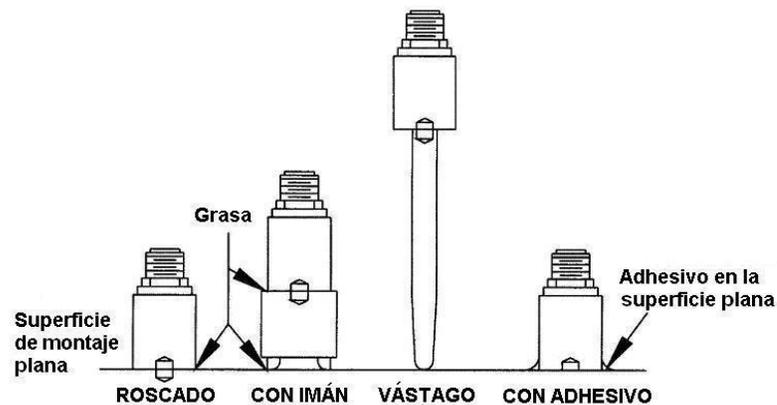
Tipo de montaje	Frecuencia máxima aceptable	Frecuencia natural del montaje
Roscado	975 000 cpm	1 900 000 cpm
Con adhesivos	540 000 cpm	No Observado
Con magneto o imán	400 000 cpm	724 500 cpm
Vástago sujetado con la mano	48 000 cpm	88 500

Fuente: VELÁSQUEZ AGUILAR, Luis. *Diagnóstico de problemas mediante análisis de vibraciones*. p. 40.

- Roscado: catalogado como el mejor tipo de montaje de sensores, consiste en fijar el sensor a un espárrago roscado en la máquina. Provee una buena repetitividad y normalmente se emplean en donde los sensores son de monitoreo permanente.
- Con adhesivos: también provee una buena repetitividad de datos y buena respuesta a la frecuencia. Sin embargo, este montaje puede ir perdiendo su respuesta a la transmisión de vibración, con el paso del tiempo.
- Con magneto o imán: este es el tipo de montaje más común. El sensor se rosca a un imán y este, por la fuerza magnética que posee, se fija a la superficie de la máquina. La respuesta de este montaje generalmente es la adecuada para las necesidades de los programas de análisis de vibraciones. Además, provee buena repetitividad de datos.

- Vástago sujetado con la mano: es el menos recomendable de los cuatro mencionados con anterioridad, dado que el sensor es sujetado por el analista con la mano durante la toma de datos. Su rango de frecuencias no es muy amplio, no importando la longitud, diámetro o material del vástago. Este montaje tampoco provee buena repetitividad de datos, ya que estos dependen de la persona que sujete el vástago e incluso, existen variaciones cuando la misma persona realiza las mediciones. Se aconseja su uso, únicamente cuando ninguno de los tres montajes anteriores pueda utilizarse.

Figura 13. Tipos de montaje para sensores de vibración



Fuente: VELÁSQUEZ AGUILAR, Luis. *Diagnóstico de problemas mediante análisis de vibraciones*. p. 41.

1.10. Determinación del estado de la máquina

Para determinar el estado de una máquina, se inicia con la medición de vibración global tanto en dirección radial, como en dirección axial en los puntos donde se encuentren los rodamientos. Posteriormente, se elige el valor más alto obtenido, esto con la finalidad de conocer la severidad de vibración de la máquina. En el punto donde se observa el valor más elevado de vibración, se asume que es el punto donde se localiza la falla o el punto donde se tiene un

mayor riesgo de ocurrir un daño. Los resultados de esta evaluación preliminar determinarán si la máquina:

- Puede continuar en operación sin tomar acción alguna.
- Presenta leves síntomas de un problema futuro y deberá tomarse alguna acción de mantenimiento y en qué momento en el tiempo.
- Posee algún daño en progreso y debe ejecutarse un estudio analítico para definir las causas de este daño y planificar el mantenimiento necesario.
- Debe ser sacada de operación de inmediato para evitar un daño inminente.

Medir la vibración es muy importante en los programas de análisis de vibraciones, debido a que, sin buenos datos, no se obtendrían buenos resultados. Por otra parte, otro aspecto importante radica en saber si el nivel de vibración de la máquina es aceptable o no.

Afortunadamente, hoy día existen tres métodos para la evaluación del nivel de vibración en las máquinas, los cuales se presentan en los siguientes incisos.

1.10.1. Evaluación usando valores límites de guías o normas

Este tipo de evaluación se utiliza cuando el comportamiento de la máquina es desconocido, y no existen datos previos con dicha máquina, la evaluación del estado de la máquina se puede realizar comparando los valores obtenidos con los límites recomendados por alguna guía del fabricante o norma técnica aplicable.

Este método es rápido y simple de llevar a cabo. Basta con tomar la vibración global de la máquina en unidades de velocidad o aceleración mediante el uso de un sensor de velocidad o aceleración, y posteriormente trasladar el valor más alto obtenido a cualquiera de las tablas o diagramas de la norma o guía que se esté empleando como referencia, y con esto, establecer la condición de operación de la máquina.

Para máquinas que posean predominantemente masas rotativas, las principales guías y normas relevantes para la evaluación de la vibración absoluta de cojinetes se muestran en el siguiente diagrama.

- Norma ISO 10816-3: esta norma establece las condiciones y procedimientos generales para la medición y evaluación de la vibración de una máquina, con el uso de mediciones realizadas sobre partes no rotativas. Por medio de la amplitud de vibración brinda una tabla comparativa con la cual se sabe el estado de la máquina analizada. Esta norma reemplaza a las ISO 2372 e ISO 3945.

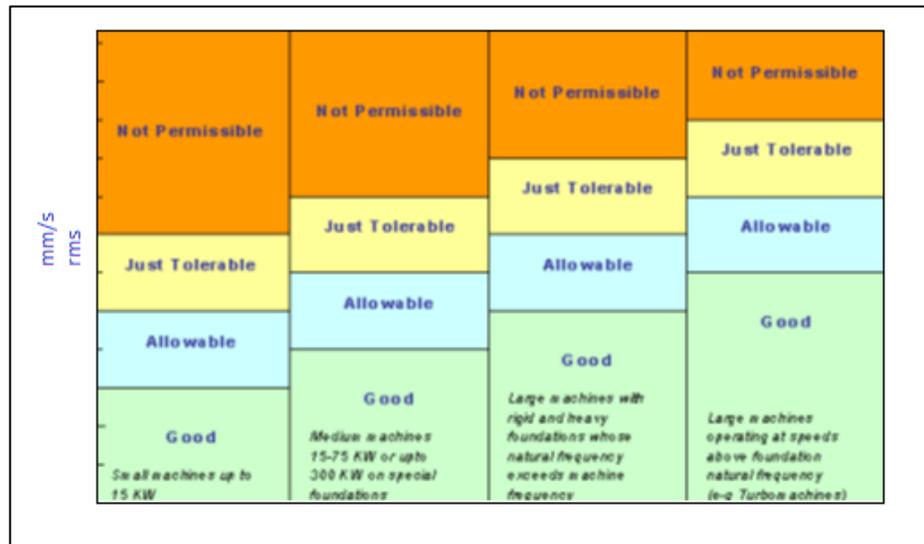
Figura 14. Norma ISO 10816-3

								v r.m.s. mm/s	v r.m.s. inch/s	Velocidad Vibración <small>10 - 1000 Hz n > 600 1/min (2 - 1000 Hz n > 120 1/min)</small>
								11	0.433	
								7.1	0.280	
								4.5	0.177	
								3.5	0.138	
								2.8	0.110	
								2.3	0.091	
								1.4	0.055	
								0.71	0.028	
rígida	flexible	rígida	flexible	rígida	flexible	rígida	flexible	Fundación		
Bombas > 15 kW radial, axial, diagonal				Máquinas medianas 15 kW < P ≤ 300 kW		Máquinas Grandes 300 kW < P < 50 MW		Tipo de Máquina		
Acople directo		Eje intermedio / Poleas.		Motores 160 mm ≤ H < 315 mm		Motores 315 mm ≤ H				
Grupo 4		Grupo 3		Grupo 2		Grupo 1		Grupo		
								<div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 5px;"> <div>■ Puesta en operación recientemente.</div> <div>■ Operación para largo plazo.</div> <div>■ Operación para corto plazo</div> <div>■ Vibración causando daños</div> </div>		

Fuente: GIRÓN CHEW, Ariel. *Propuesta de procedimientos e instructivo para la estandarización en servicio de análisis de vibraciones.* p. 26.

- Norma VDI 2056: al igual que la norma ISO 10816-3, la norma VDI 2056 muestra una tabla comparativa en la cual se definen niveles globales máximos de vibración según el tipo de máquina. Se localiza así la máquina en una condición de bueno a no permitido, según sea el nivel de vibración global máximo.

Figura 15. Norma VDI 2056



Fuente: GIRÓN CHEW, Ariel. *Propuesta de procedimientos e instructivo para la estandarización en servicio de análisis de vibraciones*. p. 27.

Norma ISO 10816-6: esta norma establece las condiciones y procedimientos generales para la medición y evaluación de la vibración utilizando mediciones realizadas en las partes no giratorias y no recíprocas. Generalmente, se aplica a máquinas de pistón alternativo montadas en una base rígida o resistente con potencias iguales o superiores a 100 kw.

Ejemplos típicos son: motores auxiliares marinos, motores que funcionan en grupos diésel, compresores de pistón, entre otros. También se utiliza para garantizar que la vibración de la máquina no afecte negativamente al equipo montado directamente.

Figura 16. NORMA ISO 10816-6

Vibration Evaluation Standard - Reciprocating machine

Vibration Severity Grade	Overall Vibration measurement measured on the machine Structure			Machine Class*						
	Displacement in um - micron (rms)	Velocity in mm/ sec (rms)	Acceleration meter/ sec (rms)	1	2	3	4	5	6	7
1.1	≤ 17.8	≤ 1.12	≤ 1.76	A	A	A	A	A	A	A
1.8	≤ 28.3	≤ 1.78	≤ 2.79	A	A	A	A	A	A	A
2.8	≤ 44.8	≤ 2.82	≤ 4.42	B	B	B	A	A	A	A
4.5	≤ 71.0	≤ 4.46	≤ 7.01	C	B	B	B	A	A	A
7.1	≤ 113	≤ 7.07	≤ 11.1	C	C	B	B	B	A	A
11	≤ 178	≤ 11.2	≤ 17.6	D	C	C	B	B	B	B
18	≤ 283	≤ 17.8	≤ 27.9	D	D	C	C	B	B	B
28	≤ 448	≤ 28.2	≤ 44.2	D	D	D	C	C	C	B
45	≤ 710	≤ 44.6	≤ 70.1	D	D	D	D	C	C	C
71	≤ 1125	≤ 70.7	≤ 111	D	D	D	D	D	C	C
112	≤ 1784	≤ 112	≤ 176	D	D	D	D	D	D	C
180	≤ 1784	> 112	> 176	D	D	D	D	D	D	D

Zone A: Vibration of newly Commissioned Machines;
Zone B: Machines considered acceptable for unrestricted long-term operation
Zone C: Machines considered unsatisfactory for long-term continuous operation
Zone D: Vibration values normally considered to be sufficient severity to cause damage to the machine



Fuente: Vibsens. Iso 10816. www.vibsens.com/iso10816-charts/. Consulta: noviembre de 2019.

