



UNIVERSIDAD  
DE PIURA

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Integración de análisis vibracional avanzado y técnicas  
predictivas para el monitoreo de condición de equipos en  
la industria minera**

Tesis para optar el Título de  
Ingeniero Mecánico - Eléctrico

**Rony Edynson Guerrero Celi**

**Asesor:**  
**Mgtr. Ing. Jorge Javier Machacuay Arévalo**

**Piura, noviembre de 2024**



### Declaración Jurada de Originalidad del Trabajo Final

Yo, Rony Edynson Guerrero Celi, egresado del Programa Académico de Ingeniería Mecánico- Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura, identificado(a) con DNI: 47693459, declaro que:

Soy autor del trabajo final titulado:

**"Integración de análisis vibracional avanzado y técnicas predictivas para el monitoreo de condición de equipos en la industria minera"**

El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis para optar el Título profesional de Ingeniero Mecánico-Eléctrico.

Que el trabajo se realizó en coautoría con los siguientes alumnos de la Universidad de Piura.

- Haga clic o pulse aquí para escribir texto, **identificado con** Elija un elemento: Escribir número

El texto de mi trabajo final es original y no vulnera los derechos de terceros o, de ser el caso, derechos de los coautores, incluidos los derechos de propiedad intelectual, datos personales, entre otros. En tal sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para lo cual, he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas. Asimismo, el texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico; y que la investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.

En caso de detectarse el incumplimiento de lo declarado asumo frente a terceros, la Universidad de Piura y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

La asesoría del trabajo estuvo a cargo de los siguientes docentes de la Universidad de Piura:

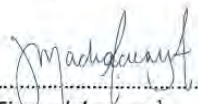
- Mgtr. Ing. Jorge Javier Machacuay Arévalo, identificado con DNI: 02794024

Declaro (declaramos) que:

Luego de haber empleado el software de coincidencia Turnitin, revisado las fuentes de información señaladas por el autor, y en razón de mi (nuestra) experiencia como investigador(es), declaro (declaramos) que las ideas expuestas en el trabajo final alcanzan las condiciones de calidad, integridad y originalidad acorde a los objetivos institucionales y estándares en materia de investigación. Finalmente, no asumo (asumimos) responsabilidad por la posible vulneración de derechos de autor en el trabajo final referido, pues tal responsabilidad es exclusiva del autor.

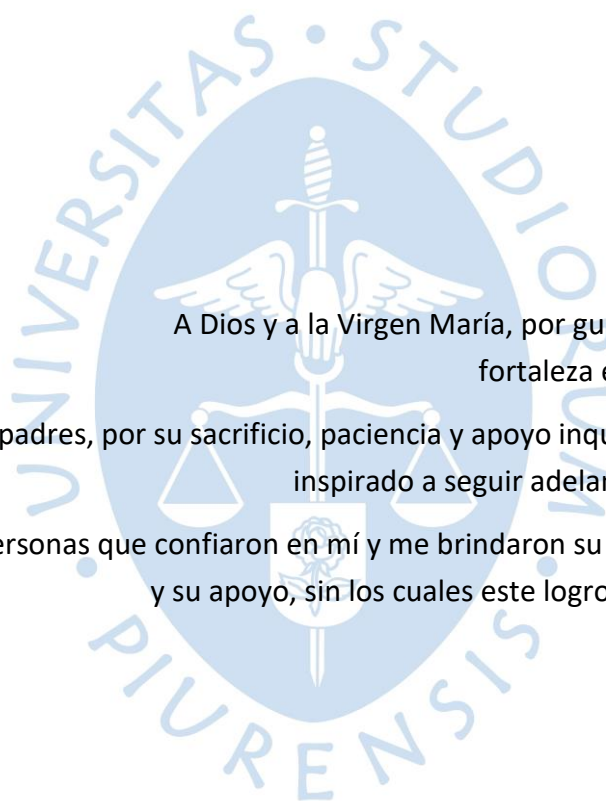
Fecha: 15/01/2025.

  
.....  
Firma del autor<sup>1</sup>

  
.....  
Firma del asesor<sup>1</sup>

.....  
Firma del co-asesor<sup>1</sup>

.....  
Firma del co-asesor<sup>1</sup>



### **Dedicatoria**

A Dios y a la Virgen María, por guiarme con su luz y darme  
fortaleza en cada paso del camino.

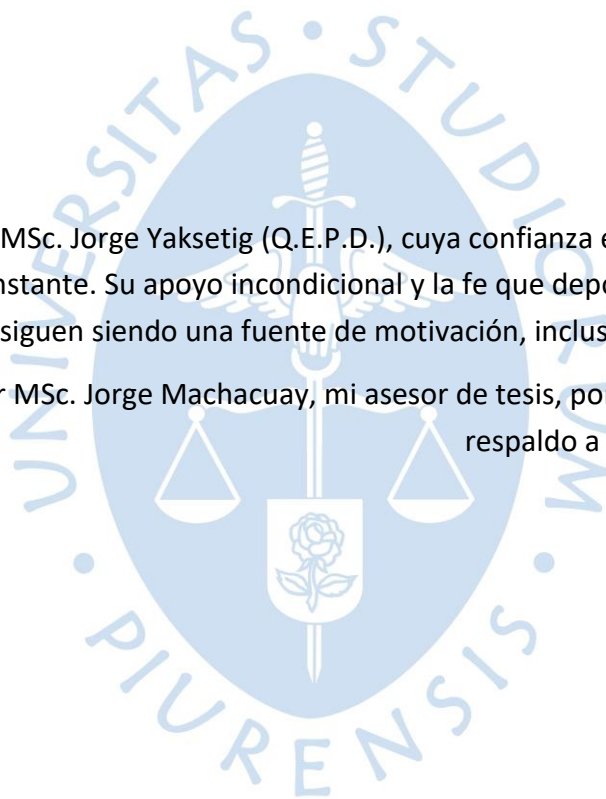
A mis padres, por su sacrificio, paciencia y apoyo inquebrantable, que me han  
inspirado a seguir adelante y alcanzar mis metas.

A todas las personas que confiaron en mí y me brindaron su confianza, por su aliento  
y su apoyo, sin los cuales este logro no hubiera sido posible.

### **Agradecimientos**

Al profesor MSc. Jorge Yaksetig (Q.E.P.D.), cuya confianza en mí durante mi carrera universitaria fue constante. Su apoyo incondicional y la fe que depositó en mis capacidades siguen siendo una fuente de motivación, incluso después de su partida.

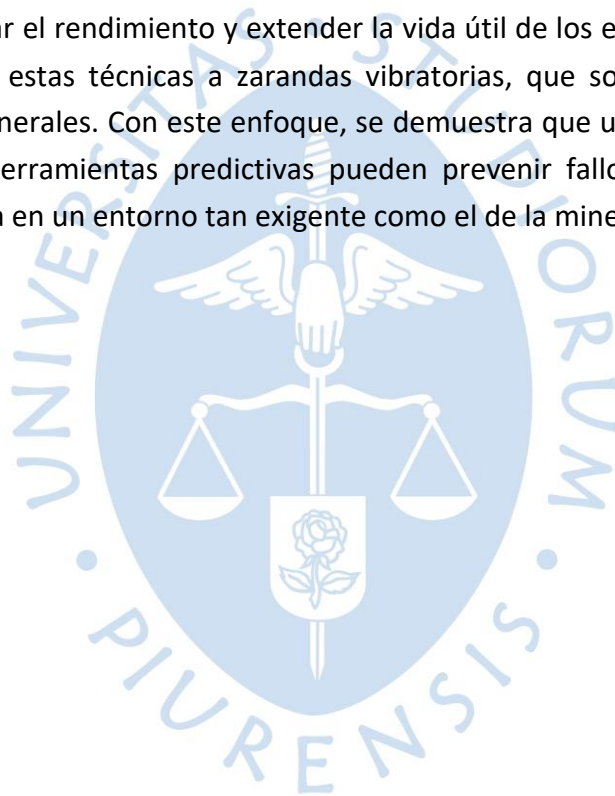
Al profesor MSc. Jorge Machacuay, mi asesor de tesis, por su valiosa orientación y respaldo a lo largo de este proceso.



## Resumen

Esta tesis se centra en cómo integrar el análisis vibracional avanzado con técnicas predictivas para monitorear el estado de los equipos en la industria minera. Dado que la fiabilidad y el rendimiento óptimo de los equipos son de gran importancia en este sector, evitar paradas inesperadas es fundamental para minimizar pérdidas económicas. Para ello, se utilizan herramientas como el análisis de deflexión operacional (ODS), la termografía infrarroja y el análisis dinámico de motores. Estas técnicas permiten detectar fallos potenciales antes de que ocurran daños significativos, lo que facilita la planificación del mantenimiento.

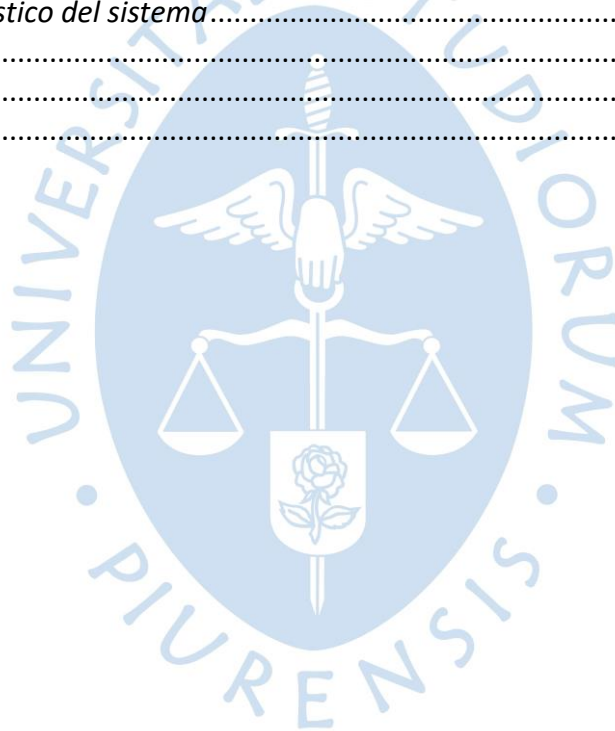
La combinación de análisis vibracional y otras técnicas predictivas brinda una comprensión más profunda del comportamiento de los equipos en condiciones reales de operación. Esto no solo ayuda a identificar problemas como resonancias o desbalances, sino que también contribuye a optimizar el rendimiento y extender la vida útil de los equipos. La investigación se enfoca en aplicar estas técnicas a zarandas vibratorias, que son fundamentales en el procesamiento de minerales. Con este enfoque, se demuestra que un monitoreo continuo y el uso de diversas herramientas predictivas pueden prevenir fallos graves y asegurar la continuidad operativa en un entorno tan exigente como el de la minería.



## Tabla de contenido

Introducción .....	11
Capítulo 1.....	12
Fundamentos teóricos .....	12
1.1 Introducción a las técnicas predictivas.....	12
1.2 Termografía infrarroja .....	12
1.2.1 <i>Introducción</i> .....	12
1.2.2 <i>Definición de transferencia de calor</i> .....	13
1.2.3 <i>Definición de radiación infrarroja</i> .....	14
1.2.4 <i>Equipos de termografía infrarroja</i> .....	14
1.2.5 <i>Parámetros de medición termográfica</i> .....	15
1.2.6 <i>Procedimientos operativos en el análisis termográfico</i> .....	16
1.2.7 <i>Modos de falla en termografía infrarroja</i> .....	17
1.3 Análisis dinámico de motores .....	18
1.3.1 <i>Introducción</i> .....	18
1.3.2 <i>Calidad en motores de inducción</i> .....	18
1.3.3 <i>Motor de inducción</i> .....	19
1.3.4 <i>Sistema eléctrico</i> .....	19
1.3.5 <i>Pruebas dinámicas</i> .....	20
1.3.6 <i>Principales fallas en motores eléctricos</i> .....	21
1.3.7 <i>Importancia de la velocidad</i> .....	21
1.3.8 <i>Áreas de medición</i> .....	22
1.4 Análisis Vibracional.....	24
1.4.1 <i>Introducción</i> .....	24
1.4.2 <i>Definición de vibración y utilidad para la industria</i> .....	24
1.4.3 <i>Movimiento armónico simple</i> .....	25
1.4.4 <i>Propiedades de vibración en componentes mecánicos</i> .....	25
1.4.5 <i>Medidas utilizadas en vibraciones mecánicas</i> .....	26
1.4.6 <i>Captura de información</i> .....	28
1.4.7 <i>Procesamiento de datos adquiridos</i> .....	29
1.4.8 <i>Identificación de fallas frecuentes</i> .....	31
1.4.9 <i>Norma en el análisis de vibraciones</i> .....	37
1.5 Análisis de las formas de deflexión en operación (ODS).....	38
1.5.1 <i>Introducción</i> .....	38
1.5.2 <i>Funciones avanzadas necesarias para realizar un (ODS)</i> .....	38
1.5.3 <i>Definición de operating deflection shape (ODS)</i> .....	41
1.5.4 <i>Tipos de análisis (ODS)</i> .....	41
1.5.5 <i>Instrumentos y software utilizados</i> .....	42
1.5.6 <i>Datos necesarios para ejecutar un (ODS)</i> .....	44
1.5.7 <i>Definición de análisis modal</i> .....	47
1.5.8 <i>Prueba de bump test</i> .....	47
1.5.9 <i>Ensayo de arranque y parada</i> .....	48
1.5.10 <i>Modos de fallo detectables con operating deflection shape (ODS)</i> .....	48
1.6 Zaranda vibratoria .....	51
1.6.1 <i>Introducción</i> .....	51
1.6.2 <i>Definición de zaranda y utilidad para la industria minera</i> .....	51
1.6.3 <i>Proceso de separación de minerales</i> .....	51

1.6.4 Clasificación de materiales .....	52
1.6.5 Tipos de zarandas .....	52
1.6.6 Clase de movimiento .....	54
Capítulo 2.....	55
Desarrollo del trabajo.....	55
2.1 Caso 1: Zaranda de mineral .....	55
2.1.1 Antecedentes del equipo .....	55
2.1.2 Análisis de criticidad del equipo .....	56
2.1.3 Inspección visual del equipo .....	59
2.1.4 Realización de técnicas predictivas .....	61
2.1.5 Técnica operating deflection shape (ODS) .....	68
2.1.6 Modelamiento 3D del sistema.....	69
2.1.7 Puntos de medición seleccionados .....	69
2.1.8 Análisis (ODS) mediante software MEscape .....	72
2.1.9 Simulación de frecuencias forzadas .....	75
2.1.10 Diagnóstico del sistema.....	81
Conclusiones.....	82
Recomendaciones .....	84
Referencias .....	85



## Lista de tablas

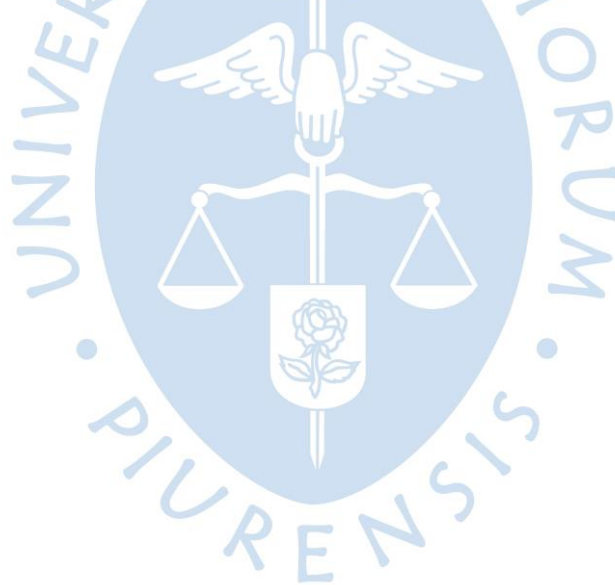
<b>Tabla 1</b>	Tabla de escala de ocurrencia .....	57
<b>Tabla 2</b>	Tabla de escala de severidad.....	57
<b>Tabla 3</b>	Tabla de escala de detección.....	58
<b>Tabla 4</b>	Tabla de clasificación del índice de prioridad de riesgo.....	58
<b>Tabla 5</b>	Matriz de criticidad FMEA para zaranda vibratoria.....	59
<b>Tabla 6</b>	Valores de vibración de placas laterales .....	66
<b>Tabla 7</b>	Tabla de niveles de vibración de placa laterales después del cambio de velocidad .	80



## Lista de figuras

<b>Figura 1</b>	Espectro de luz visible .....	14
<b>Figura 2</b>	Cámara termográfica.....	14
<b>Figura 3</b>	Punto altamente resistivo en seccionador tipo cut-out .....	17
<b>Figura 4</b>	Punto altamente resistivo en bornera de transformador eléctrico.....	17
<b>Figura 5</b>	Analizador dinámico Baker Explorer 4000 .....	18
<b>Figura 6</b>	Sistema eléctrico (red, motor y carga) .....	19
<b>Figura 7</b>	Conexión de forma directa (baja tensión) .....	20
<b>Figura 8</b>	Conexión en relé de protección (media tensión).....	20
<b>Figura 9</b>	Fallas más comunes en motores eléctricos.....	21
<b>Figura 10</b>	Determinación de velocidad del eje respecto al rotor.....	22
<b>Figura 11</b>	Secuencia de fases del motor eléctrico (voltaje y corriente).....	23
<b>Figura 12</b>	El rizado de torque supera las especificaciones del motor eléctrico.....	23
<b>Figura 13</b>	Espectro para análisis de barras de un motor eléctrico.....	24
<b>Figura 14</b>	Movimiento vibratorio vertical de la caja de rodamientos de una máquina .....	25
<b>Figura 15</b>	Relación entre los valores pico, pico a pico y RMS en una vibración sinusoidal ...	26
<b>Figura 16</b>	Relación de desfase entre desplazamiento, velocidad y aceleración.....	28
<b>Figura 17</b>	Ts= periodo de muestreo .....	30
<b>Figura 18</b>	a) Frecuencia de muestreo adecuada b) Frecuencia de muestreo inadecuada .	30
<b>Figura 19</b>	Desalineación paralela .....	33
<b>Figura 20</b>	Desalineación angular .....	33
<b>Figura 21</b>	Componentes de los rodamientos .....	34
<b>Figura 22</b>	Simulación (ODS) y mapa de calor de un sistema motor- reductor .....	38
<b>Figura 23</b>	Auto power spectrum y transmisibilidad .....	39
<b>Figura 24</b>	Modos de deflexión de un sistema (motor- reductor) .....	41
<b>Figura 25</b>	Sensores de vibraciones SKF .....	43
<b>Figura 26</b>	Analizador Microlog SKF.....	43
<b>Figura 27</b>	Analizador de vibraciones multicanal Emerson AMS 2600.....	44
<b>Figura 28</b>	Prueba de impacto. ....	48
<b>Figura 29</b>	Flexión de soporte de una zaranda .....	49
<b>Figura 30</b>	Movimiento torsional de la estructura .....	49
<b>Figura 31</b>	Zaranda horizontal Metso .....	53
<b>Figura 32</b>	Zaranda inclinada Metso .....	53
<b>Figura 33</b>	Estructura que soporta la zaranda de mineral.....	55
<b>Figura 34</b>	Grietas en las placas laterales de la primera zaranda LF3070D.....	56
<b>Figura 35</b>	Vista lateral de zaranda Sandvik SL 3072 .....	60
<b>Figura 36</b>	Vista de planta de zaranda Sandvik SL 3072 .....	60
<b>Figura 37</b>	Temperatura máxima 98.3 °C alojamientos lado libre .....	61
<b>Figura 38</b>	Temperatura mínima 92.4 °C alojamientos lado accionamiento .....	61
<b>Figura 39</b>	Rizado de torque del motor 1 .....	62
<b>Figura 40</b>	Rizado de torque del motor 2 .....	63
<b>Figura 41</b>	Desbalance de voltaje del motor 1 .....	63
<b>Figura 42</b>	Desbalance de voltaje del motor 2 .....	64
<b>Figura 43</b>	Desbalance de corriente del motor 1.....	65
<b>Figura 44</b>	Desbalance de corriente del motor 2.....	65
<b>Figura 45</b>	Prueba de impacto en placa lateral lado libre .....	66
<b>Figura 46</b>	Espectro de frecuencias naturales de la placa lateral lado libre.....	67

<b>Figura 47</b>	Prueba de impacto en placa lateral lado accionamiento.....	67
<b>Figura 48</b>	Espectro de frecuencias naturales de la placa lateral lado accionamiento .....	68
<b>Figura 49</b>	Modelado 3d renderizado - zaranda Sandvik SL 3072 .....	69
<b>Figura 50</b>	Toma de datos de vibraciones en distintos puntos .....	70
<b>Figura 51</b>	Puntos de medición lado accionamiento .....	71
<b>Figura 52</b>	Puntos de medición lado libre.....	71
<b>Figura 53</b>	Modelado 3D de zaranda en programa Sketchup .....	72
<b>Figura 54</b>	Importación de data de vibración y modelado 3D.....	73
<b>Figura 55</b>	Mapa de calor resalta la alta amplitud de vibración.....	74
<b>Figura 56</b>	Frecuencia predominante 15.5 Hz en el espectro de vibración .....	75
<b>Figura 57</b>	Vista de planta de la primera simulación (deflexión de placas laterales).....	75
<b>Figura 58</b>	Vista frontal de la primera simulación de la zaranda.....	76
<b>Figura 59</b>	Solución de problemas frecuentes, según manual Sandvik.....	77
<b>Figura 60</b>	Ventana de operación óptimo para evitar resonancias, norma VSMA 1998 .....	77
<b>Figura 61</b>	Frecuencia predominante 12.8 Hz en el espectro de vibración .....	78
<b>Figura 62</b>	Vista de planta de la segunda simulación de la zaranda.....	78
<b>Figura 63</b>	Vista frontal de la segunda simulación de la zaranda .....	79
<b>Figura 64</b>	Temperatura máxima 75.9 °C alojamientos lado accionamiento.....	79
<b>Figura 65</b>	Temperatura mínima 74.8 °C alojamientos lado libre .....	80

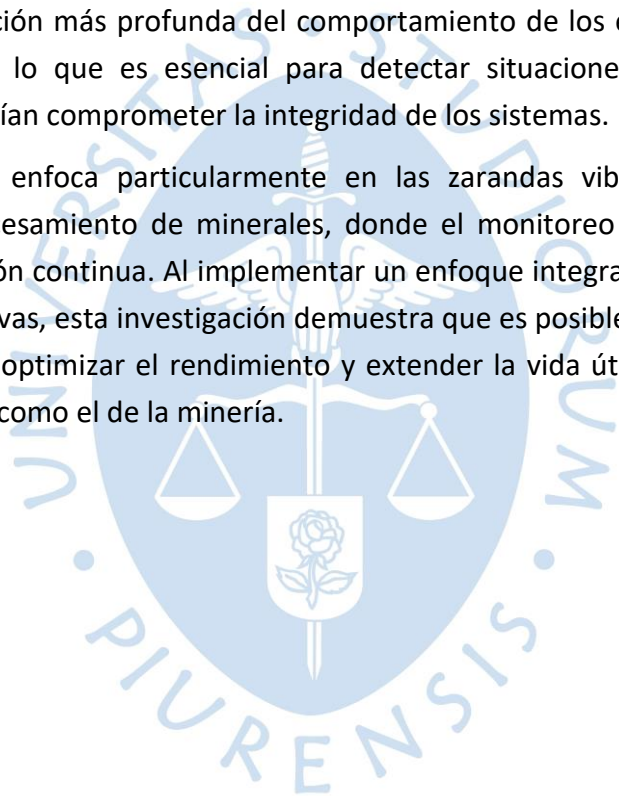


## Introducción

En la industria minera, la eficiencia y la fiabilidad de los equipos son factores fundamentales que impactan directamente en la productividad y rentabilidad de las operaciones. Las paradas inesperadas pueden ocasionar pérdidas económicas significativas, lo que resalta la necesidad de implementar estrategias de mantenimiento proactivas y efectivas. En este contexto, la integración de análisis vibracional avanzado y técnicas predictivas se presenta como una solución innovadora para el monitoreo de la condición de los equipos.

Esta tesis se centra en cómo combinar herramientas como el análisis de deflexión operacional (ODS), la termografía infrarroja y el análisis dinámico de motores para identificar fallos potenciales antes de que se conviertan en problemas importantes. Estas técnicas permiten una evaluación más profunda del comportamiento de los equipos en condiciones reales de operación, lo que es esencial para detectar situaciones como resonancias o desbalances que podrían comprometer la integridad de los sistemas.

El estudio se enfoca particularmente en las zarandas vibratorias, componentes esenciales en el procesamiento de minerales, donde el monitoreo continuo es vital para asegurar una operación continua. Al implementar un enfoque integral que combine diversas herramientas predictivas, esta investigación demuestra que es posible no solo prevenir fallos graves, sino también optimizar el rendimiento y extender la vida útil de los equipos en un entorno tan exigente como el de la minería.



## Capítulo 1

### Fundamentos teóricos

#### 1.1 Introducción a las técnicas predictivas

Las técnicas predictivas se han convertido en un elemento fundamental en la mejora del mantenimiento industrial y la gestión de activos. Estas técnicas son utilizadas para poder anticiparse a los fallos y deterioros antes de que sucedan, lo que posibilita una intervención anticipada del equipo, evitando costos debido a paradas no programadas.

A diferencia de los métodos tradicionales de mantenimiento correctivo y preventivo, las técnicas predictivas se basan en la recolección y análisis de datos en tiempo real para poder identificar indicios de fallas tempranas.

Estas técnicas utilizan una variedad de métodos y algoritmos avanzados para realizar un monitoreo de condición para así poder detectar alguna falla potencial en el equipo. Entre las técnicas predictivas más utilizadas se encuentran la termografía infrarroja, análisis vibracional, análisis dinámico de motores, ultrasonido acústico y el análisis de lubricantes. Cada una de estas técnicas ofrece una perspectiva única sobre el estado de los equipos y permite el diagnóstico de posibles fallos con mayor precisión.

Incorporar estas técnicas predictivas en un programa de mantenimiento no solo ayuda a disminuir el riesgo de fallos inesperados, sino que también ayuda a optimizar los recursos al permitir una planificación más eficiente de las actividades de mantenimiento. Este enfoque proactivo mejora la confiabilidad de los equipos, reduce los costos de operación y prolonga la vida útil de los activos.

En este capítulo se brindará una visión general de los principios y aplicaciones de las técnicas predictivas, resaltando su importancia en la industria y su aportación a la mejora continua de la gestión de activos.

#### 1.2 Termografía infrarroja

##### 1.2.1 Introducción

La termografía infrarroja es la técnica que se encarga de captar y analizar información térmica utilizando dispositivos de imágenes térmicas que pueden funcionar a distancia. La palabra termografía significa “escritura con color” y la palabra infrarrojo es lo que la caracteriza “sin contacto”.

La termografía infrarroja se utiliza para el monitoreo de procesos para poder optimizar el mantenimiento y así lograr una mayor fiabilidad, seguridad y reducción de costos.

Aplicaciones en el monitoreo de procesos:

- Electricidad, edificaciones.
- Hornos, calderas.
- Problemas de flujo en fluidos.
- Mecanismos, fricción.
- Tanques y depósitos.

