

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Mecánica



TESIS

**Aplicación de métodos de análisis de vibraciones para la
identificación de fallas en Bomba Centrífuga**

Para obtener el Título Profesional de Ingeniero Mecánico

Elaborado por

Luis Felipe Sanchez Guevara

 [0009-0006-9832-3984](#)

Asesor

Msc. Martin Andre Alburqueque Castillo

 [0000-0001-9020-9104](#)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	(Sanchez, 2025)
Referencia/Reference	Sanchez, L. (2025). <i>Aplicación de métodos de análisis de vibraciones para la identificación de fallas en bomba centrífuga</i> . [Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

Dedicado a mis padres y a todas las personas
que me han apoyado a lo largo de mi carrera.

Agradecimientos

Agradezco a mi asesor de tesis, el Ing. Martín André Alburqueque, a los técnicos que me han ayudado en el laboratorio y a mis excompañeros de la FIM que me han ayudado con mis consultas

Resumen

El presente trabajo trata de la aplicación de métodos de análisis de vibraciones a una bomba con base flexible de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) para identificar fallas. Los métodos incluyen: análisis de criticidad ISO 20816, análisis espectral, análisis de tiempo frecuencia STFT, análisis wavelet y análisis envelope. Se realizaron mediciones en 6 condiciones operativas y en 4 posiciones.

Se logró con éxito la aplicación de los diferentes métodos de análisis de vibraciones. La descripción de la forma de onda nos da un panorama general de las vibraciones siendo la mayoría uniformes, excepto en la posición axial del lado libre de la bomba. La evaluación de la severidad de vibraciones clasificó las vibraciones más importantes. Con el análisis espectral, análisis tiempo-frecuencia y análisis wavelet se pudo identificar las diferentes fallas en la bomba. En el análisis de tiempo frecuencia STFT y wavelet se pudieron visualizar las vibraciones caóticas cerca de la bomba. La wavelet que logró ser más precisa en descomponer la señal fue la Wavelet Morlet Compleja. Los valores de aceleración envelope fueron buenos y satisfactorios, sin embargo, se recomienda verificar los rodamientos con mayor nivel de aceleración envelope.

Se identificaron varias fallas. La falla más crítica es el desalineamiento del motor-bomba, además existe la presencia de vibraciones relacionadas con fallas en el estator. En la bomba la presencia de frecuencias caóticas está relacionada con fuerzas hidráulicas y posible recirculación. Existe vibraciones con frecuencias de fallas de los rodamientos en el lado acoplado motor y bomba.

Palabras clave — Análisis de vibraciones, bombas centrífugas, Transformada Wavelet, Transformada Fourier.

Abstract

This work deals with the application of vibration analysis methods to a pump with flexible base at the Mechanical Engineering Faculty of Engineering National University to identify faults. The methods include: ISO 20816 criticality analysis, spectral analysis, time-frequency (STFT) analysis, wavelet analysis, and envelope analysis. Measurements were taken under 6 operating conditions and in 4 positions.

The successful application of different vibration analysis methods was achieved. The waveform description gives an overall picture of the vibrations, with most being uniform except in the axial position on the free side of the pump. The vibration severity assessment classified the most significant vibration levels. Spectral analysis, time-frequency analysis, and wavelet analysis helped identify different faults in the pump. Time-frequency (STFT) and wavelet analysis visualized chaotic vibrations near the pump. The most precise wavelet for signal decomposition was the Complex Morlet Wavelet. The envelope acceleration values were satisfactory; however, it is recommended to check the bearings with higher envelope acceleration levels.

Several faults were identified. The most critical fault is the misalignment of the motor-pump. Additionally, there are vibrations related to stator faults. In the pump, the presence of chaotic frequencies is related to hydraulic forces and recirculation. There are vibrations with bearing fault frequencies in the motor and pump coupled sides.

Keywords — Vibration analysis, centrifugal pumps, Wavelet Transform, Fourier Transform.

Tabla de contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xix
Capítulo I. Planteamiento de la Realidad Problemática.....	1
I.1. Antecedentes de la investigación	1
I.1.1 Antecedentes investigativos:.....	1
I.1.2 Artículos científicos	6
I.2. Formulación del Problema:.....	8
I.2.1 Problema General.....	10
I.2.2 Problemas Específicos	10
I.3. Justificación e importancia	11
I.3.1 Justificación teórica:	11
I.3.2 Justificación práctica:.....	11
I.3.3 Justificación económica:	11
I.3.4 Justificación Ambiental:.....	11
I.3.5 Importancia.....	12
I.4. Objetivo.....	12
I.4.1 Objetivo General.....	12
I.4.2 Objetivos Específicos	12
I.5. Hipótesis	13
I.5.1 Hipótesis General	13
I.5.2 Hipótesis Específicas.....	13
I.6. Variables	13
I.6.1 Operacionalización de las variables.....	14
I.7. Metodología de la investigación	15
I.7.1 Unidad de Análisis:	15

I.7.2 Tipo, Enfoque y Nivel de Investigación	15
I.7.3 Diseño de la Investigación	15
I.7.4 Fuentes de Información	15
I.7.5 Población y Muestra	16
I.7.6 Técnica e instrumentos de recolección de datos.....	16
I.7.7 Análisis y Procesamiento de Datos	21
Capítulo II. Fundamento Teórico	28
II.1. Marco Teórico.....	28
II.1.1 Identificación de Fallas por medio de Vibraciones en Bomba Centrífuga	28
II.1.2 Análisis de Vibración.....	44
II.2. Marco Conceptual	67
II.2.1 Definición de Máquinas.....	67
II.2.2 Fuerzas Estáticas y Dinámicas	67
II.2.3 Bombas centrífugas.....	67
II.2.4 Propiedades Dinámicas.....	68
II.2.5 Frecuencia Natural	68
II.2.6 Medición de vibraciones	69
II.2.7 Sensores de Vibración.....	69
Capítulo III. Análisis de Resultados	70
III.1. Condiciones Operativas de la Bomba.....	70
III.2. Características de la Vibración Obtenida	71
III.3. Evaluación de la Severidad de Vibraciones.....	82
III.4. Análisis de Fourier.....	83
III.4.1 Posición 1: Lado Libre Motor	83
III.4.2 Posición 2: Lado Acoplado Motor.....	86
III.4.3 Posición 3: Lado Acoplado Bomba.....	89
III.4.4 Posición 4: Lado Libre Bomba	92
III.5. Análisis de Tiempo-Frecuencia.....	95

III.5.1 Posición 1 Lado Libre Motor	95
III.5.2 Posición 2 Lado Acoplado Motor.....	101
III.5.3 Posición 3 Lado Acoplado Bomba	107
III.5.4 Posición 4 Lado Libre Bomba	112
III.6. Análisis de Transformada Wavelet.....	117
III.6.1 Comparación entre diferentes tipos de Wavelets	117
III.6.2 Búsqueda de fallas con la Wavelet Morlet Compleja.....	119
III.7. Análisis de Aceleración Envelope	143
Capítulo IV. Resultados, Contrastación de Hipótesis y Discusión de Resultados	154
IV.1. Resultados	154
IV.1.1 Resultados de las observaciones de la Forma de Onda	154
IV.1.2 Resultados de la Evaluación de Severidad	154
IV.1.3 Resultados del Análisis de Fourier	155
IV.1.4 Resultados del Análisis Tiempo-Frecuencia.....	156
IV.1.5 Resultados del Análisis de la Transformada Wavelet	157
IV.1.6 Resultados del Análisis Envelope	158
IV.1.7 Comparación de los diferentes métodos.....	158
IV.2. Contrastación de la Hipótesis	161
IV.2.1 Contrastación de Hipótesis General	161
IV.2.2 Contrastación de Hipótesis Específicas	161
IV.3. Discusión de Resultados	163
Conclusiones	165
Recomendaciones	168
Anexos	174

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Operacionalización de variables	14
Tabla 2 Ficha técnica del acelerómetro usado	21
Tabla 3 Especificaciones del Hardware utilizado para el trabajo	22
Tabla 4 Frecuencias Características de Vibración en la operación de la bomba	22
Tabla 5 Frecuencias de Falla de Rodamientos de la Bomba	23
Tabla 6 Severidad de vibración para este estudio.....	25
Tabla 7 Solución de problemas (Troubleshooting) de vibración en bombas (Parte 1)	29
Tabla 8 Solución de problemas (Troubleshooting) de vibración en bombas (Parte 2)	30
Tabla 9 Solución de problemas (Troubleshooting) de vibración en bombas (Parte 3)	31
Tabla 10 Solución de problemas (Troubleshooting) de vibración en bombas (Parte 4) ...	32
Tabla 11 Solución de problemas (Troubleshooting) de vibración en bombas (Parte 5) ...	33
Tabla 12 Frecuencias asociadas a fallas electromagnéticas en motores eléctricos	40
Tabla 13 Medidas de vibración en Máquinas	46
Tabla 14 Unidades usadas en el análisis de vibraciones	47
Tabla 15 Clasificación de severidad según la Aceleración Envelope	64
Tabla 16 Severidad de vibración para Bombas según la norma ISO 10816-7	67
Tabla 17 Condiciones de Operación Medidas.....	70
Tabla 18 Descripción de las Formas de Onda en aceleración y velocidad.....	81
Tabla 19 Valores RMS obtenidos de la Posición 1 y 2 para las 6 Condiciones de Operación	82
Tabla 20 Valores RMS obtenidos de la Posición 3 y 4 para las 6 Condiciones de Operación	82
Tabla 21 Resumen de Valores Pico de Aceleración Envelope en gE para diferentes posiciones.....	148
Tabla 22 Valores Pico de Aceleración Envelope en gs en el Lado Libre Motor	150
Tabla 23 Valores Pico de Aceleración Envelope en gs en el Lado Acoplado Motor	151

Tabla 24 <i>Valores Pico de Aceleración Envelope en gs en el Lado Acoplado Bomba</i>	152
Tabla 25 <i>Valores Pico de Aceleración Envelope en gs en el Lado Libre Bomba</i>	153
Tabla 26 <i>Resumen de los resultados encontrados en el análisis espectral FFT.....</i>	155
Tabla 27 <i>Resumen de los resultados encontrados en el análisis tiempo-frecuencia</i> <i>STFT.</i>	156
Tabla 28 <i>Resumen de los resultados encontrados en el análisis Wavelet Morlet</i> <i>compleja.</i>	157
Tabla 29 <i>Comparación de los Diferentes Métodos de Análisis de Vibraciones - Parte 1:</i> <i>Posiciones 1 y 2.....</i>	159
Tabla 30 <i>Comparación de los Diferentes Métodos de Análisis de Vibraciones - Parte 2:</i> <i>Posiciones 3 y 4.....</i>	160

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Porcentaje de fallas en bombas por componentes.</i>	9
Figura 2 <i>Representación Gráfica de la Posición 1</i>	17
Figura 3 <i>Representación Gráfica de la Posición 2</i>	17
Figura 4 <i>Representación Gráfica de la Posición 3</i>	18
Figura 5 <i>Representación Gráfica de la Posición 4</i>	18
Figura 6 <i>Foto de la Bomba a medir</i>	19
Figura 7 <i>Diagrama de ubicaciones de la Bomba Centrífuga y el Motor Eléctrico</i>	19
Figura 8 <i>Placa del motor</i>	20
Figura 9 <i>Espacio entre el Impulsor y el Difusor y o Voluta</i>	43
Figura 10 <i>Comparación en la Transformada de Fourier de dos señales sinusoidales</i>	51
Figura 11 <i>Aplicación de la ventana Hanning a una señal aleatoria</i>	52
Figura 12 <i>Comparación de error RMS con diferentes señales</i>	52
Figura 13 <i>Aplicación de la ventana Flattop a una señal aleatoria</i>	53
Figura 14 <i>Aplicación de la ventana rectangular a una señal aleatoria</i>	54
Figura 15 <i>Señales de fallas típicas en rodamientos de elementos rodante y sus envolventes</i>	61
Figura 16 <i>Diagrama de bloques del proceso de rectificación y filtrado</i>	62
Figura 17 <i>Diagrama de bloques del método A para la obtención de la Transformada de Hilbert</i>	63
Figura 18 <i>Diagrama de bloques del método B para la obtención de la Transformada de Hilbert</i>	63
Figura 19 <i>Curva Característica de la Bomba: Altura vs Caudal</i>	70
Figura 20 <i>Curva Característica de la Bomba: Potencia vs Caudal</i>	71
Figura 21 <i>Forma de onda en aceleración de la posición 1</i>	73
Figura 22 <i>Forma de onda en velocidad de la posición 1</i>	74
Figura 23 <i>Forma de onda en aceleración de la posición 2</i>	75

Figura 24 Forma de onda en velocidad de la posición 2.....	76
Figura 25 Forma de onda en aceleración de la posición 3	77
Figura 26 Forma de onda en velocidad de la posición 3.....	78
Figura 27 Forma de onda en aceleración de la posición 4	79
Figura 28 Forma de onda en velocidad de la posición 4.....	80
Figura 29 Espectro FFT general en aceleración de la posición 1	84
Figura 30 Espectro FFT general en velocidad de la posición 1	85
Figura 31 Espectro FFT general en aceleración de la posición 2	87
Figura 32 Espectro FFT general en velocidad de la posición 2	88
Figura 33 Espectro FFT general en aceleración de la posición 3	90
Figura 34 Espectro FFT general en velocidad de la posición 3	91
Figura 35 Espectro FFT general en aceleración de la posición 4	93
Figura 36 Espectro FFT general en velocidad de la posición 4	94
Figura 37 Espectrogramas STFT general en aceleración de la posición 1 para diferentes condiciones con un ancho de ventana de 256 puntos.....	96
Figura 38 Espectrogramas STFT general en velocidad de la posición 1 para diferentes condiciones con un ancho de ventana de 256 puntos.....	97
Figura 39 Espectrogramas STFT entre 115Hz y 125Hz en velocidad de la posición 1 para diferentes condiciones con un ancho de ventana de 1024 puntos	98
Figura 40 Espectrogramas STFT entre 116Hz y 122Hz en velocidad de la posición 1 para diferentes condiciones con un ancho de ventana de 8192 puntos	99
Figura 41 Espectrograma STFT de la Posición 1 durante el apagado en aceleración con ancho de ventana de 256 puntos.....	100
Figura 42 Espectrogramas STFT general en aceleración de la posición 2 para diferentes condiciones con un ancho de ventana de 256 puntos.....	102
Figura 43 Espectrogramas STFT general en velocidad de la posición 2 para diferentes condiciones con un ancho de ventana de 256 puntos.....	103

Figura 44 Espectrogramas STFT entre 115Hz y 125Hz en velocidad de la posición 2 para diferentes condiciones con un ancho de ventana de 1024 puntos	104
Figura 45 Espectrogramas STFT entre 116Hz y 122Hz en velocidad de la posición 2 para diferentes condiciones con un ancho de ventana de 8192 puntos	105
Figura 46 Espectrograma STFT de la Posición 2 durante el apagado en aceleración con ancho de ventana de 512 puntos.....	106
Figura 47 Espectrogramas STFT general en aceleración de la posición 3 para diferentes condiciones con un ancho de ventana de 256 puntos.....	108
Figura 48 Espectrogramas STFT general en velocidad de la posición 3 para diferentes condiciones con un ancho de ventana de 256 puntos.....	109
Figura 49 Espectrogramas STFT entre 100Hz y 150Hz en velocidad de la posición 3 para diferentes condiciones con un ancho de ventana de 2048 puntos	110
Figura 50 Espectrograma STFT de la Posición 3 durante el apagado en aceleración con ancho de ventana de 512 puntos	111
Figura 51 Espectrogramas STFT general en aceleración de la posición 4 para diferentes condiciones con un ancho de ventana de 256 puntos.....	113
Figura 52 Espectrogramas STFT general en velocidad de la posición 4 para diferentes condiciones con un ancho de ventana de 256 puntos.....	114
Figura 53 Espectrogramas STFT entre 100Hz y 150Hz en velocidad de la posición 4 para diferentes condiciones con un ancho de ventana de 2048 puntos	115
Figura 54 Espectrogramas STFT entre 0Hz y 100Hz en velocidad de la posición 4 para diferentes condiciones con un ancho de ventana de 2048 puntos	116
Figura 55 Espectrograma de diferentes wavelets madre en la posición 1 condición 5 en aceleración dirección horizontal.....	117
Figura 56 Espectrograma de diferentes wavelets madre en la posición 3 condición 6 en aceleración dirección horizontal.....	118
Figura 57 Espectrograma Wavelet Morlet Compleja general en aceleración de la posición 1 para diferentes condiciones	120

Figura 58 Espectrograma Wavelet Morlet Compleja general en velocidad de la posición 1 para diferentes condiciones	121
Figura 59 Espectrograma Wavelet Morlet Compleja 115Hz y 125Hz en velocidad de la posición 1 para diferentes condiciones, ancho de ventana 256, $fb=10$ y $fc=3.5$	122
Figura 60 Espectrograma Wavelet Morlet Compleja 114Hz y 125Hz en velocidad de la posición 1 para diferentes condiciones, ancho de ventana 512, $fb=25$ y $fc=14$	123
Figura 61 Espectrograma Wavelet Morlet Compleja en aceleración de la posición 1 durante el apagado	124
Figura 62 Espectrograma Wavelet Morlet Compleja general en aceleración de la posición 2 para diferentes condiciones	126
Figura 63 Espectrograma Wavelet Morlet Compleja general en velocidad de la posición 2 para diferentes condiciones	127
Figura 64 Espectrograma Wavelet Morlet Compleja 114Hz y 125Hz en velocidad de la posición 2 para diferentes condiciones, ancho de ventana 256, $fb=10$ y $fc=3.5$	128
Figura 65 Espectrograma Wavelet Morlet Compleja 114Hz y 125Hz en velocidad de la posición 2 para diferentes condiciones, ancho de ventana 512, $fb=25$ y $fc=14$	129
Figura 66 Espectrograma Wavelet Morlet Compleja en aceleración de la posición 2 durante el apagado	130
Figura 67 Espectrograma Wavelet Morlet Compleja general en aceleración de la posición 3 para diferentes condiciones	132
Figura 68 Espectrograma Wavelet Morlet Compleja 550Hz y 565Hz en velocidad de la posición 3 para diferentes condiciones	133
Figura 69 Espectrograma Wavelet Morlet Compleja general en velocidad de la posición 3 para diferentes condiciones	134
Figura 70 Espectrograma Wavelet Morlet Compleja 20Hz y 100Hz en velocidad de la posición 3 para diferentes condiciones	135
Figura 71 Espectrograma Wavelet Morlet Compleja 100Hz y 150Hz en velocidad de la posición 3 para diferentes condiciones	136

Figura 72 <i>Espectrograma Wavelet Morlet Compleja en velocidad de la posición 3 durante el apagado</i>	137
Figura 73 <i>Espectrograma Wavelet Morlet Compleja general en aceleración de la posición 4 para diferentes condiciones</i>	139
Figura 74 <i>Espectrograma Wavelet Morlet Compleja general en velocidad de la posición 4 para diferentes condiciones</i>	140
Figura 75 <i>Espectrograma Wavelet Morlet Compleja 20Hz y 100Hz en velocidad de la posición 4 para diferentes condiciones</i>	141
Figura 76 <i>Espectrograma Wavelet Morlet Compleja 100Hz y 150Hz en velocidad de la posición 4 para diferentes condiciones</i>	142
Figura 77 <i>Ganancia en frecuencia del filtro pasabanda obtenido de la combinación de un filtro pasabaja y un filtro pasaalta</i>	143
Figura 78 <i>Espectro de la Aceleración Envelope de la posición 1</i>	144
Figura 79 <i>Espectro de la Aceleración Envelope de la posición 2</i>	145
Figura 80 <i>Espectro de la Aceleración Envelope de la posición 3</i>	146
Figura 81 <i>Espectro de la Aceleración Envelope de la posición 4</i>	147
Figura 82 <i>Ganancia en frecuencia del filtro pasabanada a las frecuencias de falla de cada rodamiento</i>	149

Lista de abreviaturas y acrónimos

B-Gap	Blade Gap – Espacio entre el impulsor y la voluta
BEP	Best Efficiency Point – Punto de Máxima Eficiencia
BPFO	Ball Pass Frequency Outer – Frecuencia de paso en la pista exterior
BPFI	Ball Pass Frequency Inner – Frecuencia de paso en la pista interior
BSF	Ball Spin Frequency – Frecuencia de giro de la bola
CNN	Convolutional Neural Networks – Redes Neuronales Convolucionales
CPM	Ciclos por minuto
CWT	Continuous Wavelet Transform – Transformada Wavelet Continua
DCS	Distributed Control System – Sistema de Control Distribuido
DEW	Denoising Envelope Analysis and Wavelet Packet Decomposition
DFT	Discrete Fourier Transform – Transformada Discreta de Fourier
ESP	Electric Submersible Pumps – Bombas Sumergibles Eléctricas
FIM	Facultad de Ingeniería Mecánica
FL	Frequency Line - Frecuencia de línea
FP	Frequency Pole - Frecuencia de paso de polos
FS	Frequency Slip - Frecuencia de deslizamiento
FTF	Fundamental Train Frequency – Frecuencia fundamental del tren
FFT	Fast Fourier Transform – Transformada Rápida de Fourier
fBPF	Frequency Blade Passing Frequency – Frecuencia de Paso de Álabes
IoT	Internet of Things – Internet de las Cosas
ISO	International Organization for Standardization
MSSP	Mechanical Systems and Signal Processing
Nb	Número de Elementos Rodantes
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NPSH	Net Positive Suction Head – Carga de Succión Neta
NPSHA	Available Net Positive Suction Head – Carga de Succión Neta Disponible

NPSHR	Required Net Positive Suction Head – Carga de Succión Neta Requerida
RBPF	Rotor Bar Passing Frequency – Frecuencia de Paso de Barras del Rotor
RMS	Root Mean Square – Raíz Cuadrada Media
RPM	Revoluciones Por Minuto
STFT	Short-Time Fourier Transform – Transformada de Fourier de Tiempo Corto
TL	Transfer Learning – Aprendizaje por Transferencia
UNI	Universidad Nacional de Ingeniería
WPD	Wavelet Packet Decomposition – Descomposición en Paquetes Wavelet
WSPF	Wire Slot Passing Frequency – Frecuencia de Paso de Bobinas

Introducción

El análisis de vibraciones es una técnica fundamental para el monitoreo y el mantenimiento predictivo de las máquinas. Las bombas pueden estar sujetas a fallas debido a la existencia de fuerzas mecánicas, hidráulicas y eléctricas durante su operación. Entre las técnicas avanzadas para el análisis de vibraciones se encuentran el análisis espectral, el análisis de tiempo-frecuencia (STFT) y el análisis wavelet.

Este estudio se centra en la identificación de fallas en una bomba con base flexible, utilizando diferentes técnicas de análisis de vibraciones. Para indicar la presencia de fallas se utilizará las recomendaciones de solución de fallas en bombas de Karassik, Messina, Cooper, & Heald (2008). Se realizaron mediciones en seis condiciones operativas y en cuatro posiciones diferentes. Primero, se describirá la forma de onda en aceleración y velocidad de las mediciones tomadas. Para evaluar la criticidad de vibraciones, los niveles de vibración serán un 25% más a los de la norma ISO 10816-7. El análisis espectral permitirá descomponer la señal en frecuencia y amplitud. El análisis de tiempo-frecuencia (STFT) permitirá graficar la señal en el dominio tiempo-frecuencia, variando el ancho de ventana. En el análisis wavelet, se compararán diferentes wavelets, se seleccionará la más adecuada y se graficarán las señales en tiempo y frecuencia, variando su ancho de banda y su frecuencia central. Finalmente, el análisis envelope permitirá descomponer la señal en su envolvente para evaluar las condiciones de falla de los rodamientos. Esto permitirá comparar la aceleración envelope pico con los resultados y los estándares recomendados.

Capítulo I. Planteamiento de la Realidad Problemática

I.1. Antecedentes de la investigación

I.1.1 Antecedentes investigativos:

Serruto Nicolas (2020)¹ realizó un estudio titulado: “Implementación de Metodología para el diagnóstico de fallas mediante el análisis vibracional en motores eléctricos en la empresa A.E.I. SRL”. El objetivo general del estudio fue desarrollar e implementar una técnica de análisis vibracional para diagnosticar fallas en motores eléctricos. La muestra fueron motores eléctricos utilizados en los talleres de Actividades Electromecánicas Industriales (A.E.I.) SRL en Arequipa. Los instrumentos que se usaron fueron equipos analizadores de vibraciones y transductores de aceleración (acelerómetros). El diseño de investigación usado fue de tipo aplicativo. Los resultados fueron establecer un método eficaz para evaluar la condición de los motores eléctricos mediante el análisis de vibraciones, identificación de las principales causas de vibración y determinación de la severidad de estas vibraciones en relación con la normativa ISO.

De La Cruz Uz (2021)² realizó un estudio titulado: “Diagnóstico de Parámetros de Operación que mitigan la vibración excesiva de bombas de lodo en la Compañía Minera Antamina S.A.”. El problema general del estudio fue: ¿Cómo realizar un diagnóstico correcto de los parámetros de operación para mitigar la vibración excesiva de las bombas de lodo en la COMPAÑÍA MINERA ANTAMINA S.A.? La justificación de la investigación se centra en la importancia del sector minero para la economía y en el papel crucial de la ingeniería mecánica en el mantenimiento de las bombas de lodo. La presente investigación

¹ **Serruto Nicolas (2020)**. Implementación de Metodología para el diagnóstico de fallas mediante el análisis vibracional en motores eléctricos en la empresa A.E.I. SRL. [Tesis, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. <http://hdl.handle.net/20.500.12773/12529>.

² **De La Cruz Uz (2021)**. Diagnóstico de Parámetros de Operación que mitigan la vibración excesiva de bombas de lodo en la Compañía Minera Antamina S.A. [Tesis, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/8171>.

no formuló hipótesis, ya que es de nivel descriptivo. El objetivo general del estudio fue realizar un diagnóstico correcto de los parámetros de operación para mitigar la vibración excesiva de las bombas de lodo. La metodología empleada fue el método inductivo. Las técnicas de recolección de datos utilizadas fueron la documental y la empírica. El tipo de investigación fue teórica, y su enfoque fue descriptivo. Los resultados indicaron que las correcciones realizadas lograron mitigar la vibración excesiva en las bombas de lodo, reduciendo significativamente los niveles de vibración. Las conclusiones señalaron que la bomba 18x16 SRH fue identificada como la más crítica. Además, se detectó que el principal problema es la presencia de espuma en la pulpa, lo que afecta la eficiencia de las bombas, y se subrayó la necesidad de un sistema de sellado de agua adecuado para evitar fugas y reducir el desgaste de los componentes.

Marín Jorge (2021)³ realizó un estudio titulado: “Determinación de modelos de fallas en bomba mediante aprendizaje automático”. El problema general del estudio fue cómo detectar fallas en una bomba mediante el uso de aprendizaje automático para procesar grandes volúmenes de datos operacionales. La justificación de la investigación fue la necesidad de una metodología automatizada para diagnosticar fallas en equipos críticos en la industria minera. La hipótesis fue que es posible detectar fallas en una bomba utilizando datos reales recolectados por sensores y aplicando algoritmos de aprendizaje automático. El objetivo general del estudio fue desarrollar una metodología de detección oportuna de fallas en una bomba de impulsión de agua desalada sensorizada. La metodología que se usó fue el procesamiento y análisis de datos recolectados durante tres meses. Las técnicas de recolección de datos que se usaron fueron mediciones con sensores de vibración, temperatura, caudal y corriente en la bomba, integrados en un sistema de control distribuido (DCS). El tipo de investigación fue aplicada. El nivel de enfoque de la investigación fue cuantitativo. Los resultados fueron que se logró detectar una falla real en la bomba

³ **Marín Jorge (2021)**. Determinación de modelos de fallas en bomba mediante aprendizaje automático. [Tesis, Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/183968>.

mediante la metodología desarrollada, validando su efectividad. Las conclusiones fueron que es posible implementar un sistema de detección automatizado de fallas en bombas críticas para la industria minera, mejorando la continuidad operacional y reduciendo la necesidad de intervención humana.

Santa María Ignacio (2022)⁴ realizó un estudio titulado: “Algoritmo para determinar el origen de la vibración sincrónica en rotores rígidos”. El problema fue que en rotores rígidos verticales múltiples modos de falla generan vibraciones a la misma frecuencia, dificultando la identificación precisa de su origen. El objetivo fue desarrollar un algoritmo en MATLAB para descomponer la vibración sincrónica en sus componentes fundamentales y mejorar el diagnóstico de fallas. La hipótesis fue que es posible identificar automáticamente los modos de falla mediante mediciones de vibraciones. La metodología incluyó el desarrollo y validación del algoritmo con simulaciones y datos reales, obteniendo resultados que demostraron su eficacia con un bajo margen de error. Los resultados fueron que el algoritmo desarrollado logró identificar y cuantificar las distintas componentes vibratorias con un error relativo máximo de 2.12% en simulaciones y 8.18% en aplicaciones a datos reales. Las conclusiones indican que el algoritmo es una herramienta eficaz para identificar modos de falla que generan vibraciones sincrónicas en rotores rígidos verticales, mejorando el diagnóstico de fallas y la planificación del mantenimiento en turbinas hidráulicas, lo que contribuye a reducir paradas no programadas y optimizar el rendimiento de estas máquinas críticas.

⁴ **Santa María Ignacio (2022)**. Algoritmo para determinar el origen de la vibración sincrónica en rotores rígidos. [Tesis, Universidad de Concepción]. <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/9457>.

Bejarano Gonzalo (2022)⁵ realizó un estudio titulado: “Reingeniería del Módulo de Pruebas de Bombeo de Slurry para Aislamiento de las Vibraciones en la Bomba” en el Laboratorio de Producción de la Universidad Católica de Santa María. La justificación de la investigación es incrementar los períodos de mantenimiento al reducir las vibraciones, lo que disminuye el desgaste de las partes móviles y de soporte de la bomba. El objetivo general del estudio fue realizar la reingeniería del Módulo de Bombeo de Slurry para lograr el aislamiento de las vibraciones mecánicas en la Bomba Centrífuga. La metodología incluye la verificación del estado de los componentes, la puesta en funcionamiento del módulo, la estimación de la vida útil del impulsor y la medición del estado de vibración inicial. El tipo de investigación fue experimental. Los resultados indicaron que se logró con éxito la reingeniería del módulo de bombeo de slurry. Las conclusiones señalaron que se logró aislar la bomba de las vibraciones externas. Además, la instalación de una placa rígida y un acople flexible con el alineamiento redujo las vibraciones.