1.10.2. Evaluación utilizando valores recomendados por el fabricante

Cada fabricante define los valores máximos para vibraciones, desplazamientos, temperaturas, entre otros. Esos valores límite están basados en cálculo o en ensayos de larga duración conducidos por el fabricante.

Estos valores límite recomendados por el fabricante son los preferidos para la evaluación de máquinas, y basta con realizar una comparación de los niveles de vibración obtenidos con los valores de referencia del fabricante para establecer en qué condición de operación se encuentra la máquina.

1.10.3. Evaluación de máquinas utilizando la tendencia

Para evitar el daño a una máquina, los niveles de vibración medidos que describen el estado de la máquina no deben exceder valores límites preestablecidos por los datos obtenidos anteriormente. Por otra parte, cambios en los niveles de vibración medidos, debajo de esos límites, pueden indicar algún daño en progreso o irregularidades en la máquina.

Este tipo de control ha nacido a raíz de las necesidades de mantener un control en las condiciones de operación ante la ausencia de valores establecidos por el fabricante o las normas.

En casos donde no se cuente con valores límites de tendencia, se puede empezar utilizando los valores de las normas, y posteriormente realizar valores de tendencia especiales para cada grupo de maquinaria con las mediciones obtenidas.

2. FASE DE INVESTIGACIÓN

2.1. Análisis de la situación actual

El Ingenio Trinidad, está compuesto por tres principales superintendencias, y estas son: fabrica, que se encarga de la producción de azúcar. Campo, se encarga de velar por el cuidado de la caña, además de brindarle mantenimiento a los pozos y bombas verticales tipo turbina. Por último, taller, que se ocupa de brindar el mantenimiento a todos los equipos del ingenio, desde motocicletas hasta maquinaria pesada. Por esta razón, la superintendencia de taller, también se subdivide en tres áreas principales, las cuales son: taller automotriz, taller agrícola y centro de control de taller (CCT).

El taller automotriz se encarga de realizar el mantenimiento necesario a las motocicletas, cisternas de riego, cabezales, buses, vehículos livianos y también tiene a su cargo un área encargada del manejo y desgaste de los neumáticos utilizados en todos los equipos del ingenio.

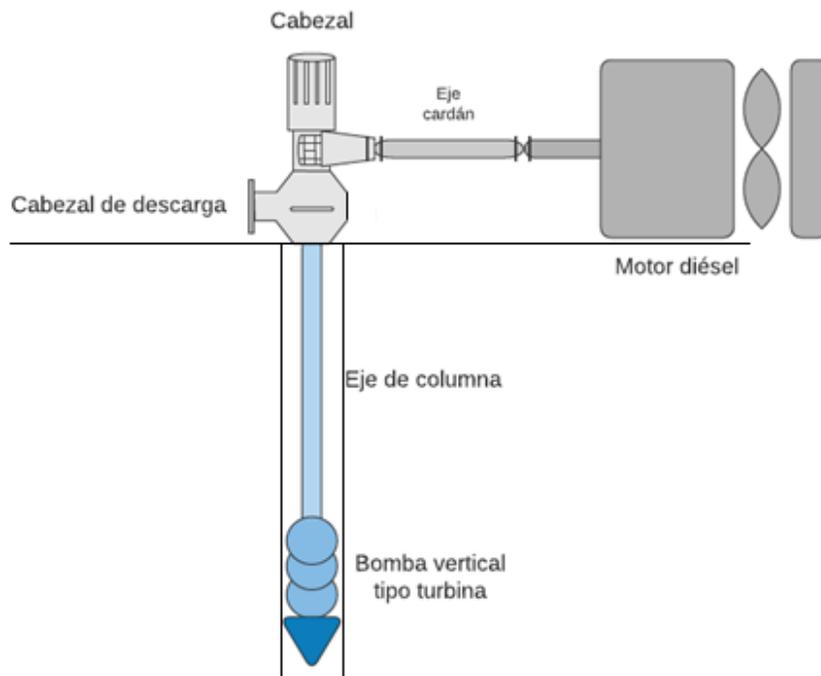
El centro de control de taller es el área encargada de llevar el control de los trabajos que se les realiza a los equipos, la maquinaria que ingresa y sale del taller. Además, genera las órdenes de trabajo para los diferentes equipos, los cuales son identificados por un centro de costo -CC- el cual es un código de cinco dígitos que todas las máquinas del ingenio tienen de manera visible y que sirven para llevar un control de los trabajos que se les realizan.

El taller agrícola, se encarga de darle mantenimiento a la maquinaria pesada, tractores, alzadoras y equipos de riego, dentro de los equipos de riego

se encuentran los pivotes centrales. Los pivotes centrales se conforman por tres elementos fundamentales, los cuales son: motor de combustión interna, cabezal de riego y bomba vertical tipo turbina. El taller agrícola se encarga de brindar mantenimiento al motor y al cabezal, por otro lado, campo se encarga del mantenimiento de la bomba vertical tipo turbina.

En la figura 17 se muestra en color gris, los elementos que pertenecen la superintendencia del taller, y en color celeste y azul lo que le pertenece la superintendencia de campo.

Figura 17. **Diagrama de una turbina vertical**



Fuente: elaboración propia, empleando Lucid Chart Online.

2.1.1. Análisis de gastos

Para realizar un correcto análisis de gastos, es necesario determinar los costos de mano de obra por mantenimiento correctivo, el costo por tiempo muerto en el que una máquina de riego no trabajó debido al mismo tipo de mantenimiento, además del costo de los repuestos empleados para corregir las fallas.

Actualmente el Ingenio Trinidad cuenta con veintiuna bombas verticales tipo turbina, trece de ellas se usan para riego por aspersión y otras aplicaciones, y las ocho restantes, son las encargadas de suministrar el agua a los pivotes centrales. Estos pivotes constan básicamente de, un motor de combustión interna, un cabezal y una bomba vertical tipo turbina.

En este proyecto está contemplado iniciar el análisis de vibraciones con los ocho pivotes centrales, con el objetivo de verificar su rentabilidad, razón por la cual este análisis se centralizará en estos ocho equipos.

Para determinar los costos por mantenimiento correctivo en los equipos de riego, se revisaron los historiales de los últimos tres periodos de zafra, posteriormente se filtraron las fallas que han tenido los cabezales, y que se pudieron evitar por medio de un monitoreo de vibraciones, excluyendo las fallas a causa de que algunos componentes hayan llegado a su tiempo de servicio o de vida útil.

De igual forma se estudiaron los repuestos que se utilizaron para corregir dichas fallas y los costos de mano de obra, dejando como resultado una base de datos de las fallas recurrentes de los cabezales.

2.1.2. Fallas recurrentes en equipos de riego

El historial que se presenta en la figura 18, contiene los costos de repuestos utilizados para los cabezales y sus componentes, los costos de tarifa por hora de trabajo de un pivote central y los costos de mano de obra. Con ayuda del software SQL y del supervisor del departamento de riegos, se seleccionaron únicamente los mantenimientos correctivos a los equipos de riego, específicamente los ocho pivotes centrales, y se determinaron las fallas para los periodos 16-17, 17-18 y 18-19.

El software SQL arroja los datos de las órdenes de trabajo, tales como la fecha, ubicación del equipo, el tipo de máquina, detalles de la falla, entre otros, pero en este informe no especifica las horas en que la máquina estuvo detenida por mantenimiento, por este motivo, se utilizó Excel para extraer únicamente la información que se necesitaba. Una vez obtenida esta información específica, se procedió a revisar cada orden de trabajo para obtener las horas que la máquina estuvo detenida por el mantenimiento, o tiempo de ticket, como se le conoce dentro del ingenio, estos datos fueron exportados a una tabla de Excel para filtrar la información más relevante para este estudio.

Figura 18. **Historial de fallas recurrentes zafra 16-17**

CC	Reporte	Acción	Hr/hombre	Hr/máquina	Costo de repuestos
29313	Desmontar cabezal y transmisión	Cambio de empaques	5	5	Q 118.00
29088	Desmontar cabezal y transmisión	Cambio de empaques	5	5	Q 118.00
29088	Golpe en el cabezal y nivelar el aceite	Cambio de cojinetes	21	21	Q 3,151.88
29078	Ruido en la transmisión	Ajuste	3	3	Q -
29078	Ruido en el cabezal y cruz de transmisión	Cambio de cojinetes y Cruz	13	13	Q 4,132.00
29302	Cruz de transmisión quebrada	Cambio de cruz de transmisión	3	3	Q 1,257.45
29079	Cruz de transmisión quebrada	Cambio de cruz dado transmisión	4	4	Q 1,257.45
29078	Tiene fuga por las estopas	Cambio de estopas	7	7	Q 75.00
29080	Motor pierde fuerza, baja caudal agua	Revisión de operación	1	1	Q -
Totales			Q 1 007,50	Q 11 718,00	Q 10 109,78

Fuente: elaboración propia, con datos de Ingenio Trinidad.

Conociendo la cantidad de horas en que la máquina estuvo detenida por mantenimiento correctivo, se puede obtener el costo de la mano de obra con la siguiente ecuación:

$$CMO = Hr_c * PH \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde:

- CMO = costo de mano de obra
- Hr_c = horas de mantenimiento correctivo
- PH = pago por hora de un técnico

El costo de las horas/hombre o mano de obra, fue calculado de la siguiente manera:

$$CMO = (116 \cancel{hr}) * (16,25 \frac{Q}{hr})$$

$$CMO = Q.1885,00$$

El cálculo para obtener el costo del total de horas en las que una máquina no trabajó se realizó con la siguiente ecuación:

$$CHM = Hr_c * TM \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde:

- CHM = costo hora máquina
- Hr_c = horas de mantenimiento correctivo
- TM = tarifa de máquina

Por lo tanto, el costo horas/máquina fue calculado de la siguiente manera:

$$CHM = (116 \text{ hr}) * (189 \frac{Q}{\text{hr}})$$

$$CHM = Q. 21\,924,00$$

La obtención del cálculo del costo de los repuestos fue realizada de manera diferente, en base al historial y números utilizados para la corrección de las diferentes fallas. De este modo, se obtuvieron un total de Q. 6 987,78.

Sumando las tres cantidades anteriores, se obtiene el siguiente costo total en mantenimiento correctivo que se pudo evitar si se hubiese tenido un monitoreo constante en los equipos. Lo anterior se debe a que, para evitar estas fallas, solo sería necesario una calibración o ajuste de alguno de los componentes.