### **1.2.2 Definición de transferencia de calor**

La transferencia de calor es el proceso por el cual se realiza un intercambio de energía en forma de calor entre diferentes cuerpos o en distintas partes de un cuerpo que se encuentran a diferentes temperaturas. La transferencia de calor siempre se produce de un cuerpo más caliente hacia uno más frío, en consecuencia, con la Segunda Ley de la Termodinámica. La transferencia de calor se lleva a cabo hasta que ambos cuerpos y el entorno logren alcanzar su equilibrio térmico. El calor se puede transferir de tres maneras:

**1.2.2.1 Por conducción:** La conducción es el proceso mediante el cual el calor se transfiere a través de un material sólido sin que haya un movimiento del propio material. Este fenómeno se produce cuando las partículas de un objeto se calientan y comienzan a vibrar, transmitiendo así su energía cinética a las partículas vecinas. La efectividad de la conducción depende de la conductividad térmica del material; por ejemplo, los metales son conocidos por su alta conductividad, lo que los convierte en excelentes conductores de calor, mientras que materiales como la madera o el plástico son considerados aislantes.

**1.2.2.2 La convección.** Se refiere a la transferencia de calor en fluidos, ya sean líquidos o gases. Este proceso ocurre cuando el fluido se calienta, se vuelve menos denso y asciende, permitiendo que el fluido más frío y denso ocupe su lugar. Este movimiento crea corrientes dentro del fluido, lo que resulta en una distribución más uniforme de la temperatura. La convección puede clasificarse en natural, impulsada por diferencias de temperatura, o forzada, donde se utiliza un ventilador o una bomba para acelerar el proceso.

**1.2.2.3 Por radiación.** La radiación es la transferencia de calor mediante ondas electromagnéticas, lo que significa que no requiere un medio material para propagarse. Todos los cuerpos emiten radiación térmica en función de su temperatura, y la cantidad de energía radiada se describe por la ley de Stefan-Boltzmann. Este tipo de transferencia es particularmente relevante en el contexto de la termografía, ya que las cámaras térmicas detectan la radiación infrarroja emitida por los objetos para medir su temperatura. A diferencia de la conducción y la convección, la radiación puede ocurrir incluso en el vacío, lo que la convierte en un mecanismo de transferencia de calor esencial en diversas aplicaciones.

### 1.2.3 Definición de radiación infrarroja

Las radiaciones infrarrojas se ubican entre las regiones visibles e invisibles del espectro electromagnético, siendo el calor o radiación térmica la fuente predominante de esta radiación. Un objeto frío es capaz de emitir radiación en el espectro infrarrojo, siempre y cuando tenga una temperatura mayor al cero absoluto ( $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$  o  $0\text{ K}$ ). El ser humano no es capaz de ver la radiación infrarroja, sin embargo, los nervios que se encuentran en la piel, pueden sentirla en forma de calor. A medida que el objeto se encuentre más caliente, producirá mayor cantidad de radiación infrarroja. En la figura 1 se observa el rango del espectro infrarrojo.

**Figura 1**  
*Espectro de luz visible*



*Nota.* Tomado de Espectro visible, por Wikipedia, (2024)

### 1.2.4 Equipos de termografía infrarroja

La termografía infrarroja ha experimentado con el tiempo un gran progreso en diversos campos y los grandes fabricantes han desarrollado múltiples dispositivos que se adaptan a los distintos requerimientos de cada uso específico. Entre los dispositivos más usados en la industria se destacan la cámara termográfica y el pirómetro. En la figura 2 se puede apreciar una cámara termográfica de última generación.

**Figura 2**  
*Cámara termográfica*



### **1.2.5 Parámetros de medición termográfica**

Una cámara termográfica permite medir y tomar imágenes de la emisión de radiación de un objeto. Dado que la radiación este vinculada a la temperatura del área del objeto, es posible que la cámara calcule y muestre esa temperatura en su pantalla.

No obstante, la radiación que es captada por la cámara infrarroja no depende únicamente de la temperatura del objeto, sino que también depende de su propia emisividad. Además, la radiación existente del ambiente que se refleja en el objeto influye en la medición. La radiación proveniente del mismo objeto y la radiación reflejada se ven afectadas por la absorción de la atmósfera. Para realizar una medida de temperatura con gran precisión, es necesario realizar una compensación a la cámara para reducir los efectos de otras fuentes de radiación cercanas. Esta compensación lo efectúa de manera automática la cámara, sin embargo, es necesario ingresar algunos parámetros del entorno y del objeto en la cámara.

**1.2.5.1 Emisividad.** Es una medida que indica cuán eficientemente un material emite radiación térmica en comparación con un cuerpo negro ideal. Varía entre 0 y 1; un valor de 1 significa que el objeto emite radiación de manera óptima, mientras que un valor de 0 indica que no emite ninguna radiación. Es importante conocer la emisividad del objeto que se está midiendo, ya que influye directamente en la precisión de las lecturas de temperatura.

**1.2.5.2 Temperatura aparente reflejada.** La temperatura aparente reflejada se refiere a la temperatura de la superficie del entorno que afecta las lecturas de la cámara termográfica. Esta temperatura puede influir en las mediciones, ya que los objetos pueden reflejar la radiación de su entorno. Por eso, es importante calibrar la cámara teniendo en cuenta esta temperatura para obtener mediciones precisas.

**1.2.5.3 Distancia al objeto.** La distancia al objeto es el espacio físico entre la cámara termográfica y el objetivo de la medición. Esta distancia es relevante porque puede afectar la resolución de la imagen térmica y la precisión de las mediciones. A medida que la distancia aumenta, la cantidad de radiación térmica que llega a la cámara puede disminuir, lo que puede llevar a errores en la interpretación de los datos.

**1.2.5.4 Temperatura atmosférica.** La temperatura atmosférica es la temperatura del aire en el entorno donde se realiza la medición. Esta variable puede influir en la propagación de la radiación térmica y, por lo tanto, en la precisión de las lecturas obtenidas. Es importante tener en cuenta la temperatura del aire, especialmente en condiciones extremas, para asegurar lecturas confiables.

**1.2.5.5 Humedad relativa.** La humedad relativa es la cantidad de vapor de agua presente en el aire en comparación con la cantidad máxima que podría contener a una temperatura determinada. La humedad puede afectar la transmisión de la radiación infrarroja y, por ende, las mediciones térmicas. Un ambiente con alta humedad puede dispersar la radiación, lo que podría llevar a lecturas inexactas.

### **1.2.6 Procedimiento operativos en el análisis termográfico**

En el análisis termográfico, existen dos formas de trabajo: la cualitativa, que se basa en comparaciones y la cuantitativa se enfoca en mediciones precisas.

**1.2.6.1 Cualitativo.** Este método se basa en el análisis de imágenes térmicas para identificar y localizar anomalías, así como para evaluarlas. Con este enfoque, podemos utilizar la imagen para detectar y valorar posibles problemas. Cada vez que realizamos un análisis termográfico, realizamos un análisis cualitativo.

La medición comparativa cualitativa implica comparar el patrón térmico de un motor con el de otro motor idéntico o similar que opere en las mismas condiciones, sin asignar valores de temperatura a los patrones. Esta técnica es rápida y sencilla de aplicar, ya que no requiere ajustes en la cámara termográfica para considerar las condiciones atmosféricas, ambientales o la emisividad de la superficie. Si bien este tipo de medición puede señalar una deficiencia, no indica la gravedad de la misma.

**1.2.6.2 Cuantitativo.** En este enfoque, la temperatura se utiliza como un criterio para evaluar la gravedad de un problema y establecer la prioridad de su reparación. Además, ofrece varios criterios para determinar la severidad de la situación.

Para este método, es necesario establecer un valor de temperatura que ayude a valorar la condición de un componente. Esto se logra comparando la temperatura del objeto en cuestión con la de equipos similares o con datos de referencia. Para superficies con alta emisividad, tanto la temperatura ( $T$ ) como la diferencia de temperatura ( $\Delta T$ ) suelen ser confiables. Por otro lado, los valores de  $T$  y  $\Delta T$  para superficies de baja emisividad pueden no ser tan precisos.

La termografía comparativa cuantitativa es un método eficaz para evaluar la condición de máquinas o componentes a través de temperaturas aproximadas. Sin embargo, medir con precisión la temperatura real de un componente usando la Termografía Infrarroja (TIR) en el campo puede resultar complicado, ya que hay que considerar varios parámetros que influyen en una medición precisa de la temperatura absoluta, como la emisividad, la reflectividad y la transmisividad.

### 1.2.7 Modos de falla en termografía infrarroja

La termografía infrarroja es una herramienta eficaz para detectar diferentes fallos en sistemas eléctricos y mecánicos. Un ejemplo común es el sobrecalentamiento en conexiones eléctricas, que puede originarse por conexiones flojas, cortocircuitos o sobrecargas, lo cual genera puntos calientes fácilmente identificables. En las figuras 3 y 4 se muestra dos tipos de fallas eléctricas muy comunes. En el caso de los rodamientos, un aumento de temperatura puede ser indicativo de desgaste o problemas de lubricación, mientras que, en motores eléctricos, un desbalance o desalineación suele reflejarse en variaciones térmicas anormales, lo que sugiere la necesidad de ajustes antes de que ocurran fallos importantes.

**Figura 3**

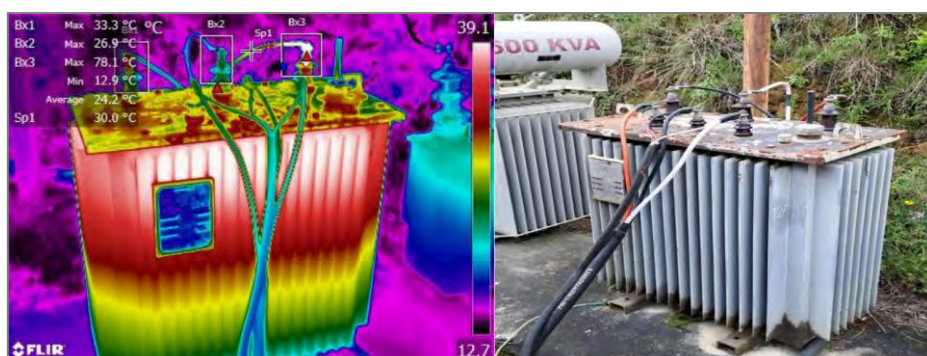
*Punto altamente resistivo en seccionador tipo cut-out*



Además, en tuberías y sistemas de vapor, la termografía permite identificar fugas o aislamiento térmico en mal estado, del mismo modo que en las conexiones mecánicas defectuosas, donde la fricción provoca un exceso de calor. En transformadores, la detección de puntos calientes en las bobinas o en las conexiones internas puede ser señal de problemas en el sistema de enfriamiento o en el estado del aceite dieléctrico. Ignorar estos problemas puede acelerar el deterioro del equipo, afectando su rendimiento y causando paradas imprevistas.

**Figura 4**

*Punto altamente resistivo en bornera de transformador eléctrico*



## 1.3 Análisis dinámico de motores

### 1.3.1 Introducción

Los analizadores dinámicos de motores han evolucionado significativamente desde su creación, convirtiéndose en herramientas importantes para el diagnóstico de motores eléctricos en operación. En sus primeras versiones, estos dispositivos ofrecían mediciones limitadas y solo permitían análisis estáticos. Sin embargo, con los avances tecnológicos, ahora permiten un monitoreo continuo y detallado en tiempo real. A través de la medición de parámetros críticos, como la calidad de la energía, el rendimiento de la máquina y las corrientes que fluyen por el sistema, se pueden identificar fallos eléctricos y mecánicos que antes eran difíciles de detectar, tales como desbalances de voltaje, distorsiones armónicas y defectos en el rotor. En la figura 5 se muestra el dispositivo *Baker Explorer 4000*, que integra estas capacidades avanzadas para ofrecer diagnósticos más precisos y fiables.

**Figura 5**

*Analizador dinámico Baker Explorer 4000*



### 1.3.2 Calidad en motores de inducción

La calidad en los motores de inducción es fundamental para garantizar su rendimiento y eficiencia durante su operación. Factores como la exactitud en el diseño, errores de fabricación y el mantenimiento influyen directamente en su confiabilidad. Las pruebas de calidad en los motores en fábrica, ayudan a la verificación de un correcto balanceo, alineación y la condición de sus rodamientos, entre otros.

El motor eléctrico debe operar de acuerdo a sus valores nominales de diseño, respetando las normativas aplicables e identificando sus límites operativos.

### 1.3.3 Motor de inducción

Un motor de inducción es un tipo de motor eléctrico que transforma la energía eléctrica en energía mecánica a través de inducción electromagnética. En este tipo de motor, el campo magnético necesario para inducir corriente en el rotor es producido por el estator, sin necesidad de conexiones eléctricas directas al rotor. La corriente en el rotor proviene del campo magnético giratorio generado por el estator. Los motores de inducción se clasifican principalmente en dos tipos: el motor jaula de ardilla y el motor de rotor bobinado. El motor jaula de ardilla, que es el más común, tiene un rotor con barras de metal conectadas en cortocircuito en ambos extremos. Por otro lado, el rotor bobinado tiene devanados en el rotor que están conectados a un circuito externo a través de anillos deslizantes.

### 1.3.4 Sistema eléctrico

El sistema eléctrico se define en tres áreas:

**1.3.4.1 La energía suministrada (calidad de energía).** Se refiere a la estabilidad y las características del suministro eléctrico, como el voltaje, el balance entre fases y la presencia de distorsiones armónicas. Mantener una buena calidad de energía es fundamental para el funcionamiento adecuado de los equipos conectados.

**1.3.4.2 El motor (performance):** Se refiere al rendimiento del motor, observando parámetros como la eficiencia y su capacidad para operar bajo diversas condiciones de carga. La evaluación del performance permite asegurar que el motor está trabajando de manera óptima y anticipar posibles problemas.

**1.3.4.3 La carga:** Representa el componente que el motor acciona y los cambios en la carga influyen directamente en el funcionamiento del motor y en la demanda de energía. Monitorear este aspecto es fundamental para prevenir sobrecargar y mantener la eficiencia del sistema en general. En la figura 6 se representará el diagrama de flujo de la carga de un motor eléctrico.

**Figura 6**

*Sistema eléctrico (red, motor y carga)*



*Nota.* Tomado de curso Análisis dinámico de motores nivel I, por Megger Instruments, (2022).

### 1.3.5 Pruebas dinámicas

Son pruebas eléctricas que se realizan mientras el motor está funcionando bajo condiciones normales de operación, que permite identificar problemas en las tres áreas del sistema, como en la alimentación del motor, en el mismo motor y en la carga cuando se encuentra conectado. Esta prueba permite conectarse de forma directa en baja tensión, mediante pinzas de voltaje y corriente en el Centro de Control de Motores (CCM) y obtener sus datos reales de operación, como se puede apreciar en la Figura 7.

**Figura 7**

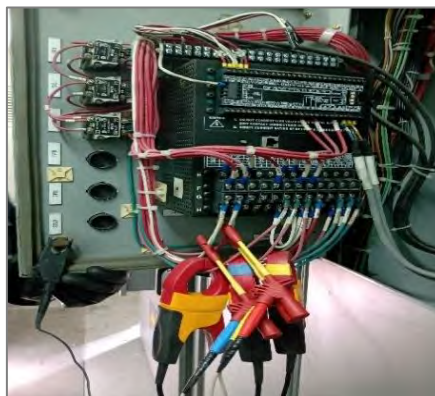
*Conexionado de forma directa  
(baja tensión)*



En el caso de motores de media tensión, la conexión se debe realizar en el relé de protección para garantizar la seguridad e integridad del personal encargado de la medición, tal como se observa en la figura 8.

**Figura 8**

*Conexionado en relé de protección  
(media tensión)*



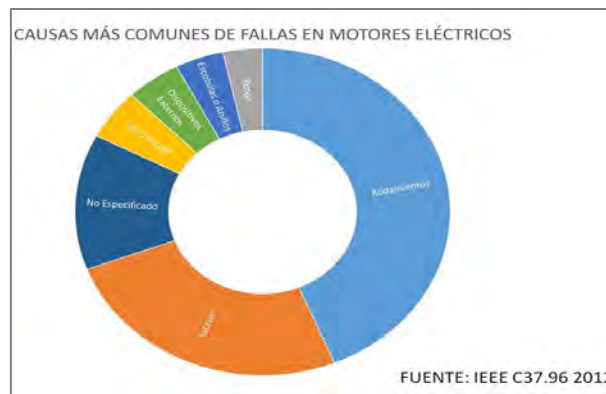
Adicionalmente, se necesita los datos nominales de placa como (potencia, velocidad, voltaje y corriente), para poder analizar el comportamiento del motor en tiempo real.

### 1.3.6 Principales fallas en motores eléctricos

Las fallas más comunes en motores eléctricos se relacionan con los rodamientos, tal como se indica en la figura 9. Estas suelen ser el resultado de desgaste y pueden causar vibraciones y ruidos anormales. Los fallos en el estator, como el aislamiento deteriorado o cortocircuitos, afectan el rendimiento eléctrico del motor. También son frecuentes los problemas en el rotor, como el desgaste o el desequilibrio, que impactan la operación y la eficiencia del motor. Otros problemas comunes incluyen desalineación o desgaste en los ejes y acoples, y fallas en las escobillas o anillos colectores, que pueden afectar la transferencia de corriente.

**Figura 9**

*Fallas más comunes en motores eléctricos*



*Nota.* Tomado de curso Análisis dinámico de motores nivel I, por Megger Instruments, (2022).

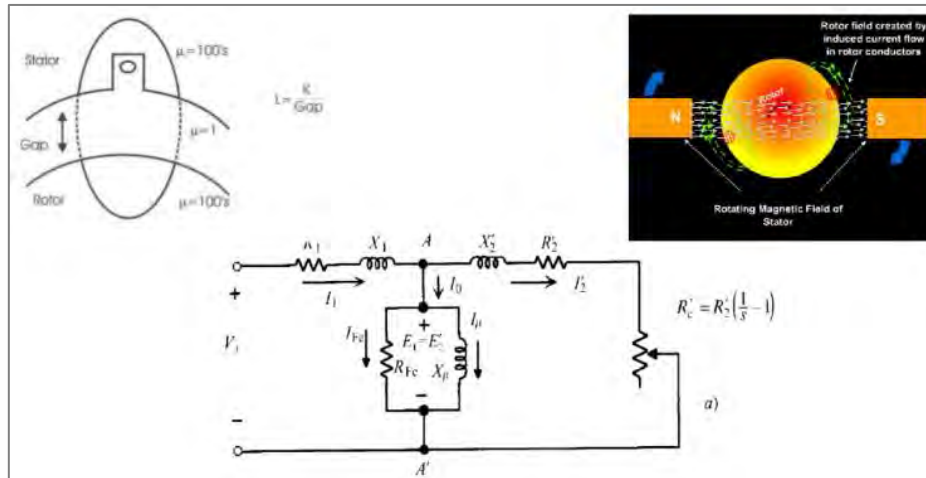
### 1.3.7 Importancia de la velocidad

La velocidad es crítica en el análisis de motores de inducción, debido a que varía con los cambios de carga. En estos motores, si la carga aumenta, la velocidad disminuye, y si la carga disminuye, la velocidad aumenta. Por lo tanto, una sola medición no puede ser precisa si la carga está cambiando en ese instante. Realizar una sola medición mientras la carga está fluctuando puede ser complicado, ya que es difícil saber si la variación de velocidad pueda deberse a un error de medición o a una variación real de la carga. Para tener una estimación más precisa de la velocidad, es importante hacer varias mediciones, preferiblemente al menos diez. Esto ayuda a identificar y a descartar las mediciones afectadas por cambios en la carga y conservar solo aquellas que proporcionan una estimación correcta de la velocidad del motor.

El algoritmo de rizado de torque calcula la velocidad asíncrona del eje con una precisión de menos del 1% de error, utilizando un modelo matemático del motor para evaluar el entrehierro existente entre el estator y el rotor (ver figura 10).

**Figura 10**

*Determinación de velocidad del eje respecto al rotor*



*Nota. Nota.* Tomado de curso Análisis dinámico de motores nivel I, por Megger Instruments, (2022).

La fuerza de entrada es aquella que altera el movimiento de un objeto a lo largo del tiempo. Una fuerza lineal sencilla puede empujar o tirar de una masa en reposo, modificando su velocidad y acelerándola con el tiempo. El torque, por su parte, es la fuerza que provoca que un objeto gire alrededor de un eje de rotación, siendo también conocida como "fuerza de torsión" o fuerza de rotación. Un ejemplo de torque es el eje de un motor eléctrico, donde la cantidad de torque que este motor puede generar determina su capacidad para realizar trabajo. El torque es un vector, lo que implica que actúa en una dirección específica, y se describe como una "fuerza de torsión" destinada a rotar un eje de transmisión.

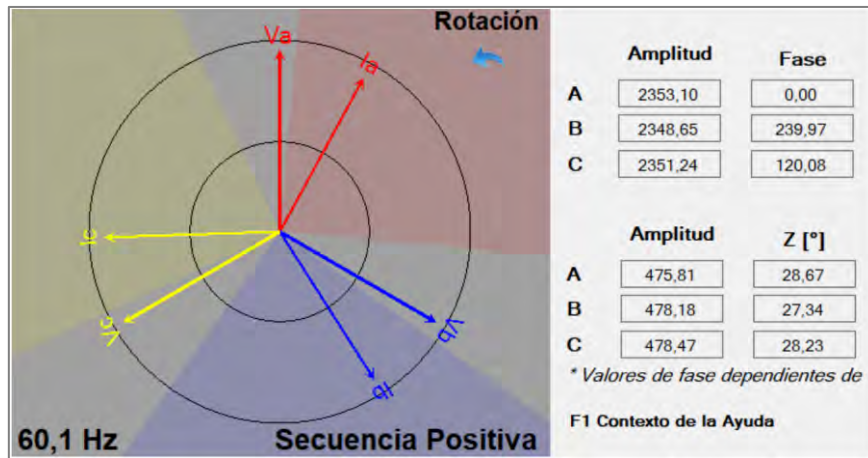
La medición del torque mecánico en ejes giratorios es crucial durante el diseño, la puesta en marcha y la resolución de problemas en diversas máquinas. Comprender el torque real de un eje o componente rotatorio es esencial para garantizar que cumple con sus especificaciones. En ciertas aplicaciones, es vital conocer el torque en todo momento para evitar un exceso que pueda resultar peligroso y provocar daños o fallos en el sistema. Las mediciones de torque son, por lo tanto, un aspecto fundamental del mantenimiento predictivo.

### 1.3.8 Áreas de medición

El *Baker Explorer 4000* es una herramienta muy útil para medir parámetros importantes, tanto de la calidad de la energía como del rendimiento de las máquinas eléctricas. Con respecto a la calidad de energía, puede medir los niveles de voltaje, desbalances de voltajes, distorsión armónica, distorsión total, potencias y fasores, dando una visión completa del estado del suministro eléctrico de la red (ver figura 11).

**Figura 11**

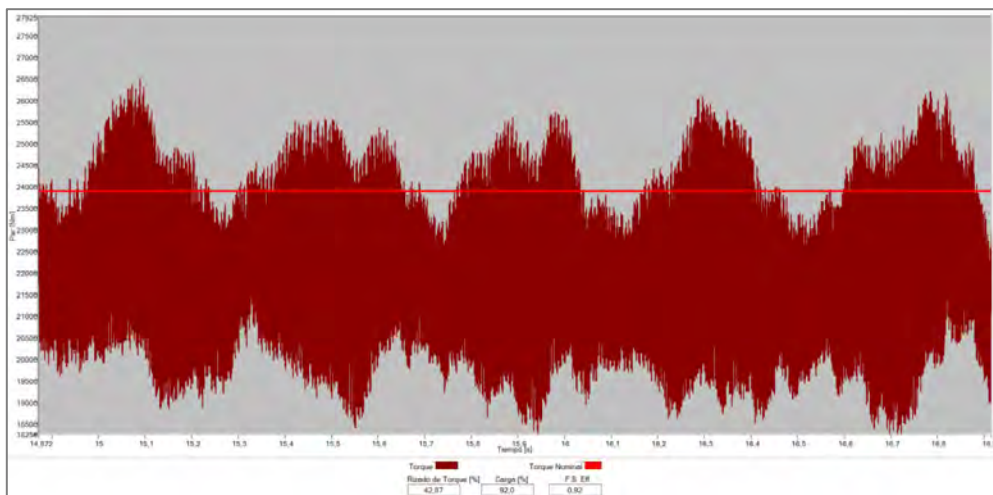
*Secuencia de fases del motor eléctrico (voltaje y corriente)*



Para conocer el rendimiento de la máquina, este equipo permite analizar parámetros como el factor de servicio efectivo, la carga y la eficiencia, lo que ayuda a entender cómo está funcionando el motor bajo sus condiciones reales de operación, según se observa en la figura 12. En lo que respecta a la corriente, mide tanto los niveles como los desbalances de corrientes, lo que es fundamental para detectar posibles problemas en el sistema eléctrico.

**Figura 12**

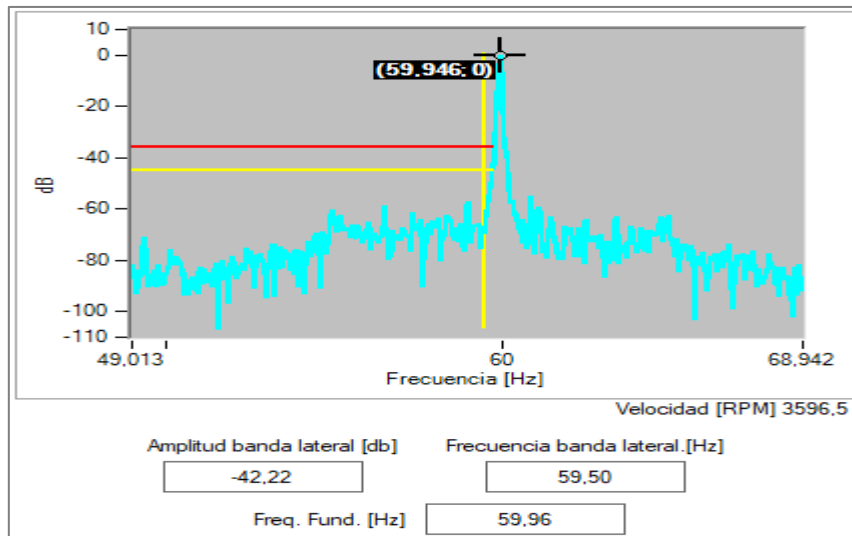
*El rizado de torque supera las especificaciones del motor eléctrico*



Finalmente, el *Baker Explorer 4000* realiza un análisis detallado de los espectros, como el análisis de barras rotas (ver figura 13) y también evalúa el espectro de voltaje y corriente, lo que permite detectar fallas específicas en el motor. Estos análisis son cruciales para entender el comportamiento del motor y mejorar su rendimiento.

**Figura 13**

*Espectro para análisis de barras de un motor eléctrico*



## 1.4 Análisis Vibracional

### 1.4.1 Introducción

Las máquinas y estructuras responden a una o más fuerzas excitadoras en forma de vibraciones. La magnitud de estas vibraciones no está determinada solo por la fuerza aplicada, sino que también depende de las características del sistema, como la masa, la rigidez y el amortiguamiento. Además, estas características varían en función de la velocidad a la que opere la máquina.

El análisis vibracional tiene un grado de complejidad debido a la necesidad de aplicar técnicas de descarte, ya que varios modos de fallo producen vibraciones con características muy similares, sin embargo, es una de las técnicas más efectivas en el campo del mantenimiento predictivo, permitiendo detectar posibles problemas en equipos rotativos y mecánicos.

En la actualidad el análisis vibracional ha logrado un ahorro significativo en la ejecución de programas de mantenimiento, paradas de planta, detección de problemas relacionados con el diseño, construcción, montaje y análisis causa raíz de fallas habituales.

### 1.4.2 Definición de vibración y utilidad para la industria.

La vibración es el movimiento que experimenta un cuerpo, ya sea mecánico o estructural, respecto a su posición de equilibrio, causado por fuerzas oscilantes que lo afectan.