Bastias Cristian (2023)⁶ realizó un estudio titulado: “Diagnóstico de fallas en rodamientos mediante imágenes tiempo-frecuencia utilizando aprendizaje profundo”. El problema del estudio fue cómo diagnosticar automáticamente fallas en rodamientos utilizando imágenes tiempo-frecuencia generadas por la Short-Time Fourier Transform (STFT). El objetivo fue desarrollar modelos de aprendizaje profundo, específicamente Convolutional Neural Networks (CNN), para clasificar estas imágenes y mejorar la confiabilidad de los rodamientos. La hipótesis planteada fue que las CNN pueden clasificar con precisión las fallas en

⁵ **Bejarano Gonzalo (2022)**. Reingeniería del Módulo de Pruebas de Bombeo de Slurry para Aislamiento de las vibraciones en la bomba. [Tesis, Universidad Católica de Santa María]. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/12087>.

⁶ **Bastias Cristian (2023)**. Diagnóstico de fallas en rodamientos mediante imágenes tiempo-frecuencia utilizando aprendizaje profundo. [Tesis, Universidad de Concepción]. <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/11191>.

rodamientos a partir de dichas imágenes. La metodología incluyó la generación de bancos de imágenes, el entrenamiento de CNN y la evaluación del uso de Transfer Learning (TL) para mejorar la generalización del modelo. Los resultados mostraron una precisión del 100% en la clasificación de fallas, validando la efectividad del enfoque propuesto.

Muñoz Manuel (2024)⁷ realizó un estudio titulado: “Factibilidad de la determinación de características del daño en rodamientos a partir de vibraciones”. El problema identificado fue cómo determinar el tamaño de los daños en rodamientos mediante el análisis de vibraciones. El objetivo general del estudio fue evaluar la factibilidad de obtener información precisa sobre el daño en rodamientos a partir de sus vibraciones. La hipótesis fue que las fuerzas dinámicas provocadas por fallas en los rodamientos generan vibraciones características que permiten estimar el tamaño del daño. La investigación empleó un nuevo método, denominado DEW (Denoising Envelope Analysis and Wavelet Packet Decomposition), que combina técnicas de Wavelet Denoising, análisis de envolvente y WPD (Wavelet Packet Decomposition), para reducir el ruido y mejorar la precisión de la estimación del daño. Los resultados indicaron que el método DEW es robusto en señales simuladas, aunque presentó limitaciones en señales experimentales debido a la presencia de ruido. Se concluyó que, aunque el método tiene potencial, requiere ajustes y validaciones adicionales para su aplicación en entornos reales.

⁷ **Muñoz Manuel (2024)**. Factibilidad de la determinación de características del daño en rodamientos a partir de vibraciones. [Tesis, Universidad de Concepción]. <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/11760>.

1.1.2 Artículos científicos

Magadán Luis et al (2020)⁸ realizó un estudio titulado "Real-Time Monitoring of Electric Motors for Detection of Operating Anomalies and Predictive Maintenance". El objetivo general del estudio fue diseñar y probar un prototipo de IoT (Internet de las cosas) para monitorear motores eléctricos, detectar anomalías operativas y sentar las bases para un futuro sistema de mantenimiento predictivo. Los instrumentos que se usaron fueron microcontroladores multisensor de bajo costo y dispositivos de enlace. El diseño de la investigación es aplicado y experimental. Los resultados muestran que el análisis de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) sobre las aceleraciones de vibración es más efectivo cuando se realiza en el dispositivo de enlace que en el microcontrolador y se logró observar armónicos fundamentales con amplitudes considerables en frecuencias múltiples de la frecuencia base del motor en los escenarios de prueba.

Reges Galdir et al. (2021)⁹ realizó un estudio titulado: "Electric submersible pump vibration analysis under several operational conditions for vibration fault differential diagnosis". El objetivo principal del estudio fue evaluar el comportamiento de las vibraciones de las Bombas Sumergibles Eléctricas (ESP) en diferentes condiciones operativas y estados de desgaste. La muestra fue bombas ESP operando con diferentes viscosidades de fluido, puntos de operación y velocidades. Los instrumentos que se usaron fueron: acelerómetros y métodos de estimación del espectro de frecuencia. El diseño de la investigación es de tipo experimental. El resultado fue identificación con precisión de las amplitudes de los

⁸ **Magadán Luis et al (2020).** Real-Time Monitoring of Electric Motors for Detection of Operating Anomalies and Predictive Maintenance. [Artículo científico, Science and Technologies for Smart Cities]. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51005-3_25.

⁹ **Reges Galdir et al. (2021).** Electric submersible pump vibration analysis under several operational conditions for vibration fault differential diagnosis. [Artículo científico, Ocean Engineering]. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108249>.

componentes de frecuencia, mostrando que la amplitud del componente sincrónico aumenta aproximadamente al cuadrado de la velocidad de rotación.

Niamat Ullah et al (2023)¹⁰ realizó un estudio titulado: “An Intelligent Framework for Fault Diagnosis of Centrifugal Pump Leveraging Wavelet Coherence Analysis and Deep Learning”. El problema general del estudio fue la necesidad de mejorar la precisión y la fiabilidad en la detección temprana de fallas en bombas centrífugas. La justificación de la investigación fue que los métodos tradicionales de diagnóstico de fallas en bombas centrífugas presentan limitaciones significativas. El objetivo fue mejorar la identificación temprana y el diagnóstico de fallas en bombas centrífugas desarrollando un marco inteligente que combine el análisis de coherencia de wavelet y el aprendizaje profundo. La metodología que se usó fue el procesamiento de señales y técnicas de aprendizaje profundo. Las técnicas de recolección de datos que se usaron fueron la adquisición de señales de vibración de una bomba centrífuga bajo diferentes condiciones operativas utilizando acelerómetros. El tipo de investigación fue experimental aplicada. El nivel de enfoque de la investigación fue tecnológico y cuantitativo. Los resultados fueron que el método propuesto demostró ser altamente efectivo, alcanzando una precisión en la identificación de fallas de hasta el 99.68%. Las conclusiones fueron que la combinación del análisis de coherencia de wavelet con técnicas de aprendizaje profundo es una estrategia prometedora para el diagnóstico de fallas en bombas centrífugas.

¹⁰ **Niamat Ullah et al (2023)**. An Intelligent Framework for Fault Diagnosis of Centrifugal Pump Leveraging Wavelet Coherence Analysis and Deep Learning. [Artículo científico, Sensors]. <https://doi.org/10.3390/s23218850>.

I.2. Formulación del Problema:

Las bombas centrífugas son componentes principales en sistemas hidráulicos¹¹. Las fallas en las bombas centrífugas causan pérdidas en las operaciones, la Figura 1 muestra las fallas principales en bombas. El mantenimiento preventivo de las bombas ayuda a mantener la vida útil. Sin embargo, las fallas a veces no son solucionadas durante el mantenimiento preventivo. La implementación de un mantenimiento predictivo ayuda a detectar fallas temprano y reducir los costos. Esta metodología ha demostrado incrementar la productividad entre un 2% y un 10% en diversas industrias y disminuir significativamente los gastos de reparación, ya que las fallas anticipadas y programadas pueden costar hasta diez veces menos que las reparaciones no planificadas¹². Dentro de las técnicas de mantenimiento predictivo, el análisis de vibración es uno de los más completos y eficaces para detectar las fallas en bombas¹³.

La aplicación de diferentes métodos de análisis de vibración para detectar fallas en las bombas es compleja debido a las diferentes condiciones de operación y los numerosos componentes. Normas como la ISO 20816, indican los niveles generales de vibración, pero no las fallas dentro de la bomba¹⁴. Métodos comunes como la Transformada Rápida de Fourier pueden ayudar a detectar la presencia de fallas en el espectro. Sin embargo, fenómenos transitorios no son detectados por la Transformada de Fourier¹⁵. Métodos como el análisis Wavelet y el análisis de la Transformada Corta de Fourier permiten detectar

¹¹ Lu, J., Wang, Y., Wang, B., Zhou, Y., Liu, X., & Si, Q. (2024). Study on the vibration characteristics induced by rotating stall in a centrifugal pump based on improved variational mode decomposition. [Artículo científico, *Flow Measurement and Instrumentation*] <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2024.102761>

¹² White, G. (2010). Introducción al Análisis de Vibraciones [Libro, Azima DLI].

¹³ Chu, T., Nguyen, T. C., Yoo, H., & Wang, J. (2024). ESP vibration prediction based on pump operating conditions in laboratory using machine learning. [Artículo científico, *Geoenergy Science and Engineering*] <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.213039>

¹⁴ ISO (2016). ISO 20816-1: Vibraciones mecánicas: Medición y evaluación de la vibración de máquinas con partes rotativas y alternativas [Norma técnica, ISO]

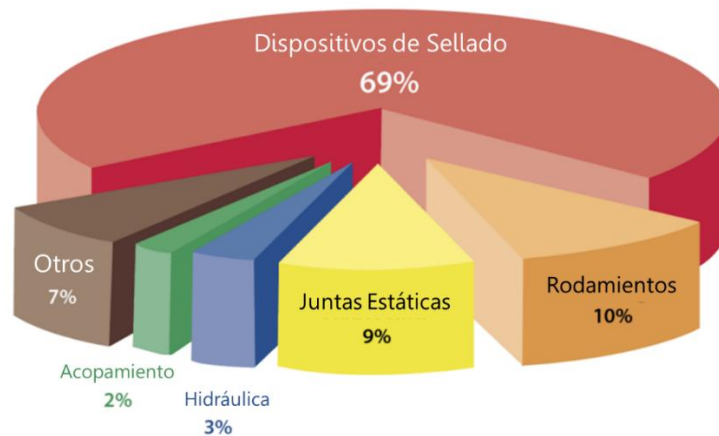
¹⁵ Newland, D. (2005). *An Introduction to: Random Vibration, Spectra & Wavelet Analysis*. New York: Dover Publications. [Libro]

fenómenos transitorios, pero son complejos y requieren mayor tiempo de procesamiento e interpretación de los resultados. Por último, el Análisis Envelope permite detectar fenómenos generados por la modulación de amplitud y frecuencia, como fallas en los rodamientos, sin embargo, no ayuda a detectar otros tipos de fenómenos¹⁶.

Aunque se pueda utilizar todos estos métodos detectar las fallas en las bombas, la implementación de múltiples métodos de análisis de vibraciones incrementa significativamente los costos del mantenimiento predictivo.

Figura 1

Porcentaje de fallas en bombas por componentes.



Adaptado de *¿Es suficiente el monitoreo de vibraciones de la bomba para evitar fallas?*, por Cid, J. (2021).

En el Laboratorio 5 de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería para detectar fallas y garantizar el buen funcionamiento de la bomba se aplicará métodos de análisis de vibración. Existe dificultad para identificar las fallas en bombas incluyendo:

¹⁶ Countréach, J., & Gaudet, M. (s.f.). *Envelope analysis - the key to rolling-element bearing diagnosis*. [Artículo técnico, Brüel & Kjær] <https://www.bksv.com/media/doc/BO0187.pdf>

- Complejidad de las componentes y diferentes modelos de las bombas.
- Errores durante la instalación que pueden causar soldaduras o desalineamientos.
- Cambios en las condiciones de operación y ambiente.
- Calidad de mantenimiento
- Imperfecciones de fabricación y materiales
- Envejecimiento natural del equipo.

1.2.1 Problema General

¿La aplicación de métodos de análisis de vibraciones permitirá identificar fallas en la bomba centrífuga con base flexible del Laboratorio 5 de la FIM-UNI?

1.2.2 Problemas Específicos

1) ¿Cuál es el comportamiento inicial de las vibraciones mecánicas de la bomba antes de aplicar los métodos avanzados de análisis de vibraciones?

2) ¿Los análisis como el de Fourier, Tiempo-Frecuencia, Transformada Wavelet y el análisis de Envolvente identificarán condiciones anómalas en las vibraciones mecánicas de la bomba?

3) ¿Será necesario utilizar todas las técnicas de análisis de vibraciones para identificar completamente las fallas en la bomba, o algunas técnicas serán suficientes?

I.3. Justificación e importancia

I.3.1 Justificación teórica:

El análisis de vibraciones comprende varias técnicas desarrolladas en combinación con las teorías de señales y el mantenimiento predictivo. Estas técnicas permiten el diagnóstico de fallas en sistemas complejos basado en las señales de vibración.

I.3.2 Justificación práctica:

El análisis de vibraciones es una técnica utilizada en muchas industria para el diagnóstico de fallas y mantenimiento predictivo de máquinas y estructuras. La aplicación directa de análisis de vibración en bombas se da en entornos industriales como minería y manufactura. Este estudio es relevante porque permite adaptar normas como la ISO 10816-7 en condiciones no ideales como una base flexible.

I.3.3 Justificación económica:

El análisis de vibraciones permite detectar fallas en una bomba, lo que permite la planificación adecuada del mantenimiento. Al identificar fallas potenciales se puede evitar la interrupción no programada de las operaciones, lo que a su vez reduce los costos asociados a un mantenimiento correctivo y al costo por lucro cesante.

I.3.4 Justificación Ambiental:

Al optimizar el funcionamiento de las bombas y minimizar las fallas, se reduce el consumo de energía. Además, se reducen ruidos lo que contribuye a un menor impacto ambiental de las operaciones.

1.3.5 Importancia

La importancia de este estudio radica en un enfoque integral de la aplicación de análisis de vibraciones para identificar fallas en una bomba centrífuga. La combinación de diferentes métodos como el análisis espectral, de tiempo-frecuencia y wavelet, junto con la norma ISO 20816 permite comparar y detectar problemas críticos. Además, permite comprender fenómenos complejos, como vibraciones por fuerzas eléctricas e hidráulicas. El procedimiento y los resultados contribuyen a la elección con precisión de técnicas de análisis de vibración avanzadas, lo que mejora la confiabilidad en sistemas hidráulicos, además de ser una base para el diagnóstico y la prevención de fallas.

1.4. Objetivo.

1.4.1 Objetivo General

Aplicar diferentes métodos de análisis de vibraciones en la bomba centrífuga con base flexible del Laboratorio 5 de la FIM-UNI para identificar y evaluar fallas.

1.4.2 Objetivos Específicos

1) Describir el comportamiento de las vibraciones mecánicas en la bomba antes de aplicar los diferentes métodos de análisis.

2) Evaluar cómo el análisis de Fourier, el análisis de Tiempo-Frecuencia, el análisis de Transformada Wavelet y el análisis de Envolvente permite identificar fallas en las vibraciones mecánicas en la bomba.

3) Determinar si todas las técnicas identifican las mismas fallas en la bomba y evaluar si es necesario implementar todas las técnicas o solo algunas.

I.5. Hipótesis

I.5.1 Hipótesis General

La aplicación de métodos de análisis de vibraciones permitirá identificar fallas en la bomba centrífuga con base flexible del Laboratorio 5 de la FIM-UNI.

I.5.2 Hipótesis Específicas

1) Las características de las vibraciones antes de aplicar diferentes métodos de análisis permitirán conocer las condiciones y zonas de mayor vibración de la bomba.

2) El análisis de Fourier, el análisis de Tiempo-Frecuencia, el análisis de Transformada Wavelet y el análisis de Envolvente identificarán fallas en las vibraciones mecánicas de la bomba.

3) Las técnicas avanzadas de análisis de vibraciones identificarán diferentes tipos de fallas, por lo que será necesario implementar una combinación de técnicas para lograr una identificación completa de las fallas en la bomba.

I.6. Variables

Variable Independiente: Aplicación de métodos de análisis de vibraciones

- Análisis de Criticidad según ISO 20816
- Análisis de Fourier
- Análisis Tiempo-Frecuencia
- Análisis de Transformada Wavelet
- Análisis de Envolvente

Variable Dependiente: Identificación de fallas por medio de análisis de vibraciones en la bomba centrífuga.

1.6.1 Operacionalización de las variables

Tabla 1

Operacionalización de variables

Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores
Aplicación de métodos de análisis de vibraciones	Scheffer & Gidhar (2004) definen el análisis de vibraciones como una técnica de mantenimiento predictivo que determina la condición operativa y el diagnóstico de máquinas.	Esta variable se va a medir mediante la evaluación vibraciones mecánicas a través de diferentes técnicas.	Análisis de Criticidad según ISO 20816 Análisis de Fourier Análisis de Tiempo-Frecuencia Análisis de Transformada Wavelet Análisis de Envolvente Análisis de Seguimiento de Órdenes	Nivel de vibración RMS Espectro Frecuencia-Amplitud Gráficos Tiempo-Frecuencia Coeficientes Wavelet y Energía de la señal Aceleración Envelope Frecuencias de armónicos y laterales
Identificación de fallas por medio de análisis de vibraciones en la bomba centrífuga	Es el proceso de diagnóstico mediante la evaluación de las características de la vibración de la bomba, utilizando herramientas y técnicas como el análisis espectral y el análisis en el tiempo.	Esta variable se va a medir utilizando la comparación con la tablas 7,8,9,10 y 11 de Solución de problemas del manual de Karassik, Messina, Cooper, & Heald (2008) cuarta edición y la norma ISO 20816.	Falla Severidad	Desbalance Desalineamiento Falla en Rodamientos Problemas eléctricos Problemas hidráulicos Leve, Moderado y Significativo

*Fuente: Elaboración propia

I.7. Metodología de la investigación

I.7.1 Unidad de Análisis:

La unidad de análisis es la bomba centrífuga del Laboratorio 5 de la FIM-UNI.

I.7.2 Tipo, Enfoque y Nivel de Investigación

Tipo de Investigación: El tipo de investigación es **aplicada**, ya que busca aplicar diferentes métodos de análisis de vibración en una bomba.

Enfoque de la Investigación: El enfoque de la investigación es **mixto**. Se utiliza un enfoque **cuantitativo** para obtener del nivel de vibración RMS con la norma ISO 20816 y los valores de referencia para el Análisis Envelope. Y, se utiliza un enfoque **cualitativo** cuando se comparan los espectros y espectrogramas de los otros métodos, con la solución de problemas recomendado por Karassik, Messina, Cooper, & Heald (2008).

Nivel de Investigación: El nivel de la investigación es **descriptivo**, ya que busca utilizar diferentes métodos de análisis de vibraciones para describir e interpretar las vibraciones relacionadas a fallas en la bomba.

I.7.3 Diseño de la Investigación

El diseño de la investigación es **cuasi-experimental**. Por un lado, se aplica diferentes métodos de análisis de vibraciones en diferentes condiciones operativas para determinar las fallas; sin embargo, no se tiene control absoluto de las vibraciones generadas por la bomba.

I.7.4 Fuentes de Información

Primarias: Datos de vibraciones recolectados directamente de la bomba utilizando acelerómetros inalámbricos.

Secundarias: Normas técnicas (como ISO 20816), literatura científica y técnica relacionada con el análisis de vibraciones y análisis de señales (Fourier, Wavelet, etc.).

1.7.5 Población y Muestra

Población: Las vibraciones generadas por la bomba en todas sus posiciones y en diferentes condiciones operativas.

Muestra: Señales de vibración colectas en 4 posiciones de la bomba, bajo 6 condiciones operativas y en 3 direcciones (horizontal, vertical y axial).

1.7.6 Técnica e instrumentos de recolección de datos

Técnica: La técnica utilizada es la medición de vibraciones con el uso de acelerómetros y su posterior análisis de vibración con diversas técnicas de procesamiento de señales.

Procedimiento de recolección de datos: El procedimiento para la recolección de datos es la siguiente:

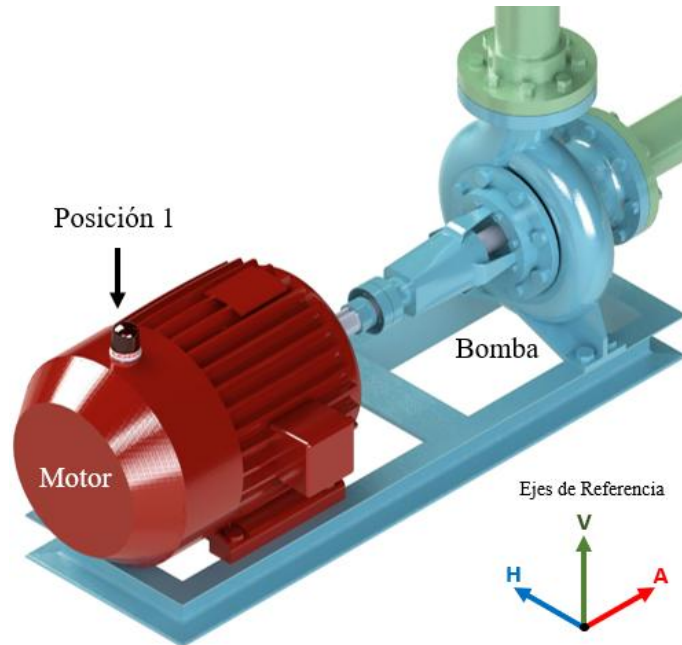
- 1.- Preparación del equipo: Se verificará que el equipo esté en perfectas condiciones operativas y sin problemas en el arranque
- 2.- Instalación del sensor: El acelerómetro inalámbrico se colocará en la posición 1.
- 3.- Configuración del software: Se comprobará que el software reconozca el sensor y que las señales lleguen correctamente al programa.
- 4.- Operación de la bomba: Se procederá a encender la bomba y ajustar la válvula de presión. Esta operación se realizará bajo seis condiciones diferentes de flujo y presión.
- 5.- Cambio de posición: Se repetirá las mediciones para las posiciones 2,3 y 4.

Puntos de Medición: Son 4 los puntos de medición y están ubicados cerca de los rodamientos. Los ejes de referencia utilizados son: H (Horizontal), V (Vertical) y A (Axial), que facilitan la identificación de las direcciones de las vibraciones medidas. En la Figura 2,

Figura 3, Figura 4 y Figura 5 se presentan la representación gráfica de los diferentes puntos de medición.

Figura 2

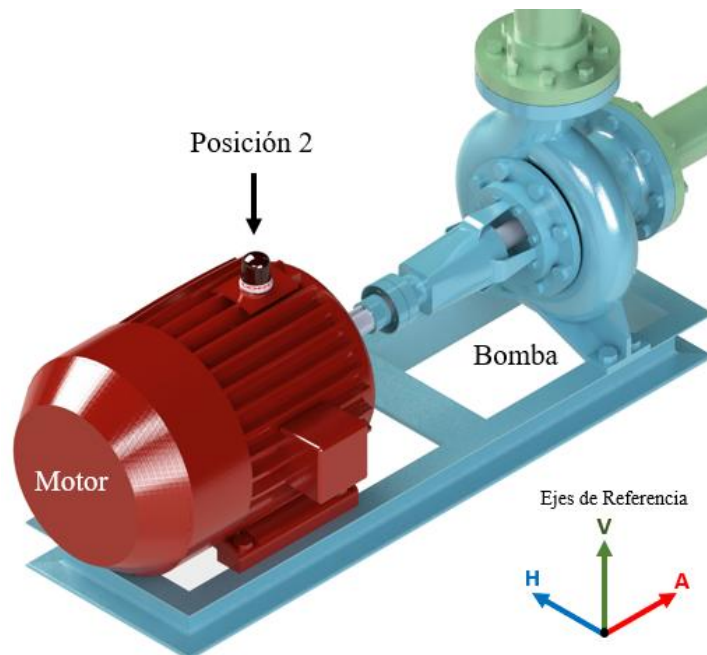
Representación Gráfica de la Posición 1



*Fuente: Elaboración propia

Figura 3

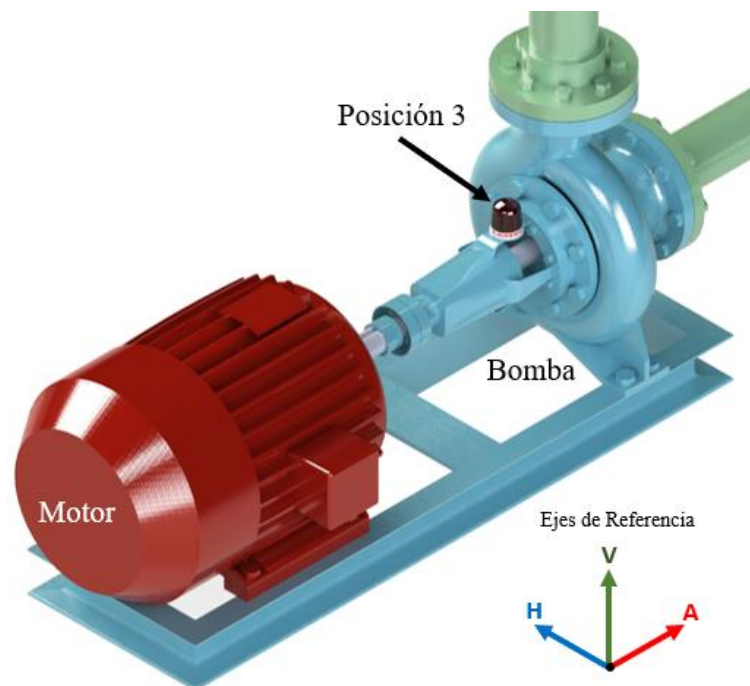
Representación Gráfica de la Posición 2



*Fuente: Elaboración propia

Figura 4

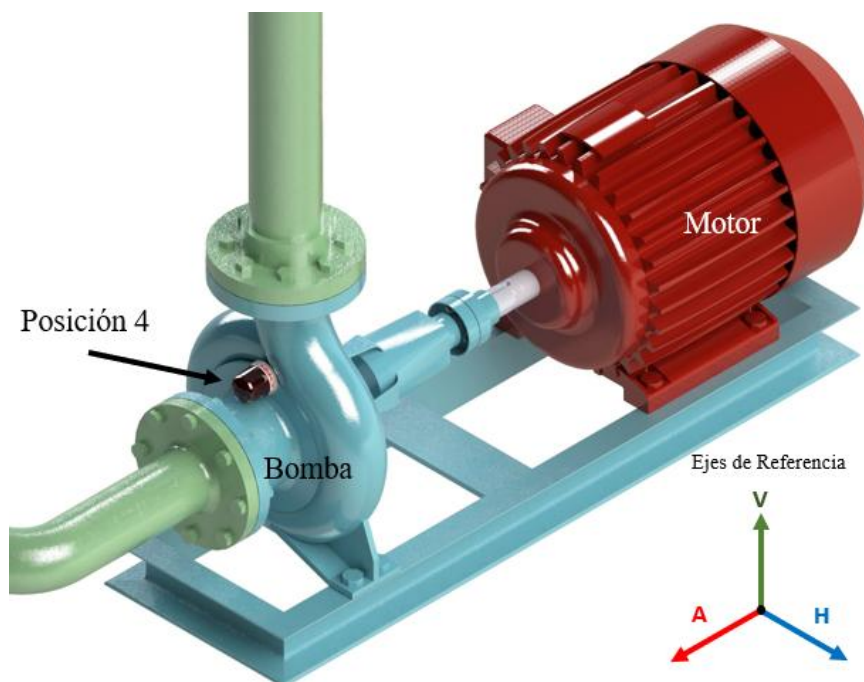
Representación Gráfica de la Posición 3



*Fuente: Elaboración propia

Figura 5

Representación Gráfica de la Posición 4

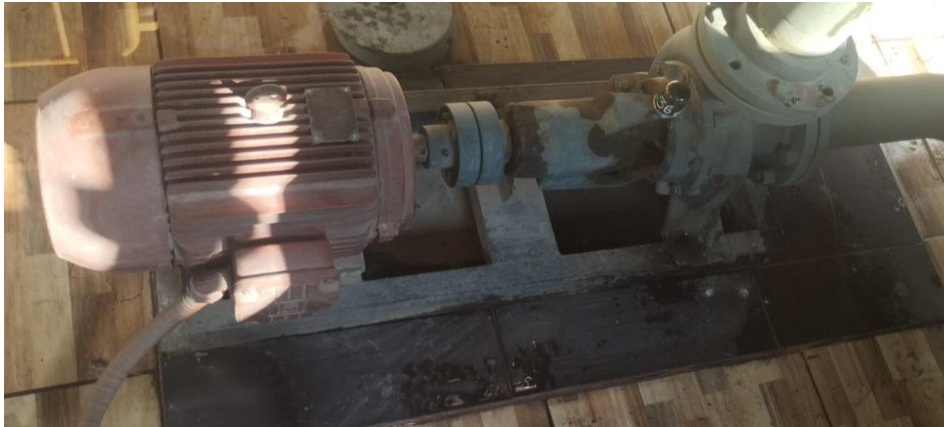


*Fuente: Elaboración propia

Descripción del equipo a medir: El equipo que se va a analizar es una bomba de ubicada en el Laboratorio 5 de la Facultad de Ingeniería Mecánica. La bomba es accionada por un motor eléctrico. A continuación, se detallan las características técnicas de la bomba y del motor.