Tabla III. **Monto total del mantenimiento correctivo zafra 16-17**

Período 16-17	
Mano de obra	Q 1 885,00
Hora máquina	Q 21 924,00
Repuestos	Q 6 986,78
Total	Q 30 795,78

Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2019.

De igual forma, se realizaron estos mismos cálculos para los dos periodos siguientes. A continuación, se muestra los historiales de fallas recurrentes de las zafras 17-18 y 18-19.

Figura 19. **Historial de fallas recurrentes zafra 17-18**

CC	Reporte	Acción	Hr/hombre	Hr/máquina	Costo de repuestos
29313	Desmontar cabezal y transmisión	Cambio de empaques	5	5	Q 118.00
29088	Desmontar cabezal y transmisión	Cambio de empaques	5	5	Q 118.00
29088	Golpe en el cabezal y nivelar el aceite	Cambio de cojinetes	21	21	Q 3,151.88
29078	Ruido en la transmisión	Ajuste	3	3	Q -
29078	Ruido en el cabezal y cruz de transmisión	Cambio de cojinetes y Cruz	13	13	Q 4,132.00
29302	Cruz de transmisión quebrada	Cambio de cruz de transmisión	3	3	Q 1,257.45
29079	Cruz de transmisión quebrada	Cambio de cruz dado transmisión	4	4	Q 1,257.45
29078	Tiene fuga por las estopas	Cambio de estopas	7	7	Q 75.00
29080	Motor pierde fuerza, baja caudal agua	Revisión de operación	1	1	Q -
Totales			Q 1 007,50	Q 11 718,00	Q 10 109,78

Fuente: elaboración propia, con datos de Ingenio Trinidad.

Figura 20. **Historial de fallas recurrentes zafra 18-19**

CC	Reporte	Acción	Hr/hombre	Hr/máquina	Costo de repuestos
29075	Cruz de la transmisión rajada	Cambio de cruz de transmisión	4	4	Q 1,257.45
29075	Cruz de la transmisión rajada	Cambio de cruz de transmisión	5	5	Q 1,257.45
29075	Cruz y transmisión quebradas	Cambio de transmisión completa	6	6	Q 2,946.43
29075	Transmisión agrietada	Cambio de transmisión completa	12	12	Q 2,946.43
29075	Cruz de la transmisión rajada	Reengrase y cambio de cruz	4	4	Q 1,257.00
29075	El eje de la bomba no gira	Cambio de juego de engranaje	23	23	Q 9,419.64
29306	Estoperos y tornillos flojos	Cambio de estopas y tornillos	4	4	Q 150.00
29078	Tornillos de transmisión quebrados	Cambio de tornillos	4	4	Q 125.00
29313	Cruz de la transmisión rajada	Cambio de cruz de transmisión	39	39	Q 1,257.45
29313	Transmisión agrietada y desalineada	Cambio de transmisión completa	8	8	Q 2,946.43
29313	fuga de agua en estopas	Cambio de estopas y tornillos	9	9	Q 75.00
29080	Fuga de agua en estopas	Cambio de estopas	3	3	Q 75.00
Totales			Q 1 966,25	Q 22 869,00	Q 23 713,28

Fuente: elaboración propia, con datos de Ingenio Trinidad.

Tabla IV. **Monto total del mantenimiento correctivo zafra 17-18**

Período 17-18	
Mano de obra	Q 1 007,50
Hora máquina	Q 11 718,00
Repuestos	Q 10 109,78
Total	Q 22 835,28

Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2019.

Tabla V. **Monto total del mantenimiento correctivo zafra 18-19**

Período 18-19		
Mano de obra	Q	1 966,25
Hora máquina	Q	22 869,00
Repuestos	Q	23 713,28
Total	Q	48 548,53

Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2019.

Efectuando un recuento sobre los montos de los tres periodos de zafra ya mencionados, se obtiene un gasto total de Q. 102 179,59 en mantenimiento correctivo, el cual se pudo haber corregido con un monitoreo de análisis de vibraciones. Este dato que se desglosa en la tabla VI.

Tabla VI. **Gastos totales en los tres periodos de zafras**

Total de horas por		299
Mano de obra	Q	4 858,75
Horas máquina	Q	56 511,00
Costo de repuestos	Q	40 809,84
TOTAL DE COSTOS	Q	102 179,59

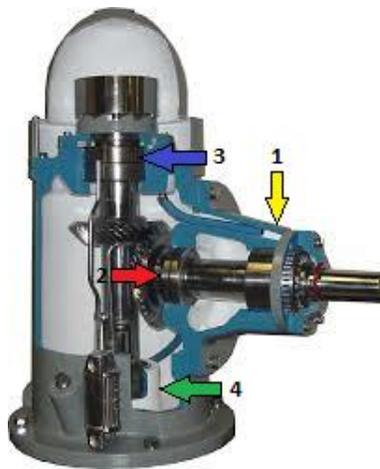
Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2019.

2.1.3. Puntos críticos de los equipos de riego

La criticidad de los puntos en los equipos de riego, se dividen en dos partes, las cuales son: puntos críticos de medición y puntos críticos de fallas.

Los puntos críticos de medición sirven para determinar si el nivel de vibración proviene de la bomba vertical tipo turbina, de la alineación del cabezal con el motor o de los componentes internos del cabezal. Estos puntos se localizan dependiendo de la disposición de los rodamientos que mantienen en la posición ideal al piñón superior o corona y a los que sujetan al eje del piñón de ataque, como se muestra a continuación.

Figura 21. Puntos críticos de medición



Fuente: elaboración propia, Ingenio Trinidad.

Los puntos críticos de fallas indican cuáles son las piezas mecánicas que son más propensas a fallar debido a las vibraciones excesivas en el sistema. En el caso de los equipos del Ingenio Trinidad, las piezas que más fallas presentaron en los periodos de zafra estudiados son los que se muestran en la tabla VIII.

Tabla VII. **Piezas con más incidencias en fallas**

Partes	Cantidad
Cruz de transmisión	10
Estopas	6
Transmisión completa	4

Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2019.

2.2. **Beneficios de análisis de vibraciones**

Existen múltiples beneficios que este tipo de mantenimiento proporciona, y al aplicar correctamente el análisis de vibraciones, se pueden diagnosticar las siguientes fallas típicas:

Tabla VIII. **Diagnóstico de fallas típicas**

No.	Tipo de falla
1	Resonancia
2	Desbalanceo
3	Desalineación
4	Soltura mecánica
5	Holgura mecánica
6	Fuerzas hidráulicas y aerodinámicas
7	Fallas rotodinámicas

Fuente: elaboración propia, empleando Word 2019.

Estas fallas poseen espectros de frecuencia característicos que permiten identificarlos. Una vez se logra diagnosticar e identificar el tipo de falla, se pueden realizar las acciones, ya sean correctivas o preventivas, dependiendo lo que el analista y el departamento de mantenimiento crean necesario, además de brindar una anticipación para obtener las piezas necesarias para reparar la falla diagnosticada.

No todos los equipos analizadores de vibraciones tienen la capacidad de obtener un espectro de frecuencia de un punto de medición, estos equipos son muy avanzados y permiten un estudio más detallado sobre la máquina analizada.

2.3. Inversión para adquirir el equipo para analizar vibraciones

En el mercado industrial existen dos clases de equipos analizadores, los genéricos o convencionales y los analíticos.

2.3.1. Equipos analíticos

Los equipos analíticos son para diagnósticos de vibraciones específicas y nos permiten realizar medidas más certeras y precisas, asimismo permiten obtener lecturas de temperatura, onda en el tiempo, aceleración envolvente, ángulo de fase, desplazamiento y espectros de frecuencia, con las cuales podemos detectar fallas de una manera más anticipada y específica. Esto conlleva a un mejor resultado en cuanto a las acciones por tomar después del análisis. Estos equipos son muy útiles para detectar problemas en máquinas cuyos repuestos o niveles de importancia sean muy elevados.

Tabla IX. Cotización A

Código	Descripción	Cantidad	Precio unitario
T2-9090-5061	Equipo analizador de vibraciones NC - TRIO CA10	1	Q 130 773,80
	ExpertALERT Cloud		
	TRIO Data procesor DP-2 Plus		
	Acceso ilimitado al usuario en el portal WATCHMAN		
	Software con lincencia		Q 30 000,00
Total		Q	160 773,80

Fuente: Termogram.

Si utilizamos la cotización de la tabla IX, contamos con un equipo capaz de medir espectros de frecuencias, realizar gráficas de tendencia, almacenamiento en la nube, entre otras aplicaciones. Con este equipo se determina con mayor precisión los problemas que afectan a la máquina.

Realizando un análisis de la inversión, en el primer año tendríamos los datos obtenidos en la tabla X. Esta propuesta incluye el equipo analizador y el software para instalación, pero no incluye la capacitación del correcto uso del equipo, por lo cual, se debe de adquirir la capacitación de cuarenta horas con un costo de veinticinco mil quetzales. También es necesario obtener un nuevo equipo de cómputo más reciente para la instalación del software del equipo analizador.

Tabla X. **Inversión con la cotización A**

Descripción	Precio
Equipo analizador	Q 130 773,80
Capacitación	Q 30 000,00
Equipo de computo	Q 5 000,00
Total	Q 160 773,80

Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2019.

2.3.2. Equipos genéricos o convencionales

Los equipos genéricos o convencionales son más básicos y no mide espectro de frecuencia o la onda de vibración con respecto del tiempo.

Los equipos de medición de vibraciones genéricos permiten medir únicamente la velocidad de vibración global de un equipo y solamente nos indican si el valor de vibración es considerado bueno, aceptable, apenas aceptable o peligro. Esto lo realiza por medio de normas de medidas de vibración global, las

cuales se mencionan en las figuras 14, 15 y 16. A continuación se detalla el precio de obtención de un equipo convencional.

Tabla XI. Cotización B

Codigo	Descripción	Cantidad	Precio unitario
A4900S	Medidor portatil, analizador y colector de datos SKF CMAS 100-SL	1	Q 29 320,00
	Capacitación gratuita online para utilización del equipo y software.		
	Basic software data base system	1	Q 11 544,75
Total		Q	40 864,75

Fuente: ERA. Mejores productos industriales.

Si utilizamos la cotización de la tabla XI, contamos con un equipo básico, capaz de medir únicamente vibración global en los equipos y temperatura en el punto de medición. Con este equipo se determinan los problemas que afectan a la máquina, pero es mucho más económico de adquirir y más fácil de utilizar.

Realizando un análisis de la inversión, en el primer año tendríamos los datos obtenidos en la tabla XII. Esta propuesta incluye el equipo analizador y la capacitación del uso del software para el almacenamiento de datos y el uso del equipo. No incluye la licencia para la utilización del software.

Tabla XII. Inversión con la cotización B

Descripción	Precio
Equipo analizador	Q 29 320,00
Lincencia Software	Q 11 544,75
Total	Q 40 864,75

Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2019.