El estudio de las vibraciones se remonta a tiempos antiguos, con Pitágoras como uno de los primeros en explorar este fenómeno, seguido por científicos como Aristóteles, Bernoulli, Newton, Galileo y Fourier. La contribución de Fourier, que permite descomponer

muchas funciones en series de senos y cosenos, es clave en el análisis de vibraciones, ya que los equipos actuales de medición se basan en esta técnica.

En el ámbito industrial, el objetivo es hacer que las máquinas sean lo más eficientes posible, mejorando la producción y la calidad de los productos. Las vibraciones son una forma de energía que se pierde, pero siempre estarán presentes debido al funcionamiento de los mecanismos y el desgaste natural de las piezas. Por ello, se busca minimizar las vibraciones en las máquinas para reducir al máximo estas pérdidas y mantener su rendimiento en óptimas condiciones.

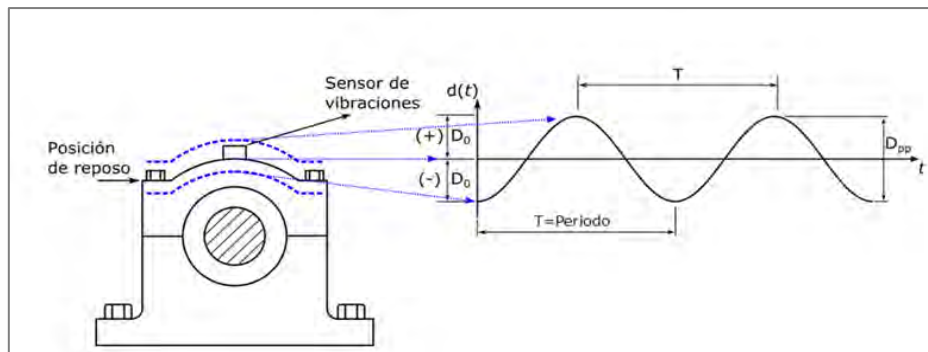
### 1.4.3 Movimiento armónico simple.

El movimiento armónico simple es un tipo de movimiento periódico que se describe con funciones seno o coseno a lo largo del tiempo. Este es el fundamento de las señales de vibración, ya que una onda compleja se puede representar como una combinación de varios movimientos armónicos simples.

La gráfica que resulta al representar los desplazamientos vibratorios en función del tiempo se denomina forma de onda del desplazamiento. La forma de onda más básica es la sinusoidal o de movimiento armónico simple, como se observa en la figura 14. Sin embargo, en los sistemas reales siempre hay algo de fricción, lo que hace que la amplitud de las vibraciones disminuya poco a poco, ya que parte de la energía se pierde en forma de calor.

**Figura 14**

*Movimiento vibratorio vertical de la caja de rodamientos de una máquina*



*Nota.* Tomado de Análisis de vibraciones de máquinas, (Capítulo 1, p. 1), por Universidad de Concepción, s.f.

### 1.4.4 Propiedades de vibración en componentes mecánicos

Las principales características de una vibración son la frecuencia, la amplitud y la fase.

**1.4.4.1 Frecuencia ( $f = 1/T$ ).** Se define como la cantidad de ciclos u oscilaciones que realiza un cuerpo en un segundo. Está vinculada al período de la vibración  $T$ , que se refiere al

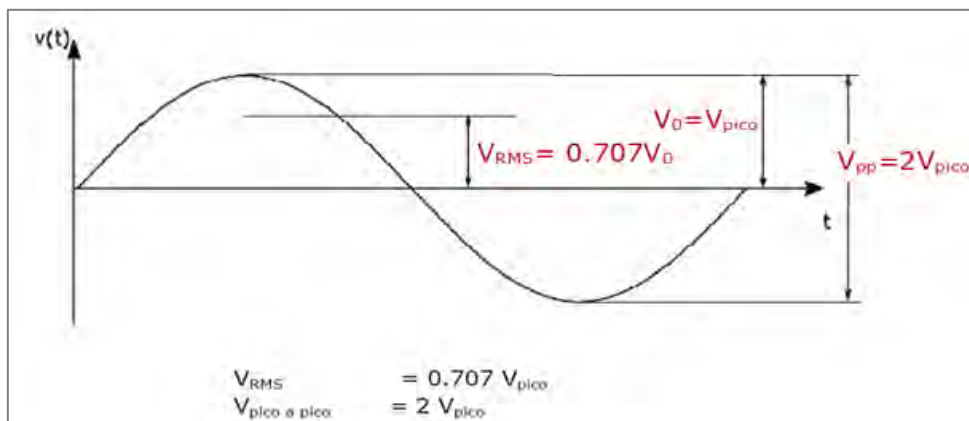
tiempo que tarda el cuerpo en completar una oscilación. Las unidades de medida son Hz (Hertz o ciclos por segundo) o cpm (ciclos por minuto).

**1.4.4.2 Amplitud (A).** Se refiere al desplazamiento máximo de la vibración y puede expresarse de diversas maneras, como:

- **Pico (p).** Representa la distancia máxima desde el punto de equilibrio.
- **Pico a pico (p-p).** Se refiere a la distancia entre una cresta negativa y una cresta positiva.
- **RMS (RMS).** Es la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de los valores de la onda, aplicable únicamente a una onda sinusoidal, y se calcula como ( $\text{RMS}=0.707p$ ) (ver figura 15).

**Figura 15**

*Relación entre los valores pico, pico a pico y RMS en una vibración sinusoidal*



*Nota.* Tomado de Análisis de vibraciones de máquinas (Capítulo 1, p. 8), por Universidad de Concepción, s.f.

**1.4.4.3 Angulo de fase de la vibración ( $\phi$ ).** Representa la posición angular de un objeto en un momento dado en relación con una referencia de la misma frecuencia (en grados).

#### **1.4.5 Medidas utilizadas en vibraciones mecánicas**

Las vibraciones pueden medirse utilizando tres unidades diferentes, las cuales están relacionadas (ver figura 16):

**1.4.5.1 El desplazamiento.** Se refiere a la distancia que un objeto recorre mientras está en movimiento. En general, es el valor más relevante cuando se trata de frecuencias bajas, es decir, aquellas por debajo de 600 ciclos por minuto (CPM). Este aspecto está relacionado con los esfuerzos de flexión y se mide comúnmente en mils pico a pico (donde 1 mil equivale a

0.001 pulgadas) o en micrones pico a pico ( $1 \mu$  equivale a 0.001 milímetros). Para describir el desplazamiento en un movimiento armónico simple, se utiliza la ecuación:

$$d(t) = D\sin(\omega t) \quad (1.1)$$

Dónde:  $d$  = desplazamiento instantáneo       $D$  = desplazamiento máximo o pico

$t$  = tiempo

$\omega$  = frecuencia

**1.4.5.2 La velocidad.** Es la tasa de cambio que indica cómo varía el desplazamiento de un objeto con el tiempo. Es especialmente relevante en el rango de frecuencias que va de 600 a 60,000 ciclos por minuto (CPM). Este aspecto está relacionado con el fenómeno de la fatiga y se mide en pulgadas por segundo o milímetros por segundo, utilizando tanto valores pico como RMS. La fórmula que se utiliza para calcular la velocidad en un movimiento armónico simple es:

$$v(t) = \frac{dd}{dt} = \omega D \cos(\omega t) \quad (1.2)$$

Dónde:  $v$  = velocidad instantánea

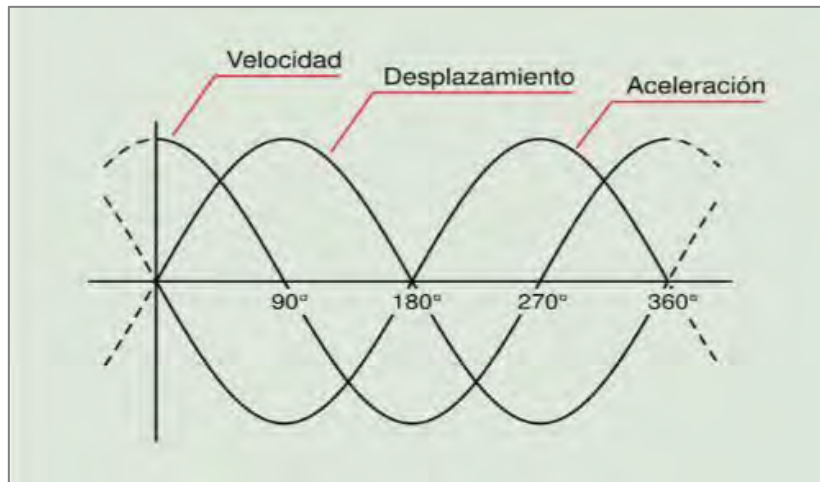
**1.1.1.1 La aceleración.** Se define como la variación de la velocidad de un objeto en función del tiempo. Este parámetro es muy importante en altas frecuencias, es decir, por encima de 60,000 ciclos por minuto (CPM). La aceleración está asociada a las fuerzas que actúan sobre los componentes de las máquinas y se mide en g's, metros por segundo al cuadrado ( $m/s^2$ ) o pulgadas por segundo al cuadrado ( $in/s^2$ ), tanto en términos pico como RMS, siendo 1g equivalente a  $386.1 in/s^2$ . La fórmula que describe la aceleración en un movimiento armónico simple es:

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2d}{dt^2} = -\omega^2 D \sin(\omega t) \quad (1.3)$$

Dónde:  $a$  = aceleración instantánea

**Figura 16**

*Relación de desfase entre desplazamiento, velocidad y aceleración*



*Nota.* Tomado de Estudio de las vibraciones, por Power-MI, s.f.

**1.4.6 Captura de información**

Los datos de vibración de una máquina se capturan a través de un transductor o sensor, el cual transforma la vibración mecánica en una señal eléctrica que es enviada a un medidor, osciloscopio o analizador. Esta señal eléctrica se mide en milivoltios (mV). Para calcular la amplitud, se divide la magnitud del voltaje por un factor de escala específico en mV por la unidad a convertir, el cual depende del tipo de transductor utilizado.

La calidad de la señal de vibración está influenciada por varios factores, como el tipo de máquina, el rango de trabajo del transductor, el método de instalación del mismo, la elección de los puntos de medición y las limitaciones de los equipos de medición empleados (transductores, colectores y analizadores).

Una correcta adquisición de datos es esencial para asegurar un monitoreo confiable, un diagnóstico de fallas efectivo, una evaluación precisa del equipo y pruebas de aceptación adecuadas. Antes de tomar los datos, es necesario realizar un análisis de costo-beneficio considerando el propósito de la medición (monitoreo, diagnóstico, evaluación de condición o pruebas de aceptación), así como el tiempo de adquisición y el tamaño de la muestra. Esto garantizará que los datos se visualicen correctamente en el equipo de recolección y que las vibraciones se analicen y evalúen de manera adecuada.

**1.4.6.1 Selección del tipo de medición.** La elección del tipo de medición depende de las frecuencias de vibración que se encuentran en la máquina, el tipo de análisis que se va a realizar y el tipo de información que se busca obtener. Existen tres formas principales de medir las vibraciones: desplazamiento, velocidad y aceleración.

- **El desplazamiento.** El desplazamiento absoluto se emplea para frecuencias de entre 0 y 600 CPM, y está relacionado con los esfuerzos que experimenta el sistema. Puede medirse utilizando un acelerómetro, siempre y cuando la señal se integre dos veces, o con un velocímetro si la señal se integra una sola vez.

Por otro lado, el desplazamiento relativo se utiliza para frecuencias entre 0 y 60,000 CPM, y se mide mediante un sensor sin contacto instalado en los alojamientos de los cojinetes. Este sensor evalúa el desplazamiento del rotor en relación con el movimiento de la carcasa.

- **La velocidad.** Se utiliza en el monitoreo de máquinas para frecuencias que van desde 600 hasta 60,000 CPM y está relacionada con la fatiga. Se puede medir de forma directa utilizando un sensor de velocidad o con un acelerómetro, siempre que la señal sea integrada.
- **La aceleración.** Es la medida más adecuada para frecuencias superiores a los 60,000 CPM, ya que está relacionada con la fuerza, y se mide directamente utilizando un acelerómetro.

#### **1.4.7 Procesamiento de datos adquiridos**

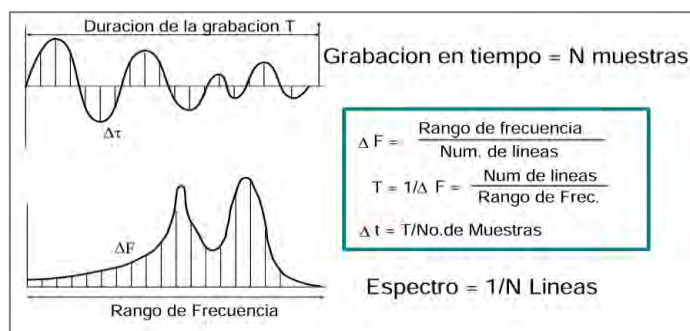
El procesamiento de datos es una de las etapas de mayor importancia dentro del análisis vibracional, ya que una incorrecta selección de parámetros de resolución podría llevar a la obtención de espectros poco confiables y, por lo tanto, a un análisis erróneo. Los transductores envían una señal analógica al colector de datos, la cual es digitalizada mediante un convertidor A/D. Una vez que la señal está en formato digital, se pueden aplicar una gran variedad de análisis y aplicaciones.

Los colectores de datos modernos son dispositivos computarizados que integran el algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para realizar análisis espectrales, así como para otras funciones como el monitoreo, análisis de formas de onda, análisis de órbitas, valores globales, envolventes, alineación y balanceo en sitio, entre otros.

Para asegurar un análisis preciso, es fundamental seleccionar un número adecuado de líneas de resolución, de modo que se eviten distorsiones en los datos durante el procesamiento. También es esencial elegir correctamente el tipo de ventana y el ancho de banda a analizar.

**1.4.7.1 La cantidad de muestras de datos.** La cantidad de muestras es clave para obtener mediciones precisas. Para evitar errores como las frecuencias fantasmas o aliasing, se necesita que el número de muestras sea 2.56 veces mayor que el número de líneas de resolución elegidas. En un análisis FFT, las resoluciones más utilizadas son 100, 200, 400, 800, 1600, 3200, 6400 y 12,800 líneas (ver figura 17). Cuantas más líneas se usen, mayor será la capacidad para distinguir entre frecuencias cercanas, aunque esto también implica un mayor tiempo de muestreo.

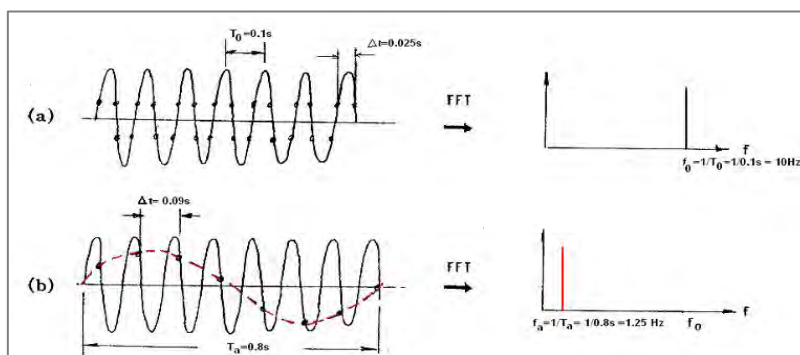
**Figura 17**  
*Ts= periodo de muestreo*



*Nota.* Tomado de Introducción al análisis de vibraciones (p. 67), por G. White, 2010.

**1.4.7.2 El aliasing.** Es un fenómeno que da lugar a la aparición de frecuencias incorrectas en el espectro, y sucede cuando la frecuencia de muestreo es inferior a las frecuencias que se encuentran en los datos. Para resolver este problema, se puede utilizar un filtro digital de paso bajo, el cual elimina las frecuencias demasiado altas que pueden provocar aliasing en los datos (ver figura 18).

**Figura 18**  
*a) Frecuencia de muestreo adecuada    b) Frecuencia de muestreo inadecuada*



*Nota.* Tomado de Análisis de vibraciones de máquinas (Capítulo 2, p. 4), por Universidad de Concepción, s.f.

**1.4.7.3 Ventanas.** Para entender el uso de ventanas en el análisis de señales, es importante conocer cómo opera el analizador FFT al procesar las muestras de la señal de entrada durante un periodo determinado. Este analizador almacena las muestras en un buffer, que es un espacio de almacenamiento temporal para datos digitales, antes de realizar el procesamiento.

El algoritmo FFT necesita que los datos comiencen y terminen en cero. Si la señal no cumple con esta condición, la forma de onda resultante estará truncada, lo que provoca una discontinuidad en la señal muestreada. Al intentar reconstruir la forma de onda, no se reflejarán fielmente los datos originales. Este tipo de truncamiento puede causar errores en el espectro conocidos como "fugas", donde la energía se dispersa hacia frecuencias más altas.

- **Rectangular o uniforme:** Esta ventana presenta una baja precisión en la medición de la amplitud de vibración (menos del 56.5%). Se emplea en la captura de datos cuando estos son controlados mediante un disparador, como un tacómetro, fotocélula o sensor magnético, y es especialmente útil en eventos transitorios, como las pruebas de impacto.
- **Flat top.** Esta ventana ofrece una excelente precisión en la amplitud (con un error menor al 0.5%), aunque tiene una baja resolución en frecuencia. Es ideal para el análisis de líneas espectrales discretas y la evaluación de la condición de los equipos.
- **Hanning.** Esta ventana se emplea en el monitoreo de vibraciones de máquinas, proporcionando una precisión aceptable en la amplitud (con un margen de error menor al 16%) y una buena resolución en la frecuencia.

#### **1.4.8 Identificación de fallas frecuentes**

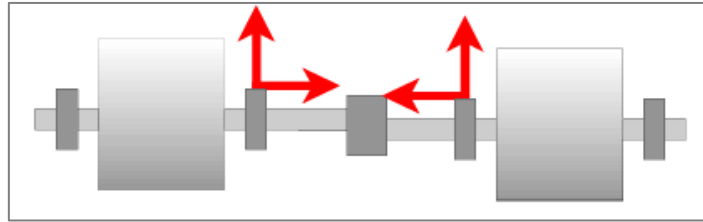
El diagnóstico de fallas se basa en la interpretación de los datos recopilados, utilizando varias técnicas como el análisis espectral, las formas de onda, las órbitas y las fases. La dificultad para diagnosticar se debe a que es complicado identificar la falla específica, ya que varios problemas pueden presentarse en una misma frecuencia. Por ejemplo, el desbalance, un eje combado o la excentricidad en los alojamientos, todos suelen manifestarse en la frecuencia 1X. Sin embargo, a través de una inspección detallada y el uso de otras herramientas, se puede determinar cuál es la falla real.

**1.4.8.1 Desbalance.** El desbalance de masas ocurre cuando el centro geométrico del rotor no coincide con su centro de masas, lo que provoca una fuerza centrífuga que varía su dirección a medida que el rotor gira. Esta falla se manifiesta una vez por cada revolución, es decir, a la frecuencia de rotación del rotor (1X), y produce una onda sinusoidal perfecta. A menudo, el desbalance se confunde con el desalineamiento, pero se diferencia porque el desbalance genera una fuerza rotativa en dirección radial, mientras que la fuerza del desalineamiento es direccional. Además, el desbalance de masas mantiene un ángulo de fase constante en relación con una referencia del eje. Existen dos tipos de desbalances:

- **Desbalance estático.** El desbalance estático ocurre comúnmente debido a un desgaste radial desigual en rotores donde la longitud es insignificante en comparación con su diámetro. El espectro muestra una vibración predominante a la frecuencia de rotación del rotor (1X).
- **Desbalance dinámico.** El desbalance dinámico se presenta en rotores de tamaño medio y largo, y es causado principalmente por desgastes simultáneos en las superficies radial y axial del rotor. El espectro muestra una vibración predominante a la frecuencia de rotación del rotor (1X).

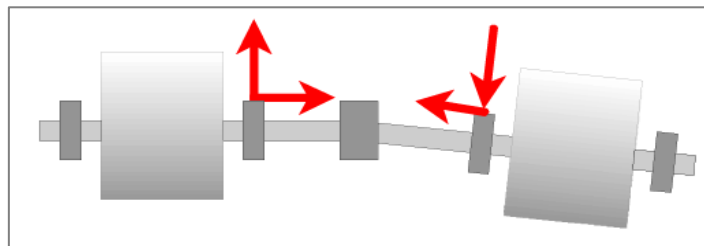
**1.4.8.2 Desalineamiento.** El desalineamiento ocurre cuando las líneas centrales de los ejes acoplados no están alineadas correctamente. Para evitarlo, los ejes de rotación de las máquinas deben estar colineales, aplicable tanto en configuraciones horizontales como verticales. El desalineamiento provoca diversas consecuencias, como la reducción de la vida útil de rodamientos, sellos, ejes y acoples; aumento de la temperatura en la carcasa; fugas de aceite, grasa u otros fluidos en los sellos; daños en cimentaciones y bases; aflojamiento de tornillos de fijación; deformación de carcasas; y un incremento en el consumo de energía eléctrica.

- **Desalineación paralela.** La desalineación paralela genera una fuerza de cizallamiento y un momento de flexión en los extremos acoplados de cada eje, provocando altos niveles de vibración en las frecuencias 2x y 1x. Estas vibraciones se presentan en direcciones radiales o tangenciales en los rodamientos a ambos lados del acoplamiento, y se encuentran en fase opuesta. En la mayoría de los casos, los componentes en 2x serán más altos que los de 1x. Los niveles axiales en 1x y 2x serán bajos únicamente en desalineación paralela, con una fase opuesta (ver figura 19).

**Figura 19***Desalineación paralela*

*Nota.* Tomado de Introducción al análisis de vibraciones (p. 109), por G. White, 2010.

- **Desalineación angular.** La desalineación angular genera un momento de flexión en cada eje, lo que da lugar a vibraciones intensas en 1x y algunas en 2x en la dirección axial en ambos rodamientos, que estarán en fase opuesta. También se observarán niveles relativamente altos de vibración en direcciones radiales y/o transversales en 1x y 2x, pero estas estarán en fase (ver figura 20).

**Figura 20***Desalineación angular*

*Nota.* Tomado de Introducción al análisis de vibraciones (p. 110), por G. White, 2010.

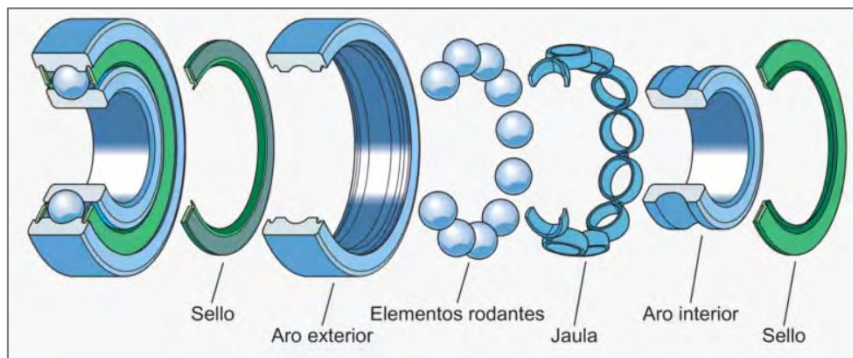
**1.4.8.3 Excentricidad.** La excentricidad se presenta cuando el centro de rotación no se alinea con el centro geométrico en una polea o engranaje. La vibración más intensa se manifiesta a la velocidad de operación (1X) del componente excéntrico, lo que puede ser confundido con el desbalance. Sin embargo, el pico más alto de vibración se observa en la dirección de la línea que conecta los centros de los dos rotores.

**1.4.8.4 Resonancia.** La resonancia es el estado en el que una máquina o estructura experimenta una coincidencia entre la frecuencia de una fuerza vibrante, como el desbalance de masa, y la frecuencia natural del sistema. El nivel de amplificación varía según la magnitud de la fuerza, la amortiguación y cuán cerca se encuentre la frecuencia que genera la excitación de la frecuencia natural.

**1.4.8.5 Fallas de rodamiento.** Las fallas en los rodamientos con elementos rodantes son entre las más comunes que se identifican y diagnostican mediante el análisis de vibraciones. Un rodamiento defectuoso generará un pico a una frecuencia que no es sincrónica, lo que implica que la componente no es un múltiplo exacto de 1x. Esto sucede porque, al pasar las bolas o rodillos sobre un defecto en las pistas o canastillas, se produce un pulso resultado de la combinación de las frecuencias del rodamiento (ver figura 21).

**Figura 21**

*Componentes de los rodamientos*



*Nota.* Tomado de Componentes y materiales en Principios de selección de rodamientos de rodillos, por SKF. (s.f.).

Los rodamientos producen frecuencias de fallas que son características de su geometría y velocidad de operación, las cuales pueden ser moduladas por las velocidades de rotación de las pistas.

- **BPFO.** Frecuencia de falla de la pista exterior (*ball pass frequency outer race*)

$$BPFI = \frac{n}{2} \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cos\theta\right) RPM \quad (1.4)$$

- **BPFI.** Frecuencia de falla de la pista interior (*ball pass frequency inner race*)

$$BPFO = \frac{n}{2} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos\theta\right) RPM \quad (1.5)$$

- **BSF.** Frecuencia de falla de la billa (*ball spin frequency*)

$$BFTF = \frac{P_d}{2B_d} \left[1 - \left(\frac{B_d}{P_d}\right)^2 (\cos\theta)^2\right] RPM \quad (1.6)$$

- **FTF.** Frecuencia de falla de la canastilla (*fundamental train frequency*)

$$FTF = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos\theta\right) RPM \quad (1.7)$$

Donde:

Bd = Diámetro de la bola

Pd = El módulo de rodamiento

n = número de elementos rodantes

$\theta$  = ángulo de contacto

Las frecuencias naturales de los componentes de los rodamientos instalados suelen estar en un rango de aproximadamente 500 a 2000 Hz. Cada componente vibrará a su frecuencia natural específica cuando se le aplique un impacto.

**1.4.8.6 Fallas electromagnéticas.** Las máquinas eléctricas enfrentan problemas similares a los de otras máquinas rotativas, como desbalance, desalineamiento, resonancia y fallos en los rodamientos. Sin embargo, presentan además fallos relacionados con el campo magnético generado por el rotor y el estator. Estas fallas suelen darse en equipos que transforman energía eléctrica en mecánica o viceversa. Generalmente, estas máquinas cuentan con un rotor y un estator devanado. Al suministrarse una corriente eléctrica, se genera un campo magnético rotatorio en el entrehierro. El principio de operación es que el campo magnético del estator, al girar, pasa por las barras del rotor (en corto circuito con los anillos de los extremos), induciendo corrientes en dichas barras, las cuales son proporcionales a la velocidad del campo magnético que las corta. A su vez, la corriente inducida crea su propio campo magnético que interactúa con el del estator, generando una fuerza en las barras del rotor.

- **Excentricidad del estator.** Cuando el rotor está correctamente centrado magnéticamente en el estator, se generan dos fuerzas de atracción ( $F = KI^2/G^2$ , donde K es una constante, I representa la corriente del estator y G es el espacio o entrehierro) que son iguales y opuestas, cancelándose mutuamente. Sin embargo, si hay excentricidad, estas fuerzas no serán iguales, lo que dará lugar a una fuerza resultante que provocará vibraciones.

Por lo tanto, en cada vuelta del campo magnético se generan dos fuerzas y debido a que el campo magnético gira a 3600 CPM (donde la velocidad síncrona NS es igual a la frecuencia de línea FL), aparecerán problemas de excentricidad cuando las vibraciones ocurren a una frecuencia de 2FL (7200 CPM). Estas vibraciones a 2FL no suelen estar acompañadas de bandas laterales a múltiplos de la frecuencia de paso de polos (Fp), ya que se originan en el estator y no dependen de las RPM del rotor ni de la frecuencia de deslizamiento.