Figura 6

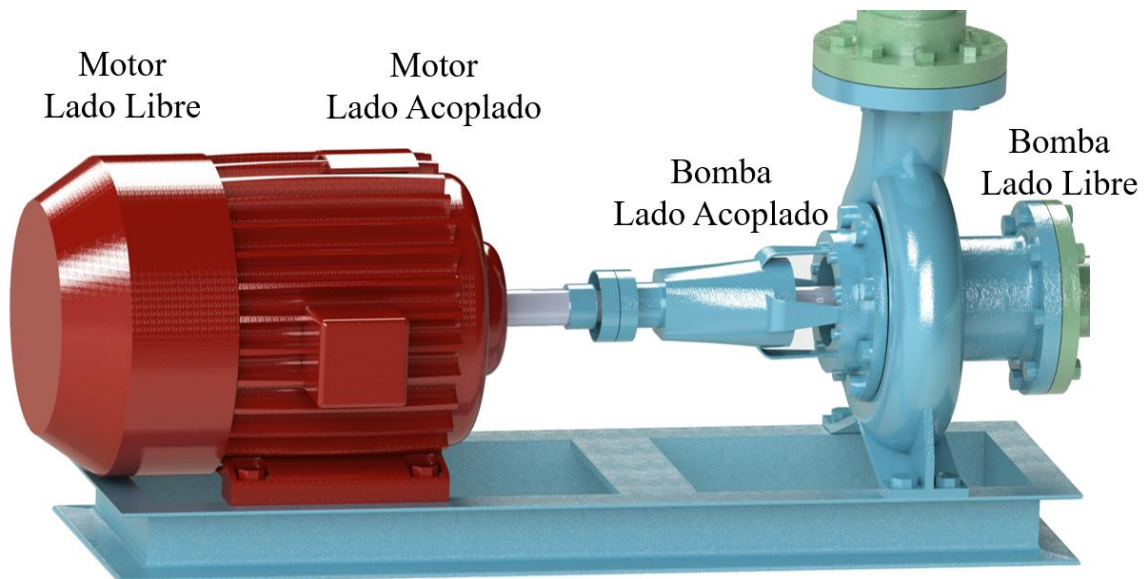
Foto de la Bomba a medir



*Fuente: Elaboración propia

Figura 7

Diagrama de ubicaciones de la Bomba Centrífuga y el Motor Eléctrico



*Fuente: Elaboración propia

Datos técnicos de la Bomba: A continuación, se presentan los datos técnicos de la bomba que se va a ser analizada.

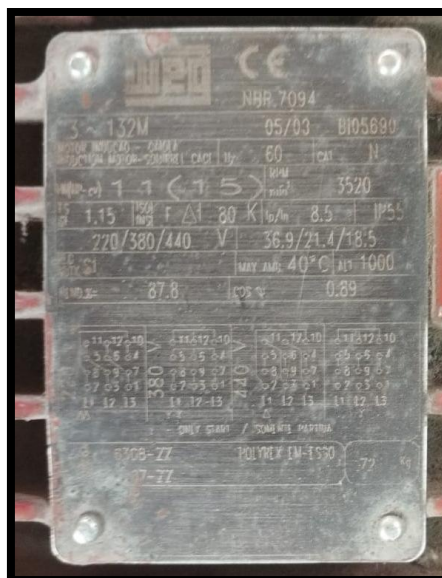
- Número de álabes: 7
- Rodamiento lado libre: 6207
- Rodamiento lado acoplado: 1315k

Datos técnicos del Motor: A continuación, se presentan los datos técnicos del motor que va a ser analizado.

- Marca: WEG
- NBR 7094
- Voltaje: 220 V
- RPM: 3520
- 1.15L
- Potencia: 11 KW (15 HP)
- Número de Barras: 28
- Número de Bobinas 36

Figura 8

Placa del motor



*Fuente: Elaboración propia

Instrumentos de medición: Los instrumentos usados en la recolección de datos han sido: un acelerómetro LORD inalámbrico, una laptop para recuperar las señales y el software SensorConnect. A continuación, se presentarán la ficha técnica del acelerómetro usado:

Tabla 2

Ficha técnica del acelerómetro usado

Características	Detalles
Tipo de Sensor	Acelerómetro triaxial inalámbrico Rugged
Ancho de Banda del Acelerómetro	DC a 1 kHz
Resolución	20 bits
Filtros Digitales	Pasa-bajo (26 a 800 Hz configurable), Pasa-alto (apagado a 2.5 Hz configurable)
Modos de Muestreo	Continuo, ráfaga periódica, activado por eventos
Opciones de Salida	Aceleración, Inclinación, Velocidad (IPSrms), Amplitud (Grms y Gpk-pk), Factor de Cresta
Frecuencias de Muestreo	1 muestra/hora a 4096 Hz
Capacidad de Almacenamiento	16 M Bytes (hasta 8,000,000 puntos de datos)
Rango de Comunicación	Exterior: 2 km (ideal), 800 m (típico); Interior: 50 m (típico)
Fuente de Alimentación	3 x 3.6 V, baterías ½ AA (Saft LS 14250 recomendadas)
Temperatura de Funcionamiento	-40°C a +85°C
Clasificación Ambiental	IP67
Peso (con baterías)	122 gramos
Material del Recinto	Acero inoxidable serie 300 con cubierta de policarbonato

*Fuente: Ficha técnica de LORD.

1.7.7 Análisis y Procesamiento de Datos

Software: Se usará el lenguaje Python, en un entorno Conda para poder programar las señales adquiridas en el campo. Python es un lenguaje muy flexible en el procesamiento de señales, ofreciendo un amplio contenido en sus bibliotecas. Esto permite realizar

a las señales la Transformada de Fourier, Transformada de Fourier de Tiempo corto, Transformada Wavelet, Seguimiento de órdenes y Análisis Envelope. Además, permite visualizar los resultados, haciendo una solución integral para el Análisis de Vibraciones.

Hardware: Se utilizó una computadora para realizar el procesamiento de señales y análisis del presente trabajo de tesis. A continuación, se presenta una tabla con las especificaciones detalladas del hardware:

Tabla 3

Especificaciones del Hardware utilizado para el trabajo

Componentes	Especificaciones
Sistema Operativo	Windows 10 Pro 64-bit (Build 19045)
Procesador	Intel® Core™ i5-9400F CPU @ 2.90GHz (6 núcleos)
Memoria RAM	32GB DDR4
Tarjeta Gráfica	NVIDIA GeForce RTX 2060
Memoria de Video	12GB de memoria dedicada + 16GB de memoria compartida
Almacenamiento	SSD 240GB (C:) + SSD 2TB (D:) + SSD 1TB (E:)
BIOS	F3 (UEFI)
Placa Base	B365M GAMING HD

*Fuente: Elaboración propia.

Frecuencias de Operación: Las frecuencias asociadas a la bomba se encuentran en la Tabla 4 y Tabla 5. Estas frecuencias caracterizan a los componentes de la Bomba y permiten identificar fallas a través del análisis de vibraciones.

Tabla 4

Frecuencias Características de Vibración en la operación de la bomba

Abreviatura	Nombre de la Frecuencia	Valor en CPM	Valor en Hz
1x	Velocidad de rotación	3555	59.25
2x	2 veces la Velocidad de Rotación	7110	118.5
3x	3 veces la Velocidad de Rotación	10665	177.75
2xFL	2 veces Frecuencia de Línea	7200	120

FS	Frecuencia de deslizamiento	45	0.75
FP	Frecuencia de Paso de Polos	90	1.5
WSPF	Frecuencia de paso de Bobinas	127980	2133
RBPF	Frecuencia de paso de Barras	99540	1659

*Fuente: Elaboración propia

Tabla 5

Frecuencias de Falla de Rodamientos de la Bomba

Ubicación	Número de rodamiento	Abreviatura de la frecuencia	Factor de multiplicación	Frecuencia de falla* (Hz)
Motor Lado Libre	6207	BPFO	3.57	211.52
		BPFI	5.43	321.73
		FTF	0.40	23.70
		BSF	2.31	136.87
Motor Lado Acoplado	6308	BPFO	3.07	181.96
		BPFI	4.92	291.57
		FTF	0.39	22.81
		BSF	2.04	120.81
Bomba Lado Acoplado	1315k	BPFO	6.73	403.8
		BPFI	9.27	556.2
		FTF	0.42	25.2
		BSF	3.04	182.4
Bomba Lado Libre	6207	BPFO	3.57	211.52
		BPFI	5.43	321.73
		FTF	0.40	23.70
		BSF	2.31	136.87

*Fuente: Elaboración propia. **Las Frecuencias de falla son en la operación de la bomba a 3550 RPM.

Limitaciones: Las limitaciones de la tesis se presentan a continuación:

- Las mediciones se realizan en la bomba en condiciones de operación cambiando la presión de salida durante 6 veces. Además, se tomarán en los puntos cercanos a los rodamientos en las posiciones previamente descritas.
- La bomba presenta una base flexible, por lo que las normas como la ISO 20816 y ISO 10816 no podrán ser aplicadas.

- Para el evaluar la severidad de la vibración se aumentó en un 25% los valores recomendados de la ISO 10816-7.
- Para el Análisis de Transformada de Fourier se utilizará una ventana Hanning y se tomará 16384 puntos.
- Para el análisis de la Transformada Rápida de Fourier se considerará un ancho de ventana de 256 puntos, equivalente a 0.0625 segundos.
- Para el análisis de Wavelets se considerarán las siguientes Wavelets: Morlet Compleja, Morlet, Mexican Hat, Spline Wavelet, Shannon. El análisis se realizará con una ventana de 256 puntos, o 0.0625 segundos.
- El rango de frecuencias usado para el análisis de envolvente será entre 600Hz y 2000Hz.
- Todas las señales serán procesadas por código en Python.

Procedimientos para Evaluar la Severidad de Vibración: El procedimiento para Evaluar la Severidad de Vibración es el siguiente:

- Cargar los datos: Los datos serán cargados a un entorno virtual.
- Acondicionamiento de señales: Las señales de aceleración serán integradas para obtener las señales de velocidad, para ello se utilizará un filtro pasa alta a 5Hz.

Se calculará la velocidad RMS (Root Mean Square) para las diferentes condiciones de presión y flujo. • Visualización de resultados: Se organizarán los datos en tablas. Los límites son establecidos en un 25% más que los de la norma ISO 10816-7 , debido a la flexibilidad de la base. Esto se hace en base a las recomendaciones del fabricante de motores WEG.

Tabla 6*Severidad de vibración para este estudio*

Zona	Límite de vibración de velocidad en mm/s (RMS)
A	≤ 4.0
B	4.0 – 6.375
C	6.375 – 10.625
D	> 10.625

*Fuente: ISO 20816 **Procedimientos para el Análisis de Fourier:** El procedimiento para el Análisis de Criticidad según ISO 20816 es el siguiente:

- Cargar los datos: Los datos recogidos se cargan en un entorno virtual con Python.
- Preprocesamiento de Señales: Se integrará la señal para poder utilizar las unidades de velocidad.
- Aplicación de la Transformada Rápida de Fourier: Se utiliza la función FFT de la biblioteca Numpy para convertir la señal en su representación en frecuencia, se tomarán 16384 puntos y la ventana Hanning.
- Visualización de resultados: Se graficará con las herramientas de visualización en Python para obtener el espectro en frecuencia vs amplitud.
- Análisis Espectral: Se analiza los resultados con las frecuencias de falla de la máquina. Se utilizarán tablas de referencia (Tabla 7 a Tabla 11). para relacionar las frecuencias detectadas con fallas específicas.
- Interpretación: Se documentan los hallazgos más importantes y se analizan sus posibles implicaciones en el estudio.

Procedimientos para el Análisis de Tiempo-Frecuencia:

- Cargar los datos: Los datos recogidos se cargan en un entorno virtual con Python.

- **Preprocesamiento de Señales:** Se descompone la señal capturada en segmentos temporales. Se utiliza la vibración en aceleración y velocidad. La señal es de 4 segundos.
- **Aplicación de la Transformada de Fourier:** Se aplica la Transformada de Fourier a cada segmento con la ventana Hanning.
- **Visualización de resultados:** Se graficará con las herramientas de visualización el espectrograma, una representación gráfica de la intensidad de frecuencias a largo del tiempo.
- **Análisis de los Resultados:** Se analiza el espectrograma para poder detectar patrones específicos o anomalías en la señal, lo que puede incluir cambios bruscos en la señal, o aparición de nuevas frecuencias a lo largo del tiempo, etc.
- **Interpretación:** Se documentan los hallazgos más importantes, sus posibles implicaciones en el estudio, conclusiones y recomendaciones.

Procedimientos para el Análisis de Transformada Wavelet:

- **Cargar los datos:** Los datos recogidos se cargan en un entorno virtual con Python.
- **Preprocesamiento de Señales:** La señal de 4 segundos se descompone en segmentos temporales de 256 puntos o 0.0625 segundos. Se utiliza la vibración en aceleración.
- **Aplicación de la Transformada Wavelet:** Se utiliza la librería PyWavelets en Python para aplicar las transformadas Wavelet (Morlet, Mexican Hat, Spline Wavelet, Shannon).
- **Visualización de resultados:** Se graficará con las herramientas de visualización el espectrograma.
- **Análisis de los Resultados:** Se analiza el espectrograma para poder detectar irregularidades, patrones inusuales o anomalías en la señal, lo que puede incluir cambios bruscos en la señal, aparición de nuevas frecuencias a través del tiempo, etc.

- Interpretación: Se documentan los hallazgos más importantes, sus posibles implicaciones en el estudio, conclusiones y recomendaciones.

Procedimientos para el Análisis de Envolvente: El procedimiento para el Análisis de Envolvente es el siguiente:

- Cargar los datos: Los datos recogidos se cargan en un entorno virtual con Python.
- Se aplicará un filtro de banda en el rango de 600Hz y 2000Hz, para aislar las zonas de alta frecuencia.
- Demodulación de la señal: Se aplican técnicas de demodulación para extraer la envolvente de la señal filtrada. Esto se realiza mediante la transformada de Hilbert,
- Visualización de los resultados: Se extraen los valores de aceleración envolvente pico en una tabla para visualizar los resultados.
- Análisis de los Resultados: Se compara los resultados con la criticidad utilizada de la Tabla 15.
- Interpretación: Se documentan los hallazgos más importantes, sus posibles implicaciones en el estudio, conclusiones y recomendaciones.

Capítulo II. Fundamento Teórico

II.1. Marco Teórico

II.1.1 Identificación de Fallas por medio de Vibraciones en Bomba Centrífuga

La identificación de fallas por medio de vibraciones en bombas centrífugas es un proceso desafiante, por ello es importante conocer las vibraciones en bombas centrífugas. Durante la operación de una bomba hidráulica aparecen fuerzas dinámicas que generan vibraciones. Estas fuerzas dinámicas pueden ser de origen mecánico (desbalance, holguras, soldaduras), hidráulico (flujo, cavitación, recirculación) o electromagnético (desbalance electromagnético del motor, desbalance entre líneas de electricidad). Además, en la bomba existen fuerzas estáticas derivadas de la instalación, como el alineamiento de ejes y las tolerancias y ajustes de los componentes de la bomba. Estas fuerzas estáticas, aunque no contribuyen al origen de la vibración, pueden influir en la respuesta de la bomba a las fuerzas dinámicas. Comprender la interacción de ambas fuerzas es crucial ya que conjuntamente definen las características de vibración dentro de las bombas hidráulicas.

Las causas mecánicas de la vibración incluyen desbalance de masas en el rotor, ejes o poleas dobladas, desalineación de ejes, rodamientos gastados y defectos en la fuente de alimentación. En el aspecto electromagnético, incluyen problemas como daños en el aislamiento interno pueden generar fugas de corriente e irregularidades en el estator, y un campo magnético no uniforme. Las causas hidráulicas comprenden el movimiento del fluido, la operación fuera del punto óptimo, el flujo turbulento y la cavitación (De La Cruz, 2021; Bejarano, 2022; Serruto, 2020).

El rendimiento y las vibraciones en bombas centrífugas están significativamente influenciados por los parámetros geométricos del impulsor, tales como el borde de ataque de las paletas, su número, el ángulo de entrada y el diámetro del impulsor. Un fenómeno crítico en la salida de las paletas es la separación de flujo en forma de chorro-estela, que interactúa con la lengua de la voluta, provocando inestabilidad en la interacción entre el rotor y el estator. Esta situación se intensifica cuando la bomba opera fuera de las

condiciones de diseño. En caudales bajos puede llevar al fenómeno de estancamiento rotativo. La interacción periódica entre el impulsor y la lengua de la voluta, debido al número limitado de paletas, genera una distribución de flujo no uniforme y pulsaciones en la frecuencia de paso de la paleta (fBPF). La separación entre el impulsor y la lengua de la voluta afecta la intensidad de las pulsaciones y la interacción rotor-estator, siendo un factor clave en la generación de vibraciones de baja frecuencia (Zhang et al., 2014).

Fuentes de Vibración en Bomba: Existen diferentes tablas que permiten determinar fallas durante la operación de una bomba a través del análisis de los componentes en frecuencia de las vibraciones. Una de las referencias más completas y es la tabla del manual de bombas de Karassik, Messina, Cooper, y Heald (2008).

A continuación, se presentan un extracto de las tablas de dicho manual, que detallan los componentes en frecuencia de las vibraciones y sus implicaciones en la condición de la bomba:

Tabla 7

Solución de problemas (Troubleshooting) de vibración en bombas (Parte 1)

Múltiplos de la Velocidad de Rotación	Otro Síntoma	Causa Probable
0.05 a 0.35x	La respuesta de vibración es amplia en frecuencia.	Atasco del difusor o canal de retorno.
Exactamente 1/2x, 1/3x, 1/4x, etc.	La vibración puede aumentar dramáticamente poco después de aparecer, excepto en bombas verticales con cuatro o más cojinetes en la línea del eje, donde es común y no perjudicial	Rozamiento leve, posiblemente combinado con una baja frecuencia natural del eje o del soporte de cojinetes
0.40x (Aproximadamente)	El eje tiene cojinetes de elementos rodantes	Defecto en la jaula del rodamiento
0.42x a 0.48x	Cerca de la frecuencia natural lateral del rotor y la órbita tiene un bucle secundario. Existe una aparición repentina a una velocidad aproximadamente 2 veces la frecuencia natural excitada y un bloqueo en la frecuencia natural a pesar del aumento de velocidad durante el arranque.	Inestabilidad rotodinámica debido a vórtices del fluido en tolerancias cercanas, por ejemplo, "latigazo de aceite" (oil whip) en cojinetes

Tabla 8*Solución de problemas (Troubleshooting) de vibración en bombas (Parte 2)*

Múltiplos de la Velocidad de Rotación	Otro Síntoma	Causa Probable
0.65x a 0.95x	Picos menores de vibración en la frecuencia de $(1-f)x$ y en bandas laterales de $\pm(1-f)x$ en varios de los primeros múltiplos de la velocidad de giro, a menudo acompañado de un ruido de retumbar y golpeteo. Ocurre en capacidad de carga parcial, pero desaparece a muy baja capacidad. Se ve afectado de independientemente por la velocidad y el caudal.	Probablemente recirculación interna de flujo en la succión
Menos de 1x	Aumento de la vibración y del nivel de ruido en un amplio espectro cuando la bomba opera por debajo de la velocidad de funcionamiento, especialmente en caudales altos, debido a la disminución del NPSH disponible. A veces es acompañado por la disminución de la vibración y el ruido por encima de la 1x.	Cavitación sin recirculación
1x	La vibración es más elevada en el eje que en el alojamiento. El rendimiento hidráulico y/o la presión de succión es normal. La vibración axial está dentro de los límites normales. Aumento de vibración con el cuadrado de la velocidad	Desbalance en el conjunto giratorio o eje doblado.
1x	La vibración es más elevada en el alojamiento del cojinete del lado de accionamiento.	Desbalance en el acoplamiento de la bomba.
1x	Vibración elevada en la carcasa interior o exterior en el lado de accionamiento. Vibración leve en lado de la bomba.	Desbalance del rotor de accionamiento.
1x	Frecuencia natural cercana a 1x.	Resonancia
1x	Las vibraciones axiales superan la mitad de la magnitud de las vibraciones horizontales o verticales y aumentan más lentamente que el cuadrado de la velocidad. Existe elevada temperatura en el aceite del cojinete	Desalineamiento en el acople bomba/motor.

Tabla 9

Solución de problemas (Troubleshooting) de vibración en bombas (Parte 3)

Múltiplos de la Velocidad de Rotación	Otro Síntoma	Causa Probable
1x	Las pulsaciones de presión en la descarga son fuertes a 1x, pero no son elevadas a la frecuencia de paso de álabes (en bombas de voluta simple).	Canal del impulsor obstruido o dañado.
1x	Las pulsaciones de presión en la descarga son fuertes a 1x y a la frecuencia de paso de álabes, especialmente cuando la bomba opera con caudales muy por encima o por debajo del punto de máxima eficiencia.	Lengüeta de voluta diseñada demasiado cerca al diámetro exterior del impulsor (B-gap), o excentricidad excesiva del entre impulsor y voluta.
2x	Fuerte vibración en el eje y el alojamiento, con pulsaciones de presión intensas en la descarga. La vibración del paso de álabes es baja en bombas de dos álabes.	Canal del impulsor obstruido o dañado.
2x	Tanto la vibración en el eje como la de la carcasa son elevadas. Fuertes pulsaciones de presión en la descarga a la frecuencia de paso de álabes. La vibración del paso de álabes es inusualmente alta.	Álabes de la voluta diseñados demasiado cerca al diámetro exterior del impulsor (B-gap), u obstrucción o daño en la voluta, o hay excesiva excentricidad del impulsor.
2x	La vibración en el eje es mucho más fuerte que en la carcasa, alcanzando o excediendo la holgura de los rodamientos. Hay una disminución en la primera frecuencia natural de flexión del eje. Otros múltiplos de la velocidad de rotación pueden ser más elevadas de lo normal.	Excentricidad de la voluta, Solturas en el soporte del cojinete o eje fisurado.
2x	La vibración en el eje es más fuerte que en la carcasa, con elevadas vibraciones en el torque.	Excitación torsional.
2x	Las vibraciones axiales superan la mitad de la magnitud de las vibraciones horizontales o verticales. Las vibraciones a la 1x también son elevadas. Existe elevada temperatura en el aceite del cojinete.	Desalineación de la bomba/motor en el acoplamiento.

Tabla 10

Solución de problemas (Troubleshooting) de vibración en bombas (Parte 4)

Múltiplos de la Velocidad de Rotación	Otro Síntoma	Causa Probable
Frecuencia de paso de álabes: mx	Tanto la vibración en el eje como en la carcasa son elevadas, con pulsaciones de presión moderadamente bajas en la descarga.	Voluta demasiado cerca al diámetro exterior del impulsor debido al diseño (B-gap) o excesiva excentricidad del rotor
Frecuencia de paso de álabes: mx	Vibración en la carcasa mucho más elevada que en el eje.	Resonancia mecánica de las tuberías en la frecuencia de paso de álabes.
Frecuencia de paso de álabes: mx	Elevadas pulsaciones de presión en la descarga a la frecuencia alta de paso de álabes. Pulsaciones de presión en la succión moderadamente bajas.	Resonancia acústica en el tubo de descarga.
Frecuencia de paso de álabes: mx	Las pulsaciones de presión también son elevadas.	Resonancia acústica en la tubería de succión.
Frecuencia de paso de álabes: mx	La frecuencia natural del rotor o de la carcasa está cerca al paso de álabes.	Resonancia
Varios múltiplos a la velocidad de rotación (1x, 2x, etc.).	La órbita muestra ángulos agudos o evidencia de 'ringing'. El espectro indica respuesta exacta a 1/2x o 1/3x. Presencia de ruidos de fricción y cambios de velocidad.	Fricción interna o acoplamiento de engranajes poco lubricado
Varios múltiplos a la velocidad de rotación (1x, 2x, etc.).	La órbita es difusa pero no muestra pulsaciones ni resonancia. El flujo del refrigerante es inesperadamente alto o bajo y puede presentar una temperatura elevada. El espectro puede mostrar componentes a 1/2x o 1/3x.	Sello atascado, obstruido o dañado
Varios múltiplos a la velocidad de rotación (1x, 2x, etc.).	La órbita muestra pulsaciones, a menudo en una dirección mucho más que en la otra. El nivel de vibración del eje es mayor que el de la carcasa.	Soltura en el soporte del eje, especialmente en el inserto del cojinete o en la tapa de retención.
Varios múltiplos a la velocidad de rotación (1x, 2x, etc.).	La órbita es bastante estable, y la carcasa vibra más que el eje. A menudo se observa un amplio rango de frecuencias por debajo de la velocidad de rotación.	Soltura en la carcasa de la bomba, pedestal o cimentación.

Tabla 11

Solución de problemas (Troubleshooting) de vibración en bombas (Parte 5)

Múltiplos de la Velocidad de Rotación	Otro Síntoma	Causa Probable
Número de Elementos Rodantes del Rodamiento (Nb) por ½ de la Velocidad Rotacional	Frecuencia $f=0.4 \text{ Nb} \cdot N/2$ aproximadamente.	Defecto en la pista exterior del cojinete
Número de Elementos Rodantes del Rodamiento (Nb) por ½ de la Velocidad Rotacional	Frecuencia $f=0.5 \text{ Nb} \cdot N/2$ aproximadamente.	Defecto en la bola o rodillo
Número de Elementos Rodantes del Rodamiento (Nb) por ½ de la Velocidad Rotacional	Frecuencia $f=0.6 \text{ Nb} \cdot N/2$ aproximadamente.	Defecto en la pista interior del cojinete
2 veces la frecuencia de línea: 2xFL	Vibración muy direccional.	Excentricidad del estator del motor
2 veces la frecuencia de línea: 2xFL	Vibración muy direccional y aumenta a medida que el motor opera (se calienta).	Láminas del estator en cortocircuito (induce excentricidad térmica)
2 veces la frecuencia de línea: 2xFL	Vibración con pulsaciones a 2xFL y armónicos cercanos de velocidad de rotación. También bandas laterales a la frecuencia de paso de polos alrededor de la velocidad de rotación.	Excentricidad del rotor del motor
2 veces la frecuencia de línea: 2xFL	Bandas laterales a 1/3xFL.	Conexiones de fase sueltas o rotas
Frecuencia de barras del rotor	Bandas laterales a 2xFL alrededor de la Frecuencia de paso de Barras del Rotor (RBPF). A veces la vibración es más elevada en 2xRBPF que en 1xRBPF	Barras del rotor sueltas o abiertas

*Fuente: Traducido de Karassik, Messina, Cooper, & Heald (2008).

A continuación se explicará la naturaleza de las fallas o condiciones relacionadas con la vibración durante la operación de la bomba.

Desbalance: El desbalance, conocido también como desequilibrio, es una causa común de vibraciones. Ocurre cuando el centro de gravedad del motor no coincide con su centro de rotación o geométrico, generando una fuerza centrífuga radial que rota con el eje y causa vibración excesiva (Serruto, 2020).

La fuerza que provoca el desbalance se mide utilizando la siguiente fórmula:

$$F = m \times d \times \omega^2$$

En la fórmula $m \times d$ es el desbalance, esta se mide normalmente en gramos por centímetro. En situaciones de desbalance puro, es decir, sin influencias externas de otras fuentes de vibración, la amplitud de la vibración es proporcional a su magnitud. Una característica notable del desbalance es que la amplitud de la vibración es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad de rotación. Además, la colocación de una masa de prueba puede modificar tanto la magnitud como el ángulo de fase de la vibración. Este método es esencial para detectar y corregir el desbalance durante el proceso de balanceo.

Las causas comunes de desbalance en bombas pueden originarse debidos a diseños asimétricos, como agujeros para cuñas; errores en la fabricación; tolerancias de montaje inexactas; y materiales no uniformes con variaciones de densidad o porosidades en piezas fundidas. Durante el funcionamiento las tensiones internas no uniformes, variaciones térmicas y acumulación irregular del fluido también causa desbalance. Los deterioros a lo largo del tiempo como la corrosión y el desgaste físico normalmente no son uniformes contribuyendo al desbalance (Serruto, 2020).

Desalineamiento: El desalineamiento es la condición en la cual dos o más ejes no están posicionados correctamente en una recta, o en un ángulo deseado.

Piotrowski (2007) identifica varios síntomas de desalineamiento en máquinas rotativas industriales (pág. 1-2), entre los que se incluyen:

1. Fallos prematuros en rodamientos, sellos, ejes o acoplamientos.
2. Temperaturas elevadas cerca de los rodamientos o altas temperaturas de aceite de descarga.
3. Fuga excesiva de lubricante en los sellos de los rodamientos.
4. Temperaturas más altas de lo normal en ciertos tipos de acoplamientos flexibles, especialmente tras apagar la unidad. En acoplamientos elastoméricos, la presencia de polvo de goma dentro del protector del acoplamiento.
5. Vida operativa mayor en partes de equipos similares.
6. Un número inusualmente alto de fallos de acoplamiento o un desgaste rápido.

7. Roturas o grietas en los ejes cerca de los rodamientos internos o en los acoplamientos.
8. Cantidades excesivas de grasa o aceite en el interior de la guarda de acoplamiento.
9. Tornillos de fundación sueltos, a menudo causados por una condición de “pie blando” y agravados por desalineamiento.
10. Tornillos de acoplamiento sueltos o rotos, generalmente debido a un par de apriete incorrecto y empeorado por una condición de desalineamiento.

Para determinar el desalineamiento en máquinas rotativas, se utilizan comúnmente dos métodos de análisis: el análisis de vibraciones y la termografía infrarroja. Sin embargo, muchas generalizaciones hechas por los proveedores de equipos de análisis de vibraciones y termografía infrarroja sobre la detección de desalineamientos no siempre son ciertas (Piotrowski, 2007, pág. 38).

El desalineamiento entre ejes puede ser angular, paralelo o una combinación de ambos. También se puede presentar desalineamiento entre el eje y los rodamientos.

El desalineamiento paralelo ocurre cuando los ejes son paralelos, pero están separados por cierta distancia, ya sea vertical u horizontal. Este problema se manifiesta en los espectros de vibración a 1x y 2x del RPM del eje en la dirección radial, además de posibles armónicos superiores de menor amplitud (Serruto, 2020, pág. 122).

El desalineamiento angular ocurre cuando las líneas centrales de dos ejes se intersecan formando un ángulo. Se manifiesta con una vibración axial intensa en el espectro a 1xRPM, y puede incluir armónicos de menor amplitud a la velocidad de rotación del eje (Serruto, 2020, pág. 122).

Aunque los ejes del motor y del componente mecánico estén correctamente alineados, puede surgir una desalineación entre el eje y su rodamiento, originada por deformaciones en el motor o montajes incorrectos. Factores como patas en diferente plano, o si la bancada no es plana, puede causar deformación al apretar los pernos. (Serruto, 2020, pág. 123)

Excentricidad: La excentricidad se define como el desalineamiento entre el eje de rotación y el eje de posicionamiento relativo de dos piezas concéntricas, como el rotor y el estator en el caso de motores eléctricos.

La excentricidad es importante en motores eléctricos, ya que el espacio entre el rotor y el estator, conocido como entrehierro, es muy pequeño. El posicionamiento incorrecto puede causar vibraciones inducidas por el campo magnético. También se debe considerar la redondez del eje y la posición relativa durante el giro. La tendencia de los fabricantes a disminuir el entrehierro para aumentar la eficiencia del motor también contribuye a la excentricidad. Los avances en fabricación han disminuido la incidencia de excentricidad, siendo ahora la causa más frecuente un desgaste desigual de las superficies (Serruto, 2020, pág. 124).