A este equipo analizador básico cuenta únicamente con un sensor de tipo vástago, el cual cuenta con el peor margen de repetibilidad en la toma de datos, debido a que es muy impreciso porque depende de la fuerza que se le aplique al equipo y que incluso puede variar si el mismo operador realiza todas las mediciones.

Por ese motivo, se recomienda que a la cotización B del equipo básico se le agregue también un sensor acelerómetro que utiliza una fijación de tipo magnética y que puede ayudar en la repetibilidad de las mediciones y así obtener un mejor resultado para la creación de bases de datos. El precio de este sensor adicional se presenta a continuación en la tabla XIII.

Tabla XIII. **Cotización del sensor magnético**

Codigo	Descrcpción	Cantidad	Precio unitario
CMAC112K	ACELERÓMETRO SKF	1	Q 7 650, 54
Total			Q 7 650, 54

Fuente: Grupo AGINT, S.A.

Esta cotización incluye únicamente el sensor magnético y los manuales de uso y una garantía de dos años por desperfectos de fábrica.

2.4. Comparativa de inversión contra los costos de reparación.

Una vez estudiados los términos anteriores, en este apartado se hace la comparación para determinar su costo/beneficio, con la finalidad de conocer si es o no factible realizar una inversión para adquirir un equipo analizador de vibraciones.

Iniciando con la cotización A, el monto total de inversión para la obtención del equipo analítico se encuentra en la tabla X, siendo este de Q. 160 773,82, y los gastos de mantenimiento correctivo durante los tres períodos estudiados de la tabla VI, se tiene un gasto total de Q. 102 179,59, que en promedio anualmente, sería un ahorro de Q. 34 058,86. Para determinar el payback, se debe emplear la siguiente ecuación:

$$PB = \frac{\text{Inversión}}{\text{Ahorro}} \quad \text{Ecuación 3}$$

El payback se utiliza para determinar en cuántos años se recupera la inversión de la implementación de un proyecto, este relaciona el monto total de la inversión y el ahorro anual que el proyecto genera, el cociente de la operación determina el tiempo en que se recupera la inversión.

Empleando la ecuación 3, se obtiene:

$$PB = \frac{160\,773,82}{34\,058,86}$$

$$PB = 4,72 \text{ años}$$

Por lo tanto, la recuperación de la inversión sería de cuatro años y ocho meses para la primera cotización con el equipo analítico.

Seguidamente, con la cotización B, el monto total de inversión para la obtención del equipo básico se encuentra en la tabla XII es de Q. 40 864,75. Con el mismo valor de la tabla VI promediado a tres años y realizando los mismos cálculos, se obtiene lo siguiente:

$$PB = \frac{40\,864,75}{34\,085,86}$$

$$PB = 1,2 \text{ años}$$

La cotización B tiene una recuperación de inversión de un año y dos meses. Si a esta cotización, se le agrega el valor del sensor magnético de la tabla XIII se tiene un monto total de inversión para la obtención del aparato medidor básico de vibraciones y el sensor magnético de Q . 48 516,29. Efectuando los mismos cálculos con este nuevo valor se obtiene lo siguiente:

$$PB = \frac{48\,516,29}{34\,085,86}$$

$$PB = 1,42 \text{ años}$$

La recuperación de esta inversión se estima para un año y cinco meses. La cual garantiza una mayor repetibilidad en la toma de datos y con esto ser más certeros para las evaluaciones y toma de decisiones a un precio más accesible.

El Ingenio Trinidad busca constantemente mejorar la calidad del mantenimiento de sus equipos, ya que esto disminuye los gastos de reparaciones mayores y aumenta la vida útil de los mismos. Sin embargo, la implementación del análisis de vibraciones es un proyecto que aún se está estudiando para aplicarse a todas turbinas de succión de agua y determinar si es beneficioso o no.

Debido a la pronta recuperación de inversión que se estima a un año y cinco meses y a las prestaciones del equipo que son suficientes para generar una tendencia del comportamiento de vibraciones de los primeros ocho pivotes

centrales. Se decidió optar por la versión básica o convencional del analizador de vibraciones junto con su sensor magnético externo, con una inversión de Q. 48 516,29

3. FASE TÉCNICO PROFESIONAL

3.1. Plan de acción para la implementación del análisis de vibraciones

Para realizar el análisis de vibraciones es necesario conocer el funcionamiento de los equipos por estudiar, sus componentes internos y externos. Esto determinará las acciones que se deben realizar para el correcto análisis de vibraciones y garantizará una mayor repetibilidad de datos.

3.1.1. Características de diseño y funcionamiento

Debido a que las bombas verticales tipo turbina están sumergidas, los equipos que se estudiarán son los cabezales de riego, los cuales funcionan como redireccionadores de fuerza rotacional. Esta fuerza es generada por el motor de combustión interna y redireccionada a los ejes de columna de los tazones para la succión de agua en los pozos. Los cabezales están compuestos principalmente por cuatro rodamientos y dos engranajes.

Estas son las características que el cabezal de riego debe cumplir para un correcto análisis que pueda ser repetitivo y confiable.

- El motor de combustión interna y el cabezal de riego deben estar montados sobre bases rígidas individuales y a una distancia mínima de un metro y medio.
- El ángulo del eje de transmisión no debe exceder los 25°.

- Los cabezales de riego deben estar trabajando a 1 500 rpm siempre.
- El motor de combustión interna debe trabajar a una temperatura de 86 °C y a 1 500 rpm, siempre.

3.1.2. Finalidad de las mediciones

- Mediciones de rutina: los equipos deben ser medidos y revisados una vez por semana para monitorear el nivel de vibración global de los mismos.
- Mediciones para crear el historial: cada medición debe ser almacenada para obtener una base de datos que aumente todos los años. Esta base de datos servirá para crear la gráfica de tendencia y nos dará a conocer cuáles son las vibraciones en condiciones normales de cada equipo y cuándo se salen del parámetro.
- Mediciones antes y después de cada reparación: estas mediciones son de alta importancia debido a que las mediciones antes de una reparación nos indican el problema y nos preparan para que las reparaciones futuras sean más eficientes. Mientras que las mediciones después de la reparación indican si esta se realizó correctamente.
- Medición de envolvente de aceleración: se deben realizar mediciones antes y después del cambio de un rodamiento para conocer el tiempo de vida del rodamiento instalado y posteriormente compararlo con el tiempo de vida teórico. Asimismo, permitirá conocer si los métodos de instalación son los correctos.

3.1.3. Selección de los parámetros por medir

Existen tres parámetros para medir las vibraciones en un equipo, velocidad, aceleración y desplazamiento. El equipo analizador de vibraciones debe configurarse para trabajar con dimensionales en el sistema internacional de vibración en velocidad mm/s RMS, de envolvente de aceleración en g y temperatura en grados centígrados.

Figura 22. Unidades de medida para vibraciones

<i>Parámetros de medición</i>	<i>Unidades de medida</i>
Velocidad	$\frac{mm}{s}$ RMS
Envolvente de aceleración	<i>g</i>
Temperatura	°C

Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2019.

3.1.4. Posición y orientación de mediciones

Se debe empezar a medir por lo más cerca del motor y lo más cerca de los rodamientos, posteriormente se deben realizar primero las mediciones en orientación horizontal, luego vertical y por último las medidas axiales que sean posibles. Más adelante se explica más detalladamente cómo se deben tomar todas las mediciones para los equipos en estudio.

3.1.5. Selección del equipo por utilizar

El Taller del Ingenio Trinidad decide adquirir un equipo básico de medición de vibraciones, el SKF CMAS 100-SL, cuyas características cubren las necesidades que se tienen planificadas, además de tener un precio más accesible respecto de un equipo analizador de vibraciones de tipo analítico.

3.1.5.1. Características del equipo recomendado

Dentro de sus diferentes características se pueden mencionar:

- Facilidad y rapidez de configuración y uso; las mediciones se muestran en una pantalla luminosa y de fácil lectura.
- Diseño ligero, compacto y ergonómico que permite una mayor portabilidad. Posee alta durabilidad y cuenta con certificación IP 54 para uso en entornos industriales.
- La medición simultánea de velocidad, envolvente de aceleración y temperatura, ahorran tiempo.
- Eficiente, económico y ecológico, el analizador de la condición de la máquina SKF recargable puede funcionar 10 horas con una sola carga.
- Suficientemente flexible como para trabajar con acelerómetros estándares de corriente constante de 100 mV/g, puede utilizarse un sensor externo opcional para ubicaciones a las que resulte difícil acceder y para realizar mediciones más precisas y repetibles.

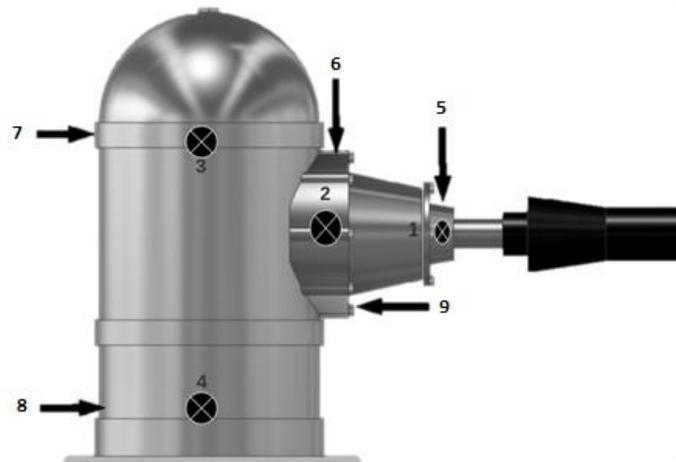
- Multilinguaje.

3.2. Toma de datos de vibraciones

Observando los puntos críticos de medición de la figura 21, se obtienen los 4 puntos donde se encuentran los rodamientos en el cabezal de riego, estos puntos serán divididos de tal forma que por cada uno se puedan extraer la mayor información posible. Se pueden medir únicamente en tres posiciones, horizontal, vertical y axial por cada punto.

Del cabezal de riego que se muestra en la figura 23, se pueden tomar nueve mediciones. Se establece que las mediciones deben realizarse empezando por los puntos más cercanos al elemento emisor de fuerza con orientación horizontal, luego con orientación vertical y, por último, los puntos con orientación axial, como se muestra a continuación:

Figura 23. Puntos de medición



Fuente: elaboración propia empleando AutoDesk Inventor Professional 2019.

Los puntos con orientación horizontal se tienen que ilustrar con un vector que entra, () y van enumerados del uno al cuatro. Posteriormente se miden los vectores con orientación vertical respecto a los rodamientos, y están enumerados del cinco al ocho.

Por último, la medición de orientación axial y es la que más dificultad presenta para la toma de datos en estos equipos, debido a la posición en la que se encuentran los rodamientos y al reducido espacio para realizar las mediciones. Por tal motivo, solo se puede tomar una medición axial y es la medición número nueve.