- **Excentricidad del rotor** Cuando el centro geométrico de un rotor no coincide con su centro de giro, este actúa como una leva, provocando entrehierros

desiguales entre el rotor y el estator. La mayor fuerza de atracción magnética se presenta en el punto donde el entrehierro es más estrecho. Esta excentricidad genera vibraciones a la frecuencia de  $2FL$ , y dado que el entrehierro más reducido gira a la  $1X$ , dependiendo de la velocidad sincrónica  $N_s$ , en el espectro de frecuencias la vibración en  $2FL$  suele estar acompañada por bandas laterales en múltiplos de la frecuencia de paso de polos  $F_p$  (número de polos  $\times$  deslizamiento)

- **Barras rotas del rotor.** Las barras de rotor que están rotas o fisuradas no conducen corriente, lo que provoca un desbalance en el campo electromagnético y un incremento en la corriente del rotor para compensar dicho desbalance. Este aumento en la corriente genera un calentamiento y expansión de las barras en comparación con el rotor; debido a las variaciones en la resistencia eléctrica de las barras individuales, el calentamiento y la expansión no serán uniformes.

Los síntomas de las barras rotas son parecidos a los de la excentricidad del rotor, ya que ambas generan bandas laterales a la frecuencia de paso de polos ( $FP = \text{número de polos}$ ) y vibraciones a la  $1X$  y sus armónicas. Esta falla no puede ser detectada sin carga y desaparece al interrumpir la energía eléctrica. Suele afectar principalmente a grandes máquinas eléctricas, especialmente a motores que inician bajo carga.

- **Problemas en la fase eléctrica.** Los problemas de fase surgen por diversas razones, como la soltura, rotura de conexiones, o falsos contactos causados por corrosión o desgaste en las superficies de contacto de una o más fases de corriente. Estos problemas pueden dar lugar a vibraciones elevadas a la frecuencia de  $2FL$ , acompañadas de bandas laterales a  $(1/3) FL$  si se trata de una fase o conector defectuoso. Además, cuando una máquina trifásica presenta fallas en una fase, seguirá funcionando, pero experimentará sobreesfuerzos, lo que provocará desbalances electromagnéticos y un aumento del ruido.
- **Excitación de paso de ranuras.** Este fenómeno de alta frecuencia ocurre debido a la variación en la densidad del flujo en el entrehierro. La reluctancia en cada ranura es mayor que la de la superficie metálica entre las ranuras de los devanados del estator, lo que provoca una menor densidad de flujo sobre las ranuras. Aunque se trata de una característica de diseño, se convierte en un problema cuando la variación en el entrehierro es significativa.

**1.4.8.7 Holguras.** La presencia de holgura mecánica genera armónicos en la frecuencia de operación (1X), y en casos más graves pueden aparecer subarmónicos a 0.5X. Si la holgura es severa, también pueden observarse frecuencias a  $(1/3)X$  y  $(1/4)X$ .

- **Holguras en equipos rotativos.** Este tipo de holguras se identifican por mostrar un espectro con bandas amplias de frecuencias relacionadas con la velocidad de giro del rotor, destacándose armónicos (1X, 2X, 3X, etc.), subarmónicos (0.5X) y medios armónicos (1.5X, 2.5X, 3.5X, etc.). Estos patrones suelen ser más evidentes en las direcciones radiales (horizontal y vertical) que en la axial.

**1.4.8.8 Aflojamiento mecánico.** El aflojamiento mecánico, también conocido como soltura, no es una causa directa de vibración, sino una consecuencia de otros problemas en la máquina, como desbalance, desalineamiento o excentricidad. Este tipo de soltura suele originarse por el desgaste de la base o por el aflojamiento de los pernos de anclaje.

- **Soltura estructural.** La soltura estructural se relaciona con los elementos mecánicos no rotativos de la máquina, como los anclajes de fijación, las uniones entre tuberías o las cajas de rodamientos. Este tipo de problema suele manifestarse con mayor claridad en la dirección radial en lugar de la axial, mostrando en el espectro de frecuencias varios armónicos de la velocidad de giro del eje. Un indicador de la gravedad de la soltura es la comparación de la amplitud de los armónicos a 2X y 3X con respecto al pico a 1X. Si estos armónicos superan el 50% de la amplitud a 1X, indica una mayor severidad del problema.

#### **1.4.9 Norma en el análisis de vibraciones**

La norma ISO 10816 establece pautas para evaluar las vibraciones mecánicas en máquinas rotativas, ofreciendo criterios para determinar si los niveles de vibración son aceptables según el tipo de equipo y sus condiciones de operación. Es una referencia común en la industria para supervisar el estado de equipos como motores, bombas, ventiladores y turbinas, facilitando la detección de problemas como desbalance, desalineación o fallos en rodamientos.

Esta norma clasifica las máquinas en diferentes grupos de acuerdo con su tamaño, tipo de soporte (rígido o flexible), y potencia, definiendo límites de vibración para diversos grados de severidad. Estos parámetros ayudan a identificar cuándo una máquina puede seguir funcionando de forma segura o cuándo es necesario realizar intervenciones correctivas.

Dentro del análisis predictivo, la norma ISO 10816 es un pilar esencial, ya que permite una supervisión constante del estado de los equipos, previniendo fallos graves y prolongando su vida útil.

## 1.5 Análisis de las formas de deflexión en operación (ODS)

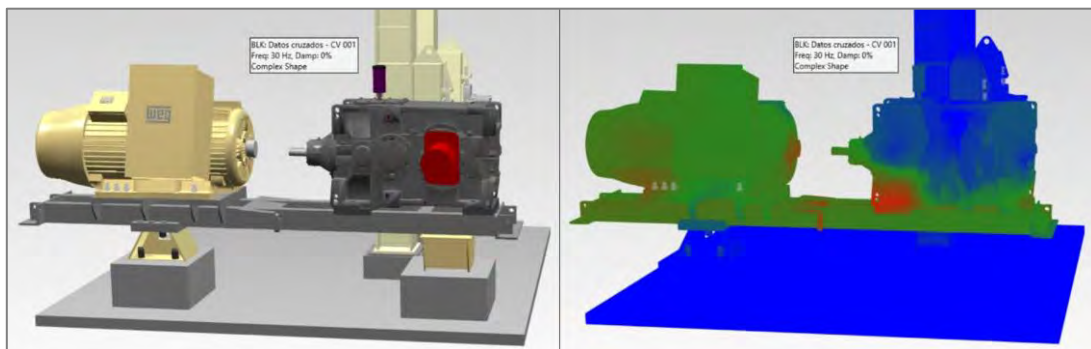
### 1.5.1 Introducción

El análisis ODS se usa para ver cómo se deforma un sistema mecánico, como una máquina o una estructura, bajo condiciones reales de operación. Esto ofrece información valiosa para comprender y evaluar su comportamiento dinámico. Es una herramienta muy flexible para realizar análisis dinámicos y complejos, ya que proporciona resultados de forma rápida y clara, y la recolección de datos es bastante sencilla.

Para realizar un análisis ODS, el equipo debe estar en funcionamiento, lo que significa que no es necesario detener la producción ni generar interrupciones, evitando así pérdidas para la empresa. El ODS es especialmente útil para identificar las causas de altos niveles de vibración, detectar resonancias estructurales, identificar velocidades críticas y validar las predicciones hechas por modelos de elementos finitos (ver figura 22).

**Figura 22**

*Simulación (ODS) y mapa de calor de un sistema motor- reductor*



### 1.5.2 Funciones avanzadas necesarias para realizar un (ODS)

Durante la recolección de datos, los niveles de carga en una máquina o estructura tienden a variar, lo que provoca que también cambien los niveles de vibración según la carga aplicada. Tanto en condiciones estacionarias como no estacionarias, es posible realizar mediciones específicas con algunos requisitos.

#### 1.5.2.1 Medidas necesarias para un estado estacionario:

- **Cross power spectrum (espectro de energía cruzada).** Para obtener una señal precisa en el cross power spectrum, es necesario colocar el punto de referencia en la zona de la máquina o estructura donde haya mayor movimiento. Si se coloca en un punto con baja amplitud de vibración ( $[S_x^*(f) \approx 0]$ ), el cross power spectrum se reducirá a cero. Uno de los inconvenientes de esta técnica es que

es muy sensible a los cambios en los niveles de carga, lo que impacta en la amplitud de las vibraciones.

$$G_{yx}(f) = [S_y(f)][S_x^*(f)] \quad (1.8)$$

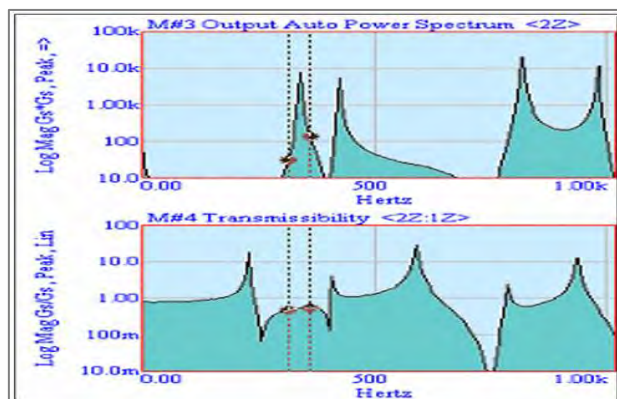
- **Transmisibilidad.** Según Schwarz y Richardson (2004), la transmisibilidad se usa cuando no es posible medir directamente las fuerzas que excitan al sistema. Se calcula de manera similar a la función de transferencia, pero con una diferencia clave: mientras que la función de transferencia relaciona la respuesta de salida con la fuerza de excitación (entrada), la transmisibilidad compara la respuesta de salida, obtenida con un sensor móvil, con la respuesta de referencia, capturada por otro sensor.

Dado que la transmisibilidad es la relación entre dos señales, se asume que cualquier cambio en los niveles de carga afecta de forma parecida a ambas señales. Al dividir estas dos señales, se elimina el efecto de las variaciones en la carga, lo que permite usarla tanto en sistemas estacionarios como no estacionarios para análisis ODS.

Sin embargo, una limitación de esta técnica es que los picos en las gráficas de transmisibilidad no siempre corresponden a las resonancias. De hecho, las frecuencias resonantes suelen aparecer como zonas planas. Por eso, cuando se usa la transmisibilidad para un análisis ODS, es recomendable complementar la información con el auto power spectrum (espectro de potencia automático), que ayuda a identificar con mayor precisión las frecuencias resonantes (ver figura 23).

**Figura 23**

*Auto power spectrum y transmisibilidad*



*Nota.* Tomado de Measurements Required for Displaying Operating Deflection Shapes, por B. Schwarz, Vibrant Technology, 2004.

### 1.5.2.2 Medidas necesarias para un estado no estacionario:

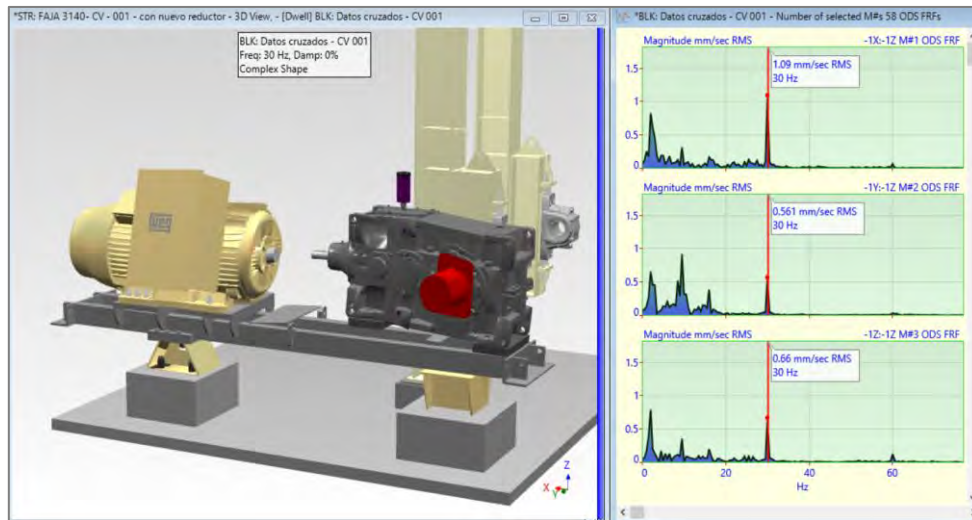
- **ODS Función de respuesta en la frecuencia (FRF).** Según Schwarz y Richardson (2004), el ODS FRF es una forma alternativa de medir que permite realizar el análisis ODS de manera más directa. Este método emplea un número complejo que integra la magnitud del espectro de la respuesta de salida, capturada por el sensor móvil, junto con la fase del cross power spectrum, que conecta la respuesta de salida con la respuesta de referencia registrada por el sensor de referencia. Al combinar estos elementos, se puede obtener una representación más detallada del comportamiento dinámico del sistema, tal como se muestra en la fórmula correspondiente.

$$ODS\ FRF(f) = |S_y(f)| \frac{G_{yx}(f)}{|G_{yx}(f)|} \quad (1.9)$$

En la ecuación (1.9), Cuando se divide  $G_{yx}(f)$  entre su módulo  $|G_{yx}(f)|$ , el resultado es un número complejo que representa un vector unitario. Esto sucede porque se está dividiendo un número complejo. Por otro lado,  $|S_y(f)|$  es simplemente la magnitud del espectro de la respuesta de salida, lo que lo convierte en un número real positivo. Así, al multiplicar  $|S_y(f)|$  por  $(G_{yx}(f)) / |G_{yx}(f)|$ , el resultado es otro número complejo.

En definitiva, el ODS FRF muestra el movimiento real en cada punto del sistema y también la fase relativa entre el sensor móvil y el sensor de referencia. Además, sus picos coinciden con las frecuencias resonantes, lo que hace que sea más fácil identificar los modos de vibración en esas frecuencias, lo que lo vuelve más útil que la transmisibilidad.

Sin embargo, el ODS FRF no considera los efectos de las señales que no son estacionarias debido a cambios en los niveles de fuerza de excitación. Por eso, es necesario ajustar las magnitudes para corregir esos cambios en las mediciones (ver figura 24).

**Figura 24***Modos de deflexión de un sistema (motor- reductor)*

### 1.5.3 Definición de operating deflection shape (ODS)

La forma de deflexión operativa (ODS) es una técnica empleada en el análisis de vibraciones que permite observar y medir cómo se deforma una estructura o componente durante su funcionamiento normal. Al recopilar datos de vibración en distintos puntos de la estructura mientras está operativa, se puede generar un modelo que ilustra cómo se mueve el equipo en respuesta a las fuerzas que actúan sobre él.

Características principales de ODS:

**1.5.3.1 Visualización de modos de vibración.** ODS permite ver gráficamente cómo se mueven las distintas partes de una estructura en relación entre sí. Esto ayuda a identificar modos de vibración específicos y áreas críticas donde se produce deformación.

**1.5.3.2 Diagnóstico de problemas.** Al estudiar la forma de deflexión operativa, es posible detectar problemas en la estructura, como desbalance, resonancias no deseadas o fallos mecánicos. Esto facilita la identificación de la causa de las vibraciones excesivas.

**1.5.3.3 Optimización del diseño.** Esta técnica ofrece información valiosa que puede ser utilizada para mejorar el diseño y la disposición de los componentes de una máquina, lo que contribuye a un mejor control de las vibraciones y a una operación más eficiente.

### 1.5.4 Tipos de análisis (ODS)

El análisis ODS puede representarse en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia, según cómo se enfoque el estudio.

**1.5.4.1 El ODS en el dominio del tiempo.** Puede aplicarse en sistemas lineales y no lineales. Este análisis muestra cómo se deforma la máquina o estructura en el momento de la

medición y cuánto se mueve, pero no revela las frecuencias que están presentes en el sistema. Es un enfoque limitado, ya que no aporta información relevante sobre las causas del comportamiento, lo que dificulta identificar los patrones característicos. Un ODS en el dominio del tiempo se consigue mediante mediciones realizadas a partir de señales impulsivas, senoidales, aleatorias o provocadas por excitaciones del entorno.

**1.5.4.2 El ODS en el dominio de la frecuencia.** Se aplica a sistemas lineales y no lineales, y permite ver cómo se deforma una máquina o estructura a una frecuencia específica, lo que ayuda a identificar cuál es la frecuencia que está causando el problema. Este tipo de ODS se obtiene a partir de mediciones de espectros, espectros de potencia cruzada o funciones de respuesta en frecuencia (FRF), también conocidas como ODS FRF.

En el análisis ODS, es importante conocer la magnitud y la fase relativa en todos los puntos de la máquina o estructura que se está estudiando. Para lograr esto, se pueden emplear dos métodos de medición.

**1.5.4.3 Método simultáneo.** Este enfoque permite obtener todas las respuestas de los diferentes grados de libertad al mismo tiempo. Sin embargo, es bastante costoso, ya que requiere muchos sensores y un equipo que pueda recopilar los datos de todos ellos.

**1.5.4.4 Método del conjunto de mediciones.** En este método, se registran algunas respuestas de sensores móviles al mismo tiempo que una respuesta fija de un sensor de referencia. Es importante asegurarse de que la respuesta del sensor de referencia se registre junto con cada medición de los sensores móviles, para mantener la fase relativa durante la prueba. Esto es similar a usar la fase del espectro de potencia cruzada entre cada respuesta móvil y la del sensor de referencia.

### **1.5.5 Instrumentos y software utilizados**

La instrumentación es esencial en el análisis vibracional avanzado y en las técnicas predictivas, ya que proporciona la información necesaria para evaluar el estado de las máquinas. Los sensores y equipos de medición capturan las señales que revelan el comportamiento dinámico de los equipos, lo que permite detectar fallos potenciales antes de que se presenten. Un ejemplo común son los acelerómetros, que se utilizan para registrar la aceleración de las vibraciones en distintos puntos de la máquina. Los analizadores multicanal, por su parte, permiten recolectar datos de varias zonas simultáneamente. Además, el software especializado facilita la interpretación de la información, permitiendo un análisis profundo de las vibraciones y modos operativos, lo que contribuye al diagnóstico y mantenimiento predictivo eficiente.

**1.5.5.1 Acelerómetros.** Son dispositivos que recogen señales de vibración en puntos clave de los equipos, permitiendo así el análisis de su comportamiento dinámico. Estos

sensores miden la aceleración de las vibraciones y están conectados a instrumentos de análisis para la recolección de datos necesarios (ver figura 25).

**Figura 25**

*Sensores de vibraciones SKF*



*Nota.* Tomado de Vibration sensors, por SKF, (s.f.).

**1.5.5.2 Analizador Microlog SKF:** Este es un equipo portátil especializado en la medición de vibraciones, proporcionando datos de manera precisa y rápida. Es ampliamente utilizado en la industria para llevar a cabo análisis predictivos, monitoreo de condiciones y mantenimiento basado en vibraciones (ver figura 26).

**Figura 26**

*Analizador Microlog SKF*



*Nota.* Tomado de Manual Microlog, por SKF, (2010).

**1.5.5.3 Analizador Emerson 2600 multicanal.** Este sistema avanzado permite medir vibraciones en múltiples canales al mismo tiempo. Es especialmente útil para monitorear equipos complejos, ya que puede recopilar información de distintos puntos de la estructura

simultáneamente, facilitando la interpretación del comportamiento dinámico de la maquinaria (ver figura 27).

**Figura 27**

*Analizador de vibraciones multicanal  
Emerson AMS 2600*



*Nota.* Tomado de AMS 2600 Machinery Health Expert, por Emerson, (2024).

**1.5.5.4 ME'scope.** Un software especializado para realizar análisis ODS (Operating Deflection Shape) y análisis modal que ofrece una visualización clara de las formas de vibración y los modos de operación del equipo, brindando una representación gráfica de cómo se deforma la estructura durante su funcionamiento. Esto lo hace una herramienta valiosa para detectar problemas como la resonancia, el desbalance y fallas estructurales.

**1.5.6 Datos necesarios para ejecutar un (ODS)**

**1.5.6.1 Transformada rápida de Fourier (FFT).** Es la abreviatura de Fast Fourier Transform, es un algoritmo utilizado para calcular la transformada discreta de Fourier (DFT) y su inversa. Mediante la transformada de Fourier, es posible expresar una señal compleja que está en el dominio del tiempo en el dominio de la frecuencia, y también realizar el proceso inverso.

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (1.10)$$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{j2\pi ft} d\omega \quad (1.11)$$

En la ecuación 1.10, la función  $X(\omega)$  se conoce como la transformada de Fourier de  $x(t)$ . De manera similar, a la ecuación 1.11, que permite obtener  $x(t)$  a partir de  $X(\omega)$ , se denomina transformada inversa de Fourier. Para aplicar la transformada rápida de Fourier (FFT) a una señal vibratoria de una máquina, dicha señal debe ser muestreada de manera discreta. Esto significa que la función  $x(t)$  de la ecuación 1.10 debe estar compuesta por  $N$  valores:  $x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_N)$ . Bajo esta condición, la integral que define la transformada de Fourier en la ecuación A se convierte en una sumatoria, dando lugar a la transformada discreta de Fourier (DFT), que como se muestra en la ecuación 1.12, es un número complejo.

$$x(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(t_n) e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \pi r^2 \quad (1.12)$$

Donde:

$x(t)$ : Muestras de la forma de onda       $n$ : Índice de las muestras

$N$ : Número total de muestras       $k$ : Frecuencia de análisis ( $k = 0 \dots N-1$ )

Para calcular  $X(k)$ , la transformada discreta de Fourier (DFT) requiere el cálculo de  $N$  funciones exponenciales, lo que implica un esfuerzo considerable cuando  $N$  es un valor elevado. La relevancia de la DFT radica en que puede emplearse un algoritmo conocido como transformada rápida de Fourier (FFT), que permite calcular la DFT de manera más eficiente y rápida, reduciendo significativamente el número de operaciones.

En resumen, un analizador de vibraciones que utiliza la FFT capta las vibraciones de una máquina a través de un acelerómetro (una forma de onda compleja), muestrea la señal de manera discreta y luego aplica la FFT a la DFT, obteniendo así la señal en el dominio de la frecuencia.

**1.5.6.2 Espectros.** El espectro,  $S_x(f)$ , es el principal resultado que se obtiene en cualquier analizador, y se refiere a la transformada rápida de Fourier (FFT) de la señal  $x(t)$ . Esta permite convertir la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, utilizando la siguiente expresión:

$$S_x(f) = FFT[x(t)] \quad (1.13)$$

Al aplicar la FFT a la señal  $x(t)$ , el resultado es que el espectro se convierte en un número complejo:

$$S_x(f) = \text{Parte Real}\{FFT[x(t)]\} + \text{Parte Imaginaria}\{FFT[x(t)]\} \quad (1.14)$$

En resumen,  $S_x(f)$  se descompone en una parte real y una parte imaginaria, lo que permite, a través de la teoría de números complejos calcular tanto la magnitud como la fase de  $S_x(f)$ :

$$S_x(f) = \sqrt{\{Parte Real\{FFT[x(t)]\}\}^2 + \{Parte Imaginaria\{FFT[x(t)]\}\}^2} \quad (1.15)$$

$$\theta = \arctg\left(\frac{Parte\ imaginaria\{FFT[x(t)]\}}{Parte\ Real\{FFT[x(t)]\}}\right) \quad (1.16)$$

**1.5.6.3 Auto power spectrum (espectro de energía automática).** El auto power spectrum de una señal,  $G_{xx}(f)$ , es una medida de la potencia que se calcula al multiplicar el espectro,  $S_x(f)$ , por su conjugado,  $S_x^*(f)$ , siguiendo la siguiente expresión:

$$G_{xx}(f) = [S_x(f)][S_x^*(f)] \quad (1.17)$$

**1.5.6.4 Cross power spectrum (espectro de energía cruzada).** El Cross power spectrum,  $G_{yx}(f)$ , es una medida de la potencia que vincula dos señales,  $x(t)$  y  $y(t)$ , en cada componente de frecuencia y se representa con la siguiente ecuación:

$$G_{yx}(f) = [S_y(f)][S_x^*(f)] \quad (1.18)$$

En la expresión 1.18:  $S_y(f)$  representa el espectro de salida y  $S_x^*(f)$  es el conjugado del espectro de entrada.

**1.5.6.5 Función transferencia.** Teóricamente, la función de transferencia,  $H(f)$ , establece una relación entre la salida (respuesta) y la entrada (excitación) de un sistema mecánico, mediante sus espectros respectivos, como se muestra en la siguiente expresión:

$$H(f) = \frac{S_y(f)}{S_x(f)} \quad (1.19)$$

Al llevar a cabo un ensayo, se debe lidiar con interferencias como el ruido proveniente de otras máquinas cercanas, el ruido eléctrico generado por la instrumentación y factores ambientales como el viento, ya que las máquinas no están aisladas dentro de una planta. Para reducir el impacto de estos factores en los resultados, algunos estudios sugieren una modificación a la expresión 1.19: multiplicar y dividir simultáneamente por  $S_x^*(f)$ , obteniendo así la siguiente ecuación:

$$H(f) = \frac{S_y(f)}{S_x(f)} \frac{S_x^*(f)}{S_x^*(f)} = \frac{G_{xy}(f)}{G_{xx}(f)} \quad (1.20)$$

A partir de la expresión 1.31, se puede observar que el numerador está determinado por el *cross power spectrum*, mientras que el denominador está regido por el *auto power spectrum*. De esta manera, la función de transferencia se redefine de la siguiente forma:

$$H(f) = \frac{G_{xy}(f)}{G_{xx}(f)} \quad (1.21)$$

### **1.5.7 Definición de análisis modal**

En los últimos 20 años, el análisis modal ha ganado relevancia como una herramienta esencial para mejorar y optimizar las características dinámicas de diversos sistemas. En la actualidad, los diseños de ingeniería tienden a ser más livianos y, a la vez, más resistentes. Asimismo, las nuevas regulaciones de seguridad y confiabilidad impuestas por gobiernos y consumidores plantean desafíos adicionales para el diseño de estructuras. En el ámbito de las vibraciones, cuando la vibración de una estructura se convierte en un problema, el desafío es mejorar sus propiedades dinámicas a través de análisis numéricos, experimentales o una combinación de ambos.

El análisis modal es un método que nos permite obtener las propiedades dinámicas de un sistema real, como las frecuencias naturales, los modos de vibración y el amortiguamiento, los cuales dependen de la rigidez, la masa y las condiciones de contorno. Este tipo de análisis se puede realizar de manera experimental, a través de mediciones de la función de transferencia (FRF), o de forma numérica usando el método de elementos finitos (MEF).

Las aplicaciones del análisis modal son variadas y abarcan campos como la ingeniería mecánica, la aeronáutica, la construcción civil, problemas biomecánicos, estructuras, instrumentos acústicos y centrales nucleares.

### **1.5.8 Prueba de bump test**

Esta prueba es también llamada prueba de impacto, es una técnica muy utilizada en el análisis de vibraciones para identificar las frecuencias naturales de estructuras o componentes mecánicos. Este método consiste en dar un golpe controlado, normalmente con un martillo instrumentado, a la estructura o máquina que está quieta. Esto genera una excitación mecánica temporal. Luego, se utilizan acelerómetros colocados en puntos estratégicos para captar la respuesta vibratoria, lo que permite registrar las frecuencias a las que el sistema resuena de forma natural.

El propósito principal de esta prueba es descubrir las frecuencias naturales del sistema, ya que son esenciales para evitar problemas de resonancia, que pueden llevar a fallas graves en los equipos. La resonancia ocurre cuando la frecuencia de excitación coincide con una frecuencia natural del sistema, lo que amplifica las vibraciones y causa tensiones excesivas en la estructura (ver figura 28).