La excentricidad puede ser estática o dinámica. La excentricidad estática en motores eléctricos ocurre debido a una deformación fija en el espacio del entrehierro. Esta puede originarse por varias causas, como la ovalidad del alojamiento del estator, un incorrecto posicionamiento del rotor debido a un apoyo inadecuado en los rodamientos, deformaciones en los alojamientos de rodamientos, excesiva tolerancia, entre otros. Por otro lado, la excentricidad dinámica en motores eléctricos ocurre debido a una deformación en el entrehierro que no es fija, sino que gira junto con el rotor. Este tipo de excentricidad puede deberse a desgaste en los alojamientos de los rodamientos o deflexión del eje (Serruto, 2020, págs. 125-126).

Soltura Mecánica: Las solturas mecánicas en motores eléctricos pueden originarse de diversas maneras, entre las cuales tenemos: pernos sueltos, rotura de anclajes, solturas en asientos o alojamiento de cojinetes.

La soltura mecánica se presenta como un síntoma de la condición de ensamblaje de los elementos mecánicos, los cuales pueden haber excedido tolerancias de juego permitidas. Cuando existe una fuente de excitación externa a la soltura, como el desbalance o el desalineamiento, las solturas se pueden detectar mediante la medición de vibración

(Serruto, 2020, pág. 126). Esta condición es debido a una reducción de rigidez en el sistema, permitiendo que fuerzas pequeñas produzcan una amplitud de vibración de mayor.

Los elementos rotativos asociados a solturas pueden ser: rodamientos, acoplamientos, rotores, cuñas. Estos se dan por juegos muy amplios que superan las tolerancias.

Serruto (2020) clasifica las solturas según su nivel de severidad (pág. 127):

- **Soltura Incipiente:** presencia de los primeros cuatro o cinco armónicos de la velocidad de giro, con armónicos superiores de menor amplitud.
- **Soltura Potencialmente seria:** incremento de la amplitud del primer armónico de la velocidad de giro y aparición de medios armónicos de muy baja amplitud.
- **Soltura seria:** aumento de la amplitud de los armónicos y medios armónicos de la velocidad de giro.
- **Soltura severa:** se caracteriza por presentar medios armónicos, armónicos y subarmónicos de la frecuencia de giro del rotor, de forma que en el espectro se observa una banda ancha de energía.

Los elementos mecánicos no rotativos asociados a solturas pueden ser: anclajes de fijación, uniones empernadas, alojamiento de rodamientos en tapas, etc. Estas solturas se manifiestan de manera más clara en las direcciones radiales que en las axiales. Además, pueden ser identificadas en los espectros de frecuencia por varios armónicos a la velocidad de giro del eje (Serruto, 2020, pág. 127).

Eje Flexionado: Un eje flexionado puede deberse a deformaciones causadas por dilataciones térmicas, sobrecargas radiales y axiales. Esta condición se manifiesta en el espectro de frecuencia en la dirección axial con gran amplitud del primer armónico (1x) seguido del segundo armónico (2x) a la velocidad de giro del eje.

Otra característica de esta condición es que, si se intenta el balanceo, normalmente, será necesario una gran masa de corrección. Para diferenciar la vibración axial del primer armónico (1x) de la velocidad del rotor de otras condiciones, como el desbalance en ejes voladizo o el desalineamiento de acoples o rodamientos es esencial usar el análisis de fases. Las causas de un eje flexionado incluyen una incorrecta manipulación del motor durante el transporte o el montaje, como impactos o golpes; montajes cruzados; y un alto torque de trabajo (Serruto, 2020, pág. 129).

Defectos en los Rodamientos: Los rodamientos durante su operación actúan como fuente de ruido y vibración. Dependiendo del nivel y características del ruido o vibración, es posible indicar la presencia de defectos. Su vida útil está influenciada por la carga, la velocidad de trabajo, la lubricación, el montaje, la temperatura, y las fuerzas exteriores causadas por desalineamientos o desequilibrios. Debido a esta complejidad es imposible determinar su duración por métodos analíticos. Técnicas modernas como los análisis de vibraciones son necesarias para determinar su condición. Además, la distribución de carga varía sobre los elementos rodantes a medida que estos giran sobre las pistas de rodadura, haciendo que los rodamientos generen vibraciones (Serruto, 2020, pág. 129).

Los defectos en rodamientos pueden ser localizados o distribuidos. Los defectos localizados son los más comunes y generalmente son causados por grietas, hendiduras, rebordes, resaltes de picaduras y descascaramientos. Las picaduras pueden ocurrir en las pistas o en los elementos rodantes y se produce cuando una grieta por fatiga subsuperficial se propaga hasta desprender una pieza de metal de la superficie. Este tipo de falla se acelera bajo sobrecarga, choques o impactos durante la operación o instalación, y con el incremento de la velocidad (Serruto, 2020, págs. 129, 130).

Por otro lado, los defectos distribuidos incluyen rugosidades superficiales, ondulaciones sobre las pistas, desalineamiento de las pistas y elementos rodantes desiguales. Los defectos distribuidos pueden ser por almacenamiento inadecuado o debido al desgaste durante el funcionamiento. Las fallas en rodamientos por defectos de fabricación son muy bajas. Las variaciones de las fuerzas de contacto entre los elementos rodantes y sus pistas

de rodadura causan vibración, sin embargo, es difícil poder determinar cuando la vibración es causada por defectos localizados o distribuidos. Por ello es recomendable analizar tanto las frecuencias como las amplitudes relacionadas con las frecuencias de falla en el espectro de vibración (Serruto, 2020, pág. 130).

Cuando el área con defectos distribuidos se desgasta, los impactos pueden ser mucho más pequeños que en las primeras etapas. Se han encontrado casos en los que los desprendimientos extendidos ya no producen impactos agudos, pero aún pueden ser detectados y diagnosticados si el rodamiento está soportando un elemento de máquina como un engranaje (Bond Randall, 2011, pág. 203).

Las vibraciones en los rodamientos normalmente son de alta frecuencia. Se produce en respuesta al impacto en las chumaceras causado por superficies irregulares entre los elementos rodantes y sus pistas. Estos impactos generan patrones de vibración que se repiten a una frecuencia de falla determinada que depende de la geometría del rodamiento y la velocidad de giro de la máquina. El deterioro de cada uno de estos elementos posee una frecuencia característica de falla (Serruto, 2020, pág. 130).

Las frecuencias de falla de los rodamientos son:

- BPFO (Ball pass frequency of the outer race) -Frecuencia de fallo de la pista exterior
- BPFI (Ball pass frequency of the inner race) - Frecuencia de fallo de la pista interior
- BSF(Ball spin frequency) - Frecuencia de fallas de elementos rodantes
- FTF (Fundamental train frequency) - Frecuencia de falla de la jaula

Fallas Electromecánicas: Las vibraciones por fallas electromagnéticas en motores ocurren debido a un campo magnético no uniforme, que puede ser causado por variaciones en el entrehierro, cortocircuitos en bobinas del estator o del rotor (en motores de rotor bobinado), barras del rotor rotas, fallas en el núcleo, desbalance en las líneas eléctricas, o

fallas por alimentación de corriente eléctrica. Las fallas por alimentación eléctrica pueden ocurrir por un falso contacto de un conductor eléctrico o la apertura de una protección del motor, como sucede con un fusible. (Serruto, 2020, pág. 134).

Las fallas electromagnéticas se identifican mediante las frecuencias más representativas:

Tabla 12

Frecuencias asociadas a fallas electromagnéticas en motores eléctricos

Abreviatura de la Frecuencia	Nombre de la Frecuencia	Valor de la Frecuencia
FL	Frecuencia de Línea	3600 CPM o 60 Hz
2x FL	2 veces la Frecuencia de Línea	7200 CPM o 120 Hz
FS	Frecuencia de Deslizamiento	Velocidad síncrona – RPM
FP	Frecuencia de Paso de Polos	Número de polos x FS
WSPF	Frecuencia de paso de bobinas	Número de bobinas del estator x RPM
RBPF	Frecuencia de paso de barras	Número de barras del rotor x RPM

*Fuente: Adaptado de Serruto (2020).

Las fallas electromagnéticas pueden ser producidas por excentricidades del rotor. En los motores, un rotor excéntrico puede provocar entrehierros variables, donde la mayor fuerza de atracción del campo magnético del estator se produce en las zonas más estrechas, induciendo vibraciones pulsantes generalmente entre 2FL y el armónico de velocidad de funcionamiento más cercano. Estas excentricidades pueden ser causadas por fallas en el aislamiento de las láminas del rotor, que pueden provocar cortocircuitos y recalentamientos localizados, distorsionando el rotor y reduciendo el entrehierro. Este tipo de falla térmica se detecta fácilmente, ya que los niveles de vibración aumentan con la temperatura inmediatamente después del arranque del motor. Para motores de inducción de 50 a 100 Hp, los valores máximos tolerables de vibración filtrada a la 2FL varían según su estado y tipo: 1.27 mm/seg para motores nuevos reparados, 2.54 mm/seg para motores en servicio, y 0.64 mm/seg para motores de máquinas herramientas (Serruto, 2020, págs. 135, 136).

Otro tipo de fallas electromagnéticas son las asociadas a roturas de barras o anillos en cortocircuito del rotor. Las fallas en las barras de los motores de inducción pueden ser por barras de rotor rotas, cuarteadas, corroídas, etc. El rotor de un motor de jaula de ardilla se compone de barras conductoras cortocircuitadas en sus extremos por anillos y un núcleo magnético formado por chapas magnéticas aisladas entre sí, que ocupa el espacio entre las barras. La rotura de las barras suele ocurrir en la soldadura de unión con los anillos de cortocircuito, una zona crítica debido a la concentración de esfuerzos mecánicos. A pesar de estar diseñadas para soportar el arranque y parada del motor, las barras pueden fallar por fatiga del material. Los regímenes transitorios térmicos pueden generar esfuerzos variables dentro del paquete magnético rotórico, llevando a torsiones y agrietamientos de los anillos. Una vez que comienza el agrietamiento de la barra o el anillo, se desencadena un proceso degenerativo donde la parte defectuosa se calienta hasta romperse. Esto provoca arcos eléctricos que incrementan la corriente en las barras adyacentes, aumentando así la temperatura y los esfuerzos mecánicos, lo que eleva la probabilidad de nuevas grietas (Serruto, 2020, págs. 136, 137).

Los problemas de fase eléctrica se deben a soldaduras, roturas de las conexiones o falsos contactos. Estos problemas suelen ser causados por la corrosión o el desgaste en las superficies de contacto de una o más fases de corriente. Una condición crítica es cuando el conector defectuoso solo hace contacto esporádicamente (Serruto, 2020, pág. 137).

La excentricidad del estator produce un entrehierro desigual durante el funcionamiento, lo que ocasiona una vibración direccional. Las diferencias en el entrehierro no deben exceder el 5% en motores de inducción y el 10% en motores síncronos. El origen de la excentricidad del estator a menudo se debe a la falta de rigidez de la bancada, lo que puede causar patas cojas o bases alabeadas. Las patas cojas son una condición donde uno o más apoyos del motor eléctrico no están completamente asentados sobre la base. Esta situación puede llevar a problemas de desalineamiento interno del motor y excentricidad en el entrehierro. Además, la pata coja normalmente produce una elevada amplitud en

la velocidad de giro, lo que dificulta su identificación y de otras condiciones como desbalanceo y falta de alineamiento (Serruto, 2020, pág. 138).

Una fuente de vibraciones en un motor eléctrico ocurre cuando el campo magnético se altera debido a un cortocircuito en el estator y el núcleo. Cuando una de las bobinas del estator no tiene corriente, afecta el campo magnético lo que resulta en vibraciones. Las bobinas del estator que están en cortocircuito generan una fuente de calor localizada y desigual, lo que provoca una vibración inducida térmicamente que aumenta significativamente con el tiempo (Serruto, 2020, pág. 139).

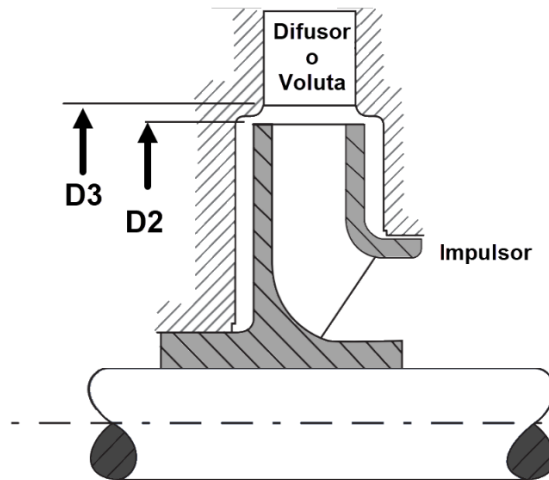
Espacio entre el Impulsor y el Difusor o Voluta: Las bombas centrífugas están sujetas a una característica única de vibración causada por la interacción de los álabes del impulsor y la lengua del difusor o de la voluta. Esto se conoce como vibración del paso de álabes. El espacio entre los álabes del impulsor y los álabes del difusor o los álabes de la voluta se llama B-Gap o Gap B. Cuando el B-Gap es demasiado pequeño, se puede presentar una amplitud excesiva de vibración en la frecuencia de paso de álabes. El B-Gap siempre se expresa como un porcentaje (%). Se calcula de la siguiente manera:

$$B - Gap = \frac{100 \times (D3 - D2)}{D1} \quad (1)$$

Generalmente se considera deseable mantener los B-Gaps mayores al 3% en bombas con difusor y al 6% en bombas con voluta. Hay muchos factores adicionales que afectan la amplitud de la respuesta de vibración en la frecuencia de paso de álabes (Eshleman, 2020, pág. 44).

Figura 9

Espacio entre el Impulsor y el Difusor y o Voluta



*Fuente: Adaptado de “Cat I: Introduction to Machinery Vibrations” por Eshleman, 2020.

Cavitación: Una presión de succión baja en la entrada de la bomba puede provocar cavitación, un fenómeno donde se forman y colapsan burbujas de vapor, generando ruido excesivo, disminución de rendimiento y erosión rápida de la bomba y el impulsor. La cavitación ocurre cuando el líquido, sometido a una presión insuficiente, empieza a vaporizarse, similar al proceso de ebullición, y luego las burbujas colapsan en áreas de alta presión. Este colapso libera energía que impacta las superficies del impulsor, causando daño. Si no se corrige, puede resultar en la destrucción rápida de la bomba. Por lo tanto, se debe monitorear la presión en la línea de succión y asegurar una carga de succión positiva neta adecuada para prevenir la cavitación y sus efectos adversos, como la reducción de la eficiencia en los propulsores de los barcos y las fuerzas sobre las superficies de control. (Mott & Untener, 2015)

Recirculación: En el punto de máxima eficiencia, el ángulo de descarga del fluido coincide con el ángulo del difusor y el flujo es suave con mínimas perturbaciones. Si el flujo disminuye (demasiada contrapresión) o aumenta (muy poca contrapresión), el ángulo del fluido ya no coincide con el ángulo del difusor, lo que resulta en recirculación, mayor vibración y una pérdida de eficiencia. La cabeza dinámica excede la cabeza centrífuga generada

por el impulsor. A medida que disminuye la contrapresión, el flujo a través de la bomba aumenta y el ángulo de descarga del fluido aumenta, causando cavitación.

II.1.2 Análisis de Vibración

El análisis de vibración comprende varias técnicas con la finalidad de evaluar y diagnosticar el estado de estructuras, máquinas, edificios, entre otros. Este proceso comienza con la captura de señales por medio de sensores o transductores. Estas señales son luego procesadas y analizadas minuciosamente. Mediante la comparación de los resultados con patrones conocidos o estándares es posible identificar anomalías o defectos, permitiendo así el planeamiento de medidas correctivas.

Vibración Mecánica: El movimiento que se repite después de un intervalo de tiempo es conocido como vibración u oscilación, con ejemplos comunes como el péndulo de un reloj y el movimiento de una cuerda de instrumento musical. La teoría de las vibraciones se ocupa del estudio de los movimientos oscilatorios de cuerpos y las fuerzas asociadas, abordando fenómenos como la extensión y torsión alternas que resultan en estrés y fatiga inducidos por el estrés. Dicha fatiga puede llevar a fallos prematuros, dependiendo de la magnitud y el número de ciclos de estrés alternante. La vibración, generada por maquinaria o estructuras, puede causar incomodidad física y fallos mecánicos. Por ejemplo, las vibraciones en turbinas de vapor y gas pueden provocar fallos catastróficos. La importancia del análisis de vibraciones radica en su potencial para prevenir daños en maquinaria y estructuras, así como en casos de desastres naturales como terremotos. Por otro lado, las vibraciones también tienen aplicaciones positivas en pantallas vibratorias, máquinas de lavar y en la música, así como en el alivio de estrés en materiales y en tratamientos médicos (Bhave, 2010).

La vibración se puede expresar en varios tipos de unidades, dependiendo el tipo de medición y análisis:

- Desplazamiento en mm o pulg.

- Velocidad en mm/s o pulg/s
- Aceleración en mm/s² o g.

Amplitud: La amplitud de vibración se define como la fuerza o tamaño de la señal. En el análisis de vibraciones, la amplitud suele ser el factor predominante para determinar la severidad de un problema (Piotrowski, 2007, pág. 48).

Existen diversas maneras de medir la amplitud. La manera que se utiliza dependerá de las unidades de vibración y del análisis que se va a realizar:

- **Pico:** Máxima valor absoluto en un tiempo dado. Utilizado en la aceleración.
- **RMS:** Valor cuadrático medio de la vibración. Utilizado en la velocidad.
- **Pico-Pico:** Diferencia entre el valor máximo y mínimo en un tiempo dado. Utilizado en el desplazamiento

Frecuencia: La frecuencia de una vibración es la inversa del periodo ($F=1/P$) de oscilación y se mide en unidades de HZ (Ciclos por segundo) o CPM (Ciclos por minuto) (Barboza, 2013, pág. 24).

Ángulo de Fase: La fase es una medida que indica la diferencia de tiempo entre dos ondas sinusoidales. Aunque la fase físicamente es una diferencia de tiempo, siempre se mide en términos de ángulos, grados o radianes (Barboza, 2013, pág. 24). La fase se usa con ondas de la misma frecuencia, por lo cual el tiempo entre ellas se puede expresar como una parte de su periodo. Esto permite realizar un análisis más preciso. Serruto (2020, pág. 31) dice que el desplazamiento de fase puede ser positivo o negativo, lo que significa que una onda puede estar adelantada o retrasada respecto a otra.

Desplazamiento: El desplazamiento es el cambio de posición de un objeto, desde una posición inicial. La unidad común del desplazamiento es micrómetros (μm), aunque también puede ser expresada en milímetros (mm) o milésimas de pulgada (mils) (Serruto,

2020, pág. 36). Eshleman (2020) afirma que el desplazamiento está relacionado a los esfuerzos internos.

Velocidad: La velocidad de vibración es la tasa de variación del desplazamiento. La velocidad es medida normalmente en milímetros sobre segundo (mm/s) o pulgadas sobre segundo (in/s). Es un indicador fiable de problemas en maquinaria que opera a una velocidad constante, detectando condiciones como desbalanceo, desalineación, soltura mecánica, y fallas en rodamientos. La fase de onda de velocidad se desplaza 90 grados respecto a la de desplazamiento (Serruto, 2020, pág. 36). Eshleman (2020) afirma que la velocidad está relacionado a la fatiga de los componentes.

Aceleración: La aceleración es la tasa de variación de la velocidad. La aceleración es medida normalmente en gravedades (g) o metros sobre segundo al cuadrado (m/s²). Es fundamental para la detección temprana de fallas en rodamiento y fallas en cajas reductoras de alta velocidad. La aceleración está adelantada 90 grados con respecto a la velocidad y 180 grados con respecto al desplazamiento (Serruto, 2020, pág. 36). Eshleman (2020) afirma que la aceleración está relacionado a la fuerza presente en los componentes.

Tabla 13

Medidas de vibración en Máquinas

Medida	Rango de Frecuencia Útil	Parámetro Físico	Aplicación
Desplazamiento relativo	0-1,000 Hz	Esfuerzo/Movimiento	Movimientos relativos en rodamientos/carcasas
Desplazamiento absoluto	0-10 Hz	Esfuerzo/Movimiento	Condición de la máquina
Velocidad	10-1,000 Hz	Energía/Fatiga	Condición general de la máquina, vibraciones de frecuencia media
Aceleración	>1,000 Hz	Fuerza	Condición general de la máquina, vibraciones de frecuencia media-alta

*Fuente: Adaptado de Eshleman (2020).

La selección de la medida de vibración se basa en las frecuencia de la vibración presentes, el tipo de sensor, el diseño de la máquina, el tipo de análisis que se realizará (por ejemplo, fallas, condición, información de diseño) y la información que se busca obtener (Eshleman, 2020).

Tabla 14

Unidades usadas en el análisis de vibraciones

Descripción	Unidades
Amplitudes de movimiento vibratorio	Desplazamiento: mm pico-pico
	Velocidad: mm/s RMS
	Aceleración: gs pico
Frecuencias	Ciclos por minuto (CPM) o ciclos por segundo (Hertz, Hz), o en órdenes (múltiplos de la velocidad de operación).
Velocidad de Rotación	Revoluciones por minuto (RPM).

**Fuente:* Adaptado de Eshleman (2020).

Análisis de Fourier: La técnica de análisis espectral mediante la transformada de Fourier es fundamental para describir el comportamiento de máquinas y equipos. Esto permite analizar señales en el dominio de la frecuencia lo que ayuda a identificar los diversos componentes de las vibraciones en máquinas. Sin embargo, esta técnica no proporciona información en el tiempo de los componentes de la frecuencia en señales no estacionarias (Pacombia, 2017, pág. 30).

El uso de ventanas en la FFT permite minimizar errores y mejorar la separación de componentes de frecuencia. Las ventanas que se usan comúnmente son: Rectangular, Hanning y Flat Top; y cada uno puede tener diferentes magnitudes de amplitud y frecuencia.

Transformada de Fourier: La transformada de Fourier es una técnica que se utiliza para obtener los componentes de frecuencia de una señal. Esto permite interpretar detalladamente el comportamiento de una señal. Para ello convierte la señal en los componentes de frecuencia que luego serán representado gráficamente con el nombre de espectro.

La Transformada de Fourier de una secuencia es:

$$x[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega \quad (2)$$

Y la transformada inversa de Fourier es:

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] e^{-j\omega n} \quad (3)$$

(Oppenheim & Schafer, 2009, pág. 48).

Criterio de Nyquist: La señal muestreada es el producto de la señal continua con un tren de impulsos. La transformada de Fourier del tren de impulsos es también un tren de impulsos lo que da como resultado que la transformada de Fourier de la señal muestreada consista en copias periódicas de la señal original desplazadas por múltiplos de la frecuencia de muestreo. Para evitar solapamiento entre copias de la transformada de Fourier la frecuencia de muestreo debe ser mayor al doble de la mayor frecuencia presente en la señal original. conocido como el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon. Si se cumple el criterio de Nyquist, la señal original puede ser recuperada exactamente a partir de sus muestras usando un filtro paso bajo ideal (Oppenheim & Schafer, 2009, págs. 155-160).

$$\Omega_s \geq 2 \cdot \Omega_N \quad (4)$$

Donde:

Ω_s : Frecuencia de muestreo

Ω_N : Frecuencia máxima presente en la señal

Transformada Discreta de Fourier: La transformada Discreta de Fourier se utiliza en secuencias de duración finita y nos ayuda a determinar los componentes de frecuencia en una señal.

Según Oppenheim la Transformada Discreta de Fourier de una secuencia es:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] W_N^{kn}, 0 \leq k \leq N-1 \quad (5)$$

Donde:

$$W_N = e^{-j(\frac{2\pi}{N})} \quad (6)$$

La Transformada Discreta Inversa de Fourier de una secuencia es:

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] W_N^{-kn}, 0 \leq n \leq N-1 \quad (7)$$

(Oppenheim & Schafer, 2009, pág. 630).

Transformada Rápida de Fourier (FFT): La Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform, FFT) es un algoritmo eficiente para calcular la DFT. Para ello explota las propiedades de periodicidad y simetría de los coeficientes. Para realizar la DFT se requiere $K(N^2)$ operaciones, donde K es una constante y N es el número de elementos de la secuencia, mientras que la FFT tan solo requiere $K \cdot (N \log N)$ número de operaciones, cuando N es grande reduce el número significativamente de operaciones. Para realizar la FFT se requiere que la secuencia cumpla que $N = 2^v$, donde v es un entero (Oppenheim & Schafer, 2009, págs. 700-706).

La Transformada Rápida de Fourier es el método más utilizado para visualizar las vibraciones en frecuencia de una señal. Los algoritmos de la FFT no están al alcance de este estudio sin embargo se utilizarán librerías de Python como Numpy y Scipy que tienen implementado la FFT.

Una desventaja al utilizar la Transformada de Fourier es que la extracción de la frecuencia solo puede realizarse para la duración completa de una señal o secuencia. Dado

que la integral en la ecuación de transformada de Fourier (4.10) se extiende sobre todo el tiempo, desde $-\infty$ hasta $+\infty$, la información que proporciona surge de un promedio sobre toda la longitud de la señal.

Si en algún momento en la secuencia hay una oscilación local que tenga una característica particular, esta contribuirá al resultado de la transformada de Fourier, pero su ubicación en el tiempo se perderá. Esta desventaja es superada con la Transformada de Fourier de Tiempo corto y el Análisis de Wavelets, que descompone la señal de manera alternativa (Newland, 2005, pág. 295).

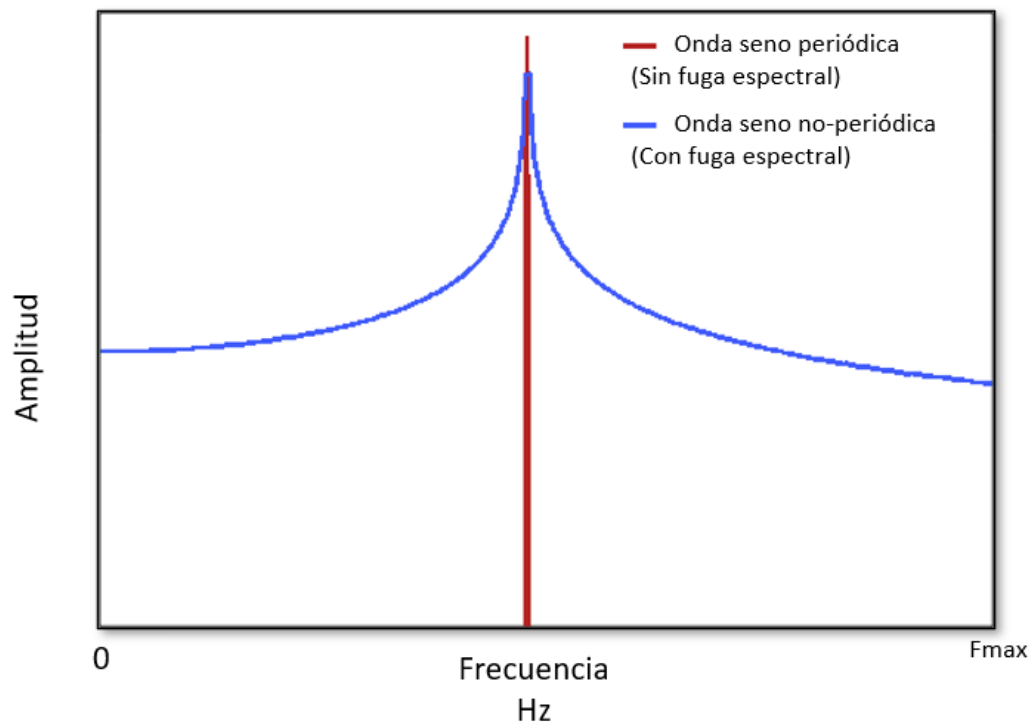
Ventanas: Existen diferentes tipos de ventanas que se usan para reducir la fuga espectral al realizar la transformada de Fourier en datos temporales y convertirlos al dominio de la frecuencia. Cada ventana está diseñada con un propósito específico y tiene sus ventajas y desventajas. (Siemens, 2019).

Señales Periódicas vs Señales No-Periódicas: La utilización de las ventanas afecta de manera diferente dependiendo si las señales son periódicas y no periódicas.

- **Señal periódica:** Si la señal colectada se repite varias veces y forma la señal original. Dentro de las señales periódicas tenemos:
 - Señales aleatorias que empiezan y terminan en 0.
 - Señales sinusoidales con una relación entera con el tiempo de medición.
 - Señales de impacto que decrecen a lo largo del tiempo.
- **Señales no periódicas:** Si la misma señal colectada con diferente tiempo resulta en una señal no periódica, creando un ancho de banda de transientes. Las señales aleatorias son consideradas no periódicas y tienen inicios y finales abruptos. Además, no pueden colectarse adecuadamente variando la frecuencia de muestreo, ya que están compuestas de varias frecuencias.

Figura 10

Comparación en la Transformada de Fourier de dos señales sinusoidales



Ventana Hanning: La ventana Hanning empieza y termina en 0, lo que ayuda a reducir los golpes abruptos al inicio y final de una señal. Esto reduce la distribución no deseada de frecuencias, también conocida como fuga espectral, al aplicar la transformada de Fourier. La ventana Hanning es comúnmente utilizada para señales aleatorias debido a sus ventajas sobre otras ventanas. Ofrece un máximo de 15% de error en la amplitud y la fuga espectral está confinada en 1.5 veces en ancho de línea espectral a cada lado de la señal de seno original. Este error del 15% se da incluso aplicando factores de corrección de ventana, y puede reducirse a 7.5% si la frecuencia está a un cuarto de la distancia entre dos líneas espectrales. En señales periódicas puras, la ventana Hanning no introduce error (0%), e incluso puede inducir fuga espectral si se le aplica (Siemens, 2019).