3.3. Formato de toma de datos

Para que el análisis de vibraciones sea lo más rápido y eficiente posible, es necesario crear un formato que facilite la toma de datos, este formato permitirá al técnico realizar las mediciones en el orden establecido y de una forma más ordenada.

3.3.1. Creación del formato para la toma de datos

El formato incluye un apartado para la identificación del equipo que se va a medir (Centro de Costo, C.C.), su localización y sus características técnicas, además, contiene un espacio para agregar la información del técnico que realizará la medición en el equipo.

El formato también incluye indicaciones de las revoluciones por minuto a las que debe estar trabajando el motor de combustión interna y su temperatura de funcionamiento, esto con la finalidad de que todas las mediciones sean lo más parecidas posibles.

Figura 24. Datos de identificación del equipo

Localización:		Técnico: _____ Fecha: _____ C.C.: _____
Potencia:		
No. de engranajes:	2	
Rodamientos:	4	
RPM:	1500	
Temp. Operación:	86 °C	
Unidades:	mm/s RMS	

Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2019.

El formato también incluye una ilustración de los puntos donde se debe colocar el analizador de vibraciones para la toma de datos (ver figura 23). Debajo de esta ilustración se encuentra las celdas y filas correspondientes a los datos que se deben extraer de las mediciones realizadas, como velocidad, temperatura y si se realiza un cambio de rodamiento, se agrega el envoltente de aceleración.

Figura 25. Formato para la toma de datos

Punto	Orientación	Velocidad	Temperatura	Envoltente
1	H			
2	H			
3	H			
4	H			
5	V			
6	V			
7	V			
8	V			
9	A			
10				

*Orientación: H = horizontal, V = vertical, A = axial

*Envoltente: gE

Fuente: elaboración propia empleando Excel 2019.

Por último, se agrega un espacio para que el técnico mencione alguna observación que el analizador deba conocer al momento de almacenar e interpretar los resultados.

Figura 26. **Observaciones del técnico**

Observaciones: _____

Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2019.

El formato completo se incluirá en el apartado de Apéndice.

3.3.2. **Formato para la interpretación de los resultados**

Una vez registrados los datos de las mediciones en el formato mencionado anteriormente, se procede a ingresarlos a un documento Excel en el cual se agregan las mediciones de vibración en los nueve puntos para su posterior análisis e interpretación, como se muestra a continuación.

Figura 27. **Ingreso de los datos a Excel**

CC	Fecha	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7	Punto 8	Punto 9	Max
29076	12/11/2019	38.3	21.1	4.1	9.8	10.7	4.1	10.8	18.4	8.1	38.3

Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2019.

Al ingresar todos los puntos, el programa tomará automáticamente el valor máximo de vibración, posteriormente se debe dar clic al botón Actualizar todo y luego clic al botón Gráfica, el cual redireccionará a la gráfica de tendencia.

Figura 28. **Botones de Excel**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2019.

Una vez actualizado los datos, la gráfica también se actualizará y mientras más datos sean ingresados mejor se podrá ver la tendencia de una máquina en específico. Cada línea que se ingrese es un punto en el plano de la gráfica. Estos puntos se unirán por medio de una línea que trazará la tendencia de comportamiento de la vibración global en un equipo.

Figura 29. **Gráfica de tendencia CC 29076**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2019.

La gráfica cuenta con un selector de cabezales de riego identificados por centro de costo, con el cual es posible seleccionar una máquina en específico y estudiarla. Es importante separar la información para conocer el comportamiento individual de cada máquina.

Figura 30. **Selector de centro de costo**

CC
29076
29078
29080
29085
29086
29087
29090
29077

Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2019.

En este apartado solo se encuentran los primeros ocho equipos con los que se hará el proyecto y a los que está enfocado, pero no se tienen restricciones para que se le agreguen más equipos si el personal de taller así lo requiere.

3.4. **Determinación del estado de la máquina**

Debido a que no se cuentan con datos históricos de vibraciones de los cabezales de riego cuando estaban nuevos o en perfecto estado, se ha decidido optar por utilizar la norma ISO 10816-3 y la norma ISO 10816-6, las cuales se mencionan en el inciso 1.10.1 y se muestra en las figuras 14 y 16,

respectivamente. La norma ISO 10816-3 permite comparar la vibración global con los datos obtenidos de las mediciones realizadas a los cabezales de riego, pero este cabezal también es afectado por la vibración del motor de combustión interna, por lo tanto, también se utilizó la norma ISO 10816-6, para establecer el valor de vibración que el motor ejerce sobre el cabezal.

En la figura 14 se puede llegar a la conclusión que los cabezales de riego se encuentran en el grupo 2 y 4, con base rígida, y que los motores de combustión interna utilizados se encuentran en la posición 3. Esto se puede resumir con la siguiente tabla.

Tabla XIV. **ISO 10816-3 Grupo 2 y 4**

NORMA ISO 10816-3			NORMA ISO 10816-6		
mm/s rms	Alerta	Significado	mm/s RMS	Alerta	Significado
...		Peligro	180		Peligro
13			112		
12			71		
11			45		
7.1			28		
4.5			18		
3.5		Alerta	11		Apenas aceptable
2.8		Alerta	7.1		
2.3		Apenas aceptable	4.5		
1.4		Apenas aceptable	2.8		Aceptable
0.71		Aceptable	1.8		
		Aceptable	1.1		

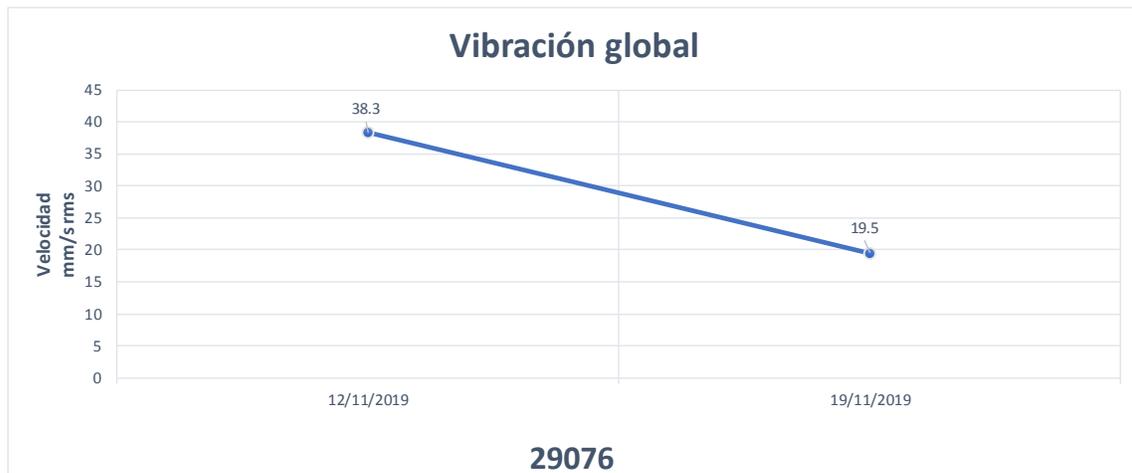
Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2019.

Estos datos serán nuestros primeros indicadores sobre el estado de las máquinas dependiendo el nivel de vibraciones global que presenten.

Luego de analizar los datos, se determinó que el punto más alto de vibración se encontraba cerca del acople que une el cabezal de riego con el eje de

transmisión. Por lo tanto, se tomó la decisión de volver a alinear dicho acople, y el nivel de vibración disminuyó considerablemente, como se muestra a continuación.

Figura 31. **Ajuste en la alineación del CC 29076**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2019.

3.4.1. Evaluación del estado de la máquina por medio de tendencias.

En la figura 31 se puede apreciar que el nivel de vibración global es demasiado alto y se sale de los parámetros que la norma ISO 10816-3 establece. Luego de un análisis se estableció que el nivel de vibración aumentaba debido a que el motor de combustión interna transmite vibraciones al cabezal de riego y estas tienen una media de 10 mm/s RMS.

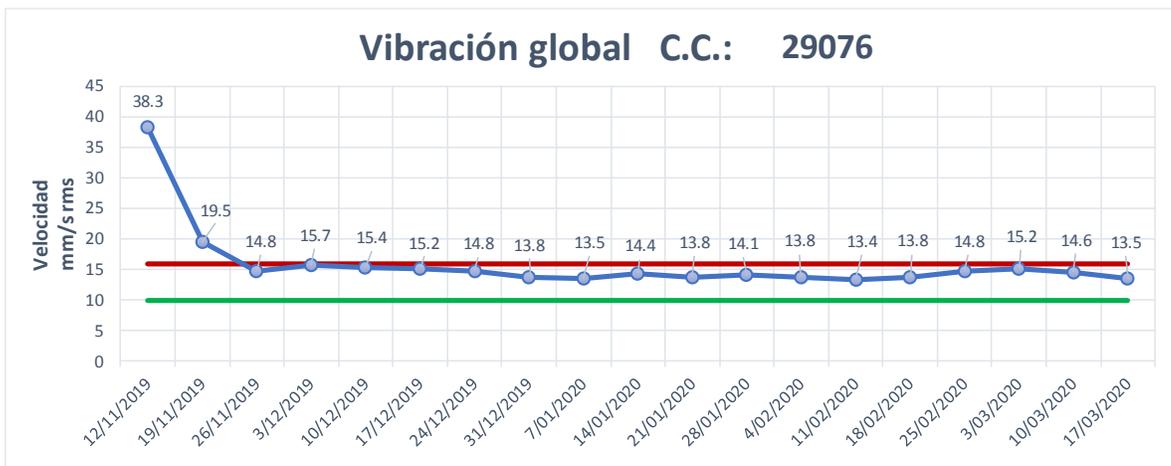
Este dato fue determinado haciendo trabajar al motor de combustión interna sin que la fuerza sea transmitida al cabezal de riego (*clutch* accionado), posteriormente se realizaron las mediciones nuevamente y se estableció un valor

mínimo de vibraciones. Este valor fue corroborado en la norma ISO 10816-6, resumida en la tabla XIV.

Por tal motivo, se decide crear un historial de vibración global para determinar una tendencia y con ello establecer un nivel máximo permisible de vibraciones en estos equipos, que debido al tiempo que llevan funcionando tienen un nivel de vibración global particular. Este nivel máximo fue determinado mediante la unión de las normas ISO 10816-6 y 10816-3, la primera para el valor mínimo de vibración y la segunda norma para determinar el valor máximo aceptable.

A continuación, se presenta la gráfica del cabezal de riego C.C. 29076 que tuvo problemas respecto del nivel de vibración global.

Figura 32. **Gráfica de tendencia C.C. 29076**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2019.

En figura 32, se muestra la gráfica de la tendencia para el centro de costo C.C. 29076, a este equipo solo se le realizaron dos ajustes menores. El primer ajuste fue realizado el 19 de noviembre de 2019, en el cual se realiza una

alineación en el eje cardán y el acople del cabezal de riego, este ajuste redujo el nivel de vibración global en casi un 50 % respecto de la medida anterior.