**Figura 28***Prueba de impacto.*

*Nota.* Tomado de Detección y eliminación de resonancias, por Power-MI, s.f.

**1.5.9 Ensayo de arranque y parada**

El ensayo de arranque y parada en el análisis de vibraciones es un procedimiento en el que se monitorean las vibraciones de un equipo mientras este acelera y desacelera. Este tipo de ensayo es de gran importancia para comprender cómo se comporta la máquina y para detectar problemas relacionados con la resonancia, que ocurre cuando la frecuencia a la que opera el equipo se alinea con alguna de sus frecuencias naturales. Durante este ciclo, el equipo pasa por un amplio rango de frecuencias, lo que facilita la identificación de resonancias que pueden intensificar las vibraciones y provocar fallos en la estructura o en los componentes.

Además, el ensayo ofrece una excelente oportunidad para observar las condiciones transitorias del equipo. En esos momentos críticos de aceleración y desaceleración, donde los cambios en la velocidad son más evidentes, se pueden identificar problemas que no se noten durante un funcionamiento estable. Por último, este ensayo también permite analizar los modos de vibración. Al atravesar diferentes frecuencias, se puede entender cómo la máquina y su estructura responden a diversas excitaciones dinámicas, lo que ayuda a mejorar el diseño y a evitar situaciones que puedan comprometer la integridad del equipo.

**1.5.10 Modos de fallo detectables con operating deflection shape (ODS)**

A continuación, se detallan algunos de los fallos más habituales que pueden identificarse utilizando la técnica de ODS:

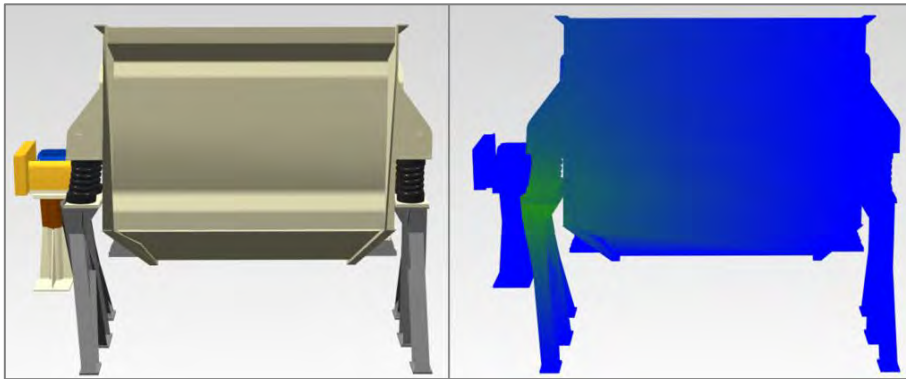
**1.5.10.1 Resonancia.** Se presenta cuando una frecuencia de operación se alinea con la frecuencia natural de la máquina o estructura, lo que resulta en una amplificación de las vibraciones. A través del ODS, es posible observar cómo la estructura se deforma bajo esta situación, destacando zonas con mayor desplazamiento que podrían verse afectadas o

dañadas. Un equipo o una estructura podría tener distintos patrones de movimiento, los cuales podrían ser:

- **Flexión.** Es común identificar deformaciones por flexión, particularmente en vigas o componentes estructurales. Esto sucede cuando algunas partes de la estructura vibran en direcciones contrarias, generando un patrón de curvatura que refleja los esfuerzos de flexión presentes (ver figura 29).

**Figura 29**

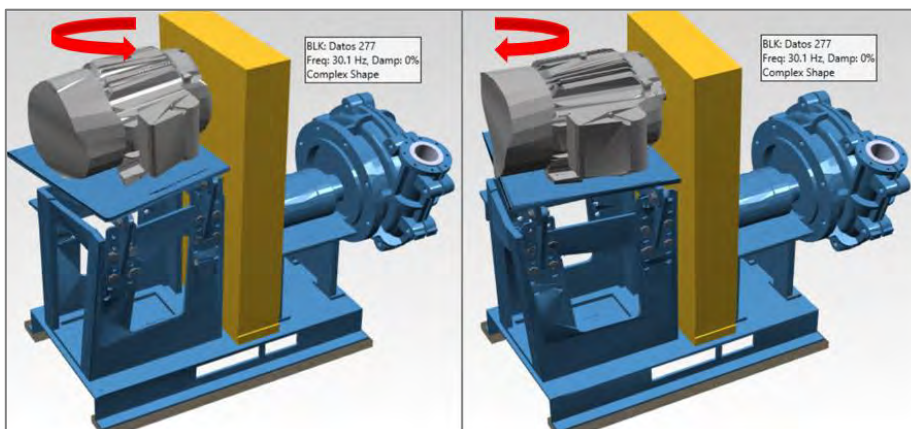
*Flexión de soporte de una zaranda*



- **Torsión.** La presencia de deformaciones torsionales indica que la estructura o los componentes están sufriendo un giro o torsión en torno a su eje. Esto es habitual en elementos alargados o cilíndricos, como ejes y árboles de transmisión (ver figura 30).

**Figura 30**

*Movimiento torsional de la estructura*



- **Desplazamientos laterales.** Estas deformaciones se presentan como movimientos transversales del equipo o de alguno de sus componentes. Son especialmente visibles en estructuras grandes y pueden estar vinculadas

también a problemas de desalineación o a una rigidez insuficiente en la construcción.

- **Vibraciones localizadas.** En algunas ocasiones, el ODS puede evidenciar vibraciones concentradas en áreas específicas de la máquina o la estructura. Estas vibraciones pueden estar asociadas con problemas de desbalance, resonancia o defectos localizados en componentes como rodamientos o uniones.
- **Movimientos no sincrónicos.** En un ODS, también es posible detectar deformaciones no sincronizadas, donde algunas secciones de la estructura vibran a distintas frecuencias o en direcciones diferentes. Esto puede indicar problemas de resonancia o desacoplamiento entre los componentes.

**1.5.10.2 Desbalance.** Un rotor con desbalance produce fuerzas centrífugas que originan vibraciones excesivas. Mediante ODS, es posible identificar las áreas con mayor amplitud en la estructura y evaluar si este desbalance está influyendo en el comportamiento dinámico del equipo.

**1.5.10.3 Desalineación.** Los problemas de desalineación en los ejes de máquinas acopladas generan patrones de vibración que pueden ser identificados con ODS. Esta técnica permite visualizar torsiones y deformaciones irregulares, facilitando la detección de fallos en los acoplamientos y las conexiones de la máquina.

**1.5.10.4 Pata coja.** Este tipo de fallo se presenta cuando una base de la máquina está mal asentada o suelta. Mediante ODS, es posible identificar patrones de vibración anómalos en los soportes, revelando que uno de los anclajes o patas no está adecuadamente fijo, lo que provoca movimientos no deseados en la estructura.

**1.5.10.5 Fisuras o grietas estructurales.** La técnica de ODS resulta particularmente efectiva para identificar daños iniciales en la estructura. Si existe una fisura o grieta, se puede visualizar una concentración de movimiento en esa zona, lo que sugiere un deterioro estructural progresivo que debe corregirse antes de que derive en fallos más graves.

**1.5.10.6 Solturas mecánicas.** La técnica de ODS puede evidenciar problemas de holguras en pernos, uniones o partes móviles de la máquina que no están adecuadamente aseguradas. Esto se refleja en movimientos anómalos o excesivos de componentes que deberían permanecer fijos.

**1.5.10.7 Fatiga estructural.** Cuando una estructura experimenta ciclos repetidos de carga, pueden surgir patrones de vibración que revelen zonas vulnerables. ODS permite identificar áreas con vibraciones elevadas que podrían estar propensas a fallos por fatiga.

## **1.6 Zaranda vibratoria**

### **1.6.1 Introducción**

En la industria minera la separación eficiente de materiales es esencial para optimizar la producción y asegurar la calidad del producto final. Dentro de este proceso, las zarandas vibratorias desempeñan un papel importante al clasificar los minerales según su tamaño, permitiendo así la distinción entre aquellos que son útiles y los que no lo son. Este equipo, que opera mediante vibraciones controladas, se ha convertido en una herramienta indispensable en las plantas de procesamiento, ya que contribuye a incrementar la productividad sin comprometer la calidad del resultado final.

### **1.6.2 Definición de zaranda y utilidad para la industria minera**

La zaranda vibratoria es un equipo electromecánico que se utiliza para clasificar materiales sólidos, especialmente en el sector minero. Consiste en una estructura que sostiene una o más mallas; al vibrar, estas permiten que el material se filtre y se separe según el tamaño de las partículas.

En minería, la principal función de las zarandas vibratorias es lograr una clasificación eficiente del mineral, incluso cuando se manejan grandes volúmenes. Por eso, son esenciales en varias etapas del proceso, como la preparación de minerales, la clasificación de productos terminados, circuitos de trituración y molienda.

### **1.6.3 Proceso de separación de minerales**

En la industria minera existen distintos métodos de separación de materiales, entre ellos la molienda, el tamizado, la filtración y la centrifugación.

**1.6.3.1 Molienda y tamizado.** En este proceso la disminución del tamaño del material se realiza con el fin de transformarlo en fragmentos o gránulos que cumplan con las dimensiones predefinidas dentro de ciertos límites. Este proceso tiene como finalidad asegurar que el material cumpla con los requerimientos de operaciones específicas, siendo beneficioso para algunas etapas.

**1.6.3.2 Filtración.** Este proceso se basa en la separación de partículas sólidas o semisólidas presentes en la superficie de un fluido, el cual atraviesa un medio poroso o granular llamado medio filtrante, con la ayuda de una fuerza impulsora aplicada durante un

tiempo determinado. El propósito principal de esta operación es la clarificación de líquidos, la recuperación de sólidos y líquidos, además, colabora en los procesos de secado y lavado de diferentes materiales.

**1.6.3.3 La centrifugación.** La centrifugación es también conocida como separación centrífuga, se emplea para concentrar sólidos, clarificar residuos en la superficie de líquidos y separar mezclas líquidas, así como para eliminar sólidos. Ejemplos claros de esta técnica son las decantadoras y separadoras, las cuales han demostrado su utilidad a lo largo de los años en procesos industriales, facilitando considerablemente la producción.

#### **1.6.4 Clasificación de materiales**

La zaranda se utiliza para realizar estas dos clasificaciones principales de materiales:

**1.6.4.1 Clasificación por estratificación.** Este método de clasificación de materiales consiste en que las partículas más grandes ascienden a la superficie, mientras que las más pequeñas pasan a través de los orificios del tamiz, alcanzando el fondo.

**1.6.4.2 Clasificación de probabilidad.** Se trata del proceso mediante el cual el material atraviesa las aberturas de la malla, con el fin de establecer la granulometría adecuada. Durante este paso, se separa el material que no cumple con los criterios predefinidos, basado en la relación entre el tamaño de las partículas y la apertura de la malla. Además, este procedimiento permite determinar los porcentajes de material utilizable y el que requiere ser triturado nuevamente hasta alcanzar los valores estándar de granulometría permitidos para su correcta utilización.

#### **1.6.5 Tipos de zarandas**

Se clasifican de la siguiente forma:

**1.6.5.1 Vibratoria horizontal.** Las zarandas horizontales se caracterizan por su capacidad para separar elementos en movimientos longitudinales, arrastrando partículas finas y desechando las más gruesas, además de contar con componentes adicionales para eliminar estas últimas. Su uso se da principalmente en la minería y la construcción. Estos clasificadores suelen tener un diseño de doble eje con un ángulo de  $45^\circ$ , o de triple eje, que generalmente se sitúa entre  $30^\circ$  y  $60^\circ$  con respecto a la horizontal (ver figura 31).

**Figura 31***Zaranda horizontal Metso*

*Nota.* Tomado de Harneros horizontales serie ES, por Metso (2024).

**1.6.5.2 Vibratoria inclinada.** Estos equipos son fundamentales en el procesamiento de minerales, ya que manejan tamaños de partículas que van desde 25 cm hasta 250  $\mu\text{m}$ . En el caso de este tipo de zarandas, el manejo de la inclinación es crucial, ya que está relacionado directamente con la velocidad del flujo del material. En una zaranda vibratoria inclinada, el movimiento que se genera es circular. Para lograr un rendimiento óptimo, la inclinación de la zaranda debe estar entre  $15^\circ$  y  $20^\circ$ . La vibración eleva el material, lo que acelera el proceso de estratificación, y la combinación de la vibración con el ángulo de inclinación determina la velocidad a la que el material se desplaza sobre la plataforma (ver figura 32).

**Figura 32***Zaranda inclinada Metso*

*Nota.* Tomado de Harneros inclinados, por Metso (2024).

**1.6.5.3 Movimiento oscilante.** Se utilizan principalmente en trabajos de mediana escala, a diferencia de las zarandas vibratorias, que son empleadas en la separación de materiales en la minería a gran escala. Estas zarandas funcionan de manera horizontal o con una ligera inclinación de entre 2% y 8%, y cuentan con un bastidor que se apoya en balancines inclinados, movidos por un mecanismo de biela y manivela. Las cribas de sacudida operan a bajas frecuencias, entre 100 y 400 Hz. El cajón, generalmente suspendido o apoyado en muelles o ballestas, se acciona por un sistema de biela-manivela, generando un movimiento inclinado en relación a la superficie de cribado, lo que transmite vibraciones a la estructura circundante.

### **1.6.6 Clase de movimiento**

Las zarandas vibratorias se pueden clasificar según el tipo de movimiento que generan para lograr la separación de materiales. A continuación, se describen los principales tipos de zarandas según su movimiento:

**1.6.6.1 Zarandas de movimiento circular.** Las zarandas de movimiento circular generan un tipo de vibración circular gracias a uno o más pesos excéntricos que están conectados al eje de un motor. Este diseño es perfecto para trabajar con materiales de tamaño medio y fino, ya que el movimiento circular ayuda a que el material se desplace fácilmente sobre la superficie de cribado. Además, su construcción es simple y resistente, lo que las hace ideales para su uso en minería y en la industria de agregados.

**1.6.6.2 Zarandas de movimiento lineal.** Las zarandas de movimiento lineal producen un movimiento recto, que puede ser hacia adelante y hacia atrás o de arriba hacia abajo. Este tipo de movimiento es generado por dos motores que vibran en sincronía, pero en direcciones opuestas, creando un patrón lineal. Son especialmente útiles para materiales finos y húmedos, ya que el movimiento lineal facilita el tamizado de partículas pegajosas o con alto contenido de humedad.

**1.6.6.3 Zarandas de movimiento elíptico.** El movimiento elíptico se produce cuando los vibradores están desalineados o dispuestos de forma asimétrica, generando una trayectoria elíptica en las partículas sobre la zaranda. Esta combinación de movimientos lineales y circulares es fundamental para mejorar tanto el transporte del material como la eficacia en la separación. El material avanza sobre la superficie de la zaranda siguiendo una ruta elíptica, optimizando el tiempo de exposición en la malla y permitiendo una clasificación más precisa. A lo largo de este proceso, las partículas experimentan aceleraciones variables, lo que facilita la separación de materiales según sus diferentes tamaños y pesos.

## Capítulo 2

### Desarrollo del trabajo

#### 2.1 Caso 1: Zaranda de mineral

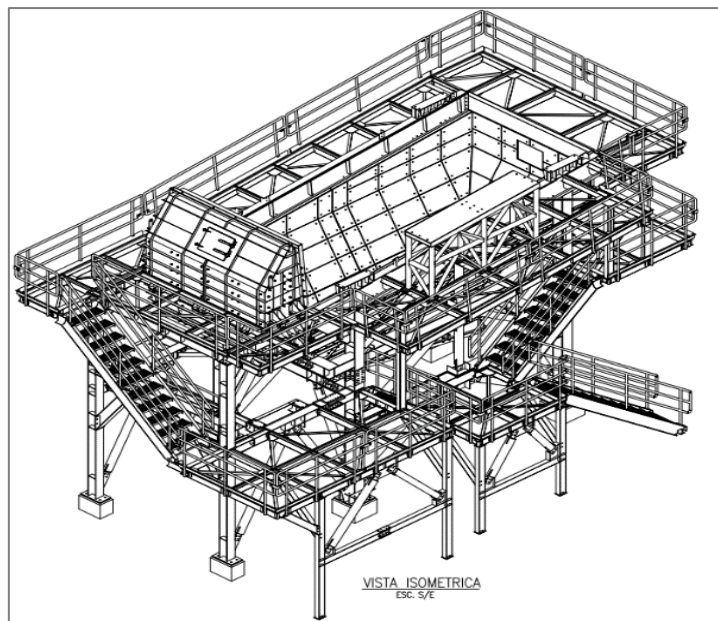
##### 2.1.1 Antecedentes del equipo

En este capítulo se analizará el comportamiento dinámico de una zaranda horizontal Sandvik, la cual es un equipo esencial en el procesamiento y clasificación de minerales dentro de la planta concentradora de una unidad minera. Este equipo permite la separación del material en distintas granulometrías, optimizando los procesos posteriores y asegurando la calidad del producto final. Sin embargo, las condiciones de operación y el desgaste del equipo pueden afectar su rendimiento y seguridad operativa.

En esta unidad minera, se operaba una zaranda horizontal Sandvik modelo *LF3070D* soportada por una estructura como se puede apreciar en la figura 33, con el tiempo, comenzó a presentar elevados niveles de vibración en las placas laterales. Este comportamiento resultó en el agrietamiento progresivo de las placas laterales de la zaranda como se puede observar en la figura 34, comprometiendo su integridad estructural y operativa. Ante esta situación, se decidió sustituir la zaranda afectada por el modelo *SL 3072* más reciente, caracterizado por un diseño más robusto y significativamente más pesado que la anterior, aunque instalado sobre la misma estructura de soporte.

**Figura 33**

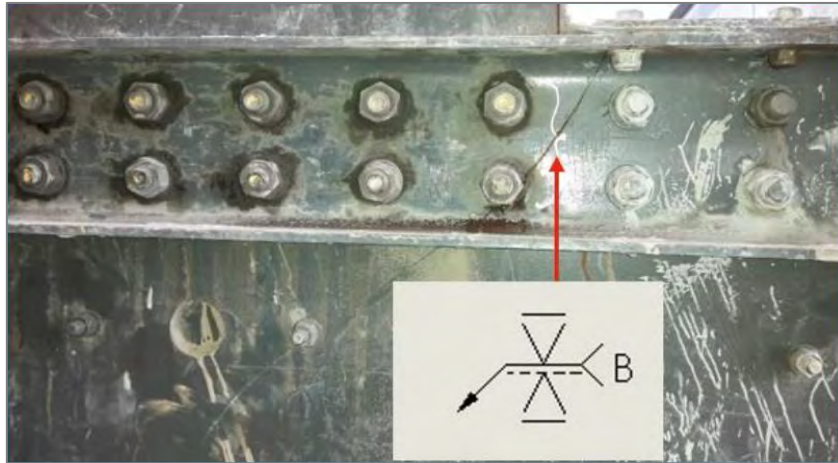
*Estructura que soporta la zaranda de mineral*



*Nota.* Tomado de Estructura soporte – vista isométrica, por TAMA Ingenieros S.A.C, (2021).

**Figura 34**

*Grietas en las placas laterales de la primera zaranda LF3070D*



*Nota.* Tomado de Informe de reparación de grietas en la placa lateral zaranda LF3070D, por Sandvik, (2018).

Tras la instalación del nuevo equipo, surgió un problema adicional. El eje que conecta las placas laterales y alberga los rodamientos de la zaranda comenzó a alcanzar temperaturas de hasta 98.3 °C, excediendo los límites normales de operación. Dada la criticidad de la zaranda en el proceso productivo, se optó por realizar un análisis de deflexión de formas en operación (ODS) para evaluar de manera precisa el comportamiento dinámico del equipo. Este estudio ayuda a identificar las causas de las anomalías térmicas y las posibles interacciones dinámicas con la estructura que podrían estar afectando su rendimiento.

### **2.1.2 Análisis de criticidad del equipo**

Para elaborar una matriz de criticidad de una zaranda vibratoria, es necesario evaluar el impacto de sus fallas potenciales en términos de severidad, ocurrencia y detección. La zaranda es un equipo esencial en el proceso de clasificación de materiales, y la interrupción de su operación puede tener consecuencias significativas en la producción. Por ello, es de gran importancia identificar y priorizar los modos de falla que pueden comprometer su funcionamiento.

La matriz de criticidad se basa en el análisis de modos y efectos de falla (FMEA), este método combina la frecuencia de ocurrencia, la severidad de las fallas y la capacidad de detectarlas para determinar el nivel de criticidad o riesgo asociado a cada componente de la zaranda.

La norma ISO 9001:2015 (sistemas de gestión de calidad) no menciona de manera directa el FMEA, pero promueve un enfoque orientado a la gestión de riesgos en los sistemas de calidad. En este contexto, el FMEA es ampliamente empleado como una herramienta eficaz para gestionar riesgos y garantizar la calidad de productos y procesos.

**2.1.2.1 Escala de ocurrencia.** Evalúa con qué probabilidad ocurre un fallo en un componente específico (ver tabla 1).

**Tabla 1**

*Tabla de escala de ocurrencia*

10	Muy alta	El fallo es inevitable, ocurre con mucha frecuencia.
9	Muy alta	Ocurre casi siempre, muy alta probabilidad de ocurrencia.
8	Alta	Ocurre frecuentemente.
7	Alta	Ocurre a menudo.
6	Moderada	Ocurre de vez en cuando.
5	Moderada	Ocurre con cierta frecuencia.
4	Moderada	Ocurre ocasionalmente.
3	Baja	Ocurre pocas veces.
2	Muy baja	Rara vez ocurre.
1	Muy baja	El fallo es casi imposible.

*Nota.* Tomado de Failure Mode and Effects Analysis FMEA Handbook, por AIAG & VDA (2019).

**2.1.2.2 Escala de severidad.** Mide la gravedad o el efecto de la falla en la operación de la zaranda o el proceso productivo (ver tabla 2).

**Tabla 2**

*Tabla de escala de severidad*

10	Peligro sin aviso	El fallo puede causar daños graves al personal sin ninguna advertencia.
9	Peligro con aviso	El fallo puede causar daños graves al personal, pero con alguna advertencia.
8	Fallo muy crítico	El fallo causará una pérdida completa de la función, afectando la seguridad o el cumplimiento.
7	Fallo crítico	El fallo causará una pérdida significativa de la función o una gran reducción en el rendimiento.
6	Fallo moderado	El fallo causará una pérdida parcial de la función o una reducción moderada en el rendimiento.
5	Fallo menor	El fallo causará una reducción ligera en el rendimiento o una función secundaria.
4	Molestia mayor	El fallo causará una molestia significativa, pero no afecta la función principal.
3	Molestia moderada	El fallo causará una molestia moderada y perceptible.
2	Molestia menor	El fallo causará una molestia leve, apenas perceptible por el usuario.
1	Ninguna	El fallo no tiene efectos perceptibles.

*Nota.* Tomado de Failure Mode and Effects Analysis FMEA Handbook, por AIAG & VDA (2019).

**2.1.2.3 Escala de detección.** Representa la facilidad o dificultad de detectar la falla antes de que ocurra un fallo catastrófico (ver tabla 3).

**Tabla 3**

*Tabla de escala de detección*

10	Improbable	No es posible detectar el fallo antes de que ocurra.
9	Muy improbable	Muy baja probabilidad de detección.
8	Baja	Baja probabilidad de detección.
7	Baja	Probabilidad de detección moderadamente baja.
6	Moderada	Posibilidad de detección moderadamente alta.
5	Moderada	Probabilidad de detección moderada.
4	Moderada	Probabilidad de detección razonable.
3	Alta	Alta probabilidad de detección.
2	Muy alta	Muy alta probabilidad de detección.
1	Casi cierta	El fallo será detectado con certeza antes de que ocurra.

*Nota.* Tomado de Failure Mode and Effects Analysis FMEA Handbook, por AIAG & VDA (2019).

**2.1.2.4 Clasificación del índice de prioridad de riesgo (RPN).** El Índice de prioridad de riesgo (RPN) se calcula multiplicando severidad (S), ocurrencia (O) y detección (D), entonces  $RPN = S \times O \times D$ . Una vez calculado el RPN, es posible categorizar los riesgos en distintos niveles para establecer prioridades en las acciones correctivas. A continuación, se presenta una tabla con la clasificación de los rangos de criticidad (ver tabla 4).

**Tabla 4**

*Tabla de clasificación del índice de prioridad de riesgo*

Rango de RPN	Clasificación de Prioridad	Acción Requerida
1 - 100	Baja	Monitoreo continuo, acciones correctivas no urgentes.
101 - 200	Moderada	Se debe considerar una acción correctiva, pero no inmediata.
201 - 500	Alta	Se requiere una acción correctiva prioritaria en el corto plazo.
501 - 1000	Crítica	Acción inmediata necesaria para evitar fallos catastróficos.

*Nota.* Basado en Failure Mode and Effects Analysis FMEA Handbook, por AIAG & VDA (2019).

En la matriz de criticidad elaborada para la zaranda vibratoria (ver tabla 5), se puede observar que cuatro componentes tienen una criticidad alta, entre ellos los rodamientos, placas laterales, motor y base estructural de la zaranda. Como acciones propuestas es importante el uso de técnicas predictivas como el análisis vibracional (ODS- modal), análisis dinámico y monitoreo termográfico.

**Tabla 5**

*Matriz de criticidad FMEA para zaranda vibratoria*

Elemento	Falla funcional	Modo de fallo	Efecto del fallo	Causa del fallo	Severidad (S)	Ocurrencia (O)	Detección (D)	Índice de prioridad (RPN = S x O x D)	Prioridad	Acciones propuestas
<b>Rodamientos</b>	Incapacidad de soportar adecuadamente la carga rotacional.	Sobrecalentamiento, fallo de rodamiento	Daño en componentes internos, parada inesperada	Lubricación insuficiente, sobrecarga	8	5	6	240	Alta	Mejora de lubricación, monitoreo termográfico, análisis vibracional
<b>Placas laterales</b>	integridad estructural necesaria para mantener la	Fisuras o roturas	Pérdida de rigidez estructural	Fatiga por vibración, sobrecarga	8	5	6	240	Alta	Refuerzo estructural, monitoreo de vibraciones ( análisis ODS y modal)
<b>Resortes</b>	Incapacidad para amortiguar vibraciones efectivamente	Rotura o pérdida de tensión	Pérdida de aislamiento de vibraciones	Desgaste, fatiga por uso	7	5	4	140	Moderada	Reemplazo de resortes, inspección periódica
<b>Motor</b>	Incapacidad de generar el torque necesario para la operación de la zaranda.	Sobrecalentamiento, fallo eléctrico	Parada de la zaranda	Sobrecarga, fallo en componentes eléctricos	8	5	6	240	Alta	Mantenimiento preventivo, monitoreo termográfico y análisis dinámico
<b>Malla</b>	Ineficiencia en el clasificación o separación del material procesado.	Desgaste o rotura	Pérdida de eficiencia en el cribado	Sobrecarga de material, abrasión	6	6	4	144	Moderada	Reemplazo periódico de mallas, inspección visual
<b>Eje</b>	balance o alineación, lo que afecta el movimiento de la zaranda.	Desbalance o flexión	Vibraciones excesivas, desgaste acelerado	Desgaste de rodamientos, mal ensamblaje	7	5	4	140	Moderada	Balanceo del eje, ajuste de componentes
<b>Sistema de lubricación</b>	Incapacidad para reducir la fricción y disipar el calor generado en componentes críticos.	Falla en la lubricación	Sobrecarga térmica de componentes	Falta de mantenimiento o lubricante incorrecto	8	5	4	160	Moderada	Monitoreo de lubricación, análisis de aceite
<b>Chute de descarga</b>	Bloqueo o acumulación del flujo del material procesado.	Fisuras o bloqueos	Bloqueo del material, ineficiencia operativa	Sobrecarga de material, fatiga	6	5	5	150	Moderada	Refuerzo, mantenimiento correctivo
<b>Base estructural</b>	Falta de soporte y estabilidad adecuada para la zaranda en operación.	Suelta o deflexión	Aumento de vibraciones, inestabilidad	Soltura mecánica, fatiga estructural	9	4	6	216	Alta	Ajuste de pernos, refuerzo estructural, análisis vibracional

*Nota.* Basado en Failure Mode and Effects Analysis FMEA Handbook, por AIAG & VDA (2019).