La ecuación de la ventana Hanning es:

$$w(n) = 0.5 - 0.5 \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot n}{N-1}\right) \quad (8)$$

Figura 11

Aplicación de la ventana Hanning a una señal aleatoria

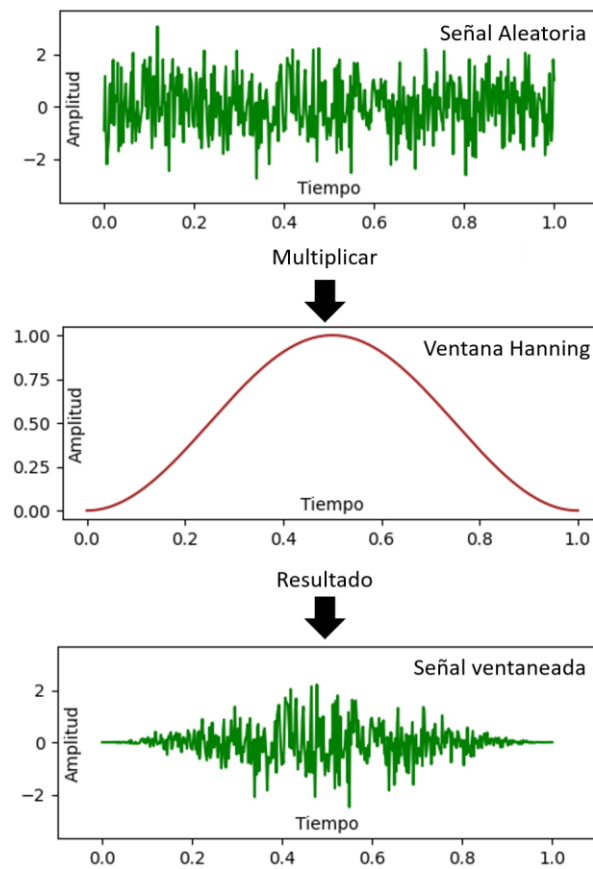
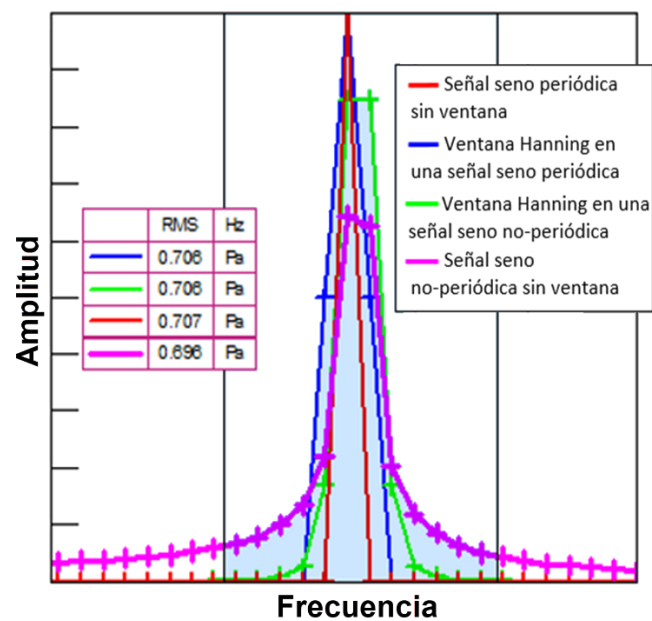


Figura 12

Comparación de error RMS con diferentes señales



En una señal aleatoria no periódica, el cálculo del RMS tiene menor error al usar la ventana Hanning en comparación a la señal sin ninguna ventana (Siemens, 2019).

Ventana Flattop: La ventana Flattop proporciona una mayor precisión en la amplitud de una señal en comparación con la ventana Hanning, con un error máximo de menos del 0.01%, frente al 15% de la ventana Hanning. Para ello se utiliza factores de corrección de la reducción de amplitud causada por la aplicación de la ventana. Sin embargo, la ventana

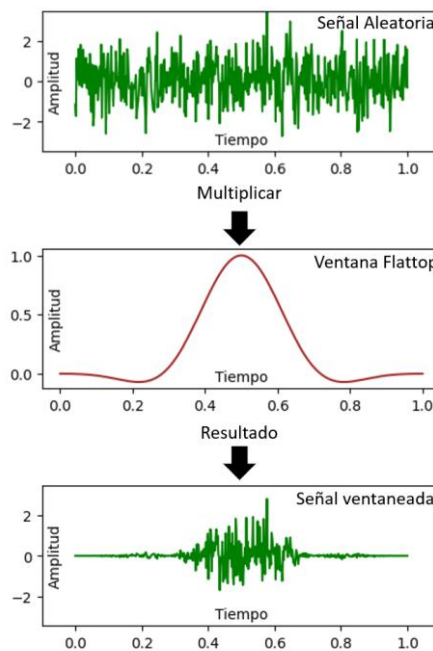
Flattop genera una fuga espectral de 3.43 veces el ancho de la línea espectral de una señal, significativamente mayor que el 1.5 de la ventana Hanning. Al igual que la ventana Hanning, la ventana Flattop comienza y termina en 0 (Siemens, 2019).

La ecuación de la ventana Flattop:

$$w(n) = 1 - 1.93 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + 1.29 \cdot \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right) - 0.388 \cos\left(\frac{6\pi n}{N-1}\right) + 0.028 \cos\left(\frac{8\pi n}{N-1}\right) \quad (9)$$

Figura 13

Aplicación de la ventana Flattop a una señal aleatoria



La falta de precisión de la ventana Flattop la hace inconveniente cuando las frecuencias no están bien separadas, ya que esto puede causar la unión de varios picos. En estos casos, es referible usar la ventana Hanning (Siemens, 2019).

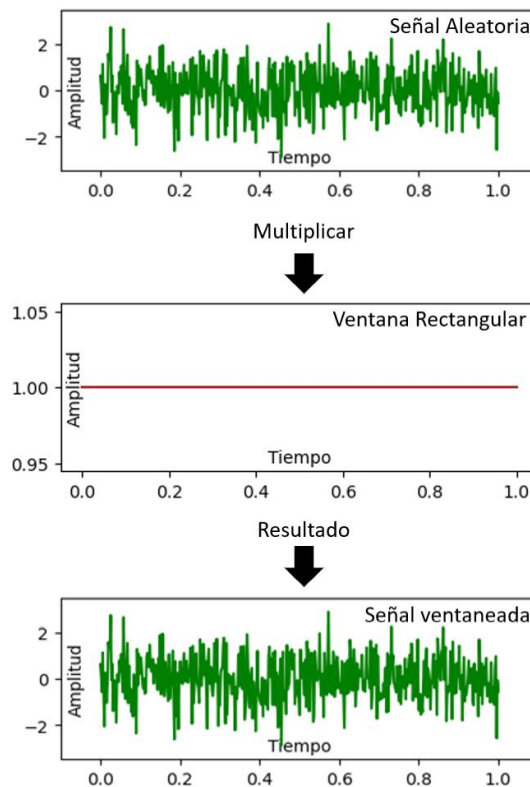
Ventana Rectangular: La ventana Uniforme, también conocida como ventana Rectangular, tiene un valor constante de 1 en toda la medición. No crea distorsiones de frecuencia o amplitud cuando la señal es periódica. En señales no periódicas, la amplitud se reduce hasta un 36%, pero la frecuencia se mantiene dentro del ancho de banda medido. La ventana Uniforme es preferida para señales periódicas porque la ventana Hanning o Flat Top pueden distorsionar la frecuencia y la amplitud. Sin embargo, si no se puede asegurar que la señal es periódica se debe evitar su uso (Siemens, 2019).

La ecuación de la ventana Rectangular es:

$$w(n) = 1 \quad (10)$$

Figura 14

Aplicación de la ventana rectangular a una señal aleatoria



Análisis de Tiempo-Frecuencia: La distribución tiempo-frecuencia, originada en la física cuántica en la década de los 30 con la distribución de Wigner, ha demostrado ser valiosa en el análisis de señales no estacionarias. Esta técnica permite identificar la distribución de energía de una señal en los dominios del tiempo y de la frecuencia. En el ámbito de la ingeniería mecánica, las distribuciones tiempo-frecuencia se han utilizado de manera prometedora en el monitoreo y detección de fallas en sistemas rotativos. También se han realizado estudios en la estimación de respuesta de desequilibrio, la identificación de sistemas giratorios, en el análisis vibratorio y acústico de componentes de vehículos, y en el análisis y estimación de los parámetros de sistemas no estacionarios. Las distribuciones tiempo-frecuencia son útiles para analizar sistemas que operan en condiciones reales y están sujetos a cambios de carga durante su funcionamiento (Pacombia, 2017, pág. 31).

Transformada de Fourier de Tiempo Corto (STFT): La Transformada de Fourier de Tiempo Corto (Short-time Fourier Transform, STFT) es una técnica que transforma una función en el dominio del tiempo en un gráfico bidimensional en el tiempo y la frecuencia. Este procedimiento se realiza con una ventana en el tiempo de duración constante que recorre toda la señal analizada. En cada segmento de tiempo, se calcula la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Este procedimiento se repite con el desplazamiento de la ventana. El desplazamiento del segmento temporal puede entenderse como una superposición entre ventanas de tiempo consecutivas (Łuczak, 2024, pág. 4).

$$F(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \omega(t - \tau) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (11)$$

Donde:

f : Frecuencia

$\omega(t - \tau)$: Ventana temporal de longitud constante

$f(t)$: Es la función examinada

F : Es el resultado en el dominio tiempo-frecuencia

Sin ninguna modificación, la ventana temporal se comporta como una ventana rectangular. Por otro lado, es recomendable el uso de alguna ventana para evitar la fuga espectral. La resolución temporal depende del tamaño del segmento. Por el contrario, la resolución en frecuencia se calcula de manera similar a la FFT. Esto significa que la longitud de la ventana temporal determina la resolución de la frecuencia expresada por la fórmula:

$$f_{res} = f_s / K \quad (12)$$

donde K denota la longitud del segmento en número de muestras y f_s representa la frecuencia de muestreo (Łuczak, 2024, pág. 5).

Análisis de Transformada Wavelet: El uso de wavelets en el análisis de vibraciones es una técnica nueva que presenta varias dificultades, como la elección de la wavelet adecuada y la interpretación de los datos. La transformada wavelet es computacionalmente simple, no obstante, tiene limitaciones en su decaimiento. Aunque sigue en desarrollo, diversas maneras de aplicar la transformada wavelet podrían convertirse en un estándar en el análisis de vibraciones en el futuro (Newland, 2005, pág. 370).

El origen de las Wavelets proviene del análisis de registros de terremotos, pero actualmente ha encontrado importantes aplicaciones en el procesamiento de voz e imágenes y es una nueva herramienta significativa en el análisis de señales en general (Newland, 2005, pág. 295).

La selección de la Wavelet Madre para el análisis de vibraciones mecánicas ha sido estudiado ampliamente y comparado con diferentes métodos. Algunos estudios son los siguientes:

Uno de los primeros artículos sobre diagnóstico de fallas mecánicas utilizando wavelets fue el de McFadden y Wang en el MSSP, centrado en el diagnóstico de fallas en engranajes. En este estudio, McFadden y Wang (como se cita en Gaberson, 2006) concluyeron que las wavelets ortogonales Daubechies-4 y la armónica de Newland no ofrecen un mapa de tiempo-frecuencia lo suficientemente amplio. Por otro lado, el análisis de wavelets continuas no ortogonales de Morlet proporciona más información sobre el fallo de

engranajes (Gaberson, Continuous wavelet machinery vibration analysis calculations., 2006, pág. 1).

En su estudio, Gaberson (2002) compara el uso de diferentes técnicas de análisis en tiempo-frecuencia en señales de vibración transiente en máquinas. En ello menciona que la STFT es más precisa en cálculo de las amplitudes y características de señales que varían lentamente. El análisis con la wavelet Morlet es tan buen como el STFT, sin embargo, parece encontrar cresta de tiempo constantes verticales que podría sugerir impactos con otras técnicas de análisis. Las wavelets ortogonales de Daubechies pueden ser realizadas rápidamente comparado con otras técnicas (Gaberson, The Use of Wavelets for Analyzing Transient Machinery Vibration, 2002, pág. 17).

En el estudio de Łuczak (2024), se realizó una comparación en condiciones iguales entre la STFT y la CWT de Morlet. Los atributos de una wavelet Morlet compleja fueron seleccionados por el diseñador del sistema. Los resultados indican que la wavelet de Morlet permite extraer características de frecuencia con mayor precisión en comparación con la STFT. Esto permite una representación con mayor claridad y alcance de los síntomas, mejorando las capacidades diagnósticas del sistema (Łuczak, 2024, pág. 10).

En la mayoría de estudios se concluye que la Transformada Wavelet Continua de Morlet es la que mejor representa los cambios transitorios durante un análisis de vibración. Existen otros tipos de Wavelet que también extraen características de la señal como la Daubechies, Mexican-Hat, etc.

Principio Matemático de la Transformada Wavelet: La Transformada Wavelet Continua (CWT por sus siglas en ingles Continuous Wavelet Transform) es un método que convierte una señal basada en el tiempo en una representación de tiempo-frecuencia con una escala de amplitud. La CWT permite ajustar la longitud del segmento de tiempo utilizado para analizar la señal. Este ajuste permite seleccionar con precisión las frecuencias de la señal en función de escala de la ventana. Esto significa que se puede utilizar para identificar con precisión tanto frecuencias bajas como altas de una señal. La CWT emplea

una función núcleo (kernel en inglés) que se puede seleccionar según las necesidades requeridas (Łuczak, 2024, pág. 5).

El cálculo de la transformada wavelet se realiza mediante:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \bar{\psi} \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (13)$$

Donde:

$W(a, b)$ son los coeficientes de la Transforma Wavelet

a : Es el Factor de escala

b : Es el Factor de desplazamiento

$\bar{\psi}$: Es la contraparte conjugada de la Transformada Wavelet

$f(t)$: Es la función examinada.

Las wavelets Morlet complejas tienen un espectro dominante suave y único, y se puede seleccionar la frecuencia dominante. Por el contrario, las wavelets Mexican-Hat tienen la wavelet madre con frecuencia dominante (central). Las wavelets Shannon complejas tienen ecuaciones complicadas y una forma de frecuencia rectangular con ondulaciones para todas las frecuencias dominantes (centrales) (Łuczak, 2024, pág. 5).

Existen diferentes tipos de wavelets que se pueden utilizar para transformar una señal. A continuación, se presentarán algunas:

Wavelet Morlet: La wavelet Morlet es una onda sinusoidal modulada por una gaussiana y se define como:

$$\psi(t) = e^{j\omega_0 t} \cdot e^{-t^2/2} \quad (14)$$

La función Morlet usa la frecuencia angular central (ω_0) para transformar una señal.

Wavelets Morlet Complejas: La función wavelet Morlet compleja se define por la expresión:

$$\bar{\psi}_M(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} e^{j2\pi f_c t} \cdot e^{-\frac{t^2}{f_b}} \quad (15)$$

Donde:

$\bar{\psi}_M(t)$: Es la Wavelet Madre Morlet Compleja

f_b : Es el ancho de la frecuencia wavelet

f_c : Es la frecuencia dominante central

El primer componente, $e^{j2\pi f_c t}$, se deriva de la fórmula de Euler y resulta en $\cos(2\pi f_c t) + j\text{seno}(2\pi f_c t)$, que es el núcleo de la transformada de Fourier. El otro componente $e^{-t^2/b}$ se interpreta es la forma de la envolvente de la ventana en el tiempo. El resultado de la CWT de Morlet es una función de a , que representa la escala, y b , que indica el factor de desplazamiento. En consecuencia, se denomina adecuadamente un examen tiempo-escala (escalograma o espectrograma). Sin embargo, para comparar las frecuencias obtenidas en la señal es mejor usar un pseudo-frecuencia, ya que permite observar la frecuencia en Hz (Łuczak, 2024, pág. 7).

Esta conversión se logra mediante la siguiente ecuación:

$$f_{pseudo} = \frac{f_{media}}{a \cdot f_s} \quad (16)$$

Aquí, f_{media} denota la frecuencia central de la wavelet y f_s representa el tiempo de muestreo. El examen FFT de la función wavelet puede abarcar componentes de múltiples frecuencias, pero solo se selecciona y retiene la frecuencia dominante, lo que la convierte en una pseudo-frecuencia (Łuczak, 2024, pág. 7).

Wavelets Mexican Hat: La wavelet Mexican Hat, también conocida como Ricker wavelet, se define como la segunda derivada de una gaussiana:

$$\bar{\psi}_M(t) = (2 - t^2)e^{-t^2/2} \quad (17)$$

Wavelet Shannon: La wavelet Shannon está basada en la función seno

$$\psi(t) = \frac{\sin(\pi t)}{\pi t} \quad (18)$$

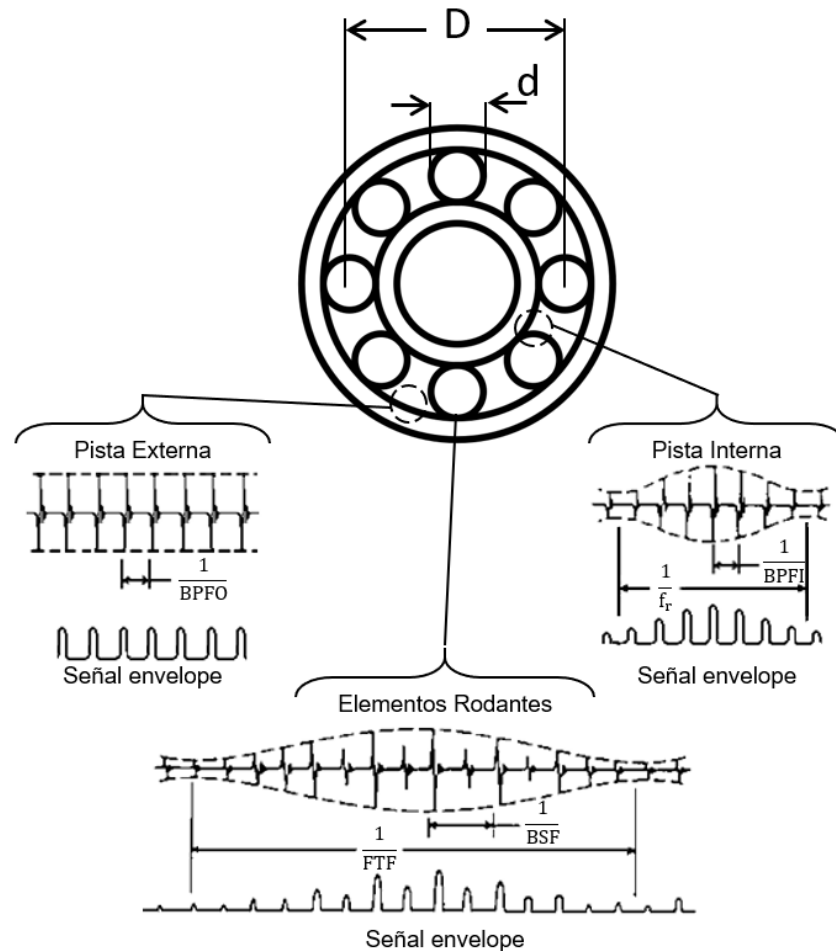
Análisis de Envolvente: El análisis de envolvente o envelope es una técnica avanzada de análisis de vibraciones usada para detectar fallas de alta frecuencia. Estas fallas pueden ser causadas por un impacto repetitivo que produce una modulación de la amplitud. Esta técnica implica aislar la señal de interés mediante la extracción de su envolvente, lo que facilita una identificación más precisa de los defectos. Además, el análisis de envolvente permite diagnosticar una variedad de problemas mecánicos tales como daños en rodamientos, fallas en los dientes de engranajes, excentricidad en los engranajes y deterioro en las palas de una turbina o bomba (Countréach & Gaudet, s.f.).

Además, el análisis envelope es la técnica más utilizada para detectar fallas en los rodamientos. Anteriormente, se empleaba la Transformada de Fourier para ubicar la frecuencia de falla de los rodamientos (inferior a 500Hz). Pruebas hechas con rodamientos con fallas no mostrarían diferencias significativas entre las señales de rodamientos defectuosos y normales en el espectro de frecuencias, especialmente en fases iniciales de falla (Osorio Santander, 2014, págs. 66-68).

Esta dificultad en la determinación de las fallas de los rodamientos en el espectro es superada cuando se utiliza el análisis envelope. El análisis envelope y el análisis a altas frecuencias es más sensible para determinar fallas en los rodamientos. Esto es debido a que las holguras dentro del rodamiento excitan un impulso que luego excita las frecuencias naturales. Los impactos de corta duración contienen energía que luego es distribuida a lo largo del espectro. Estas frecuencias naturales son de alta frecuencia debido a la rigidez elevada en una máquina (Osorio Santander, 2014, pág. 69).

Figura 15

Señales de fallas típicas en rodamientos de elementos rodante y sus envolventes



*Fuente: Adaptado de Vibration-based Condition Monitoring (Bond Randall, 2011)

En el estudio de Osorio Santander (2014, pág. 70) indica que para realizar un análisis envelope, se debe seguir el siguiente procedimiento:

1. Obtener la FFT (Transformada Rápida de Fourier).
2. Aplicar un filtro pasa banda para el rango de frecuencias que se desea analizar.
3. Filtrar las señales y demodular para eliminar las componentes de alta energía de modulación. Esto puede llevarse a cabo por dos métodos:
 - a. Utilizar la transformada de Hilbert para la construcción de una señal analítica compleja en el dominio del tiempo.

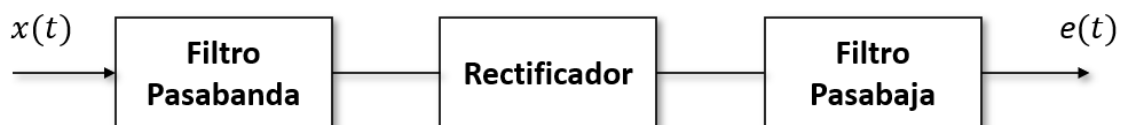
- b. Rectificar y suavizar la señal utilizando un filtro paso bajo para eliminar la frecuencia portadora.
4. Realizar la FFT de la envolvente para obtener su espectro.
5. En el espectro se realiza un nuevo cambio de dominio para posibilitar la extracción de las frecuencias de falla de los rodamientos.

El filtro pasa banda permite aislar la zona donde la frecuencia natural de los rodamientos son moduladas por los impactos causados por la fallas de los rodamientos. Howard (n.d.) recomienda usar un filtro para eliminar las frecuencias por debajo de las 10 veces la RPM de la máquina.

Técnica de Rectificado-Filtrado: Esta técnica se basa en el filtrado de la señal de vibraciones, $x(t)$, para eliminar componentes de baja frecuencia. Posteriormente, la onda de tiempo se rectifica y se pasa a través de un filtro pasabaja para obtener la señal envolvente, $e(t)$. Esto permite eliminar vibraciones no asociadas a fallas en los rodamientos. Luego, se realiza el espectro de esta señal procesada, asegurando que solo aparezcan las frecuencias indicativas de fallos en los rodamientos (Hernández-Montero & Gutierrez García, 2010, pág. 35).

Figura 16

Diagrama de bloques del proceso de rectificación y filtrado



Técnica que aplica la transformada de Hilbert

Se aplica al módulo de la señal analítica $x(t) + j\hat{x}(t)$, donde $x(t)$ es la señal a analizar y $\hat{x}(t)$ es la transformada de Hilbert.

$$e = |x(t) + j\hat{x}(t)| \quad (19)$$

La transformada de Hilbert se obtiene de la siguiente manera:

$$\hat{x}(t) = \frac{1}{\pi t} * x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \times \frac{1}{\pi (t - \tau)} d\tau \quad (20)$$

La transformada de Fourier de $\hat{x}(t)$ está dada por:

$$\hat{X}(f) = -j \cdot \text{sng}(f) \cdot X(f) \quad (21)$$

Donde

$$\text{sng}(u) = \begin{cases} -1, & u < 0 \\ 1, & u \geq 0 \end{cases} \quad (22)$$

Existen dos métodos que utilizan la transformada de Hilbert. El método B es el más empleado debido a que se basa en un algoritmo más rápido, aunque ambos métodos, A y B, llevan al mismo resultado (Hernández-Montero & Gutierrez García, 2010, pág. 36).

Figura 17

Diagrama de bloques del método A para la obtención de la Transformada de Hilbert

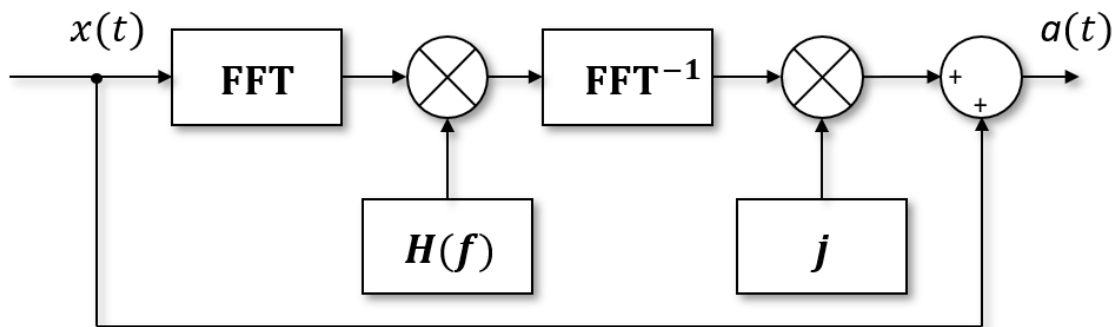
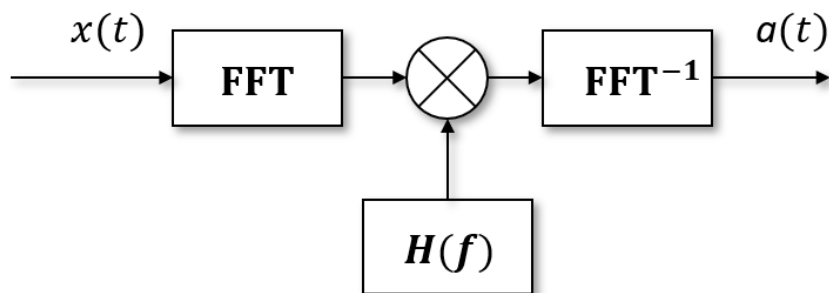


Figura 18

Diagrama de bloques del método B para la obtención de la Transformada de Hilbert



En el Método A, $H(f)$ se define:

$$H(f) = \begin{cases} -j, & f \leq 0 \\ j, & f > 0 \end{cases} \quad (23)$$

En el Método B, $H(f)$ se define:

$$H(f) = \begin{cases} 2, & f \geq 0 \\ 0, & f < 0 \end{cases} \quad (24)$$

ERBESSD Instruments recomienda delimitar la severidad de la aceleración envelope según la Tabla 15.

Tabla 15

Clasificación de severidad según la Aceleración Envelope

Severidad de Envolvimiento (gE)	Velocidad <500 rpm	Velocidad entre 500 y 1800 rpm	Velocidad 1800 o 3600 rpm
0.1	Bueno	Bueno	Bueno
0.5	Satisfactorio	Bueno	Satisfactorio
0.75	Satisfactorio	Satisfactorio	Satisfactorio
1	Insatisfactorio	Insatisfactorio	Insatisfactorio
2	Inaceptable (peligro)	Inaceptable (peligro)	Insatisfactorio
4	Inaceptable (peligro)	Inaceptable (peligro)	Inaceptable (peligro)
10	Inaceptable (peligro)	Inaceptable (peligro)	Inaceptable (peligro)

*Fuente: según Erbessd Instruments (Howard, n.d.).

Evaluación de la Severidad: Para determinar si la vibración en una bomba supera niveles aceptables de vibración, primero hay que establecer estos niveles. La norma ISO 20816-1 permite establecer la severidad de vibración en diferentes máquinas. Sin embargo no da parámetros acerca de los niveles de vibración en una bomba con base flexible. Manuales como el de Vibration Institute, recomienda hacer un seguimiento de las vibraciones, a partir de condiciones normales. Cambios abruptos en los niveles de vibración pueden indicar alguna falla. Para determinar los valores límite de vibración en base flexible, algunos fabricantes recomiendan aumentar el nivel de vibración en un 25% a los de los parámetros de la ISO 10816 (WEG, 2020).

La norma ISO 20816 permite las mediciones en partes no rotativas y rotativas de una máquina. En las partes no-rotativas se realizan utilizando un transductor sísmico que mide velocidad o aceleración, mientras que en partes rotativas se emplea un transductor sin contacto que mide el desplazamiento relativo entre el eje y la parte en la que está montado. Las partes correspondientes de la norma ISO 20816 especifican los criterios de evaluación para diferentes máquinas y son actualizaciones de la norma anterior, la ISO 10816. La norma ISO 20816-1 indica que, si no existen partes actualizadas en su versión, se puede utilizar la versión correspondiente en la norma ISO 10816. La bomba de este estudio se va a evaluar bajo la norma ISO 10816-7, considerando un incremento del 25% en los límites debido a la condición de base flexible.

Según la ISO 20816-1, antiguamente el rango de frecuencias utilizado era de 10 Hz a 1,000 Hz. Sin embargo, ahora se debe evaluar cual es el rango recomendado. En la ISO 10816-7, indica que el rango de frecuencias debe cubrir hasta 2.5X la frecuencia de paso de álabes. Las vibraciones en partes no giratorias se miden con transductores sísmicos que detectan la velocidad o aceleración absolutas, generalmente en el alojamiento de los rodamientos.

En las pruebas in situ, todos los componentes de la máquina deben estar instalados. Las mediciones se toman en direcciones radiales (horizontal y vertical) y axial en cojinetes de empuje. Si las vibraciones medidas superan el límite recomendado, se mide la vibración ambiental con la máquina apagada. Según la ISO 10816-7 las mediciones deben realizarse bajo condiciones normales de operación y con temperatura estable. El rango operativo permitido es asegurado por el fabricante para operación segura, mientras que el rango operativo seleccionado, 70% al 120% del punto de máxima eficiencia (BEP), es una parte específica del rango permitido para aplicaciones o pruebas determinadas.

Es crucial asegurar que las mediciones no se vean afectadas por variaciones externas como temperatura, campos magnéticos o ruido. Los transductores de vibración deben estar correctamente instalados, especialmente si se usan bases magnéticas, para evitar errores de medición.