El siguiente ajuste, realizado el 26 de noviembre de 2019, fue el de reapretar los tornillos de sujeción de la base del cabezal de riego, cuya reducción de vibración fue de un 25 % con respecto a la medida anterior.

La gráfica de tendencia sirve únicamente para comprobar si el nivel de vibración global es aceptable o si requiere algún ajuste para que los valores de vibración se encuentren entre el rango establecido.

3.4.1.1. Interpretación de resultados

Interpretar los resultados para conocer qué acciones se deben tomar es muy importante para que el análisis de vibraciones sea un buen mantenimiento predictivo.

Esto se logra mediante el estudio y análisis de los nueve puntos de medición en el formato de Excel, se estudia cuáles son los puntos con mayor vibración y cuál es el valor mayor de vibración. En el C.C. 29076 sus puntos máximos de vibración fueron los más cercanos al eje cardán y motor, por lo tanto, se tomaron acciones preventivas para evitar las altas vibraciones.

Figura 33. **Puntos de vibración del C.C. 29076**

Fecha	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7	Punto 8	Punto 9
12/11/2019	38.3	21.1	4.1	9.8	10.7	4.1	10.8	12.4	8.1
19/11/2019	19.5	14.3	3.9	8.4	11.3	4.2	8.9	10.4	7.4
26/11/2019	14.4	13.8	4.1	14.8	11.9	4.9	10.8	14.5	8.1

Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2019.

Cada vez que se realiza un ajuste, se debe agregar un comentario a la celda en la cual se ve la mayor variación de vibración, esto con el fin de generar un historial de acciones tomadas que fueron efectivas o no para la disminución del nivel de vibraciones.

En este equipo, solo se necesitaron dos pequeños ajustes para controlar el nivel de vibración, pero en algunos casos no es tan simple, debido a que, a pesar de las acciones tomadas, el nivel de vibración no disminuye considerablemente y se aleja del rango establecido, como en el caso del C.C. 29077.

Figura 34. **Puntos de vibración C.C. 29077**

Fecha	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7	Punto 8	Punto 9
12/11/2019	20.5	15.3	5.4	12.1	8.4	6.3	8.9	12.8	5.4
19/11/2019	18.7	14.9	6.1	11.8	9.2	7.1	7.6	11.2	8.5
26/11/2019	22.4	15.3	5.4	12.1	8.4	6.3	8.9	12.8	5.4
3/12/2019	17.3	14.9	6.2	11.2	10.5	7.8	8.1	12.3	7.6
10/12/2019	17.1	14.2	7.2	10.4	10.1	8.2	7.7	10.2	8.5
17/12/2019	18.7	14.9	6.1	11.8	9.2	7.2	8.1	11.2	8.9
24/12/2019	21.3	15.2	6.3	12.4	14.9	7.5	8.2	11.3	8.1
31/12/2019	19.5	15.3	6.5	10.8	15.8	7.6	8.6	11.5	8.2
7/01/2020	18.7	15.9	6.2	10.9	11.8	7.9	8.9	11.5	8.2
14/01/2020	13.8	13.7	6.9	9.5	13.6	7.8	8.8	11.8	8.3

Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2019.

Para este caso, se trató de alinear el eje cardán en dos ocasiones, pero posteriormente se desajustaba, por lo tanto, se determinó que el eje estaba en

mal estado y las abolladuras que este tenía desbalanceaban al eje. El 14 de enero de 2020, se realizó el cambio del eje cardán y disminuyó el nivel de vibración. Esto evitó que los rodamientos sufrieran daños mayores y que los engranajes se desgastaran irregularmente.

Figura 35. **Gráfica de tendencia C.C. 29077**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2019.

También hay casos en los cuales, no se toma ninguna acción para disminuir el nivel de vibración, como el caso del C.C. 29085, cuya vibración estaba muy por encima del rango establecido. Al analizar los puntos, se determinó que podría estar dañado el rodamiento inferior, y el 13 de diciembre de 2019, se realizó el cambio. El rodamiento se encontraba en mal estado, pero el nivel de vibración no disminuyó. Por lo tanto, el 2 de enero de 2020, se envía un aviso de revisión de la turbina de succión de agua al departamento de Campo, pero ellos no tomaron ninguna acción y el equipo continuó trabajando.

El 23 de febrero de 2020, la turbina de succión de agua falló y el cabezal sufrió desgaste en uno de los engranajes. La turbina fue cambiada y se perdió

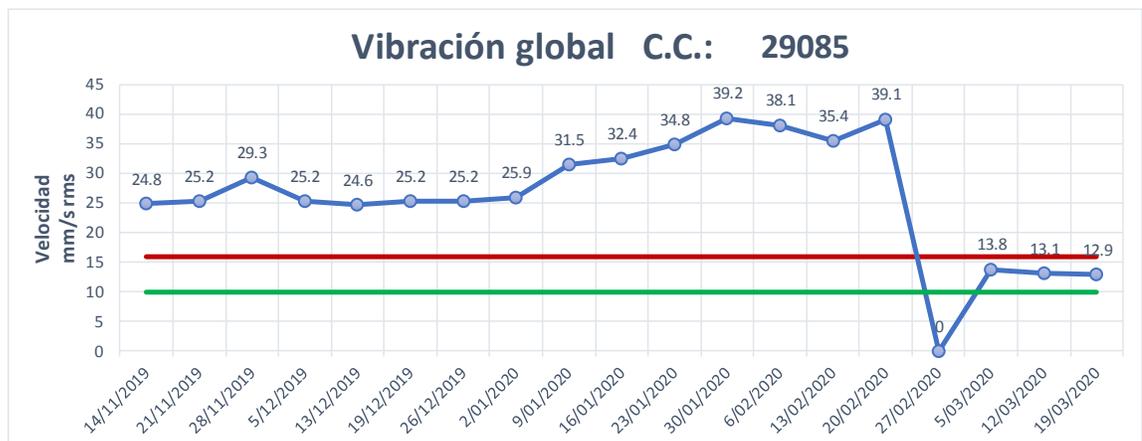
más de una semana de trabajo y un monto que sobre pasa los cien mil quetzales, que pudo evitarse si se hubiese atendido el aviso que Taller envió.

Figura 36. Puntos de vibración C.C. 29085

Fecha	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7	Punto 8	Punto 9
14/11/2019	10.1	8.3	14.9	23.2	10.5	9.2	14.2	24.8	4.7
21/11/2019	10.9	8.5	15.4	23.8	11.2	9.1	14.9	25.2	5.1
28/11/2019	11.5	8.3	13.8	23.2	10.5	9.2	14.2	29.3	4.7
5/12/2019	11.4	8.5	13.9	23.8	11.2	9.1	14.9	25.2	5.1
13/12/2019	9.2	8.7	14.2	24.6	11.4	8.9	13.8	23.1	7.2
19/12/2019	9.5	9.2	13.7	24.9	11.5	8.4	14.9	25.2	5.4
26/12/2019	9.8	9.6	14.9	24.8	12.4	8.7	15.4	25.2	5.8
2/01/2020	10.8	9.4	14.5	25.9	10.8	7.6	15.7	24.9	5.6
9/01/2020	10.2	8.1	15.9	31.5	10.4	7.9	15.4	24.3	5.5
16/01/2020	11.9	7.5	15.4	32.4	11.9	9.5	15.4	26.7	5.1
23/01/2020	11.2	9.5	16.6	26.4	9.5	7.8	12.9	34.8	5.3
30/01/2020	12.5	8.4	15.4	27.9	12.4	7.1	13.7	38.4	6.4
30/01/2020	11.4	7.6	14.8	39.2	9.6	8.6	15.7	28.9	4.8
6/02/2020	10.4	7.9	16.2	28.4	10.5	8.4	12.8	38.1	4.5
13/02/2020	10.6	8.1	14.7	35.4	12.3	9.7	14.2	29.4	6.5
20/02/2020	10.8	8.5	15.4	30.4	12.3	9.7	14.2	39.1	5.1
27/02/2020									
5/03/2020	11.8	9.1	12.4	12.1	12.4	7.7	13.8	13.2	5.9

Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2019.

Figura 37. Gráfica de tendencia C.C. 29085



Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2019.

Después del cambio de la turbina, la cual falló debido a que el pozo contenía demasiada tierra, el nivel de vibración global pudo ser controlado y mantenido en el rango establecido.

En el caso del C.C. 29078, el cual al inicio del análisis de vibraciones funcionaba dentro del rango establecido y posteriormente fue aumentando su vibración global hasta salirse de los parámetros. Analizando sus puntos de vibración, se tomaron medidas de alineación en dos ocasiones sin dar buenos resultados. Por lo tanto, se determinó que el problema se encontraba en el rodamiento de entrada, el cual ya había cumplido su vida útil. Al momento del cambio, el 8 de enero de 2020, el nivel de vibración se redujo considerablemente, como se puede ver en la figura 39.

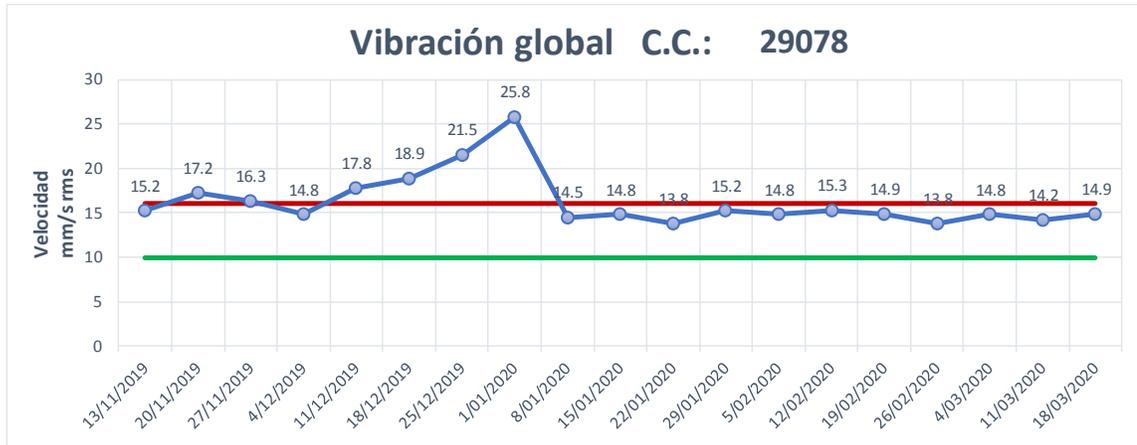
Figura 38. **Puntos de vibración C.C. 29078**

Fecha	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7	Punto 8	Punto 9
13/11/2019	14.4	15.2	4.5	9.2	11.3	5.2	11.7	12.3	9.1
20/11/2019	14.4	15.2	5.5	9.2	17.2	5.8	10.9	11.8	8.2
27/11/2019	14.4	16.3	4.5	9.2	11.3	5.2	11.7	12.3	9.1
4/12/2019	12.3	14.8	4.6	7.4	13.2	5.8	10.9	11.8	8.2
11/12/2019	14.4	15.2	5.6	9.2	17.8	5.7	11.2	12.3	8.6
18/12/2019	14.5	15.3	5.7	9.6	18.9	5.7	11.6	12.4	8.4
25/12/2019	14.2	15.5	5.4	9.5	21.5	5.6	11.6	11.8	8.3
1/01/2020	14.8	15.6	5.9	9.7	25.8	5.9	11.8	12.1	8.8
8/01/2020	13.2	13.2	5.5	9.1	14.5	5.8	10.2	12.8	8.9

Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2019.