### 2.1.3 Inspección visual del equipo

Durante la inspección visual no se encontraron observaciones relevantes. Los componentes estaban en buen estado, sin signos de corrosión, fisuras o desalineaciones como se puede observar en las figuras 35 y 36. Esto era esperado, ya que la zaranda no había estado en operación por mucho tiempo, reduciendo la probabilidad de desgaste o daños visibles. Aunque la inspección visual no reveló problemas, debido a las limitaciones de este método, se realizaron técnicas predictivas como análisis dinámico de motores, termografía infrarroja y análisis vibracional. Estas técnicas permitieron un análisis más detallado del estado operativo de la zaranda, proporcionando una evaluación más profunda y detectando posibles anomalías no visibles a simple vista.

**Figura 35**

*Vista lateral de zaranda Sandvik SL 3072*

**Figura 36**

*Vista de planta de zaranda Sandvik SL 3072*

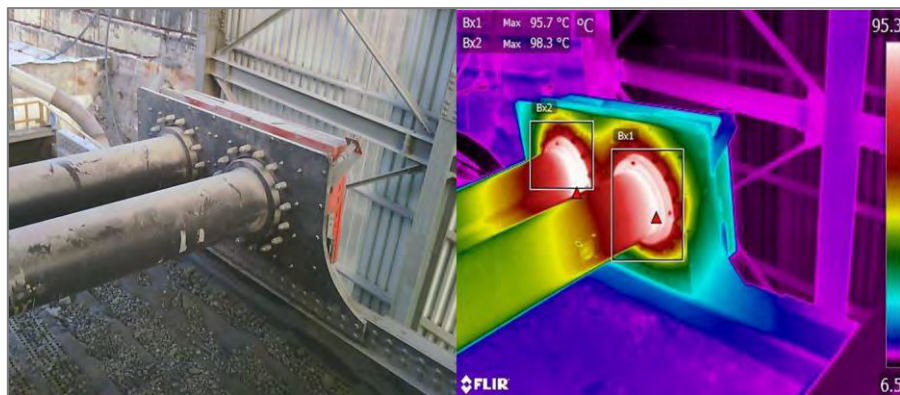


## 2.1.4 Realización de técnicas predictivas

**2.1.4.1 Termografía infrarroja.** En la inspección termográfica de la zaranda, se detectaron temperaturas fuera de los rangos normales. Se midieron las temperaturas en los alojamientos de los rodamientos y otros componentes importantes mientras el equipo estaba en operación. Los resultados indicaron una temperatura máxima de 98.3 °C y mínima de 92.4 °C en los alojamientos de los rodamientos como se puede apreciar en las figuras 37 y 38. Estos valores están por encima de lo esperado, ya que las temperaturas de operación deberían estar en el rango de 70 °C y 75 °C, según la información proporcionada por el fabricante.

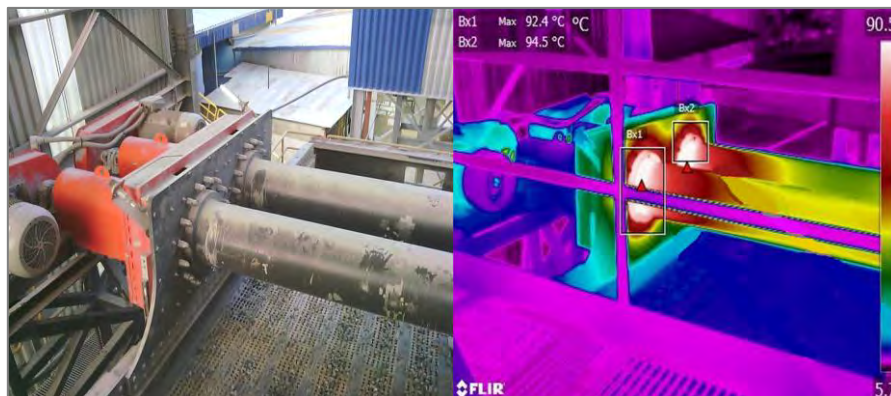
**Figura 37**

*Temperatura máxima 98.3 °C alojamientos lado libre*



**Figura 38**

*Temperatura mínima 92.4 °C alojamientos lado accionamiento*



Las temperaturas registradas, con un máximo de 98.3 °C, superan lo que se considera óptimo para el funcionamiento de los rodamientos. Esto puede acelerar la degradación del lubricante, disminuyendo su capacidad de protección y aumentando la fricción entre las superficies en contacto. Si el lubricante pierde sus propiedades, el calor seguirá incrementándose, lo que provocará un mayor desgaste en los rodamientos. Este aumento de temperatura puede generar un daño prematuro en los rodamientos si no se implementan medidas correctivas.

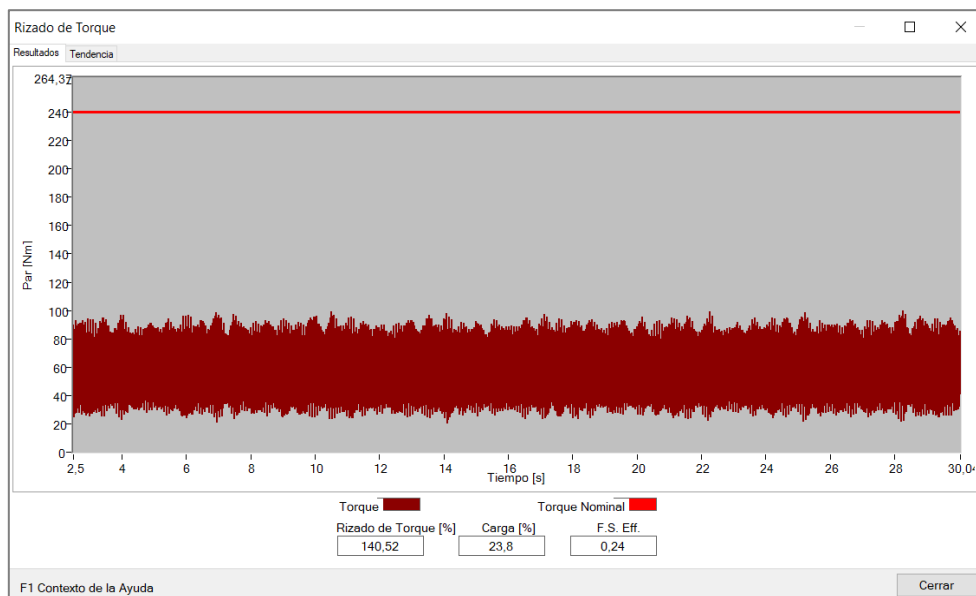
**2.1.4.2 Análisis dinámico.** Durante la inspección de los dos motores de la zaranda, se aplicaron técnicas avanzadas de análisis dinámico para evaluar diversos aspectos del comportamiento eléctrico y mecánico de los motores. Este análisis se centró en tres áreas principales: el rizado de torque, el desbalance de voltaje y el desbalance de corriente. Para realizar el análisis es necesario ingresar al analizador los siguientes datos de placa:

Voltaje: 460 V Corriente: 72 A Potencia: 75 kW Velocidad: 1788 RPM

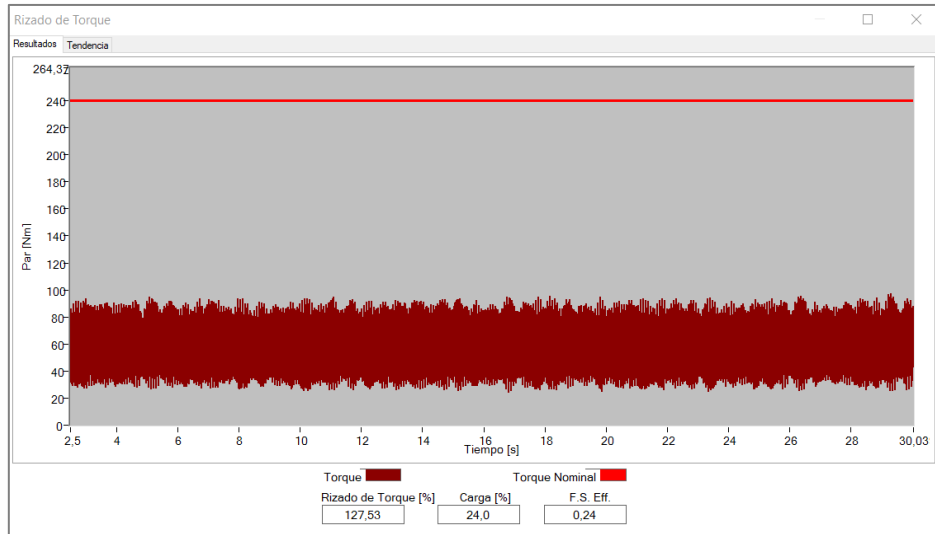
- **Rizado de torque.** El rizado de torque, que se refiere a las fluctuaciones periódicas del torque generado por el motor. Estas fluctuaciones suelen ser causadas por variaciones en el suministro de energía o irregularidades en el sistema mecánico del motor. En el análisis realizado, se monitorearon los niveles de rizado de torque para identificar posibles irregularidades que pudieran estar generando fluctuaciones en la operación de la zaranda, especialmente bajo condiciones de carga.

**Figura 39**

*Rizado de torque del motor 1*

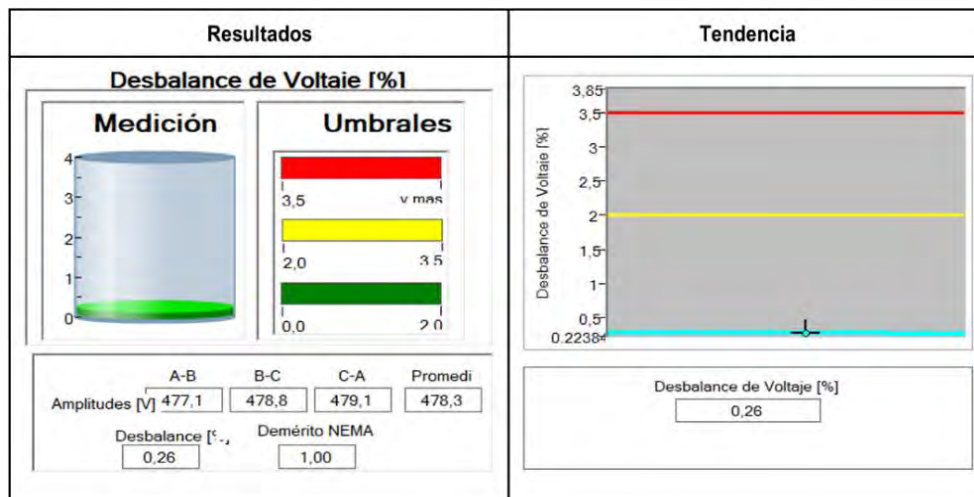


En la figura 39 se puede apreciar que el rizado de torque del motor 1 de la zaranda no supera el valor nominal establecido en la línea roja de 240 N.m y presenta un porcentaje de rizado de torque de 140.52 %, indicando un rango de operación sin problemas mecánicos.

**Figura 40***Rizado de torque del motor 2*

En la figura 40 se puede apreciar que el rizado de torque del motor 2 de la zaranda no supera el valor nominal establecido en la línea roja de 240 N.m y presenta un porcentaje de rizado de torque de 127.53 %, indicando un rango de operación sin problemas mecánicos

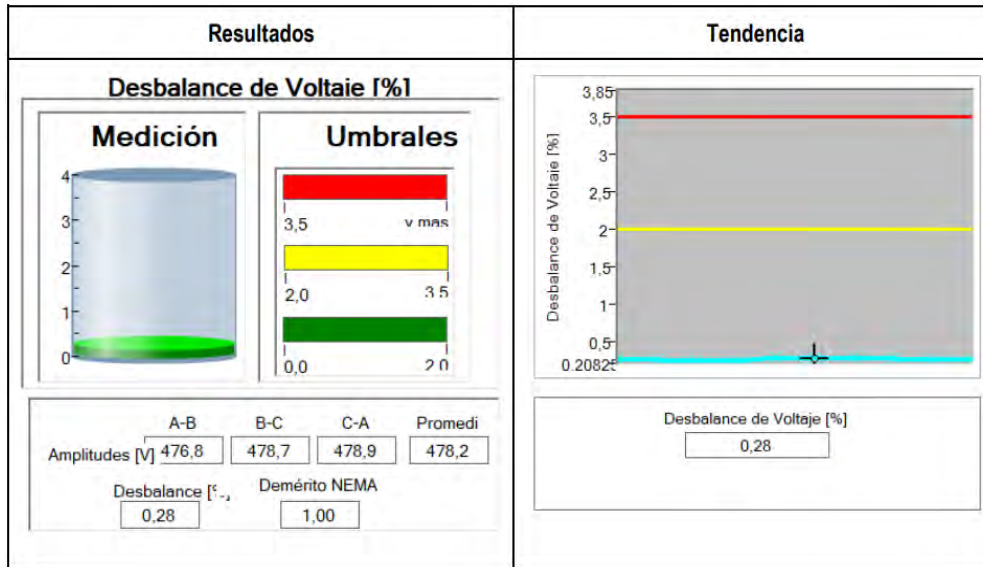
- **Desbalance de voltaje.** El desbalance de voltaje se refiere a la diferencia en la magnitud del voltaje entre las fases del motor que genera corrientes que pueden llegar a ser entre 6 y 15 veces superior al desequilibrio de tensión. Esta corriente extra incrementa el calentamiento del motor y puede deteriorar el aislamiento del motor, reduciendo su vida útil.

**Figura 41***Desbalance de voltaje del motor 1*

En la figura 41 se aprecia que en el motor 1 el nivel de desbalance voltaje detectado es de 0.26 %, por lo que su valor está dentro del 3% permisible establecido por la norma NEMA MG-1.

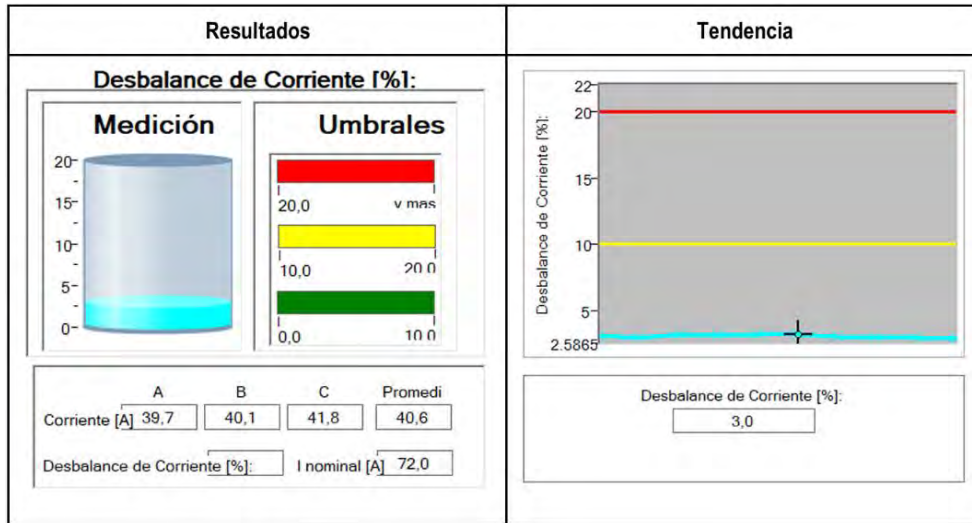
**Figura 42**

*Desbalance de voltaje del motor 2*

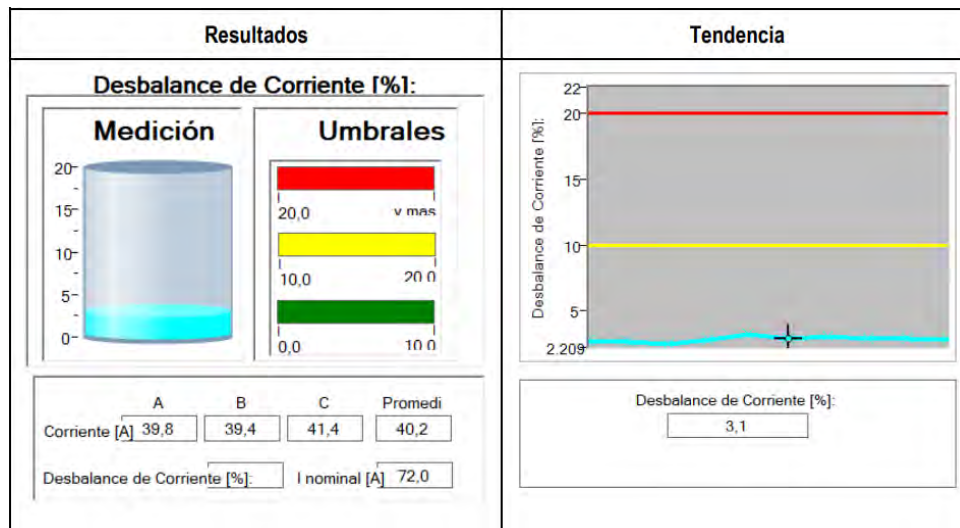


En la figura 42 se aprecia que en el motor 2 el nivel de desbalance voltaje detectado es de 0.28 %, por lo que su valor está dentro del 3% permisible establecido por la norma NEMA MG-1.

- **Desbalance de corriente.** El desequilibrio de corriente se da cuando la intensidad que pasa por cada una de las tres fases no es igual, lo que provoca que en el neutro circule corriente, cuando en condiciones normales debería ser cero. Esto causa sobrecalentamiento tanto en las cargas como en los cables y sistemas de protección, este problema suele aparecer por una mala distribución de las cargas en la instalación. Además, en instalaciones donde hay armónicos, es posible que haya corriente en el neutro, aunque el sistema trifásico esté equilibrado.

**Figura 43***Desbalance de corriente del motor 1*

En la figura 43 se aprecia que en el motor 1 el nivel de desbalance corriente detectado es de 3 %, por lo que su valor está dentro del 10% permisible establecido por la norma NEMA MG-1.

**Figura 44***Desbalance de corriente del motor 2*

En la figura 44 se aprecia que en el motor 2 el nivel de desbalance corriente detectado es de 3.1 %, por lo que su valor está dentro del 10% permisible establecido por la norma NEMA MG-1.

**2.1.4.3 Análisis vibracional.** El análisis vibracional de la zaranda se centró en detectar cómo las vibraciones afectaban sus componentes principales, como los resortes (rosta) y las placas laterales en donde se encuentran también los rodamientos del sistema de la transmisión, se pudo observar que las placas laterales presentaban niveles altos de vibración especialmente en la parte central (ver tabla 6), lo cual daba indicios de un posible fenómeno de resonancia por lo que se realizó pruebas de impacto para conocer las frecuencias modales de las placas laterales.

**Tabla 6**

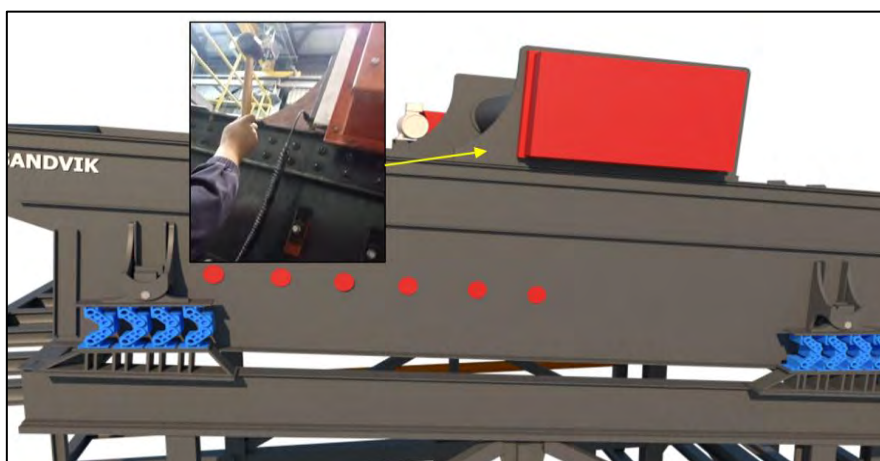
*Valores de vibración de placas laterales*

PLACA	UBICACIÓN	PUNTO	VALOR	UNIDAD	PLACA	UBICACIÓN	PUNTO	VALOR	UNIDAD
PLACA LATERAL LADO ACCIONAMIENTO	EXTREMO	6Y	6.94	mm/s <sup>2</sup>	PLACA LATERAL LADO LIBRE	-25Y	EXTREMO	13.38	mm/s <sup>2</sup>
	EXTREMO	7Y	6.81	mm/s <sup>2</sup>		-26Y	EXTREMO	9.78	mm/s <sup>2</sup>
	MEDIO	8Y	18.49	mm/s <sup>2</sup>		-27Y	MEDIO	21.46	mm/s <sup>2</sup>
	MEDIO	9Y	22.3	mm/s <sup>2</sup>		-28Y	MEDIO	19.99	mm/s <sup>2</sup>
	MEDIO	10Y	24.3	mm/s <sup>2</sup>		-29Y	MEDIO	17.47	mm/s <sup>2</sup>
	MEDIO	11Y	22.64	mm/s <sup>2</sup>		-30Y	MEDIO	20.46	mm/s <sup>2</sup>
	EXTREMO	18Y	13.57	mm/s <sup>2</sup>		-37Y	EXTREMO	4.84	mm/s <sup>2</sup>
	EXTREMO	19Y	14.10	mm/s <sup>2</sup>		-38Y	EXTREMO	6.56	mm/s <sup>2</sup>

- **Ensayo de impacto.** Al realizar esta prueba a las placas laterales de la zaranda Sandvik. Este ensayo consistió en golpear la estructura con un martillo de goma de peso considerable cuando estaba detenida para lograr excitarla y a su vez medir la respuesta vibratoria que genera. El objetivo es identificar las frecuencias naturales de las placas laterales (ver figura 45 y 47).

**Figura 45**

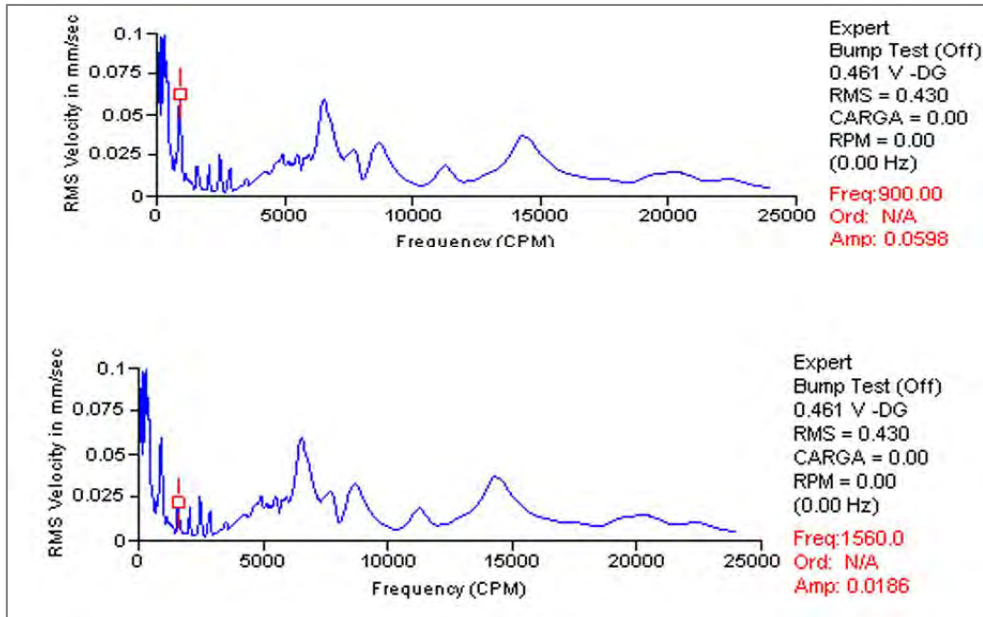
*Prueba de impacto en placa lateral lado libre*



Durante la prueba de impacto a la placa lateral lado libre, se pudo encontrar distintas frecuencias naturales que podrían llegar a ser excitadas por la velocidad de operación y entrar en resonancia.

**Figura 46**

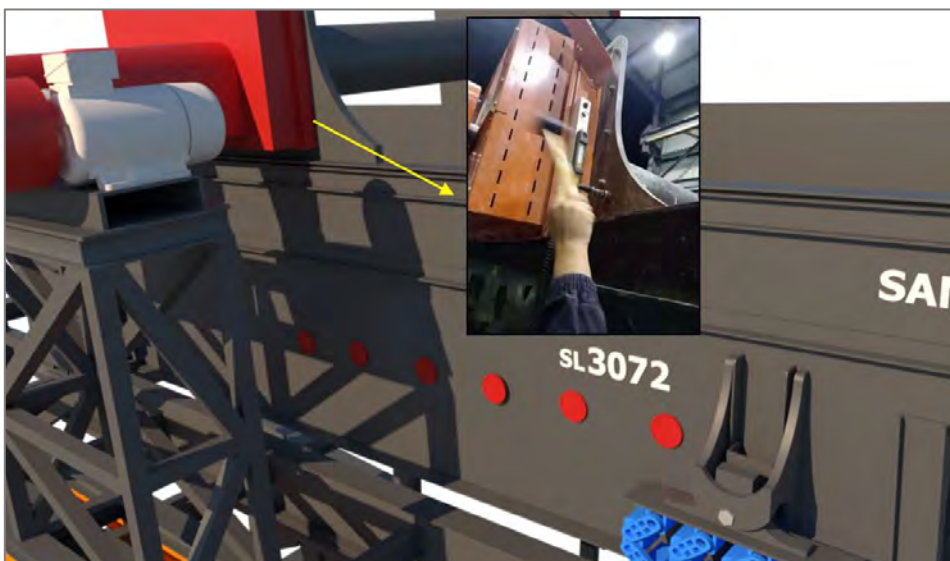
*Espectro de frecuencias naturales de la placa lateral lado libre*



En la figura 46 el espectro muestra picos que representan las frecuencias naturales de la placa lateral lado accionamiento, entre ellas (900 RPM y 1560 RPM), esta primera frecuencia de 900 RPM (15 Hz) se encuentra cercana a la velocidad de operación de la zaranda que es 930 RPM (15.5 Hz).