Se debe prestar especial atención para garantizar que el transductor de vibración esté correctamente instalado y que el soporte no disminuya la precisión de la medición. Si se utilizan transductores de vibración con base magnética, la superficie de soporte en el objeto de medición debe estar preparada para evitar errores de medición.

La norma ISO 20816-1 especifica varias técnicas para la evaluación de los rodamientos. Sin embargo, no especifica el uso de estas técnicas ya que no todas son adecuadas para todas las condiciones de falla en los rodamientos. Se necesitan técnicas específicas para la evaluación de rodamientos debido a las limitaciones de las mediciones de banda ancha.

Para los criterios de evaluación, el nivel de vibración se divide en zonas. Las zonas de evaluación incluyen:

Zona A: La vibración de las máquinas recién puestas en marcha suele estar en esta zona, aunque el esfuerzo para alcanzar esta zona puede ser desproporcionado.

Zona B: Las máquinas en esta zona se consideran aceptables para operación a largo plazo sin restricciones.

Zona C: Las máquinas en esta zona se consideran insatisfactorias para operación continua a largo plazo, pero pueden operar por un período limitado hasta que se realicen acciones correctivas.

Zona D: Las vibraciones en esta zona son suficientemente graves como para causar daños a la máquina.

Debido a que no se cuenta con registros previos de los niveles de vibración y considerando que la bomba se encuentra sobre una base flexible, se tomará los valores de severidad de vibración según la norma ISO 20816, incrementándolos en un 25%.

Tabla 16*Severidad de vibración para Bombas según la norma ISO 10816-7*

Zona	Descripción	Límites de vibración de velocidad mm/s (RMS)			
		Categoría I		Categoría II	
		≤200 kW	>200 kW	≤200 kW	>200 kW
A	En esta zona usualmente las condiciones de la máquina son muy nuevas y las condiciones de la máquina son muy buenas.	2.5	3.5	3.2	4.2
B	Máquinas con vibración dentro de esta zona son consideradas para operación a largo plazo.	4.0	5.0	5.1	6.1
C	Máquinas con vibración dentro de esta zona pueden ser operadas por un corto período de tiempo hasta que se realice la reparación necesaria..	6.6	7.6	8.5	9.5
D	Vibración por encima de esta zona. La vibración dentro de esta zona es considerada peligrosa y puede causar daños serios en la máquina	>6.6	>7.6	>8.5	>9.5

*Fuente: Adaptado de ISO 10816-7

II.2. Marco Conceptual

II.2.1 Definición de Máquinas

Una máquina es un transformador de energía, que modifica la clase y el estado de energía que es suministrado. Las turbomáquinas hidráulicas, como bombas centrífugas, transforman la energía mediante la rotación de los álabes.

II.2.2 Fuerzas Estáticas y Dinámicas

Las fuerzas estáticas son aquellas que tienen una dirección constante. En las máquinas la fuerzas están presentes como ajustes de piezas, tolerancias, peso de la máquina, etc. Las fuerzas dinámicas, la amplitud y dirección pueden variar en el tiempo, y son las responsables de las vibraciones en máquinas, como el desbalance, desalineamiento, etc.

II.2.3 Bombas centrífugas

Las bombas centrífugas son un tipo de turbomáquinas hidráulicas que impulsan líquidos por tuberías, proporcionando el caudal y la energía cinética suficiente para superar las pérdidas de un sistema.

Parámetros Operativos de Bombas Centrífugas

Punto de Operación de una Bomba: El punto de operación de una bomba relaciona el caudal y la carga total en un sistema. La operación ideal de la bomba se da en el punto de máxima eficiencia (BEP), para optimizar y evitar daños.

Carga de Succión Neta (NPSH): La carga de succión neta es un parámetro hidráulico que permite medir la energía disponible para que el fluido evite la cavitación. El $NPSH_A$ es la energía real del fluido en la entrada de la bomba, y el $NPSH_R$ es la mínima que debe tener la bomba en la succión para evitar la cavitación. El $NPSH_A$ tiene que ser mayor al $NPSH_R$.

Impulsor: Los impulsores son parte del rotor de la bomba y convierte la rotación mecánica en velocidad del líquido mediante los álabes.

Carcasa: La carcasa es la estructura externa de la bomba que contiene todos los componentes internos. Se encarga de guiar el fluido hasta la tubería de descarga.

Ejes: Los ejes permiten transmitir torque al impulsor desde la fuente de rotación, que normalmente es un motor eléctrico. El eje de la bomba y el motor normalmente están unidos por medio de un acople, el cual su mala alineación puede generar vibraciones.

Sellos: Los sellos hidráulicos previenen las fugas de fluido entre componentes móviles y fijo, protegiendo al sistema. Además evitan la entrada de contaminantes.

II.2.4 Propiedades Dinámicas

Masa: La masa mide la inercia del cuerpo, el cambio de aceleración en un cuerpo cuando se aplica una fuerza.

Rigidez: La rigidez es la relación entre la deformación y la fuerza aplicada en un cuerpo o estructura,

Coeficiente de Amortiguamiento: El coeficiente de amortiguamiento es la capacidad de un sistema o estructura para reducir la velocidad.

II.2.5 Frecuencia Natural

La frecuencia natural es una propiedad dinámica de los cuerpos, y es la frecuencia en la cual vibran si se le excita y depende de la masa y rigidez de un sistema. Cuando la

frecuencia de excitación de un cuerpo coincide con la frecuencia natural, ocurre resonancia generando amplitudes de vibración peligrosas.

II.2.6 Medición de vibraciones

La recolección de vibraciones puede realizarse de distintas maneras: mediante múltiples sensores conectados a un colector de datos para registrar información simultáneamente, o utilizando un sensor único para medir puntos de forma asíncrona.

II.2.7 Sensores de Vibración

Los sensores de vibración permiten la recolección de datos de vibración mediante la transformación de movimientos mecánicos en señales eléctricas. Cada sensor tiene su propia sensibilidad y rango de frecuencia en el cual puede ser usado para medir vibraciones.

Acelerómetros: Los acelerómetros son sensores de vibración populares para medir vibraciones en carcasas y rodamientos. Funcionan mediante una masa sobre un cristal piezoeléctrico que genera una señal eléctrica proporcional a la aceleración. Su tamaño determina la sensibilidad, que varía de 5 mv/g con respuesta plana hasta 25 kHz, a 1,000 mv/g con un rango de hasta 1,000 Hz.

Capítulo III. Análisis de Resultados

III.1. Condiciones Operativas de la Bomba

Los resultados de las seis condiciones medidas en la operación de la bomba fueron los siguientes:

Tabla 17

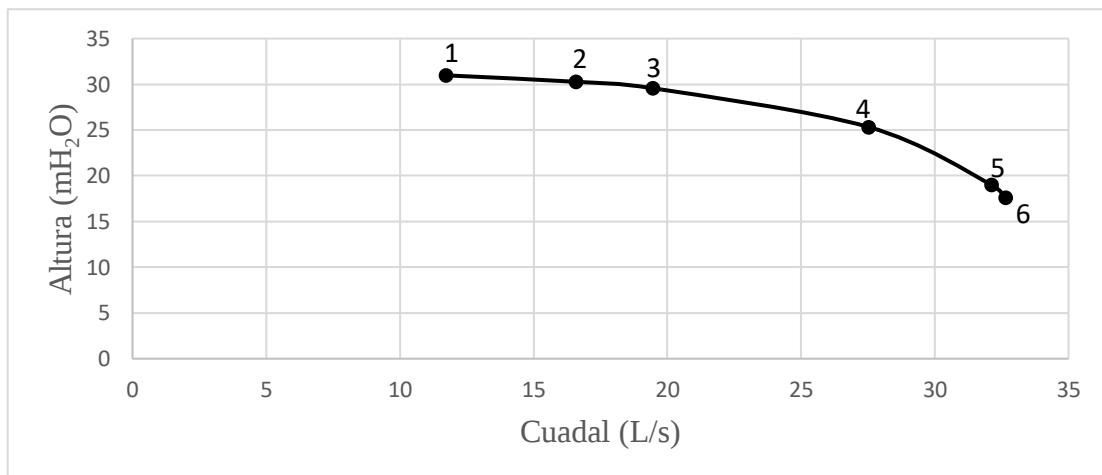
Condiciones de Operación Medidas

Condición	Caudal (L/s)	Presion (mH ₂ O)	Potencia (HP)
Condición 1	11.7	31.0	4.78
Condición 2	16.6	30.3	6.61
Condición 3	19.5	29.6	7.57
Condición 4	27.5	25.3	9.17
Condición 5	32.1	19.0	8.03
Condición 6	32.7	17.6	7.56

*Fuente: Elaboración propia

Figura 19

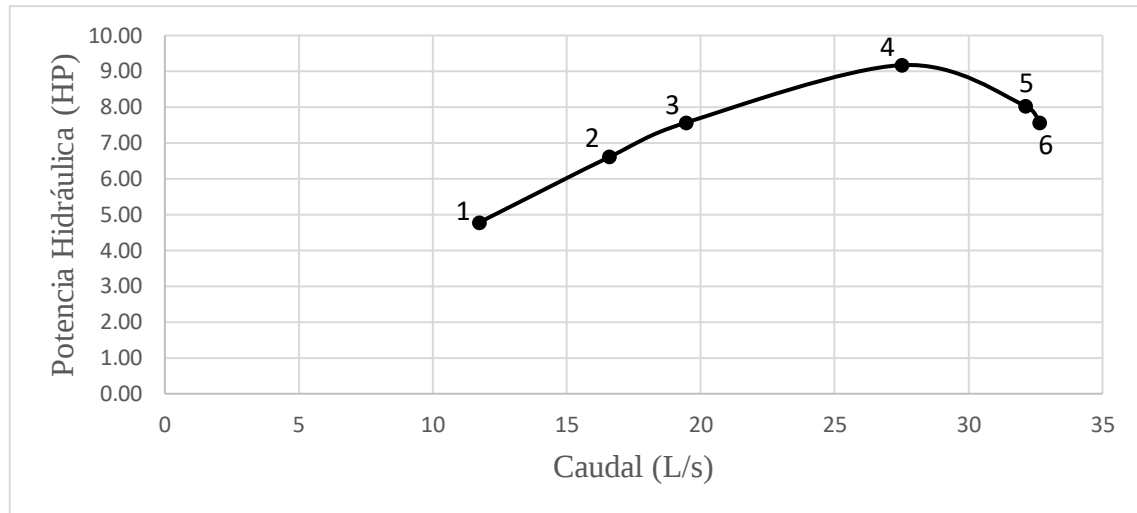
Curva Característica de la Bomba: Altura vs Caudal



*Fuente: Elaboración propia

Figura 20

Curva Característica de la Bomba: Potencia vs Caudal



*Fuente: Elaboración propia

La Figura 19 y Figura 20 describen las curvas características de la bomba en relación al caudal. La Tabla 17 indica que la altura máxima de la bomba es de 31mH₂O y se da en la condición 1, y el caudal máximo de la bomba es de 32.7L/s y se da en la condición 6. El punto de máxima Potencia Hidráulica se da en la condición 4.

III.2. Características de la Vibración Obtenida

Para poder visualizar la vibración es necesario graficar la forma de onda. La forma de onda muestra las vibraciones sin descomponer. Esto permite observar directamente la amplitud y consistencia de las señales, lo cual es crucial para comprender los fenómenos vibratorios dentro de la bomba. La descripción detallada de la forma de onda es esencial, ya que puede revelar fenómenos aleatorios, como impactos repentinos que ocurren en intervalos breves. Además, los cambios abruptos en la forma de onda pueden influir significativamente en los resultados al aplicar distintos métodos de análisis de vibración.

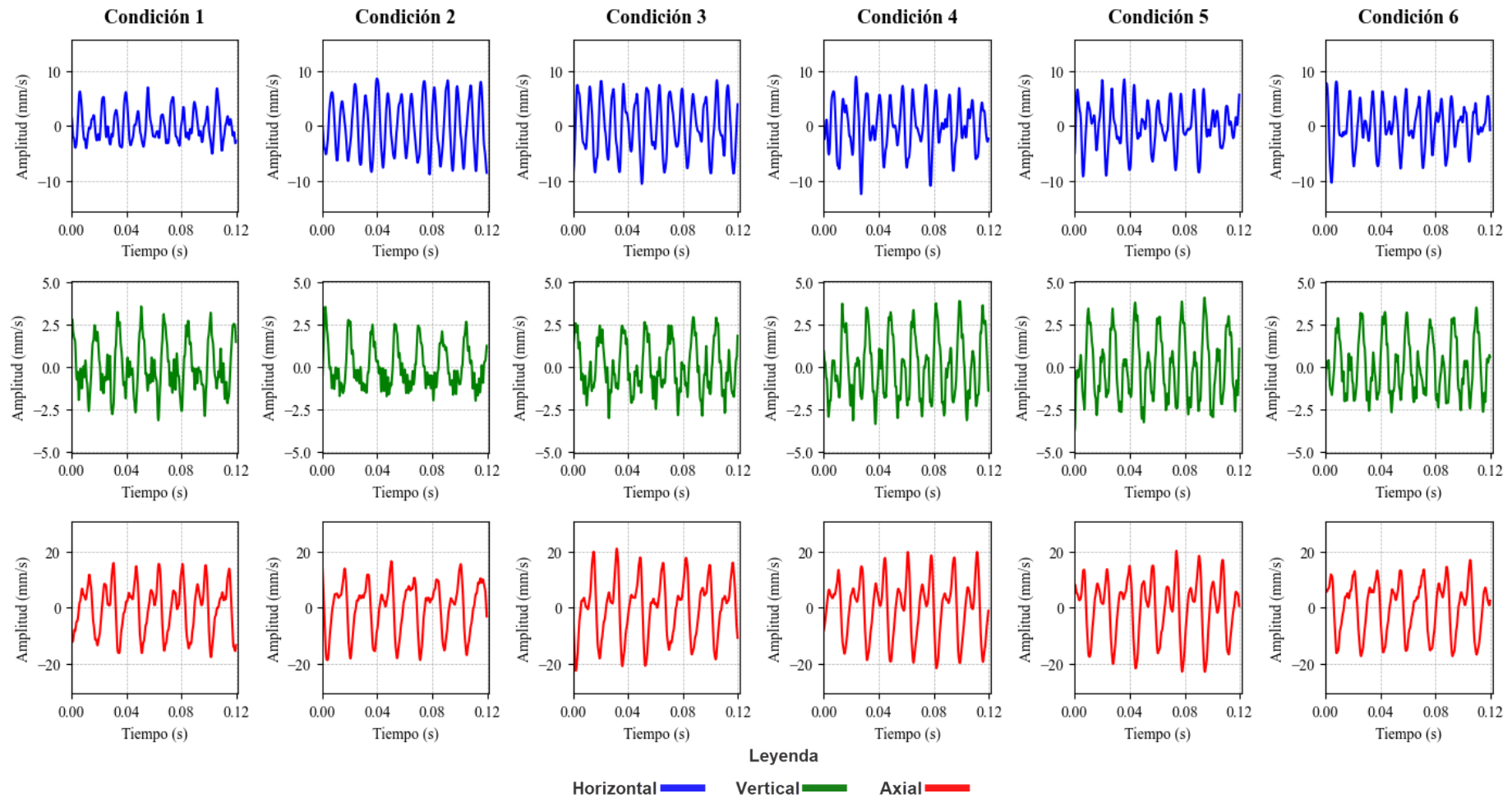
A continuación, se presentan las formas de onda en velocidad y aceleración, colectas en las 6 condiciones operativas y las 4 posiciones de la bomba, con un tiempo de visualización de 0.12 segundos:

Forma de onda en aceleración de la posición 1



Figura 22

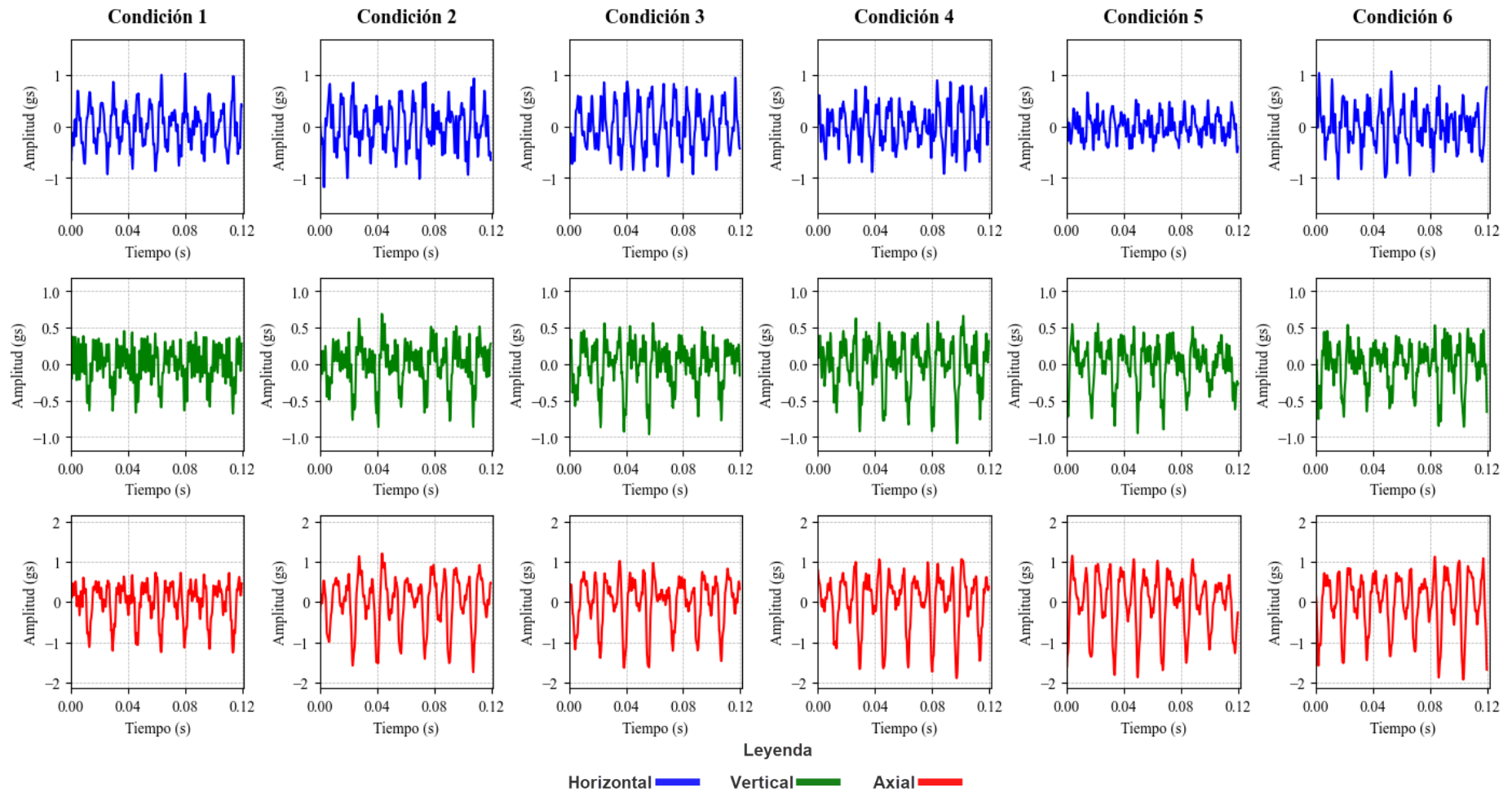
Forma de onda en velocidad de la posición 1



*Fuente: Elaboración propia. ** Tiempo visualizado: 0.12 segundos

Figura 23

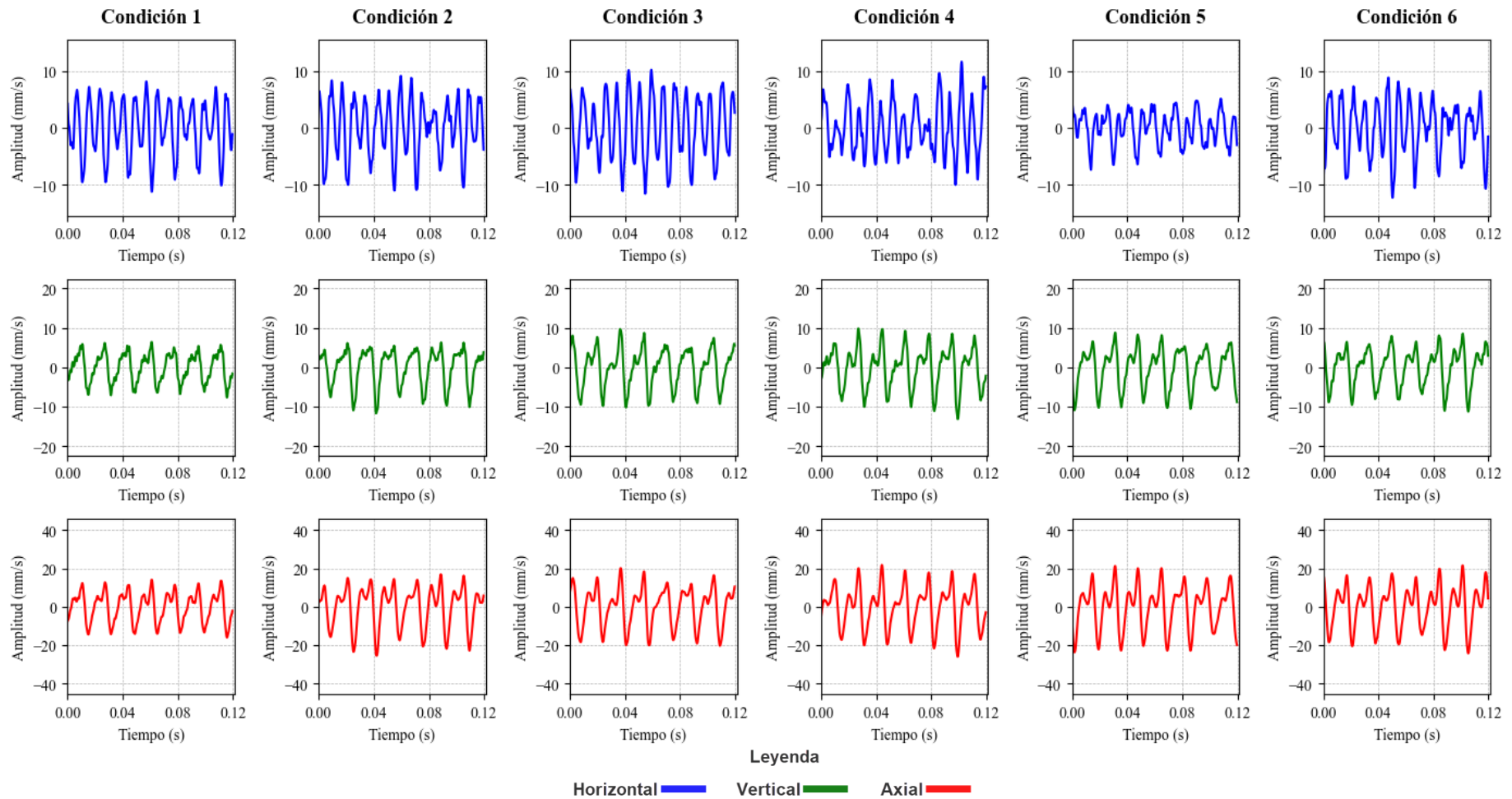
Forma de onda en aceleración de la posición 2



*Fuente: Elaboración propia. ** Tiempo visualizado: 0.12 segundos

Figura 24

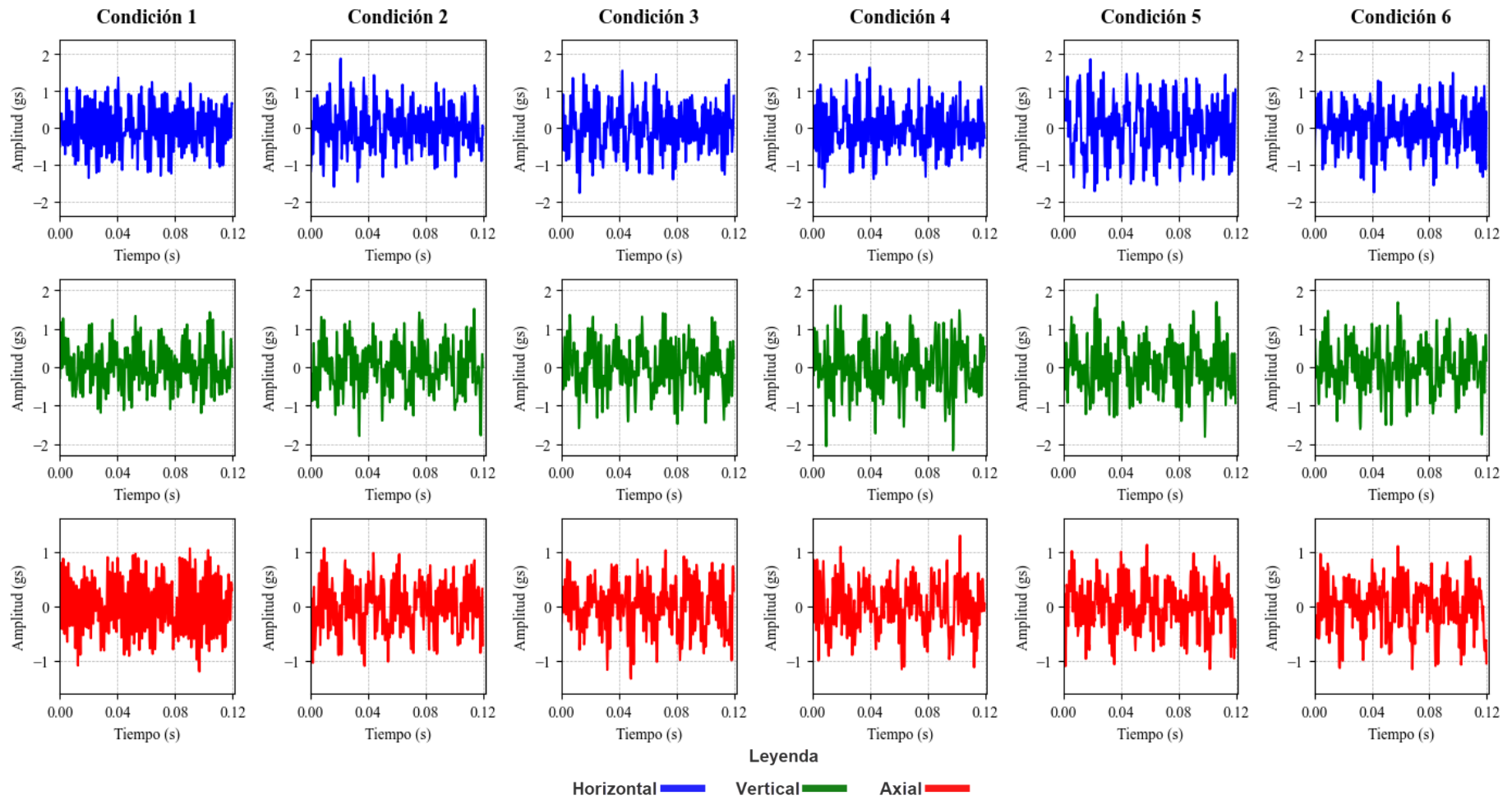
Forma de onda en velocidad de la posición 2



*Fuente: Elaboración propia. ** Tiempo visualizado: 0.12 segundos

Figura 25

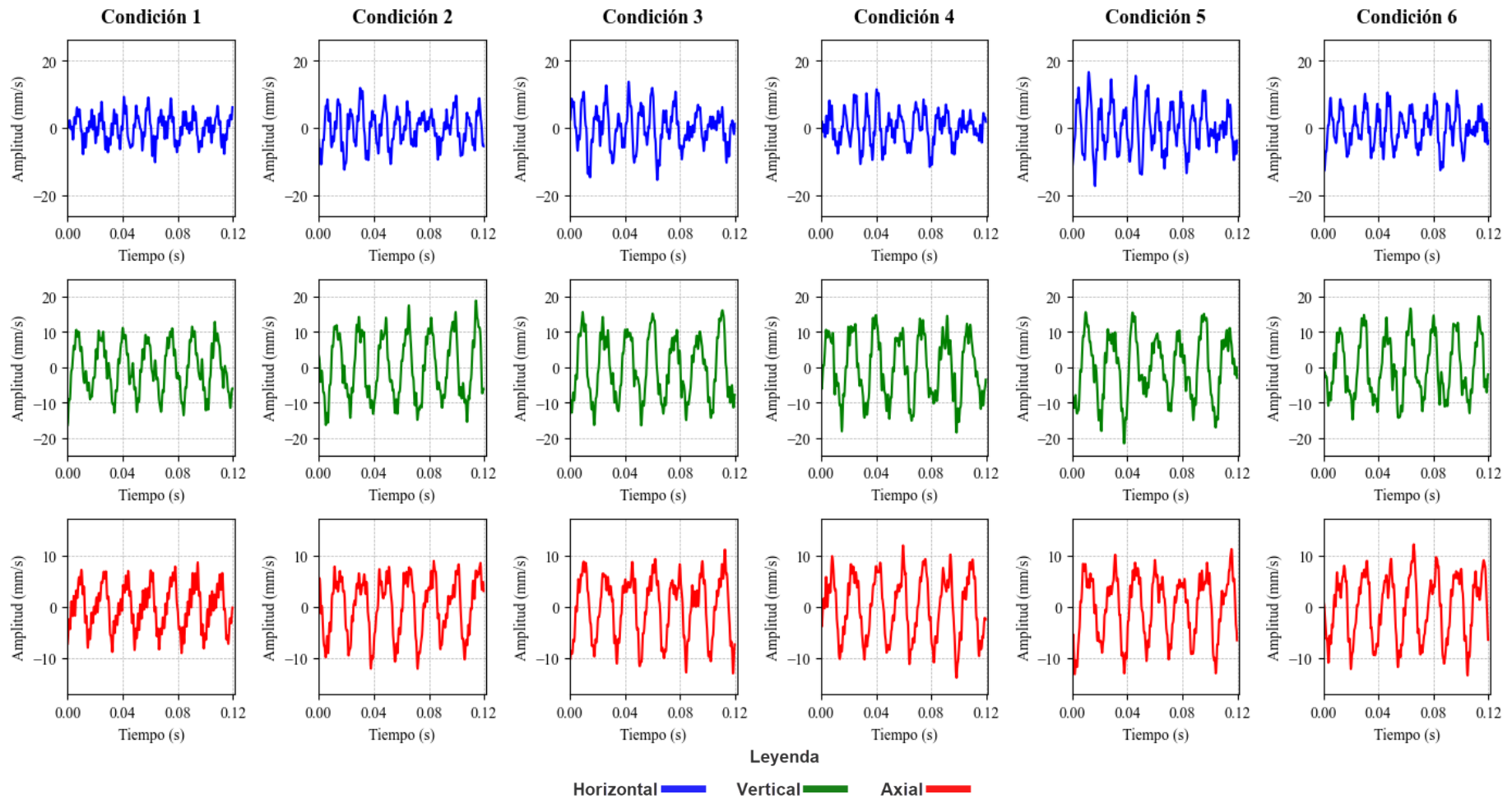
Forma de onda en aceleración de la posición 3