En la gráfica de tendencia se puede apreciar de mejor forma su comportamiento.

Figura 39. Gráfica de tendencia C.C. 29078



Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2019.

Una vez realizado el cambio del rodamiento, el nivel de vibración global se mantuvo dentro del rango establecido.

Los rodamientos presentan un comportamiento que aumenta las vibraciones gradualmente cuando su vida útil está por terminar, y se puede apreciar en el caso del C.C. 29078 y en el siguiente caso del C.C. 29090, cuyo rodamiento intermedio empezaba a generar vibración al principio de las mediciones.

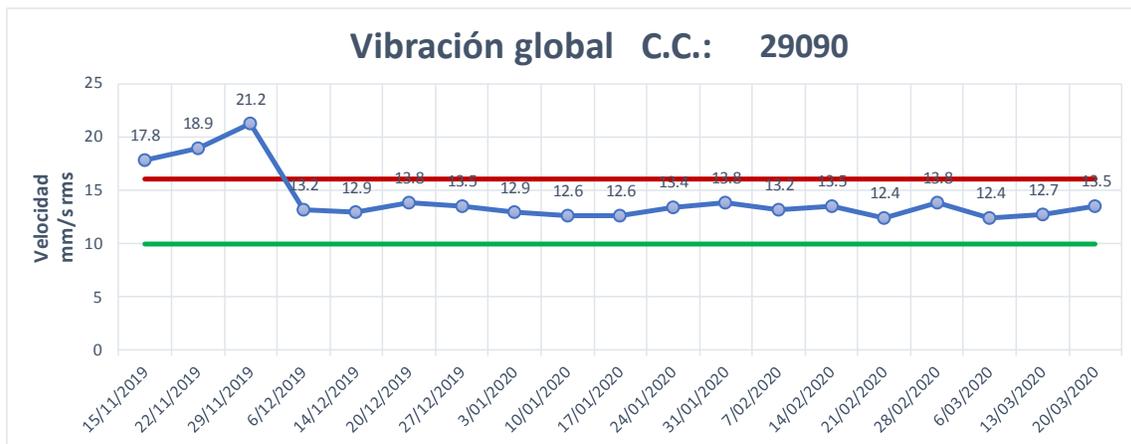
Figura 40. Puntos de vibración C.C. 29090

Fecha	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7	Punto 8	Punto 9
15/11/2019	13.7	15.8	8.9	11.3	14.5	17.5	9.4	7.1	17.8
22/11/2019	13.5	16.2	9.4	9.5	13.4	16.8	9.2	8.4	18.9
29/11/2019	13.7	16.8	9.5	9.8	15.4	20.8	8.4	9.4	21.2
6/12/2019	13.2	12.8	13.2	8.5	12.2	12.4	7.3	8.1	12.8
14/12/2019	12.9	12.5	12.4	9.7	11.8	12.2	7.6	7.5	12.4

Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2019.

Gracias al punto nueve, se pudo determinar que ese rodamiento era el que fallaba, ya que es el único rodamiento que posee los tres puntos posibles de medición. Luego del cambio las vibraciones se mantuvieron en el rango establecido como se muestra a continuación.

Figura 41. Gráfica de tendencia C.C. 29090



Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2019.

El realizar el análisis de vibraciones únicamente con el método de vibración global es más complicado que si se tuviera el analizador de espectros, pero debido a que los problemas suelen ser muy repetitivos. Este método puede mejorarse con el tiempo y proveer la suficiente información para detectar problemas más específicos y con mayor certeza.

Teniendo una base cimentada con un nivel de vibración máximo para revisar la tendencia de comportamiento de cada equipo, será más previsible el o los problemas que pueda presentar una máquina. Resumiendo, en cuanto a la interpretación de resultados, se puede concluir que las vibraciones altas en los primeros dos rodamientos de entrada pueden ser causados por el desbalance, desalineación o algún otro problema con el eje cardán. Las vibraciones altas en

los dos rodamientos posteriores o de salida, pueden ser generadas por algún desajuste de la turbina, el pozo en mal estado o deterioro de los componentes internos del cabezal de riego.

Una vez revisado que el o los problemas no pertenecen al departamento de taller, se procede a enviar un aviso al departamento de campo para que ellos revisen en qué estado está el pozo o en dónde están ubicados los tazones de la turbina, ya que estos pueden estar ubicados en un tubo de rejilla y no uno liso, lo cual provoca que se generen turbulencias y se llenen de grava los tazones e impulsores y pierda fuerza la turbina o que incluso quede defectuosa en su totalidad.

4. FASE DE DOCENCIA

En esta fase, se trata de demostrar la importancia del análisis de vibraciones como mantenimiento predictivo, además de proporcionar la información necesaria para realizar un correcto análisis de vibraciones.

Este apartado, está dirigido a los colaboradores del mantenimiento preventivo de los equipos de riego, quienes realizarán las revisiones y mantenimiento semanal a estos equipos.

4.1. Efectos del mantenimiento predictivo

Los efectos que el análisis de vibraciones como mantenimiento predictivo han generado son llevar un mejor control del estado de las máquinas, así como prepararse para alguna falla específica que requiera la obtención de algún repuesto o ajuste específico.

También permite al personal de mantenimiento conocer qué tan efectivas son sus reparaciones y cómo afecta un mal mantenimiento. Para llevar un mejor control del análisis de vibraciones, es recomendable que cada equipo sea medido por una persona en específico para obtener mediciones más precisas y repetibles.

La capacitación debe ir preparada, tanto para el analizador de vibraciones, como para el técnico que realizará las mediciones. Para ello fue diseñado un plan de capacitación, que comprende los temas necesarios para la medición de vibraciones.

4.2. Plan de capacitación

Para esta capacitación fue empleada una presentación con múltiples diapositivas que engloban todos los temas necesarios para la medición de vibraciones de una manera resumida y de fácil comprensión. A continuación, se presentan los temas que se trataron en la presentación.

4.2.1. Beneficios del análisis de vibraciones

- **Anticipación:** da tiempo al personal de mantenimiento para planificar las reparaciones necesarias y adquirir las piezas adecuadas.
- **Seguridad:** se puede retirar el equipo o pieza defectuosa antes que suceda alguna falla peligrosa.
- **Ingresos:** se incurre en menos fallas inesperadas graves, lo que evita interrupciones en los resultados finales.

4.2.2. Vibración global

- **¿Qué es?:** permite comparar por medio de normas el estado de vibración de un equipo en unidades de velocidad.
- **Severidad de vibración:** de todos los datos de medición de una máquina se toma únicamente el valor más alto obtenido y se compara con la norma que aplique para ese equipo.

- Analizador CMAS 100-SL: se cuenta con un equipo para realizar las diferentes mediciones de las vibraciones en los equipos. Este equipo puede medir la vibración en velocidad, envolvente de aceleración y temperatura.

4.2.3. Mediciones

- Motor: el motor o elemento emisor de fuerza es por donde se deben empezar a tomar las mediciones, y posteriormente ir acercándose al cabezal de riego o elemento receptor de fuerza.
- Orientación: se deben tomar primero las mediciones con orientación horizontal, luego las mediciones con orientación vertical y, por último, las axiales que permita la máquina. Se toma como ejemplo la figura 23.

4.2.4. Almacenamiento de datos

- Toma de datos: es la parte fundamental del análisis de vibraciones, ya que sin datos correctos no se pueden obtener resultados precisos. Para ello fue creado un formato que facilite la obtención de los datos.
- Excel: en este software se creó un formato para ingresar los datos de manera digital y llevar un mejor control y registro. De esta manera se puede observar la gráfica de tendencia por equipo.
- Análisis: por medio de la norma ISO 10816-3 utilizando el tipo de máquina 2 y 4 se puede verificar el estado de vibración global de una máquina. Aquí es donde se decide qué acciones tomar para reducir las vibraciones.

- Conclusión: debido a que no se puede dar un análisis específico con la vibración global, solo se sabrá si la máquina está funcionando con valores aceptables o fuera de rango, pero puede analizarse para encontrar un posible daño.

4.2.5. Costos

- Mano de obra: calculada en base a las horas de mantenimiento correctivo en los últimos tres periodos de zafra y en la mano de obra de un técnico promedio, dando el siguiente resultado.

Figura 42. **Mano de obra**

Período	Mano de obra	
16-17	Q	1 885,00
17-18	Q	1 007,50
18-19	Q	1 966,25
Total	Q	4 858,75

Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2019.

- Tiempo muerto: este dato también fue calculado utilizando las horas de mantenimiento correctivo en los últimos tres periodos de zafra y la tarifa para este grupo de máquinas.

Figura 43. **Tiempo muerto**

Período	Tiempo muerto	
16-17	Q	21 924,00
17-18	Q	11 718,00
18-19	Q	22 869,00
Total	Q	56 511,00

Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2019.

- Repuestos: por medio de consultas y revisión del historial de fallas, se logró estimar el costo total de los repuestos para los mismos tres periodos de zafra.

Figura 44. **Repuestos utilizados**

Período	Costo de repuestos	
16-17	Q	6 986,78
17-18	Q	10 109,78
18-19	Q	23 713,28
Total	Q	40 809,84

Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2019.

Son los gastos realizados debido a la falta de mantenimiento predictivo, el cual asciende a más de cien mil quetzales, mientras que la implementación del análisis de vibraciones tiene un costo no mayor de cuarenta y cinco mil quetzales.

- Cuidados del equipo analizador: el cuidado del equipo analizador de vibraciones es muy importante para que el sensor no se descalibre y pueda

extenderse su vida útil. Por tal motivo se presentan los siguientes aspectos para dicho cuidado:

- Transportar el equipo analizador en su respectivo estuche.
- No llevar el equipo analizador en la caja de herramientas.
- Después de utilizarlo, debe ser entregado al supervisor a cargo.
- Evitar mojar el equipo analizador.
- No torcer o doblar los cables de carga ni el del acelerómetro externo.
- No dejar cargando el equipo toda la noche para no afectar el rendimiento de la batería.

4.3. Presentación de capacitación

La capacitación fue presentada al gerente de taller, al jefe del mantenimiento preventivo, y al supervisor de equipos de riego, con la finalidad de que estén enterados de los procedimientos y cuidados que deben tomarse para este tipo de mantenimiento.