**Figura 47**

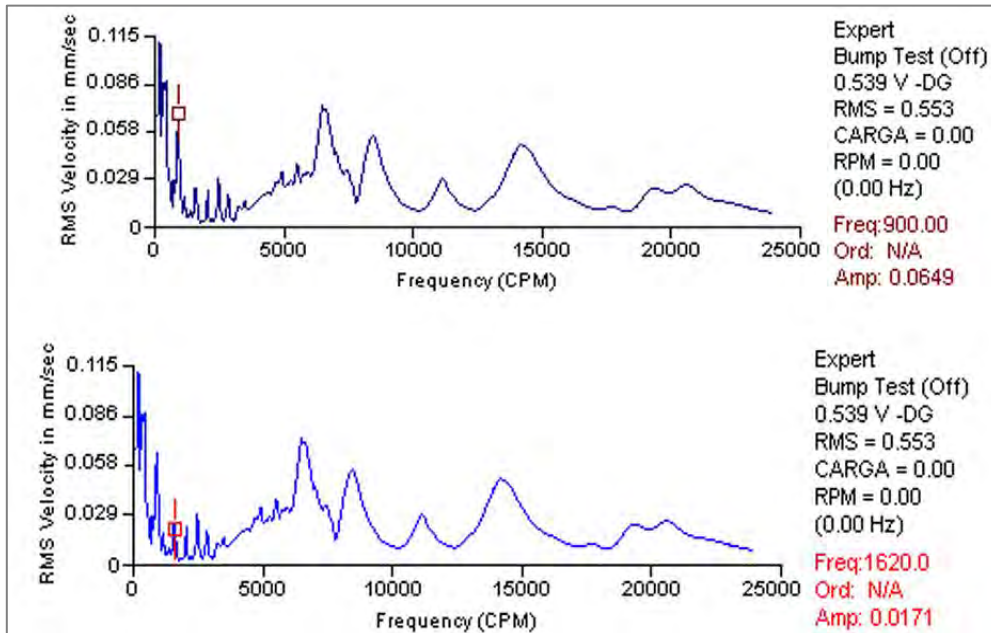
*Prueba de impacto en placa lateral lado accionamiento*



Durante la prueba de impacto a la placa lateral lado accionamiento, se pudo encontrar distintas frecuencias naturales que podrían llegar a ser excitadas por la velocidad de operación y entrar en resonancia.

**Figura 48**

*Espectro de frecuencias naturales de la placa lateral lado accionamiento*



En la figura 48 el espectro muestra picos que representan las frecuencias naturales de la placa lateral lado accionamiento, entre ellas (900 RPM y 1620 RPM), esta primera frecuencia de 900 RPM (15 Hz) se encuentra cercana a la velocidad de operación de la zaranda que es 930 RPM (15.5 Hz) (ver figura 48).

### **2.1.5 Técnica operating deflection shape (ODS)**

El análisis se realizó con el programa MScope, el cual permitió registrar datos de vibración a través de acelerómetros colocados en puntos clave de la zaranda. A partir de esa información, se generó un modelo animado que mostraba las deformaciones y movimientos de la estructura en distintas frecuencias de operación. Esto facilitó la identificación de problemas como resonancia, desalineación o solturas en componentes.

Una de las ventajas del ODS es que brinda una visión precisa del comportamiento vibratorio de la zaranda bajo condiciones reales de operación, lo que permite detectar anomalías que podrían no ser evidentes en una inspección visual común.

### 2.1.6 Modelamiento 3D del sistema

Para implementar correctamente la técnica ODS, fue necesario crear un modelo 3D a escala real de la zaranda en el programa Sketchup en donde se necesitó hacer un levantamiento de medidas en campo y consultar los planos de diseño del equipo.

Este modelo fue de gran importancia para definir los puntos de medición y comprender cómo las fuerzas dinámicas afectaban la estructura durante su operación.

El modelado permitió replicar con precisión las dimensiones de la zaranda, facilitando la visualización de los resultados del ODS. Además, ayudó a ubicar la data obtenida por los acelerómetros en posiciones clave. Al integrar el modelo 3D con los datos obtenidos del ODS en MEscape, se pudo ver de manera más clara cómo se comportaba el equipo, identificando zonas con mayor deflexión y posibles puntos críticos (ver figura 49).

**Figura 49**

*Modelado 3d renderizado - zaranda Sandvik SL 3072*



### 2.1.7 Puntos de medición seleccionados

Se seleccionaron varios puntos clave en la zaranda para medir vibraciones, con el fin de obtener un diagnóstico preciso de su comportamiento dinámico (ver figura 50). Estos puntos incluyeron:

**2.1.7.1 Placas laterales de la zaranda.** Se midió la vibración en ambas placas, áreas propensas a esfuerzos significativos por el movimiento del equipo y la interacción con los materiales procesados.

**2.1.7.2 Placas de los alojamientos.** Este punto es crítico, ya que permite detectar posibles desalineaciones o daños en los rodamientos.

**2.1.7.3 Vigas de soporte.** Se evaluaron las vigas que sostienen la zaranda para detectar vibraciones que podrían generar fatiga estructural.

**2.1.7.4 Resortes (rosta).** Los resortes, parte del sistema de amortiguación, fueron medidos para identificar fallos en la amortiguación o resonancias indeseadas.

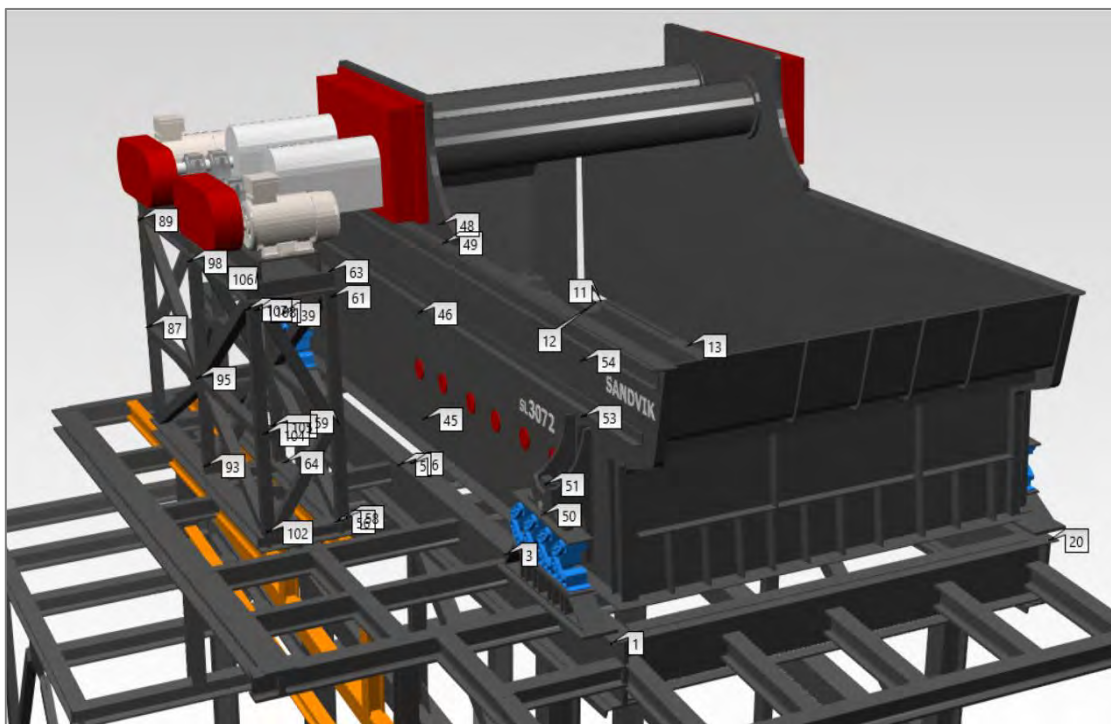
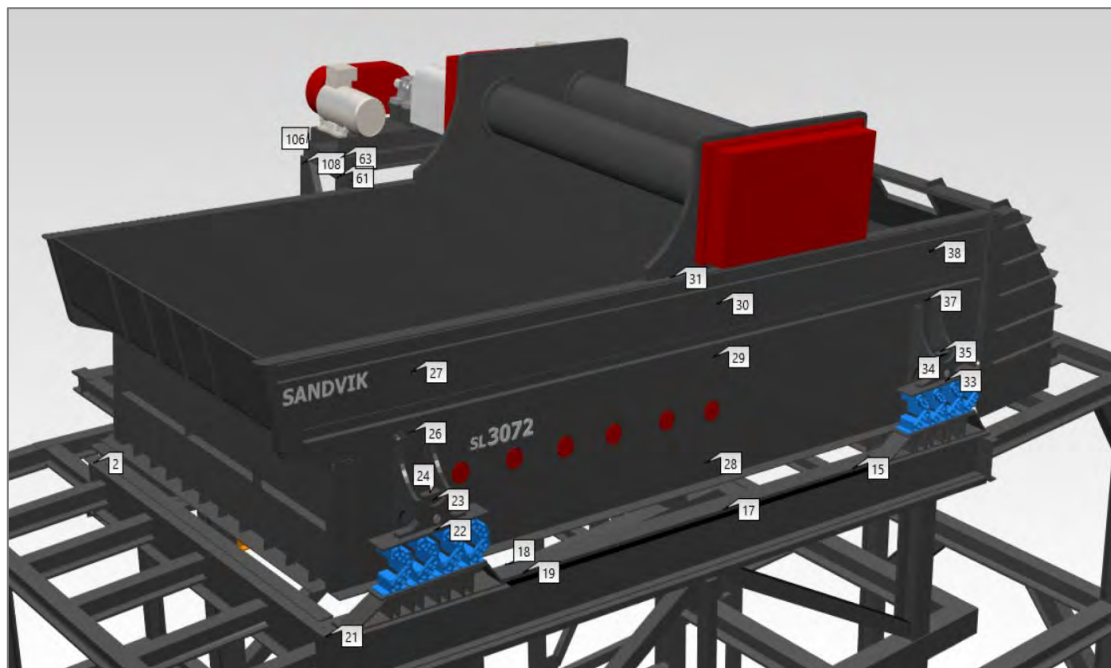
**2.1.7.5 Estructura de soporte de los motores.** Se midió en la estructura que soporta los motores para identificar problemas de vibración que puedan afectar la integridad de los motores y el rendimiento de la zaranda.

**Figura 50**

*Toma de datos de vibraciones en distintos puntos*



Las figuras 51 y 52 muestran las mediciones que se realizaron con los acelerómetros en cada punto seleccionado, permitiendo captar las vibraciones en tiempo real mientras el equipo estaba en operación. Esto proporcionó un perfil detallado de la vibración en los componentes, ayudando a prever posibles fallas o desgastes.

**Figura 51***Puntos de medición lado accionamiento***Figura 52***Puntos de medición lado libre*

### 2.1.8 Análisis (ODS) mediante software MEscape

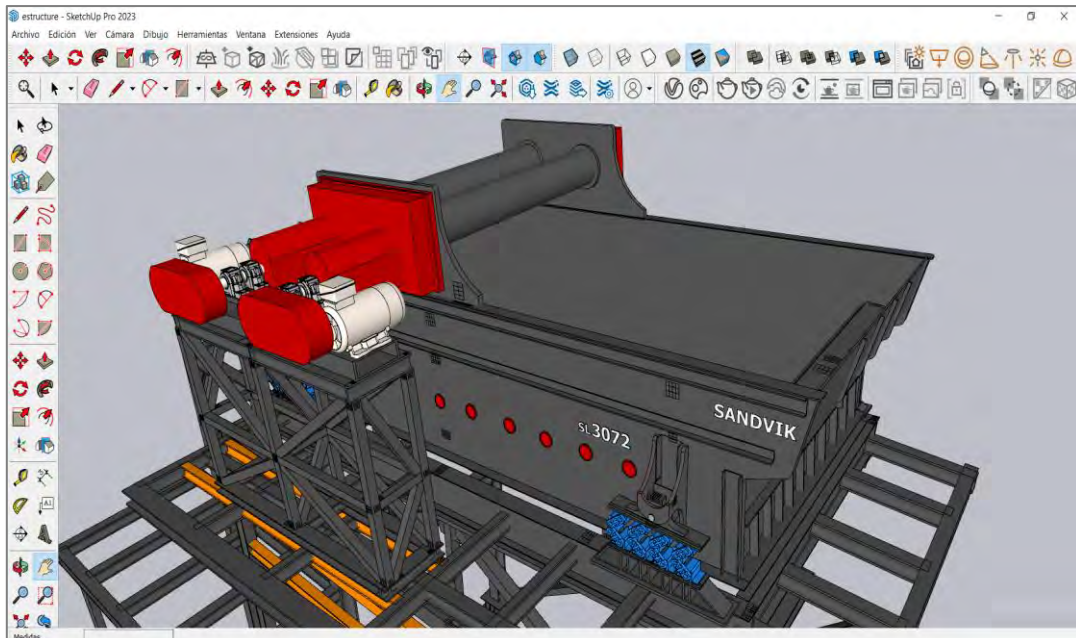
El análisis de deflexión de formas en operación (ODS) utilizando el programa MEscape ofrece una manera precisa de visualizar el comportamiento vibratorio de un equipo en condiciones de operación. Este proceso se fundamenta en la captura de datos de vibración en distintos puntos del equipo, además de la creación de un modelo 3D a escala que permite simular el movimiento de sus componentes. A continuación, se describen los pasos esenciales para realizar este análisis con el programa MEscape:

#### 2.1.8.1 Modelado 3D de la zaranda.

- **Creación del modelo.** El primer paso es construir un modelo tridimensional del equipo a estudiar. En este caso, la zaranda. Este modelo debe replicar con exactitud las dimensiones del equipo real para garantizar que la simulación se asemeje a las condiciones físicas del mismo (ver figura 53).
- **Definición de los puntos de medición en la zaranda.** En el modelo 3D, se marcan los puntos específicos donde se colocaron los sensores de vibración. Estos puntos corresponden a las ubicaciones de las mediciones reales en la estructura del equipo, para esto es necesario realizar una recolección fotográfica de los puntos tomados en campo para tener la ubicación exacta en el modelado 3D.

**Figura 53**

*Modelado 3D de zaranda en programa Sketchup*

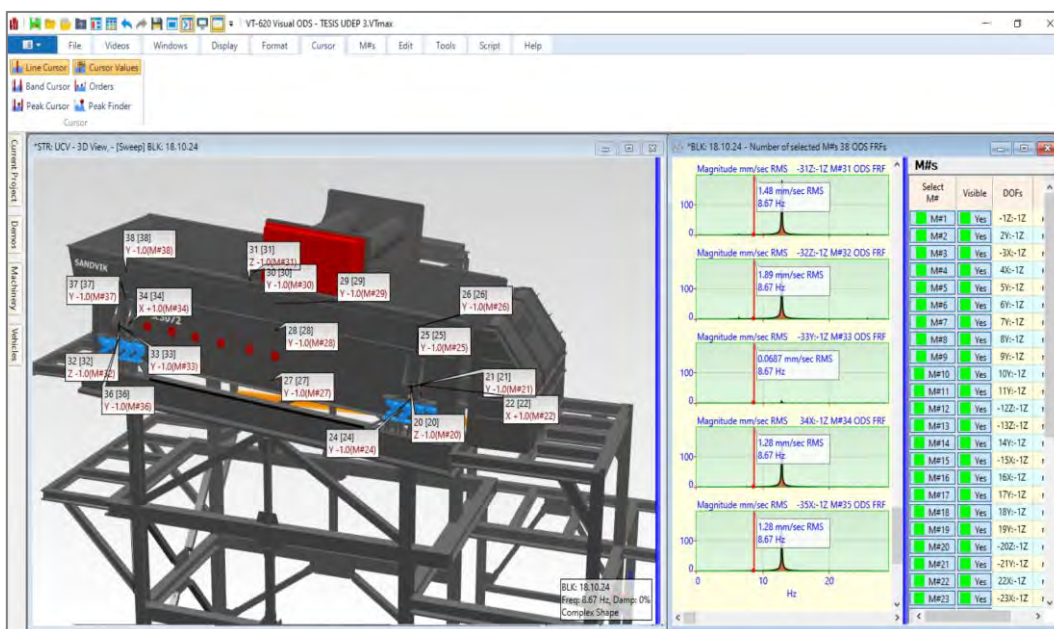


### 2.1.8.2 Carga de datos de vibración.

- **Importación de datos.** Los datos de vibración capturados en campo en distintas partes de la zaranda se cargan en el programa, que incluirá las frecuencias, amplitudes y fases medidas en cada punto. Es crucial asegurarse de que estos datos se vinculen correctamente con los nodos del modelo 3D.
- **Interpolación de puntos no medidos.** Si no se han tomado datos en todos los puntos del modelo, el programa aplica una interpolación, estimando el comportamiento vibratorio en los puntos que no tienen mediciones directas, basándose en los datos de puntos cercanos. Esto completa la representación del movimiento del equipo (ver figura 54).

**Figura 54**

*Importación de data de vibración y modelado 3D*



### 2.1.8.3 Configuración de la simulación ODS.

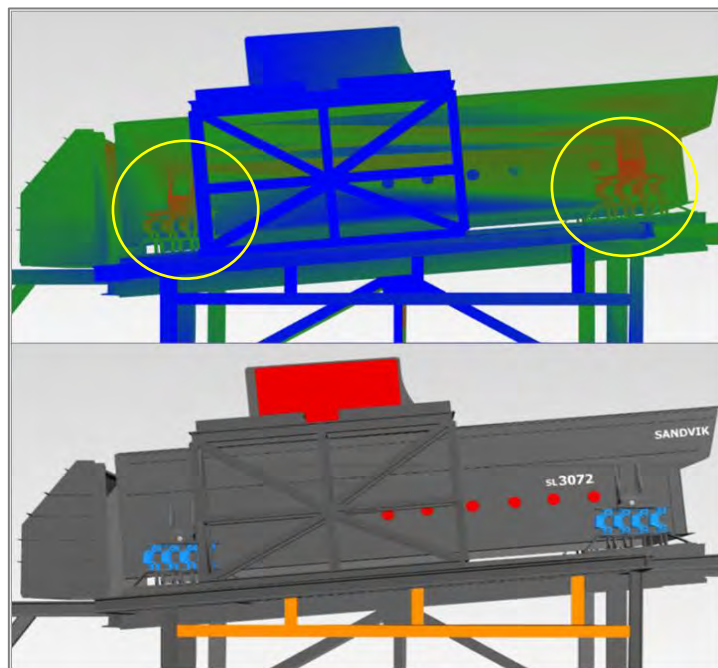
- **Selección de frecuencias de interés.** Se eligen las frecuencias clave para el análisis, ya sea la frecuencia de operación del equipo o frecuencias críticas detectadas en análisis previos.
- **Generación de modos de vibración.** El software calcula cómo se deflexiona el equipo a cada frecuencia seleccionada, con base en los datos de vibración de los puntos medidos.

#### 2.1.8.4 Simulación del comportamiento dinámico de la zaranda.

- **Animación del comportamiento.** MEscape genera una animación que muestra cómo vibra el equipo. Esto permite identificar visualmente las áreas que presentan mayores deflexiones mediante un mapa de calor (ver figura 55).
- **Evaluación del comportamiento dinámico.** La simulación ayuda a identificar resonancias o movimientos anómalos en la estructura, lo que permite correlacionar estas vibraciones con posibles problemas estructurales.

**Figura 55**

*Mapa de calor resalta la alta amplitud de vibración*



#### 2.1.8.5 Análisis de resultados.

- **Identificación de fallos estructurales.** El análisis revela cómo se desplazan las diferentes partes del equipo, permitiendo detectar fallas como deflexiones excesivas, resonancias o solturas mecánicas.
- **Recomendaciones.** Con los resultados obtenidos, se pueden realizar ajustes, como la modificación de la velocidad de operación o el refuerzo de ciertas áreas críticas de la estructura.

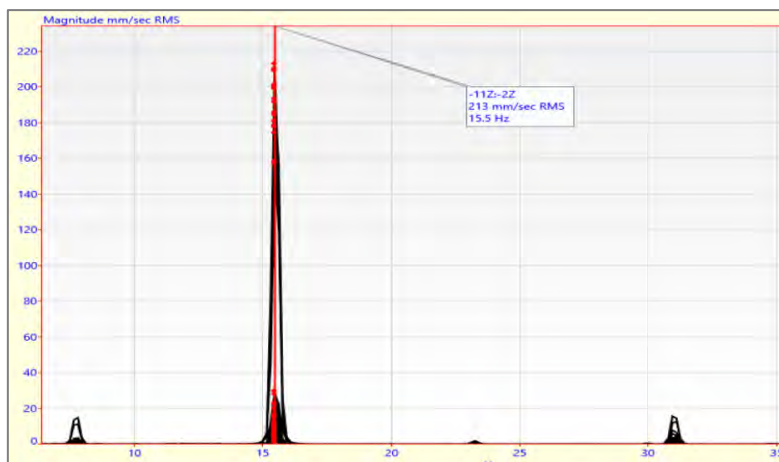
Este análisis de vibraciones avanzado de ODS mediante MEscape permite una comprensión profunda del comportamiento vibratorio de la zaranda, brindando información clave para la toma de decisiones en el mantenimiento y operación del equipo.

## 2.1.9 Simulación de frecuencias forzadas

**2.1.9.1 Simulación bajo condiciones iniciales.** Se realizó una simulación a la frecuencia de 15.5 Hz (930 RPM), seleccionada debido a que es la frecuencia predominante en el espectro de vibración, pues corresponde a la velocidad de operación del equipo (ver figura 56). Esta frecuencia refleja las condiciones normales de funcionamiento de la zaranda y es fundamental para analizar cómo las vibraciones afectan su comportamiento dinámico. La simulación permitió observar con precisión los patrones de movimiento del equipo bajo la influencia de esta frecuencia forzada (ver figuras 57 y 58).

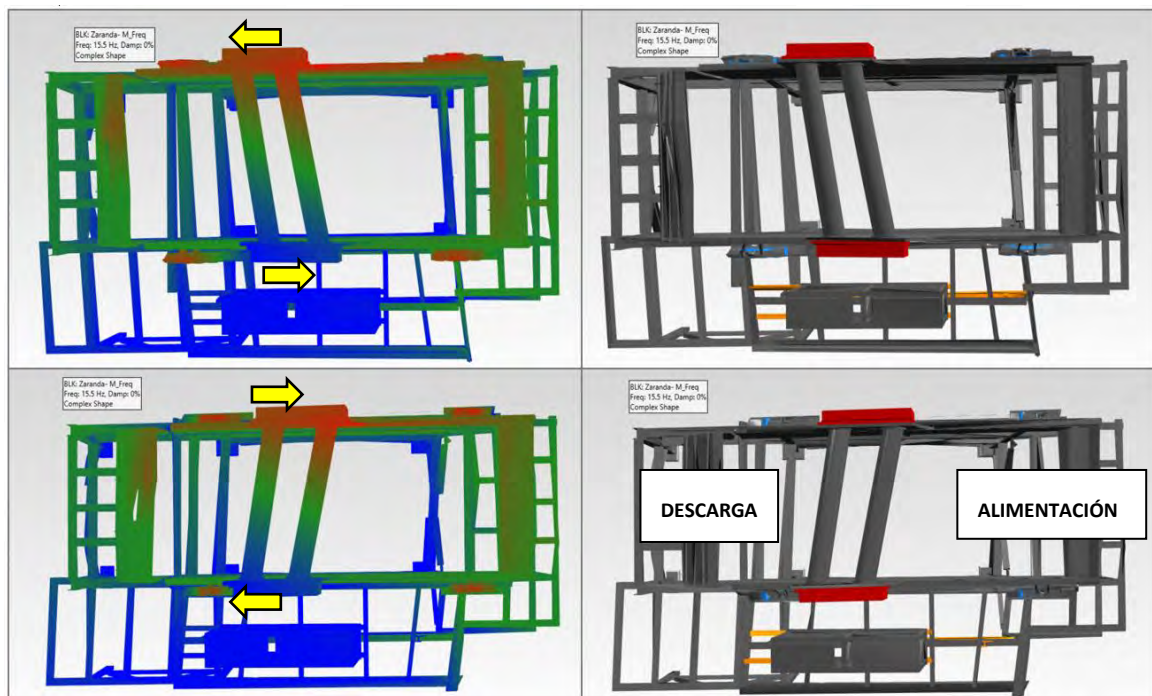
**Figura 56**

*Frecuencia predominante 15.5 Hz en el espectro de vibración*



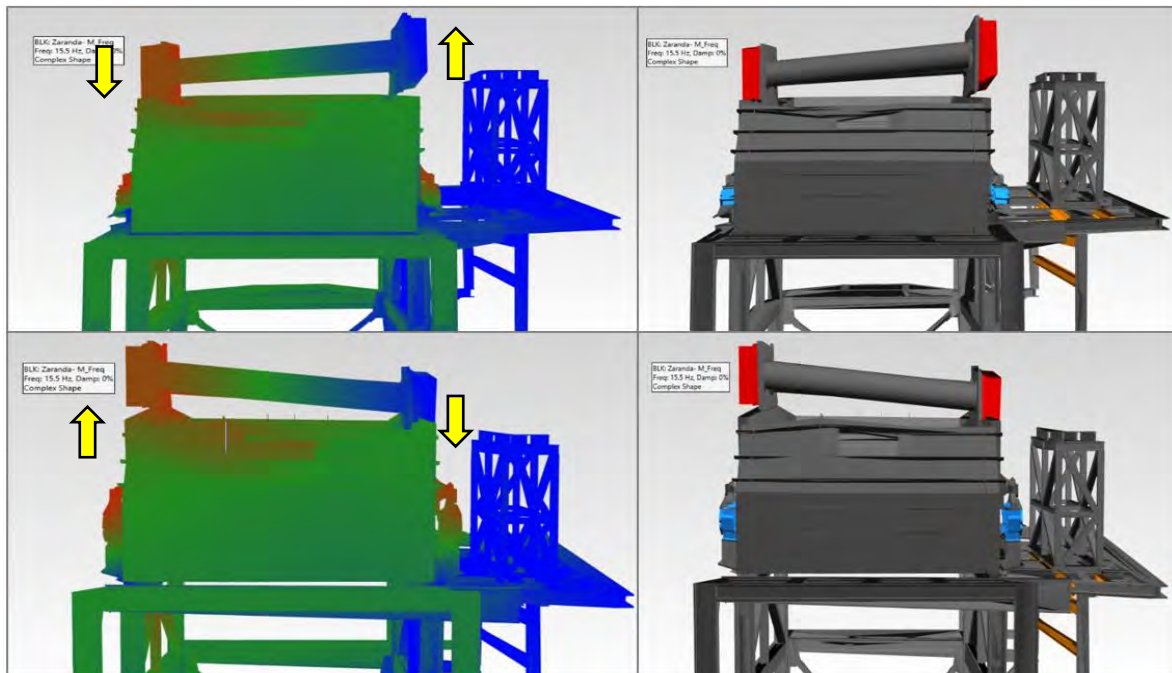
**Figura 57**

*Vista de planta de la primera simulación (deflexión de placas laterales)*



**Figura 58**

*Vista frontal de la primera simulación de la zaranda*



Los resultados de la simulación de ODS revelaron que las placas laterales de la zaranda presentaban movimientos en direcciones opuestas. Este comportamiento confirma que la zaranda está entrando en resonancia, activando algún modo de deflexión natural del equipo que generan un movimiento indeseado en las estructuras. La interacción entre la frecuencia de operación y los modos naturales de vibración del sistema es un factor clave que influye en estos desplazamientos.

Asimismo, se identificó que este movimiento opuesto de las placas laterales podría estar afectando directamente las tolerancias de los rodamientos en los alojamientos de la transmisión. La vibración generada en las placas laterales podría estar produciendo esfuerzos adicionales al eje, contribuyendo al aumento de las temperaturas en los rodamientos. Esto podría explicar las elevadas temperaturas registradas, que alcanzaron hasta 98.3 °C, lo cual excede los valores normales de operación y aumenta el riesgo de daños prematuros en estos componentes críticos.

Durante la simulación ODS a la frecuencia de 15.5 Hz (930 RPM), se evidenció que las placas laterales de la zaranda entraban en resonancia, debido a que la velocidad de operación estaba cercana a una de las frecuencias naturales de las placas, como se comprobó en el ensayo de impacto. Para disminuir el sobrecalentamiento de los rodamientos de los ejes, se consultó el manual del fabricante, donde se indica que es recomendable reducir la velocidad de operación en tales situaciones (ver figura 59).