*Fuente: Elaboración propia. ** Tiempo visualizado: 0.12 segundos

Figura 26

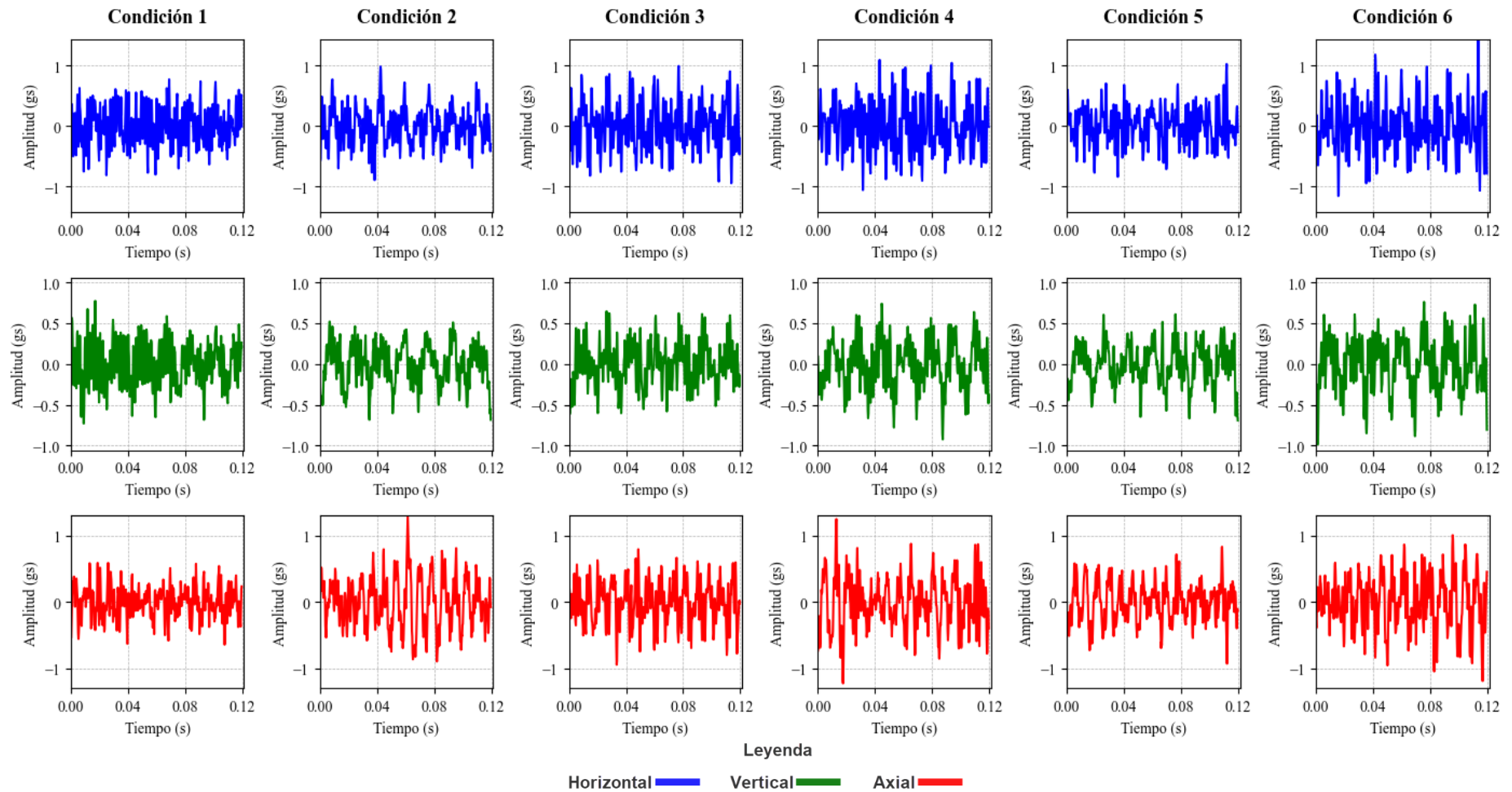
Forma de onda en velocidad de la posición 3



*Fuente: Elaboración propia. ** Tiempo visualizado: 0.12 segundos

Figura 27

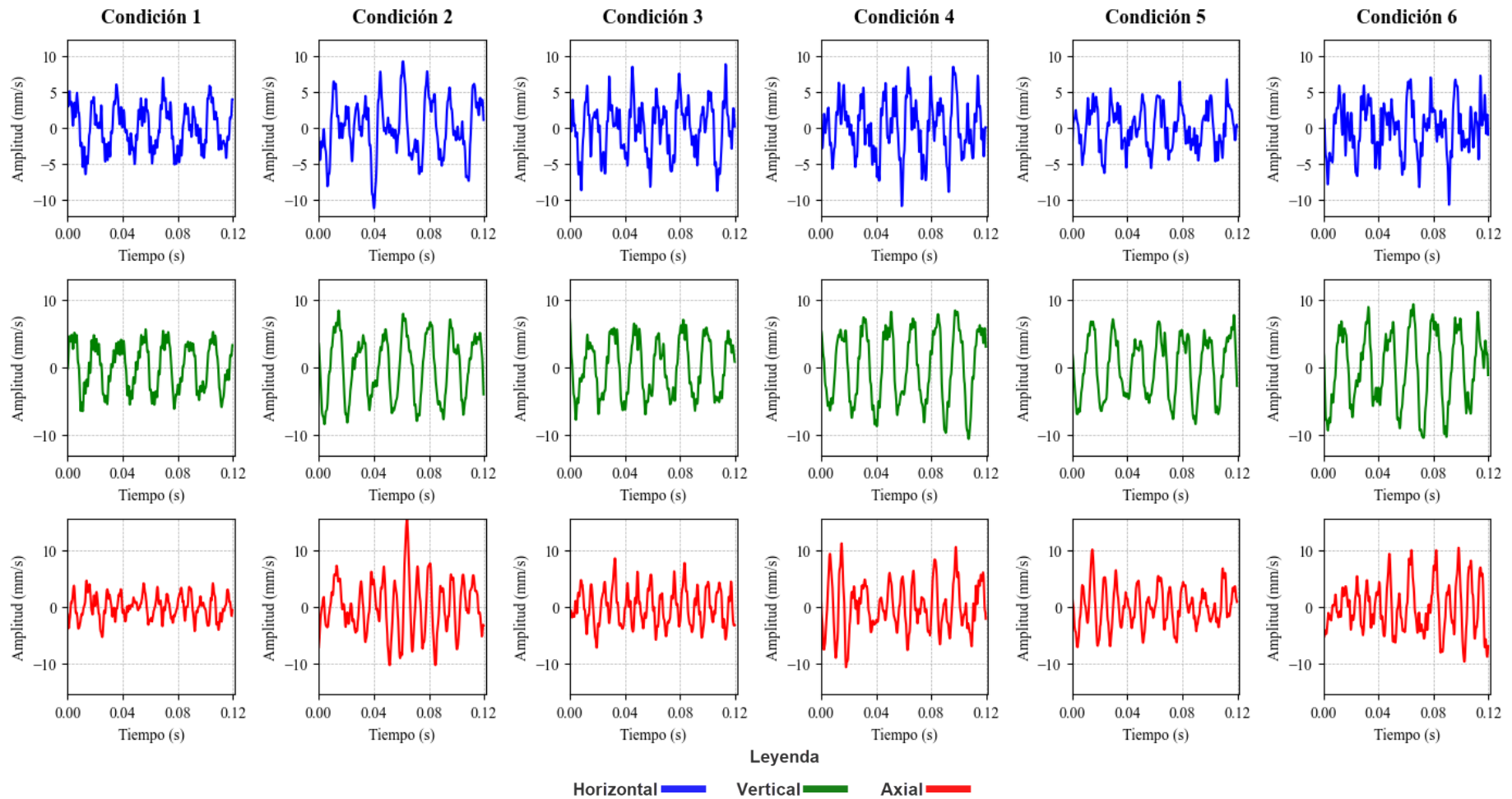
Forma de onda en aceleración de la posición 4



*Fuente: Elaboración propia. ** Tiempo visualizado: 0.12 segundos

Figura 28

Forma de onda en velocidad de la posición 4



*Fuente: Elaboración propia. ** Tiempo visualizado: 0.12 segundos

Los resultados de observar y describir la forma de onda en aceleración y velocidad de las diferentes condiciones se muestran en la Tabla 18:

Tabla 18

Descripción de las Formas de Onda en aceleración y velocidad

Posición	Figura	Dirección	Amplitud de Aceleración (g's)	Amplitud de Velocidad (mm/s)	Estabilidad
1	Figura 21	Horizontal	± 0.5	± 10	Estable
	Figura 22	Vertical	± 0.25	± 2.5	Estable
		Axial	± 1	± 20	Estable
2	Figura 23	Horizontal	± 1	± 10	Estable
	Figura 24	Vertical	± 0.5	± 8	Estable
		Axial	± 1	± 20	Estable
3	Figura 25	Horizontal	± 1	± 10	Ligera variación
	Figura 26	Vertical	± 1	± 10	Estable
		Axial	± 1	± 10	Estable
4	Figura 27	Horizontal	± 1	± 10	Ligera variación
	Figura 28	Vertical	± 0.25	± 5	Estable
		Axial	± 1	± 10	Inestable

*Fuente: Elaboración propia

III.3. Evaluación de la Severidad de Vibraciones

Para la evaluación de la severidad se tuvo como referencia un incremento del 25% a los valores de la norma ISO 10816-7, la cual clasifica el valor RMS de la velocidad de vibración en 4 zonas. A continuación, se presentan los resultados de los valores RMS:

Tabla 19

Valores RMS obtenidos de la Posición 1 y 2 para las 6 Condiciones de Operación

Posición	Posición 1			Posición 2		
Eje	Horizontal	Vertical	Axial	Horizontal	Vertical	Axial
Condición 1	3.90	1.33	8.23	4.37	3.60	7.44
Condición 2	3.97	1.53	9.62	4.72	4.82	10.45
Condición 3	4.04	1.56	9.42	4.61	4.62	9.95
Condición 4	4.18	1.68	10.21	4.71	4.68	10.15
Condición 5	4.25	1.73	10.49	4.65	4.82	10.47
Condición 6	4.20	1.60	9.72	4.95	5.02	10.99

Elaboración Propia

Tabla 20

Valores RMS obtenidos de la Posición 3 y 4 para las 6 Condiciones de Operación

Posición	Posición 3			Posición 4		
Eje	Horizontal	Vertical	Axial	Horizontal	Vertical	Axial
Condición 1	3.67	6.75	4.20	3.10	3.22	2.25
Condición 2	5.59	8.38	5.54	3.45	4.57	4.58
Condición 3	4.93	8.21	5.47	3.46	4.94	3.82
Condición 4	5.06	8.38	5.75	3.29	4.89	4.07
Condición 5	5.34	8.43	5.94	3.24	4.95	3.82
Condición 6	4.68	7.94	5.54	3.34	4.96	3.90

Elaboración Propia

Leyenda:

●—● Zona A ●—● Zona B ●—● Zona C ●—● Zona D

Los resultados muestran un nivel de vibración dentro de la Zona D en la dirección axial en la posición 1 y condición 6. Además, se observa un nivel de vibración en la Zona C en las dirección axial de la posición 1 y 2, en la dirección vertical de la posición 3. Los demás puntos y posiciones están dentro del nivel de las Zonas A y B.

III.4. Análisis de Fourier

Para el análisis de Fourier se graficaron los espectros para cada posición y se explica los hallazgos. Los espectros de aceleración están configurados para 600Hz y los de velocidad para 200Hz.

III.4.1 Posición 1: Lado Libre Motor

En las figuras 29 y 30 se muestran el espectro en aceleración y velocidad de la posición 1.

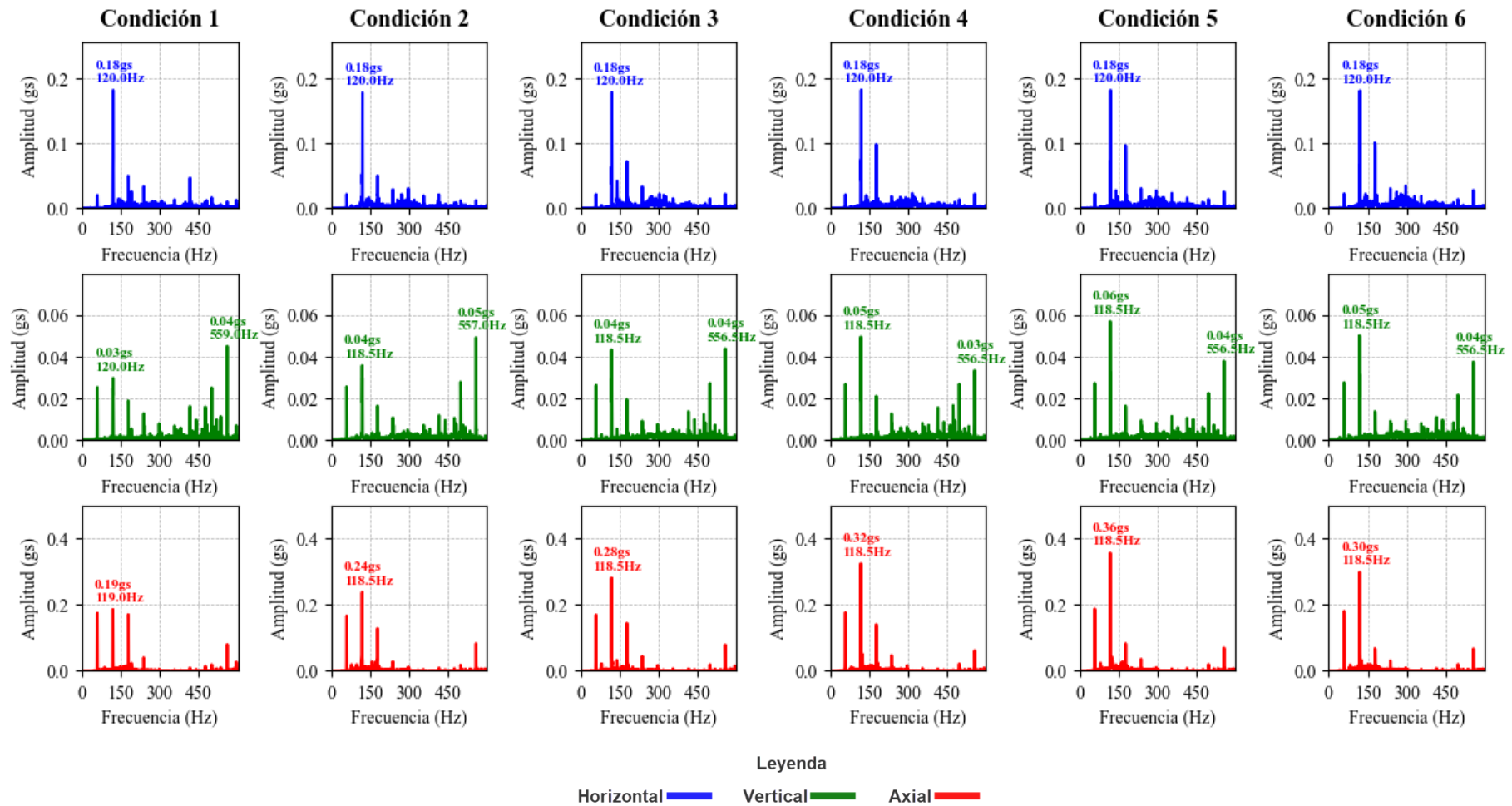
En la dirección horizontal predomina establemente la frecuencia de 2FL (120Hz), con amplitud de 0.18gs 2.38mm/s. Esto podría estar relacionado con problemas eléctricos en el motor o en su conexión. Además, existen picos menores a 1x y 2x.

En la dirección vertical, aunque es menor que en la dirección horizontal y axial, predomina las frecuencias de la 1x a la 2x.

En la dirección axial las amplitudes son significativas en las frecuencias de la 1x y 2x, que aumenta conforme la bomba opera, lo que podría sugerir problemas de alineación o fuerzas axiales inusuales.

Figura 29

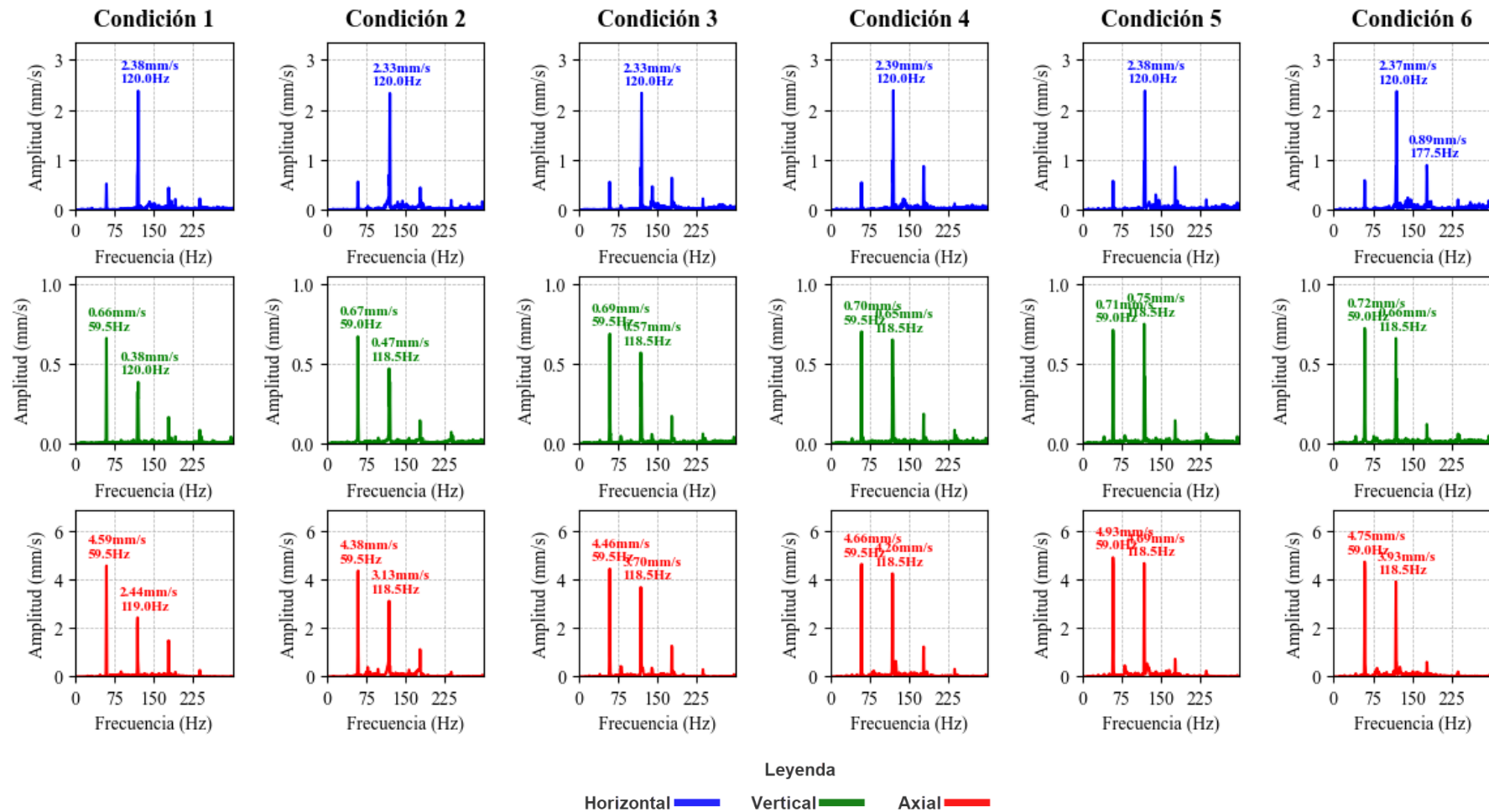
Espectro FFT general en aceleración de la posición 1



*Fuente: Elaboración propia. ** Frecuencia máxima: 600Hz, Número de puntos: 16384

Figura 30

Espectro FFT general en velocidad de la posición 1



*Fuente: Elaboración propia. ** Frecuencia máxima: 300Hz, Número de puntos: 16384

III.4.2 Posición 2: Lado Acoplado Motor

En las figuras 31 y 32 se muestran el espectro en aceleración y velocidad de la posición 2.

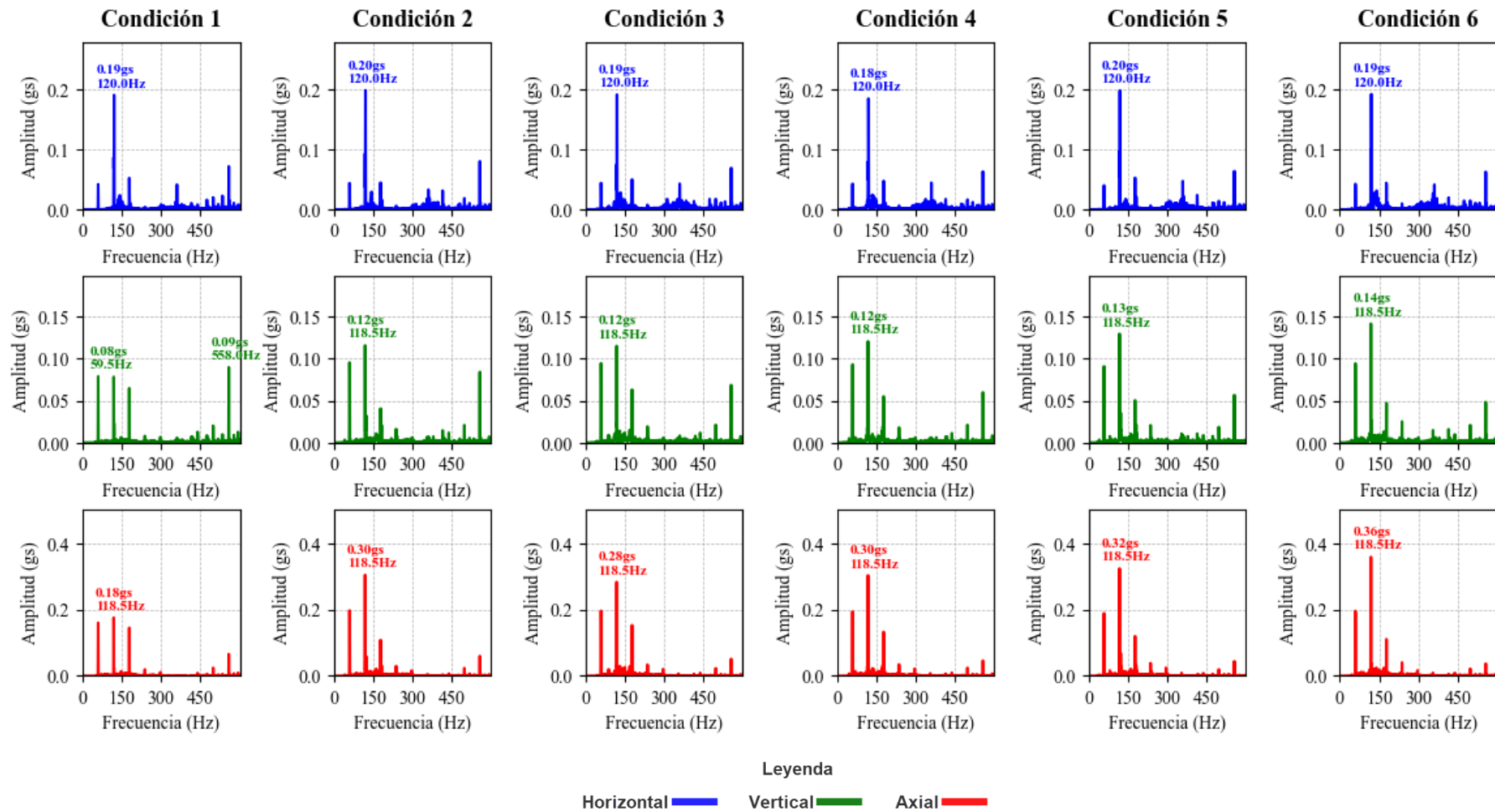
En la dirección horizontal predomina establemente la frecuencia de 2FL (120 Hz), con amplitud de 0.19gs 2.48mm/s. Un poco mayor que en la posición 1. Además, existen picos menores a 1x y 2x.

En la dirección vertical, aunque es menor que en la dirección horizontal y axial, predomina las frecuencias de la 1x a la 2x y aumenta conforme la bomba opera.

En la dirección axial las amplitudes son significativas en las frecuencias de la 1x y 2x, llegando la 2x a 0.36gs, lo que podría sugerir problemas de alineación o fuerzas axiales inusuales.

Figura 31

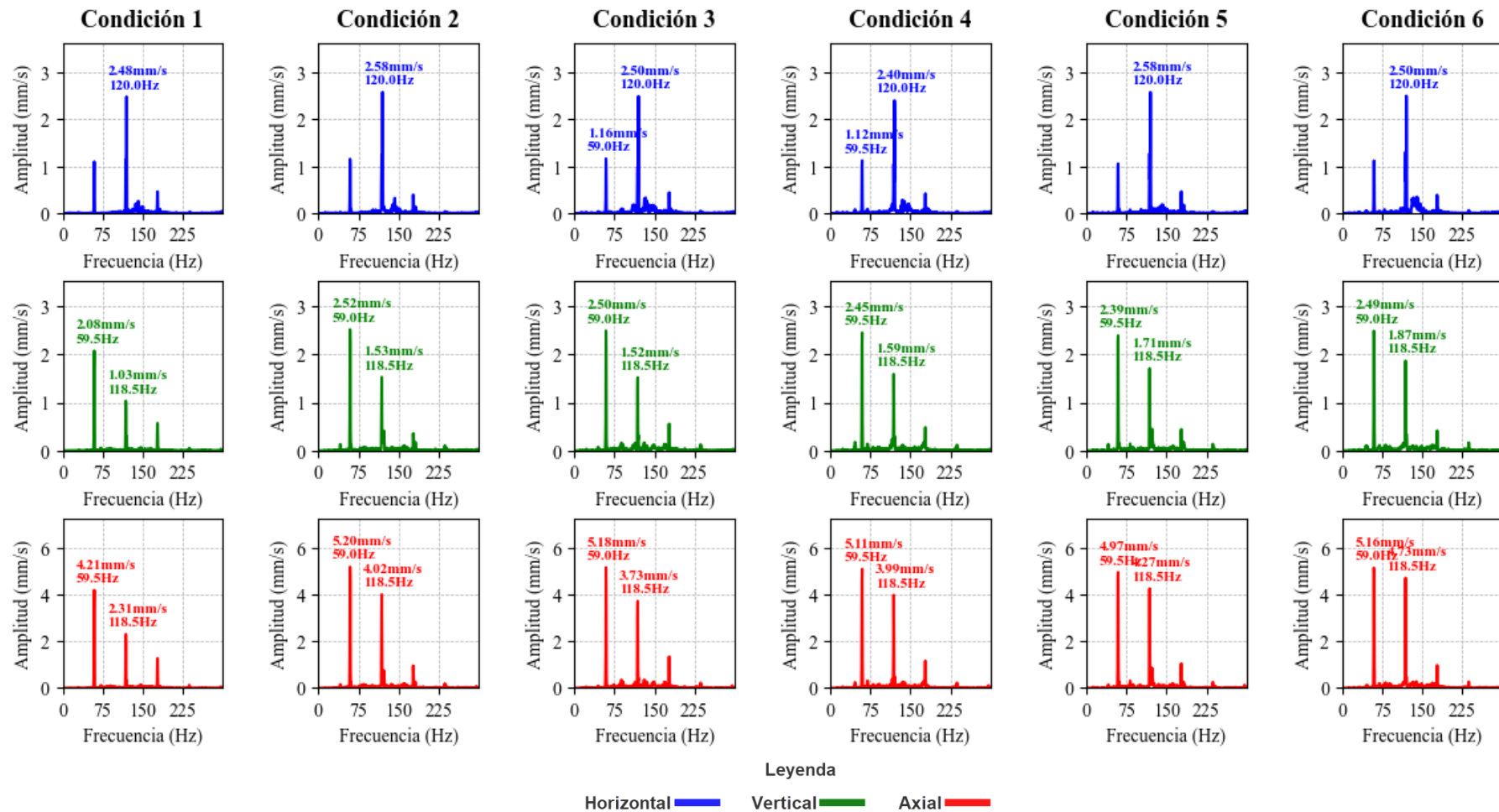
Espectro FFT general en aceleración de la posición 2



*Fuente: Elaboración propia. ** Frecuencia máxima: 600Hz Número de puntos: 16384.

Figura 32

Espectro FFT general en velocidad de la posición 2



*Fuente: Elaboración propia. ** Frecuencia máxima: 300Hz, Número de puntos: 16384.

III.4.3 Posición 3: Lado Acoplado Bomba

En las figuras 33 y 34 se muestran el espectro en aceleración y velocidad de la posición 3.

En todos los espectros en aceleración está presente la frecuencia de 555Hz con un nivel de vibración significativo y mayor amplitud en la dirección horizontal. Esta frecuencia podría estar relacionada a la frecuencia de falla de la pista interna del rodamiento (BPFI) que es 552Hz.