Para los técnicos fue proporcionado un instructivo y una charla informativa acerca de cómo se deben tomar las medidas y cómo se debe configurar el equipo analizador de vibraciones. Se les informó la importancia del correcto uso del equipo y de sus cuidados.

Figura 45. **Presentación de capacitación al gerente de taller**



Fuente: Oficina de Gerencia del Ingenio Trinidad.

CONCLUSIONES

1. Al comparar los gastos de reparación, mano de obra y paro de las bombas verticales tipo turbina con los gastos de inversión para obtener el equipo analizador básico de vibraciones, se puede concluir que el retorno de inversión del equipo es rápido y que es una inversión cuya relación costo/beneficio es alta debido a sus múltiples beneficios, entre ellos, el mejor control del estado actual de los equipos.
2. Se realizó un plan de acción con los pasos por seguir para realizar un correcto análisis de vibraciones para las bombas verticales tipo turbina mediante los cabezales de riego. Para lograrlo se emplearon normas y se crearon de gráficas de tendencia de comportamiento.
3. Se elaboró una presentación que contiene la información necesaria para dar a conocer los detalles del plan acción. Esta presentación contiene conceptos resumidos y de fácil comprensión para el análisis de vibraciones.
4. Se creó un formato físico para la toma de datos y un formato digital para su almacenamiento e interpretación. Estos formatos permiten que el análisis de vibraciones sea más rápido, certero y repetible.

RECOMENDACIONES

1. Verificar que el personal encargado del análisis de vibraciones siga el procedimiento establecido para la obtención de datos. De igual manera y de ser necesario, crear nuevos procedimientos específicos que sean fundamentados bajo normas de seguridad y de vibraciones.
2. Corroborar el estado del equipo analizador de vibraciones como, la batería, el cable de carga, cable del acelerómetro externo y consultar con el proveedor sobre la calibración del sensor de vibraciones.
3. Utilizar equipo de protección personal, para evitar accidentes que puedan resultar fatales en el campo.
4. Lograr que las condiciones de medición sean las mismas que ya se establecieron, como la temperatura del motor de combustión interna y sus RPM, para que la gráfica de tendencia sea confiable.
5. Colocar el sensor de vibraciones en los puntos señalados y en la posición correcta.
6. Es importante que cada máquina tenga asignado un mismo técnico que realice las mediciones.
7. Tomar acciones preventivas más específicas, como el uso de un equipo analizador de vibraciones de tipo analítico, con el cual se podrán medir vibraciones utilizando el analizador de espectros.

8. Leer el manual de usuario del equipo analizador de vibraciones y cargarlo únicamente 5 horas.
9. Realizar reuniones de retroalimentación con el personal encargado de llevar a cabo el análisis de vibraciones, con el fin de una mejora continua.
10. Lograr la tercerización de estos servicios y, de esta forma, llevar un mejor control del estado de los equipos estudiados.

BIBLIOGRAFÍA

1. DUMAS, Jackie; VIEYRA, Diego. *El mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones. Las nuevas tecnologías para el tratamiento de la señal*. Barcelona, España: TecniAcustica. 1993. 4 p.
2. GIRÓN CHEW, Ariel Waldemar, *Propuesta de procedimientos e instructivos para la estandarización en servicio de análisis de vibraciones*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2017. 94 p.
3. GOULDS PUMPS. *Bombas de turbina verticales*. Nueva York: B. VerticalSeries.es-LA.2018-05, 2018. 20 p.
4. GUEMISA. *Análisis de vibraciones e interpretación de datos*. [en línea]. <www.guemisa.com/articul/pdf/ibraciones.pdf>. [Consulta: 19 de agosto de 2019].
5. National Pump Company. *Instrucciones de instalación, operación y mantenimiento y lista de piezas para bombas verticales de turbina*. Arizona: 1969. 28 p.
6. Servicio Nacional de Adiestramiento en Trabajo Industrial. *Mantenimiento predictivo y TPM*. Lima: Mecánico de mantenimiento. 120 p.
7. VELÁSQUEZ AGUILAR, Luis Alberto. *Diagnóstico de problemas mediante análisis de vibraciones. Enfoque en bombas centrífugas*

del sistema de enfriamiento de motores de combustión interna de una planta de generación de energía eléctrica y ventiladores de tiros mecánicos de calderas acuatubulares en un ingenio. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica Industrial. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2004. 230 p.

8. WHITE, Glen. *Introducción al análisis de vibraciones.* E.E.U.U. 2010. 148 p.

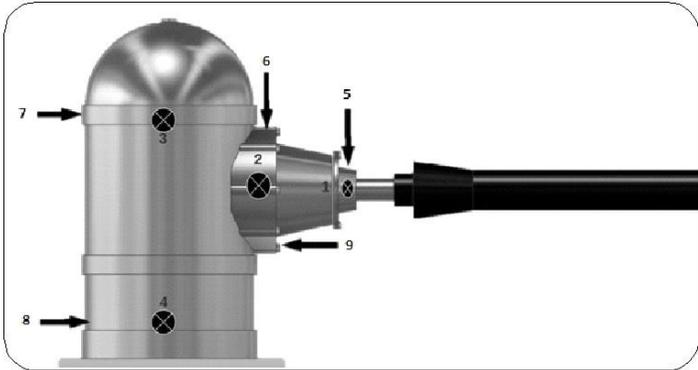
APÉNDICE

Apéndice 1. Formato de toma de datos



TOMA DE DATOS

Análisis de vibraciones



Localización:	
Potencia:	
No. de engranajes:	2
Rodamientos:	4
RPM:	1500
Temp. Operación:	86 °C
Unidades:	mm/s RMS

Técnico: _____

Fecha: _____

C.C.: _____

Punto	Orientación	Velocidad	Temperatura	Envolvente
1	H			
2	H			
3	H			
4	H			
5	V			
6	V			
7	V			
8	V			
9	A			
10				

*Orientación: H = horizontal, V = vertical, A = axial *Envolvente: gE

Observaciones: _____

Fuente: elaboración propia, empleando Excel 2019.

ANEXOS

Anexo 1. Propuesta Termogram



Termografía Infrarroja – Análisis por Vibraciones –
Alineación Láser – Análisis de Motores Eléctricos –
Ultrasonido - Endoscopia Industrial – Análisis de Aceites –
Sistemas de Vigilancia Térmicos y Visuales – Drones -
Cursos

Propuesta Comercial

No.	Código	Descripción	Cant.	Precio Unitario	IVA	Total
1	T2-9090-5061	NC - TRIO CA10 Package with Annual ExpertALERT Cloud Subscription TRIO Data Processor, DP-2 plus standard accessories • TRIO Controller, CA10 tablet plus standard accessories • TRIO Triaxial accelerometer and cable plus standard accessories • License of ViewALERT, embedded • Subscription to hosted ExpertALERT, annual renewal required • Unlimited user access to WATCHMAN Reliability Portal • Communication via Survey File Exchange include, Sybase Replication optional. • One year, annual-renewable warranty agreement (SSA) for TRIO Sensor and Data Processor • One year, non-renewable warranty agreement (SSA) for TRIO Controller • One year access to technical support plus access to Azima DLI Resource Center • ALERT software maintenance updates and feature upgrades included	1,00	\$17.840,90	\$0,00	\$17.840,91

Fuente: Termogram.

Anexo 2. Características SKF

Precisión, flexibilidad y confianza

Al ejecutar las mediciones, la señal de entrada del sensor de aceleración del Analizador de la condición de la máquina SKF se procesa para producir dos mediciones diferentes para cada PUNTO de la maquinaria: la velocidad general y la envolvente de aceleración. Al mismo tiempo, el sensor de infrarrojos sin contacto del Analizador de la condición de la máquina SKF mide la temperatura superficial en el punto de medición y muestra simultáneamente los tres valores de medición.

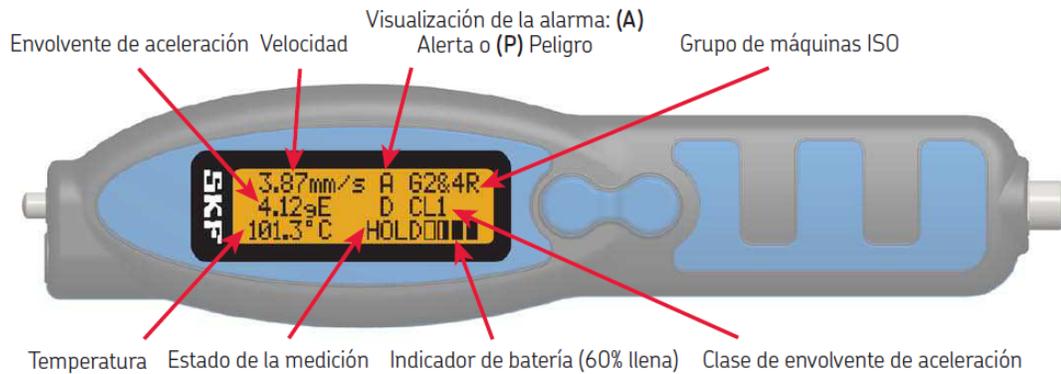
Dependiendo del ajuste del sistema del Analizador de la condición de la máquina SKF, el panel frontal de cristal líquido (LCD) muestra simultáneamente:

- Unidades en sistema métrico o inglés
- Velocidad en mm/s, RMS o ips pico
- Temperatura en grados Celsius o Fahrenheit
- Lecturas de envolvente de aceleración en gE

Rápido y fácil, la primera vez y todas las demás

1. Pulse los botones "Seleccionar" o "Buscar" para encender el Analizador de la condición de la máquina SKF
2. Presione la punta del sensor contra el punto en que desea efectuar la medición
3. Cuando se establezca la lectura, pulse el botón "Seleccionar" para retener la lectura
4. Lea y registre los valores de medición

Pantalla LCD en modo de medición



Fuente: SKF Reliability Systems.

Anexo 3. **Acelerómetro externo**

Ampliación de sus capacidades con los accesorios compatibles con el Analizador de la condición de la máquina SKF

Kit de sensor externo modelo CMAC 105

El kit de sensor externo CMAC 105 contiene un acelerómetro con un cable integral y todo lo necesario para tomar mediciones en puntos de difícil acceso.



Acelerómetro

- Sensibilidad 100 mV/g
- Caja pequeña, 1,27 cm x 2,67 cm
- Perfil pequeño, 1,27 cm
- Rango de frecuencias de 0,32 Hz a 10 kHz (± 3 dB)
- Impermeable

Cable integral (1,5 metros)

- Conector al Analizador de la condición de la máquina SKF CMAS 100-SL

Imán, modelo CMAC 106

- Fuerza de tracción, 10 lb, diámetro, 19,05 mm

Todos los acelerómetros están totalmente encerrados en una cápsula hermética de acero inoxidable.

Fuente: SKF Reliability Systems.