**Figura 59**

*Solución de problemas frecuentes, según manual Sandvik*

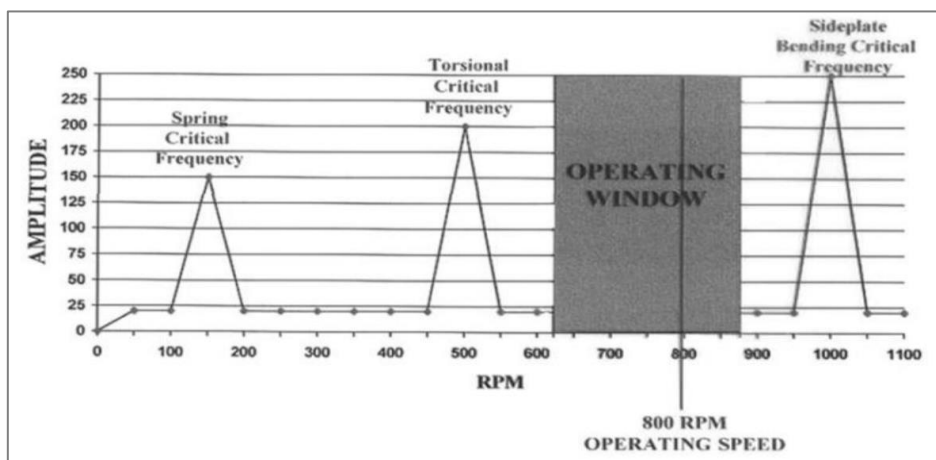
Sobrecalentamiento de rodamientos de zaranda	1	Cantidad incorrecta de aceite en el eje vibratorio.	Revisar el nivel de aceite.
	2	Tipo incorrecto o aceite degradado en el eje.	Realizar cambio de aceite.
	3	Daños en los rodamientos.	Inspeccionar el rodamiento dañado
	4	Altas temperaturas en el ambiente o material.	Disponer de ventilación externa y cambie el aceite adecuado para altas temperaturas.
	5	Velocidad demasiado alta.	Reducir la velocidad.

*Nota.* Imagen tomada de Vibrating screens maintenance, por Sandvik, s.f.

Además, la norma VSMA 1998 establece una ventana de operación entre 625 y 875 RPM, ya que las frecuencias resonantes en diferentes tipos y tamaños de zarandas describen modos y límites similares, así como un rango óptimo de operación. Esta norma identifica tres frecuencias críticas en las zarandas: la frecuencia crítica de los resortes, la frecuencia crítica torsional y la frecuencia crítica de flexión de las placas laterales (ver figura 60).

**Figura 60**

*Ventana de operación óptimo para evitar resonancias, norma VSMA 1998*



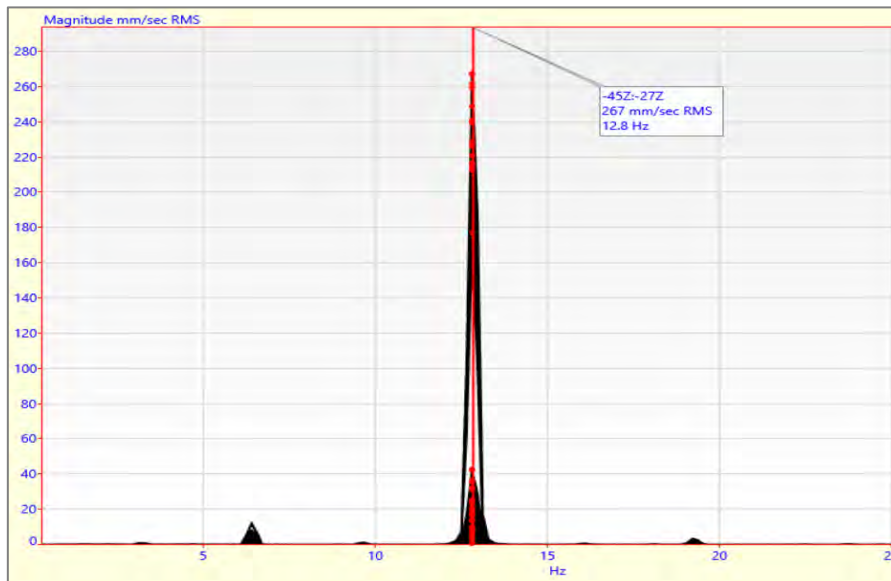
*Nota.* Imagen tomada de Diseño de un módulo educativo a escala de una zaranda vibratoria (p. 17), por L. León, 2019, Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica Del Perú.

Con base en esta información, en una parada de planta programada se decidió ajustar la velocidad de la zaranda, por lo que se procedió a realizar el cambio de tamaño de poleas, debido a que no se contaba con variador de velocidad, logrando una reducción de la velocidad de operación a 12.8 Hz (768 RPM).

**2.1.9.2 Simulación bajo condiciones finales.** Después de realizarse los trabajos de cambio de velocidad de la zaranda de 15.5 Hz (930 RPM) a 12.8 Hz (768 RPM), se procede a simular la nueva frecuencia predominante del sistema (ver figura 61). Esta frecuencia es importante para analizar cómo las vibraciones influyen en el comportamiento dinámico de la zaranda tras el ajuste de velocidad.

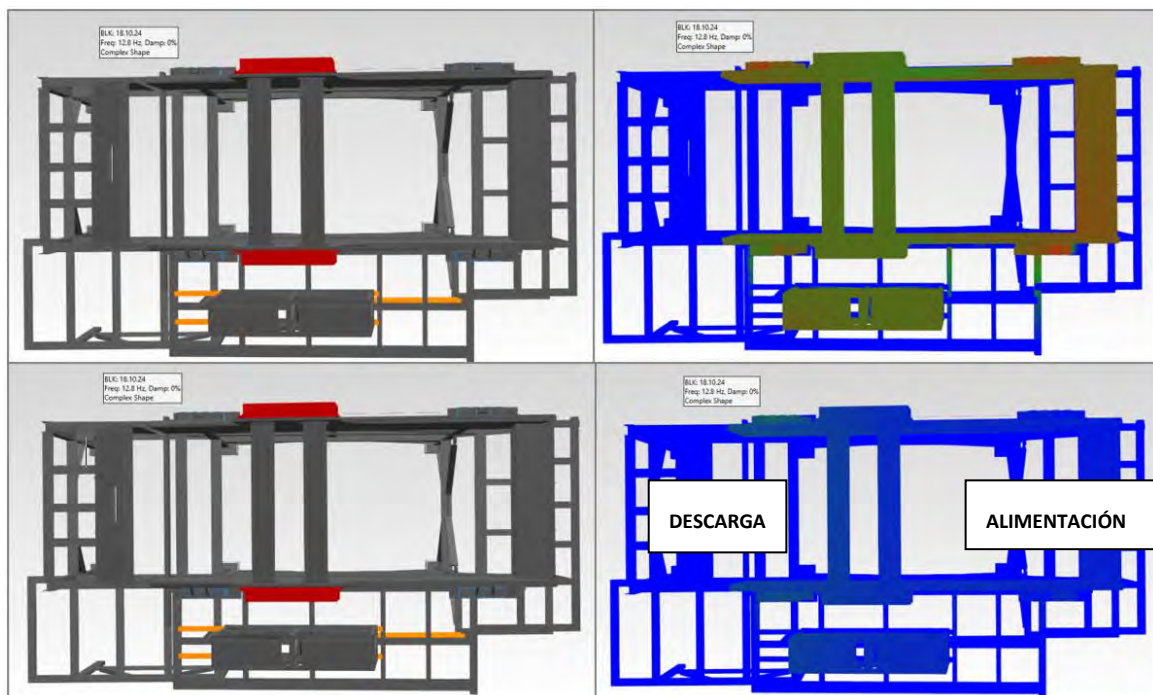
**Figura 61**

*Frecuencia predominante 12.8 Hz en el espectro de vibración*



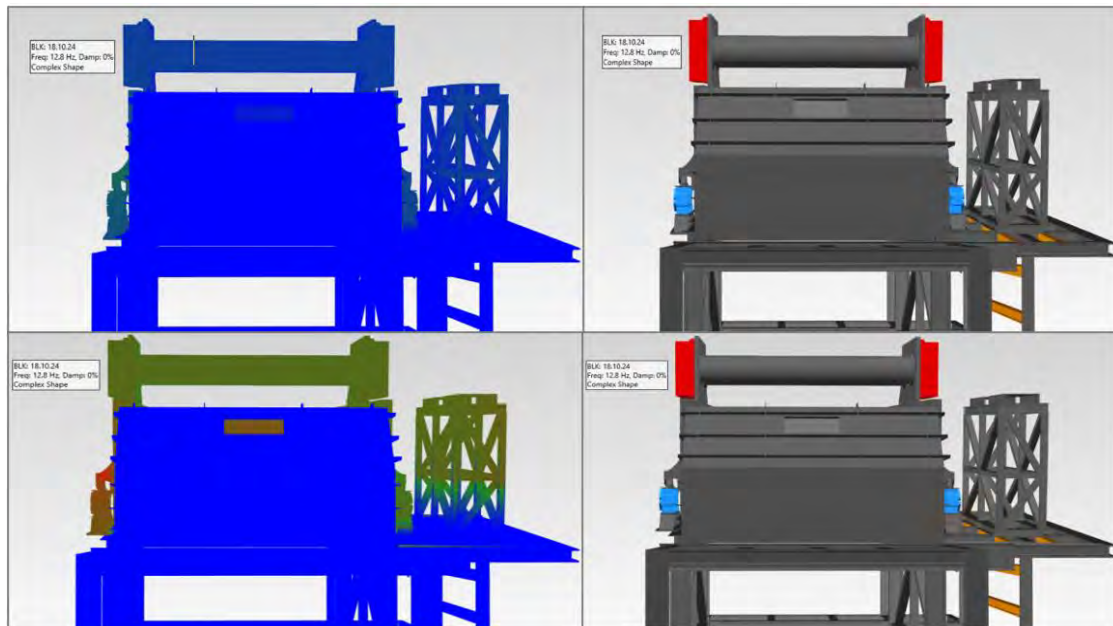
**Figura 62**

*Vista de planta de la segunda simulación de la zaranda*



**Figura 63**

*Vista frontal de la segunda simulación de la zaranda*

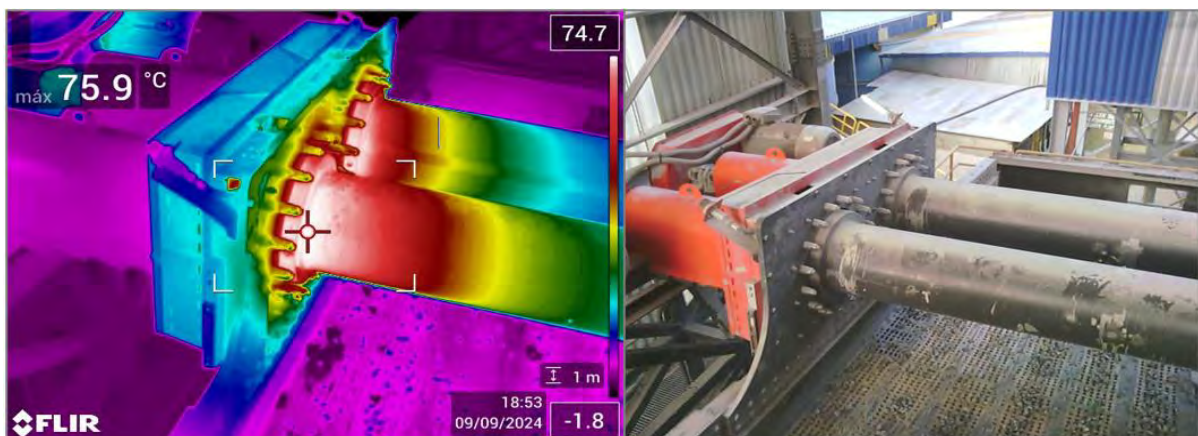


Después del cambio de velocidad a 12.8 Hz (768 RPM), En las figuras 62 y 63 la simulación de ODS muestra que la zaranda ya no presenta deflexión en sus placas laterales, lo cual sucedía cuando operaba a 15.5 Hz (930 RPM). En esa condición, la deflexión de las placas laterales afectaba directamente el aumento de temperatura en los rodamientos.

Este nuevo comportamiento sugiere que la zaranda ha dejado de entrar en resonancia, evitando la activación de algún modo de deflexión natural del equipo. Para corroborar si ha ocurrido algún cambio en la temperatura en los rodamientos de la zaranda, se realizó una inspección con termografía infrarroja a esta nueva velocidad de operación como se puede observar en las figuras 64 y 65.

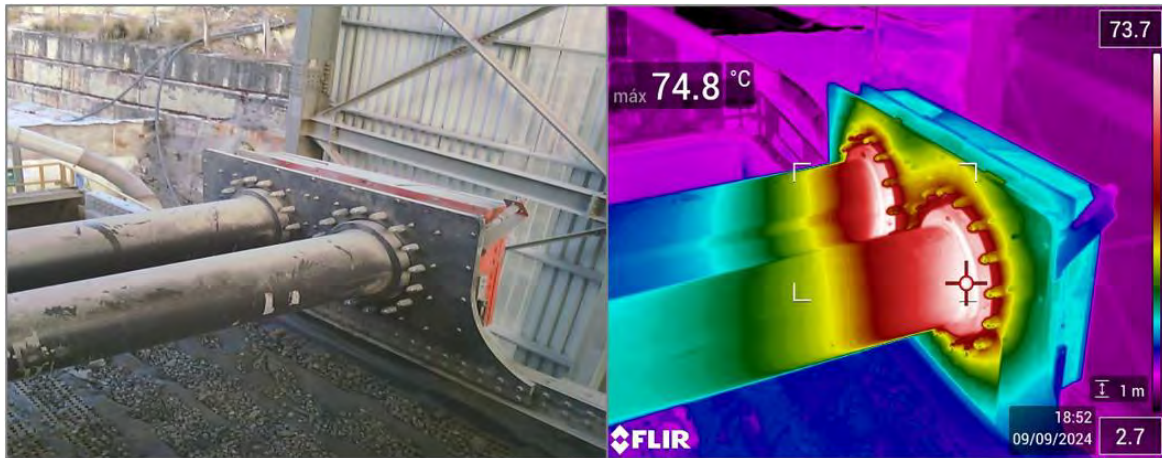
**Figura 64**

*Temperatura máxima 75.9 °C alojamientos lado accionamiento*



**Figura 65**

Temperatura mínima 74.8 °C alojamientos lado libre



Al realizarse la inspección termográfica a la zaranda, específicamente a los alojamientos de los rodamientos. Se observa que la temperatura máxima registrada es de 75.9 °C, lo que representa una disminución de 22.4 °C en comparación con las condiciones iniciales.

Esto indica que al no existir una deflexión de las placas laterales ha favorecido la disminución de temperatura en los rodamientos, pudiendo trabajar en un rango de temperatura recomendado por el fabricante.

También se pudo evidenciar que los niveles de vibración en la parte central de las placas laterales disminuyeron, como podemos apreciar en la tabla 7.

**Tabla 7**

Tabla de niveles de vibración de placa laterales después del cambio de velocidad

PLACA	UBICACIÓN	PUNTO	VALOR	UNIDAD	PLACA	UBICACIÓN	PUNTO	VALOR	UNIDAD
PLACA LATERAL LADO ACCIONAMIETO	EXTREMO	6Y	7.94	mm/s2	PLACA LATERAL LADO LIBRE	-25Y	EXTREMO	13.38	mm/s2
	EXTREMO	7Y	6.81	mm/s2		-26Y	EXTREMO	9.78	mm/s2
	MEDIO	8Y	8.49	mm/s2		-27Y	MEDIO	7.46	mm/s2
	MEDIO	9Y	10.76	mm/s2		-28Y	MEDIO	7.99	mm/s2
	MEDIO	10Y	8.53	mm/s2		-29Y	MEDIO	5.47	mm/s2
	MEDIO	11Y	5.64	mm/s2		-30Y	MEDIO	8.46	mm/s2
	EXTREMO	18Y	13.57	mm/s2		-37Y	EXTREMO	4.84	mm/s2
EXTREMO	19Y	14.10	mm/s2	-38Y	EXTREMO	6.56	mm/s2		

### **2.1.10 Diagnóstico del sistema**

La simulación realizada a una frecuencia de 15.5 Hz (930 RPM) mostró el comportamiento dinámico de la zaranda bajo sus condiciones normales de operación donde se logró identificar que las placas laterales, presentaban movimientos en direcciones opuestas. Este comportamiento sugería que la zaranda estaba entrando en resonancia, lo que provocaba una deflexión no deseada en las estructuras del equipo. Se observó que las vibraciones de las placas laterales se transmitían hacia los alojamientos de los rodamientos, generando esfuerzos adicionales en el eje y contribuyendo al aumento de temperatura de los rodamientos, alcanzando hasta 98.3 °C, un valor superior al límite recomendado para su correcto funcionamiento.

El análisis confirmó que la velocidad de operación de la zaranda estaba próxima a una de las frecuencias naturales de las placas laterales. Como resultado, se activaba un modo de deflexión que causaba sobrecalentamiento en los rodamientos. Se decidió reducir la velocidad de operación, siguiendo las recomendaciones del fabricante y de la norma VSMA 1998, la cual establece un rango de operación óptimo entre 625 y 875 RPM, para evitar estos problemas.

Durante una parada programada de la planta, se ajustó la velocidad de operación a 12.8 Hz (768 RPM), alejando la zaranda de la frecuencia crítica de las placas laterales. Posteriormente, se realizó una nueva simulación ODS a esta velocidad para evaluar su impacto.

Se observó una significativa disminución en los valores de vibración en las placas laterales de la zaranda. En la parte central, los niveles de vibración pasaron de 24.3 mm/s<sup>2</sup> a 10.76 mm/s<sup>2</sup>, lo que indica una mejora considerable en el comportamiento dinámico de la estructura después de la disminución de la velocidad de operación.

En las condiciones finales, la simulación ODS evidenció que las placas laterales ya no presentaban deflexiones, lo que indicaba que la zaranda había dejado de entrar en resonancia. Este ajuste evitó los modos de deflexión naturales indeseados. Para comprobar si el ajuste de velocidad había influido en la temperatura de los rodamientos, se realizó una inspección termográfica, registrando una temperatura máxima de 75.9 °C, lo que representa una disminución de 22.4 °C respecto a las condiciones iniciales.

## Conclusiones

El análisis vibracional es una gran herramienta que no solo puede usarse en equipos rotativos, sino también en estructuras, como fue el caso de las placas laterales de la zaranda en donde se encontraron niveles altos de vibración de hasta 24.3 mm/s<sup>2</sup>.

La simulación de ODS en condiciones iniciales a la frecuencia forzada de 15.5 Hz (930 RPM) muestra un modo de deflexión de las placas laterales que causaba un sobrecalentamiento significativo en los alojamientos de los rodamientos, con temperaturas que alcanzaron los 98.3 °C, debido a que la zaranda operaba a una velocidad cercana a una de las frecuencias naturales de las placas laterales.

La simulación de ODS en condiciones finales a la frecuencia forzada de 12.8 Hz (768 RPM) no mostró ningún modo de deflexión de placas laterales, lo que indica que se logró controlar el fenómeno de resonancia y, como resultado, se obtuvo una disminución de la temperatura en los alojamientos de los rodamientos, alcanzando un valor de 75.9 °C.

La reducción de las vibraciones en las placas laterales de la zaranda, de 24.3 mm/s<sup>2</sup> a 10.76 mm/s<sup>2</sup> en la parte central, indica una mejora en el comportamiento dinámico tras la disminución de la velocidad de operación.

La inspección termográfica confirmó que el ajuste de velocidad de zaranda fue efectivo al evidenciar una disminución de 22.4 °C respecto a las condiciones iniciales en los alojamientos de los rodamientos. Esto asegura que los rodamientos se mantengan dentro del rango adecuado según lo especificado por el fabricante.

La técnica avanzada de ODS fue determinante para identificar con precisión las áreas afectadas por la resonancia a través del mapa de calor. Sin esta técnica, no habría sido posible observar el comportamiento dinámico de la zaranda, ya que el ODS permite detectar aspectos que el ojo humano no puede percibir a simple vista, como las deformaciones por flexión que generan esfuerzos de tensión y compresión en las placas lateral donde se ubican alojamientos de los rodamientos. Esto brinda una comprensión más profunda de cómo interactúan los componentes durante su funcionamiento.

En el análisis dinámico realizado a los motores de la zaranda, se verificó que ambos operan dentro de los límites establecidos por la norma NEMA MG-1. En el motor 1, se detectó un desbalance de voltaje del 0.26 %, y en el motor 2, del 0.28 %, valores que se encuentran dentro del límite permisible del 3 %. En cuanto al desbalance de corriente, el motor 1 registró un 3 %, mientras que el motor 2 presentó un 3.1 %, ambos dentro del rango permitido del 10 %. Estos resultados confirman que los motores están funcionando en condiciones adecuadas.

Sin embargo, es importante mantener un monitoreo constante para identificar cualquier variación que pueda afectar su rendimiento o eficiencia.

La integración de técnicas predictivas como el análisis vibracional avanzado, la termografía infrarroja y el análisis dinámico de motores constituye una herramienta eficaz para el monitoreo de condición de una zaranda de mineral, permitiendo detectar posibles fallos de manera anticipada y facilitando la toma de decisiones de mantenimiento antes de que ocurran paradas no planificadas.



## Recomendaciones

Se recomienda operar la zaranda a una velocidad de 12.8 Hz (768 RPM), considerando que la simulación de ODS ha demostrado que esta frecuencia de trabajo evita la resonancia y disminuye el riesgo de sobrecalentamiento en los rodamientos.

Para equipos de mayor complejidad y magnitud, como una zaranda vibratoria, es recomendable realizar un análisis modal de la estructura; sin embargo, el ensayo de impacto fue una alternativa útil para identificar las frecuencias naturales de las placas laterales, proporcionando resultados de igual similitud.

Continuar con el monitoreo de condición de la zaranda mediante las técnicas predictivas de vibraciones, análisis dinámico y termografía para asegurar la correcta operación del equipo y prevenir posibles fallas futuras.

Durante una parada de planta programada, inspeccionar las placas laterales internamente, específicamente las vigas de unión entre placas, para verificar que no existan signos de desgaste o fatiga estructural que con el tiempo pueda llegar a disminuir su rigidez y generar problemas de resonancia futuros.

Continuar aplicando la norma VSMA 1998 como referencia para asegurar que la zaranda opere dentro de un rango seguro de frecuencias, evitando zonas críticas que puedan comprometer la integridad de sus componentes.

Se recomienda realizar levantamientos topográficos periódicos para verificar la nivelación de las vigas base de la zaranda vibratoria, con el fin de asegurar que el equipo funcione de manera adecuada y nivelada. Trabajar de forma desalineada podría comprometer la integridad de la zaranda y sus componentes, lo que podría provocar una concentración de esfuerzos en las placas laterales y los resortes (rosta).

Ante un nuevo aumento significativo en la temperatura de los rodamientos, se recomienda coordinar con el fabricante una evaluación mediante análisis por elementos finitos para aumentar la rigidez de la placa. Esto permitirá desplazar la frecuencia natural y mejorar el comportamiento del equipo.

## Referencias

- AIAG & VDA. (2019). Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) Handbook. Automotive Industry Action Group (AIAG) y Verband der Automobilindustrie (VDA).
- Bin Zahid, F., Ong, Z. C., & Khoo, S. Y. (2020). A review of operational modal analysis techniques for in-service modal identification. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(7), Article 345. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02448-0>
- Brincker, R. (2014). Some elements of operational modal analysis. *Advances in Acoustics and Vibration*, 2014(Article ID 746418). <https://doi.org/10.1155/2014/746418>
- Buehrle, R. D., & Kappus, K. (2003). Operating Deflection Shapes for the Space Shuttle Partial Stack Rollout. NASA Langley Research Center. [Technical Report]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20050081825>
- Chen, S., Li, B., Cao, J., Mao, B. (2018). Research on Agricultural Environment Prediction Based on Learning. *Procedia Comput.* <https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2018.10.214>
- Cronholm, M. (s.f.). Curso de termografía infrarroja Nivel I. Infrared Training Center.
- Fundación Euskampus. (2016). El espectro electromagnético. En *Cultura Científica*. Obtenido de <https://www.culturacientifica.com/2016/08/16/el-espectro-electromagnetico/>.
- Jacobsen, N.-J., & Andersen, P. (n.d.). Operational Modal Analysis on structures with rotating parts: Enhanced algorithms and practical considerations. Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S; Structural Vibration Solutions A/S.
- Kadushin, D., & Mais, J. (2008, February). Operating deflection shape analysis: Principles and procedures of ODS analysis, applied to industrial fan. Artículo SKF. [https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d1968019d891/pdf\\_preview\\_medium/0901d1968019d891\\_pdf\\_preview\\_medium.pdf](https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d1968019d891/pdf_preview_medium/0901d1968019d891_pdf_preview_medium.pdf)
- Lara, H. S., Silva, J. N., & Brito, J. N. (2022). Study of the behavior of an irregular mechanical system through operational deflection analysis. *Brazilian Journal of Development*, 8(8). <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/51379/38542>
- León Paro, Luis. (2019). Diseño de un módulo educativo a escala de una zaranda vibratoria [Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/15412>
- Limaymanta Sierra, Paulo Claudio. (2022). Análisis de calidad en motores de inducción mediante pruebas eléctricas en régimen dinámico [Tesis de pregrado en Ingeniería Eléctrica, Universidad Continental]. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/11858>

- López Lamadrid, Cesar Miguel. (2013). Evaluación, rediseño y validación de estructuras mediante análisis vibracional por funciones avanzadas [Tesis de pregrado en Ingeniería Mecánica Eléctrica, Universidad de Piura]. <https://pirhua.udep.edu.pe/item/997be04b-5995-4b89-99b5-3bac72272578>
- Power-MI. (s.f.). Detección y eliminación de resonancias. En Power-MI. Obtenido de <https://www.power-mi.com/es/content/detecci%C3%B3n-y-eliminaci%C3%B3n-de-resonancias>.
- Power-MI. (s.f.). Estudio de las vibraciones. En Power-MI. Obtenido de <https://www.power-mi.com/es/content/estudio-de-las-vibraciones>.
- Quispe Ramos, Jaime. (2013). Metodología de mantenimiento predictivo para el diagnóstico de motores eléctricos mediante termografía infrarroja [Tesis de Maestría de Mantenimiento, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia]. <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/29745>
- Richardson, M. H., (February, 1997). Is It a Mode Shape or an Operating Deflection Shape? Sound and Vibration Magazine.
- Saavedra, P. (s.f.). Análisis de vibraciones de máquinas Categoría II. Universidad de Concepción.
- Schwarz, B., & Richardson, M. (January, 2004). Measurements required for displaying operating deflection shapes. Vibrant Technology, Inc., Jamestown, CA. <https://www.vibetech.com/resources/technical-papers/>
- SKF. (s.f.). Components and materials. En SKF. Obtenido de <https://www.skf.com/pe/products/rolling-bearings/principles-of-rolling-bearing-selection/general-bearing-knowledge/bearing-basics/components-and-materials>.
- SKF. (s.f.). Vibration sensors. En SKF. Obtenido de <https://www.skf.com/uy/products/condition-monitoring-systems/sensors/vibration-sensors>.
- Vold, H., Schwarz, B., & Richardson, M. H. (Febrero, 2000). Measuring Operating Deflection Shapes Under Non-Stationary Conditions. Proceedings of the 18th International Modal Analysis Conference, Kissimmee, Florida.
- Zhang L., Brincker R. (2005). An overview of operational modal analysis: major development and issues. In: 1st international operational modal analysis conference, 2005. Aalborg University, pp 179–190.