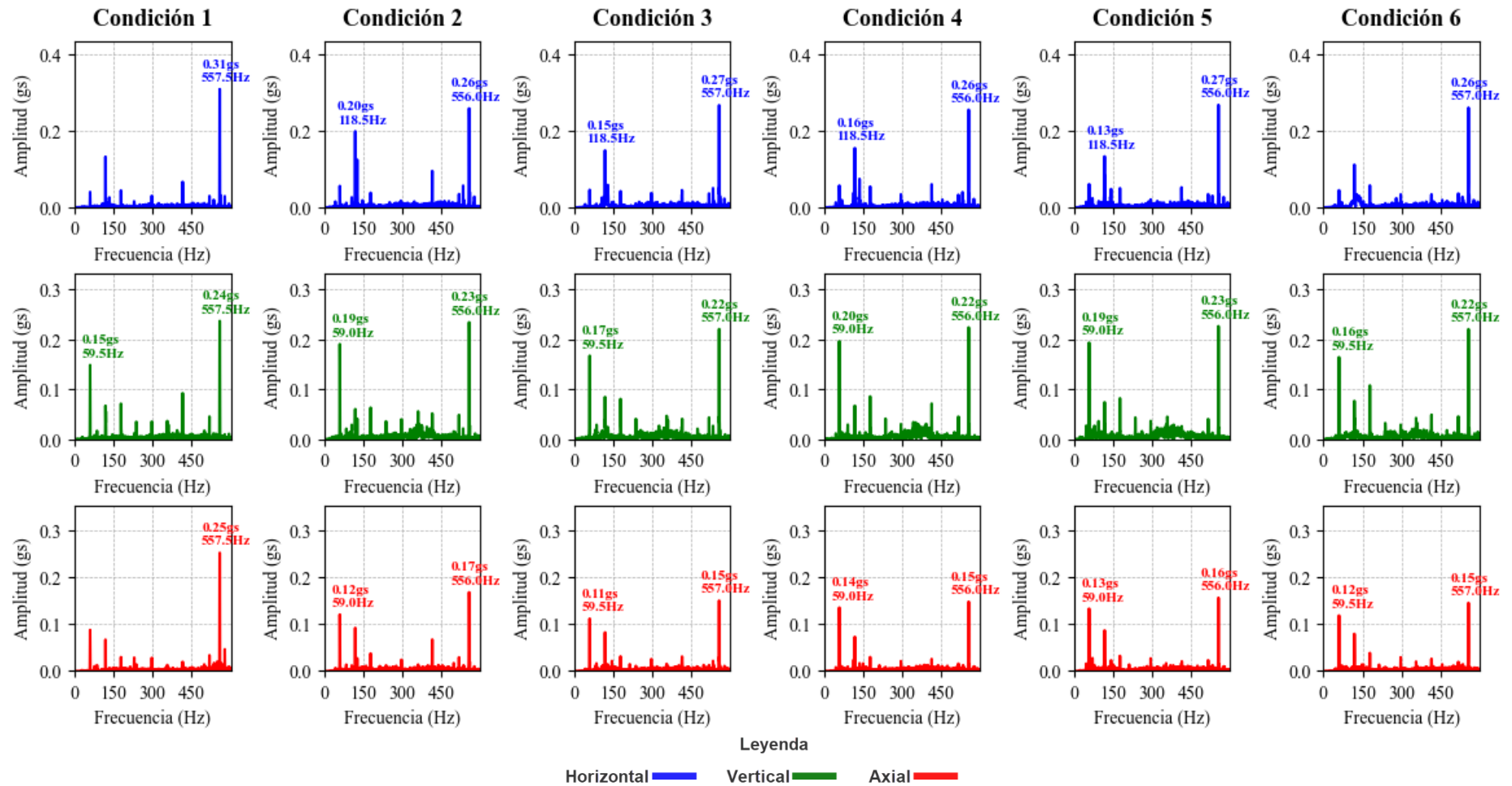
En la dirección horizontal la frecuencia predominante es la 2x(118.5Hz) y varía en las diferentes condiciones. La presencia de vibraciones cercanas a 1mm/s la 1x puede sugerir desbalance.

En la dirección vertical se observan picos significativos a la 1x (59.5Hz) con amplitudes de hasta 5.11mm/s, lo que podría indicar desbalance o desalineamiento. En los espectros de aceleración se puede observar ligeramente otros múltiplos lo que podría sugerir desalineamiento, soldadura, fricción interna o problemas en los sellos. La presencia de turbulencias no necesariamente indica un problema y puede formar parte de la operación normal de la bomba.

En la dirección axial, las amplitudes son significativas a la 1x, con variación de 2.32mm/s a 3.59mm/s, y a la 2x, llegando cerca de 1mm/s. Esto podría sugerir desalineamiento o fuerzas axiales relacionadas con la entrada de flujo.

Figura 33

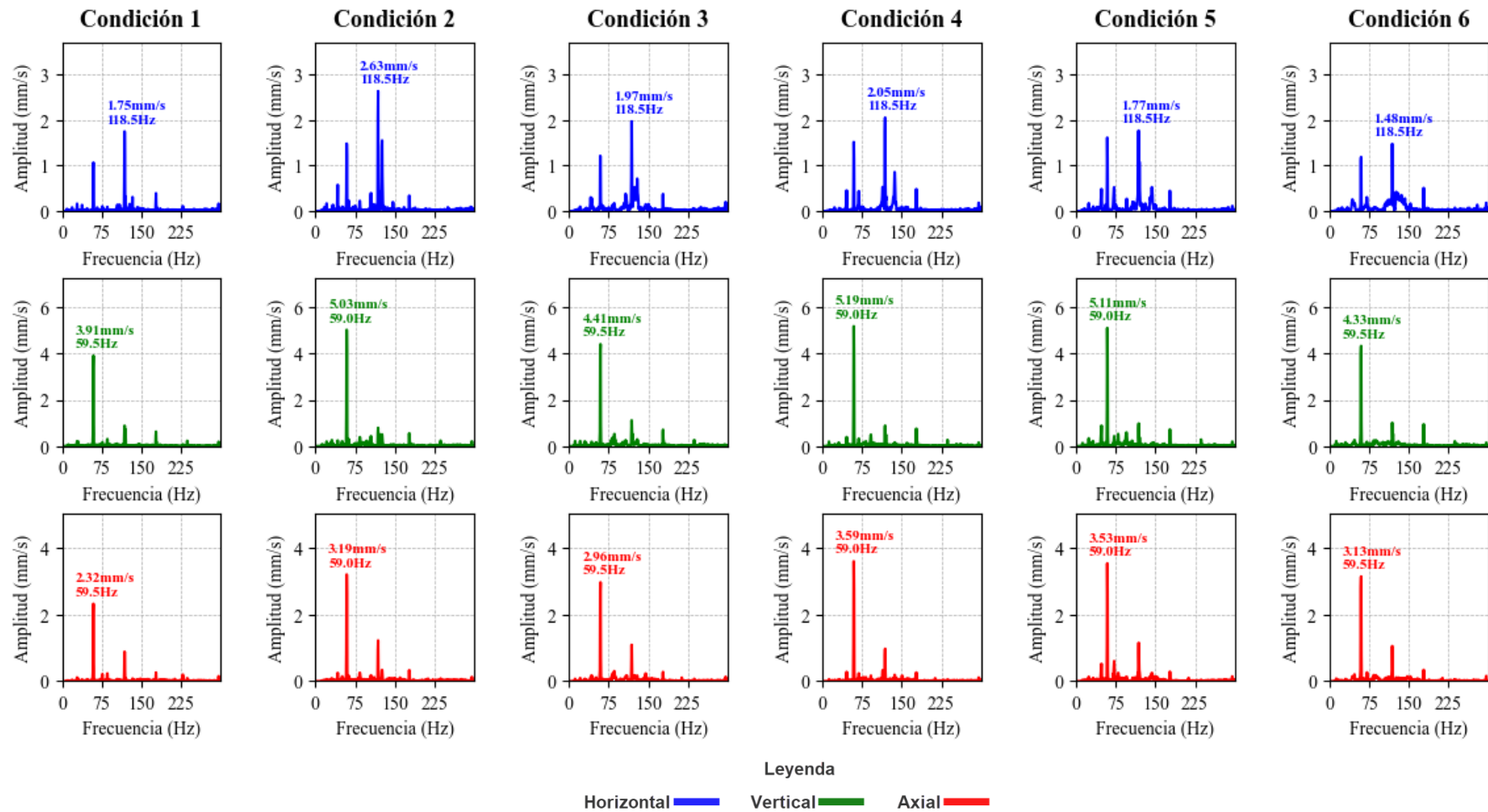
Espectro FFT general en aceleración de la posición 3



*Fuente: Elaboración propia. ** Frecuencia máxima: 600Hz, Número de puntos: 16384.

Figura 34

Espectro FFT general en velocidad de la posición 3



*Fuente: Elaboración propia. ** Frecuencia máxima 300Hz, Número de puntos 16384.

III.4.4 Posición 4: Lado Libre Bomba

En las figuras 35 y 36 se muestran el espectro en aceleración y velocidad de la posición 4.

Al igual que en la posición 3 en todos los espectros en aceleración está presente la frecuencia de 558Hz, pero con menor nivel de vibración. La frecuencia de paso de álabes (414 Hz) está presente en todas las direcciones en un rango de 0.05gs a 0.08gs, con mayor amplitud en la dirección horizontal.

Existe la presencia de turbulencias de frecuencias en las dirección horizontal y axial en un amplio rango de frecuencias, desde frecuencias menores a la velocidad de rotación hasta la 3x. Esto puede ser debido a fuerzas hidráulicas como la recirculación en la entrada (dirección axial), así como en la misma bomba. La cavitación se descarta a la ausencia de un aumento de vibración en el rango de 300 a 600Hz.

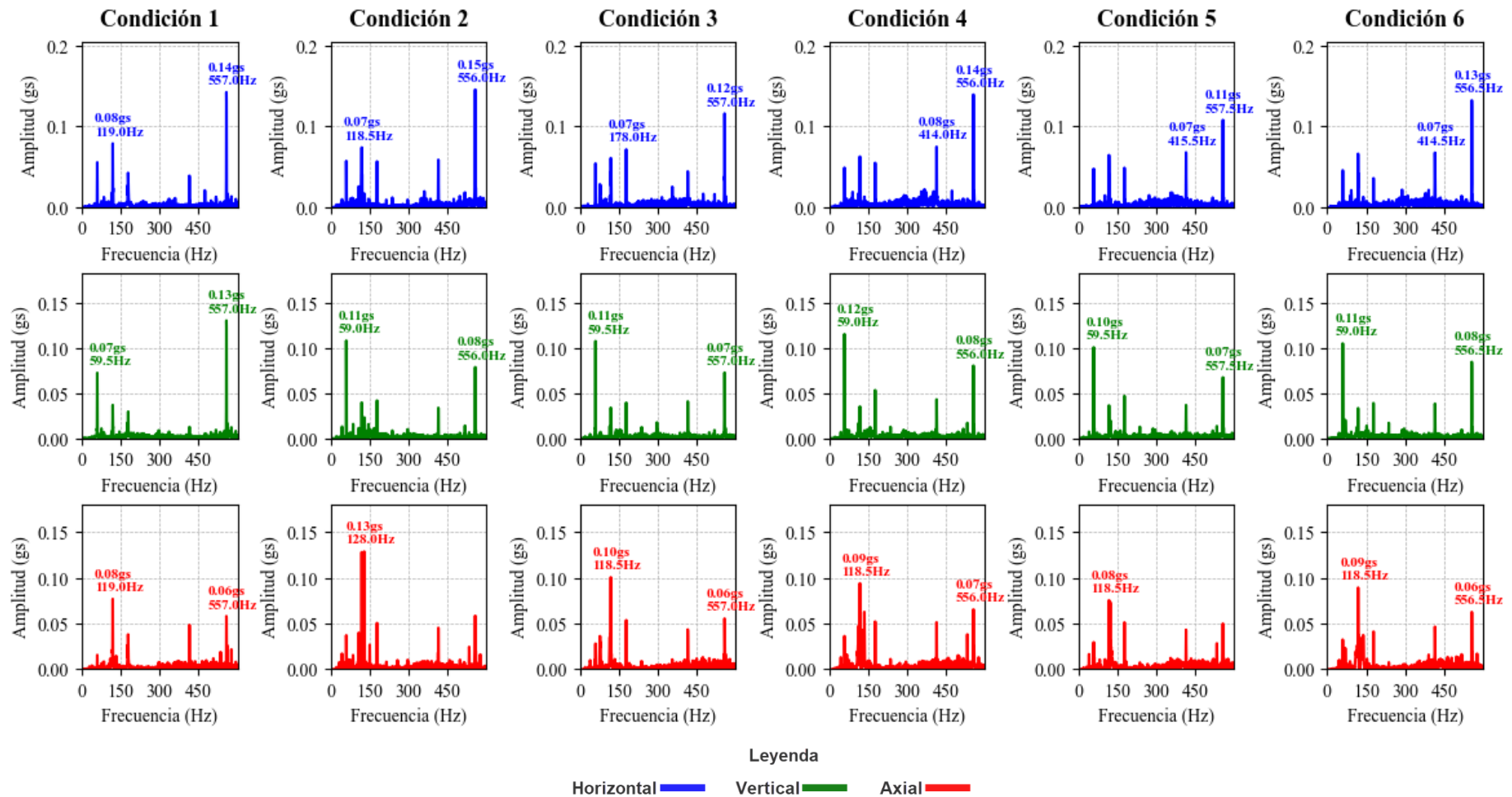
En la dirección horizontal se observan frecuencias a la 1x, 2x y 3x cuya forma se mantiene estable en toda la operación de la bomba.

En la dirección vertical existe un pico a la 1x que varía de 2.86 mm/s a 2.77 mm/s lo que podría indicar un desbalance puro

En la dirección axial, las amplitudes son moderados a la 2x, y varía en diferentes condiciones. Los picos de la 1x y la 2x se pierden con las frecuencias de turbulencias lo que podría sugerir problemas en la entrada de flujo, dado que la entrada de flujo es axial.

Figura 35

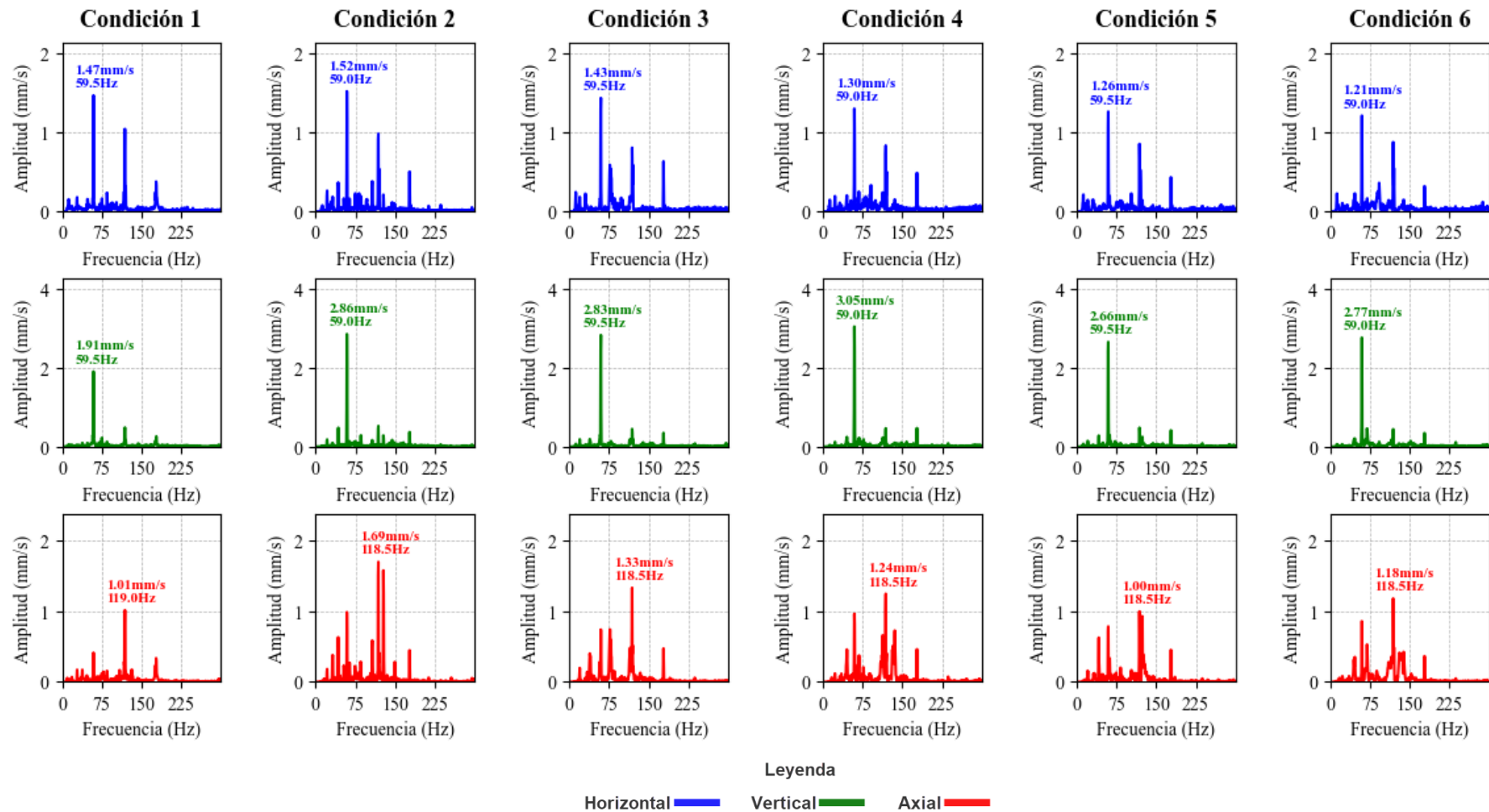
Espectro FFT general en aceleración de la posición 4



*Fuente: Elaboración propia. ** Frecuencia máxima: 600Hz, Número de puntos: 16384.

Figura 36

Espectro FFT general en velocidad de la posición 4



*Fuente: Elaboración propia. ** Frecuencia máxima: 300Hz, Número de puntos: 16384.

III.5. Análisis de Tiempo-Frecuencia

Los resultados de aplicar STFT son presentados a continuación. Se varió en ancho de la ventana para poder visualizar algunas características de las frecuencias.

III.5.1 Posición 1 Lado Libre Motor

En las figuras 37, 38, 39 y 40 se muestran los espectrogramas STFT en aceleración y velocidad de la posición 1. La visualización general está configurada para la frecuencia máxima de 600Hz.

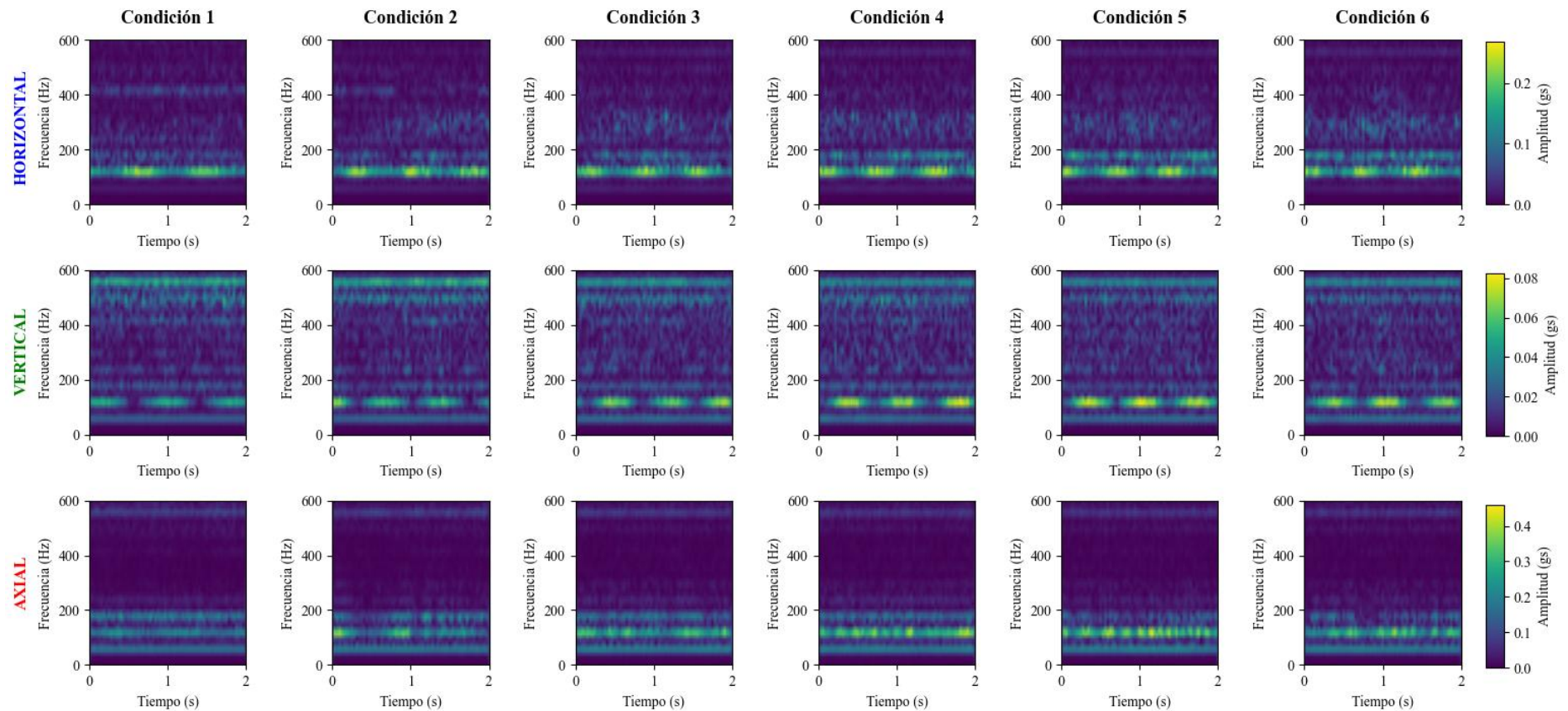
En la dirección horizontal predomina establemente la frecuencia 2FL, con valor máximo amplitud aproximada de 3.2mm/s, observándose en la Figura 36 la modulación de su amplitud. Esto podría estar relacionado con problemas eléctricos en el motor o en su conexión. Además, existe una frecuencia menor en la 3x. Existe una zona de frecuencias caóticas entre 200 y 400Hz que podría estar relacionado a fallas en los rodamientos o ruido ambientales.

En la dirección vertical, presenta vibraciones leves en las frecuencias a la 1x, 2x y 2FL.

En la dirección axial, las vibraciones son significativas en las frecuencias de la 1x y 2x. En la frecuencia de 2x se observan picos esporádicos en el tiempo que aumentan conforme la bomba opera. Esto lo que podría sugerir problemas de alineación o fuerzas axiales inusuales.

Figura 37

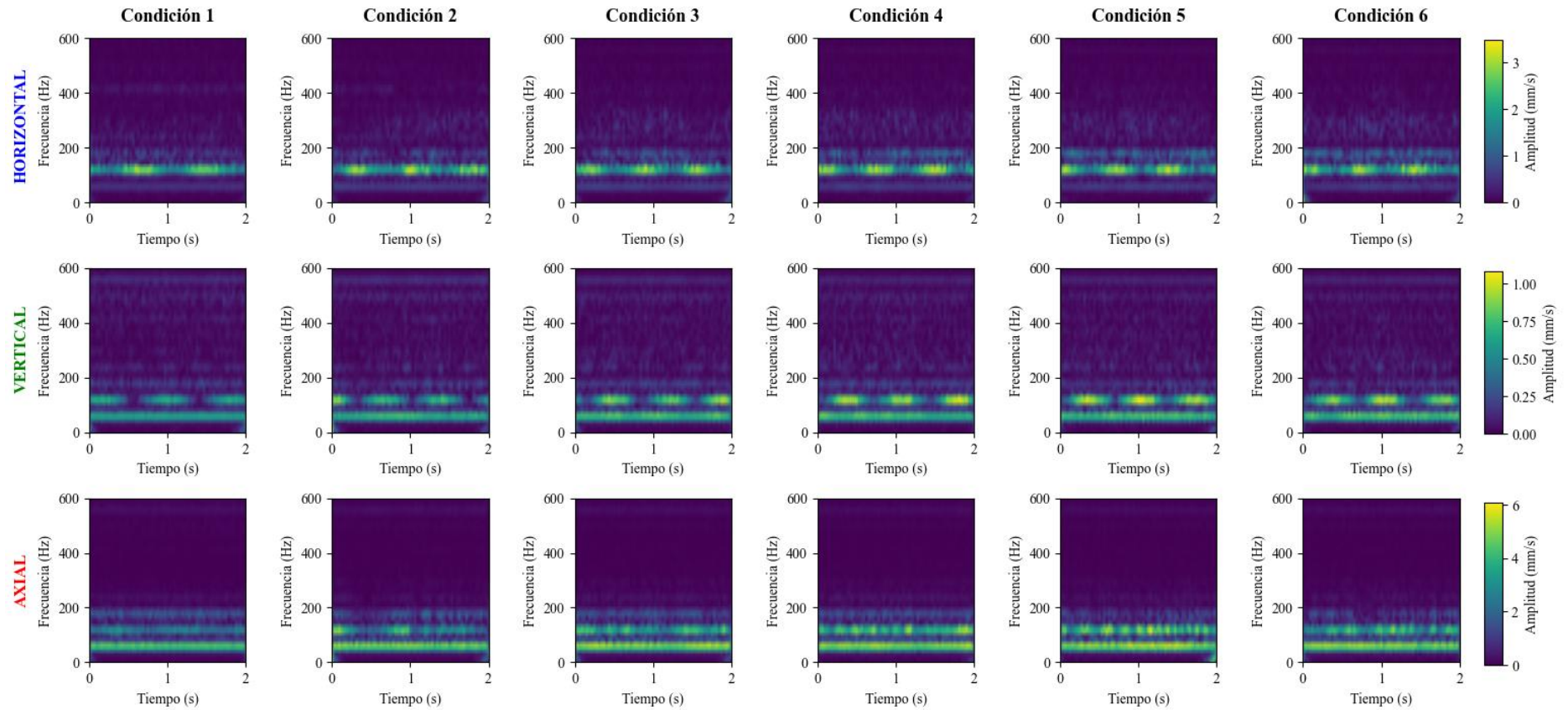
Espectrogramas STFT general en aceleración de la posición 1 para diferentes condiciones con un ancho de ventana de 256 puntos



*Fuente: Elaboración propia. ** Frecuencia máxima 600Hz.

Figura 38

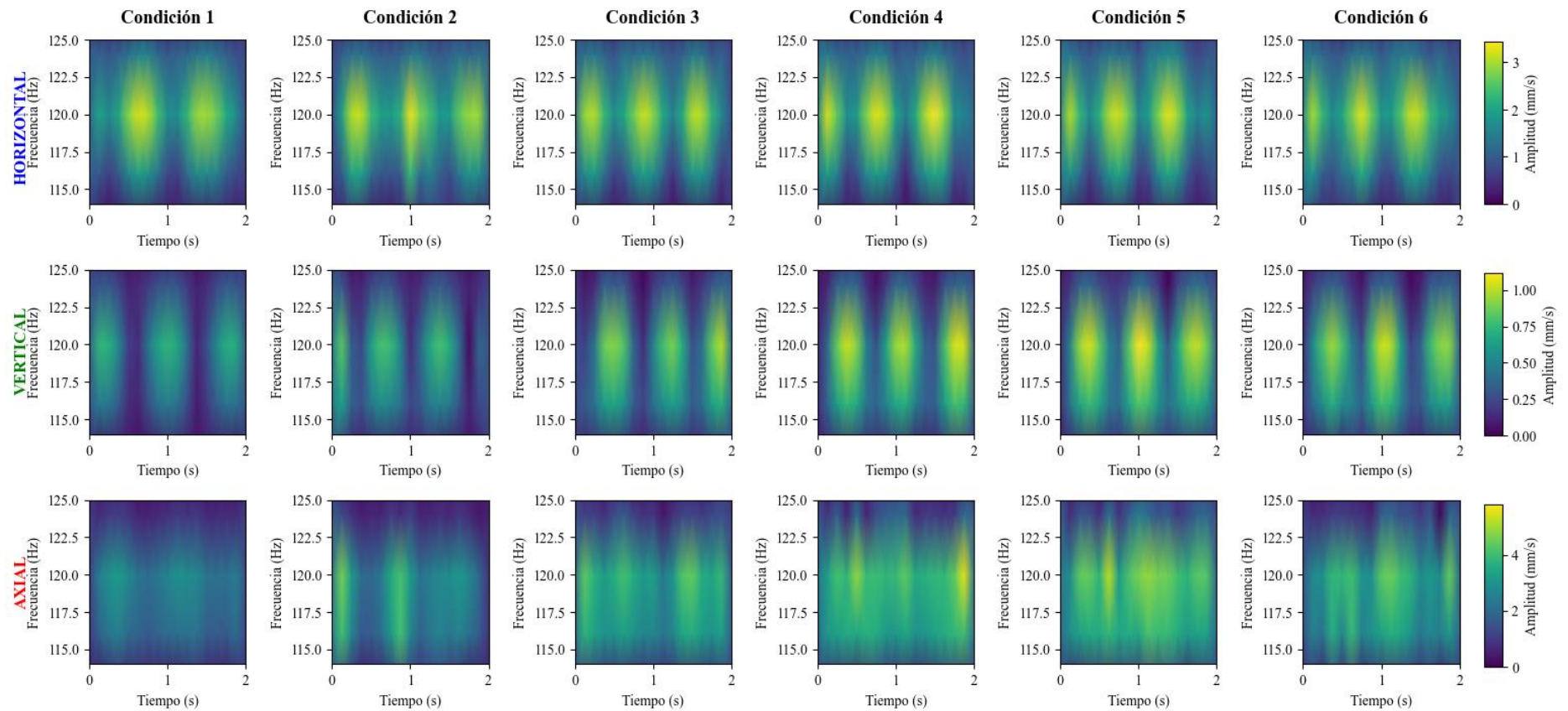
Espectrogramas STFT general en velocidad de la posición 1 para diferentes condiciones con un ancho de ventana de 256 puntos



*Fuente: Elaboración propia. ** Frecuencia máxima 600Hz.

Figura 39

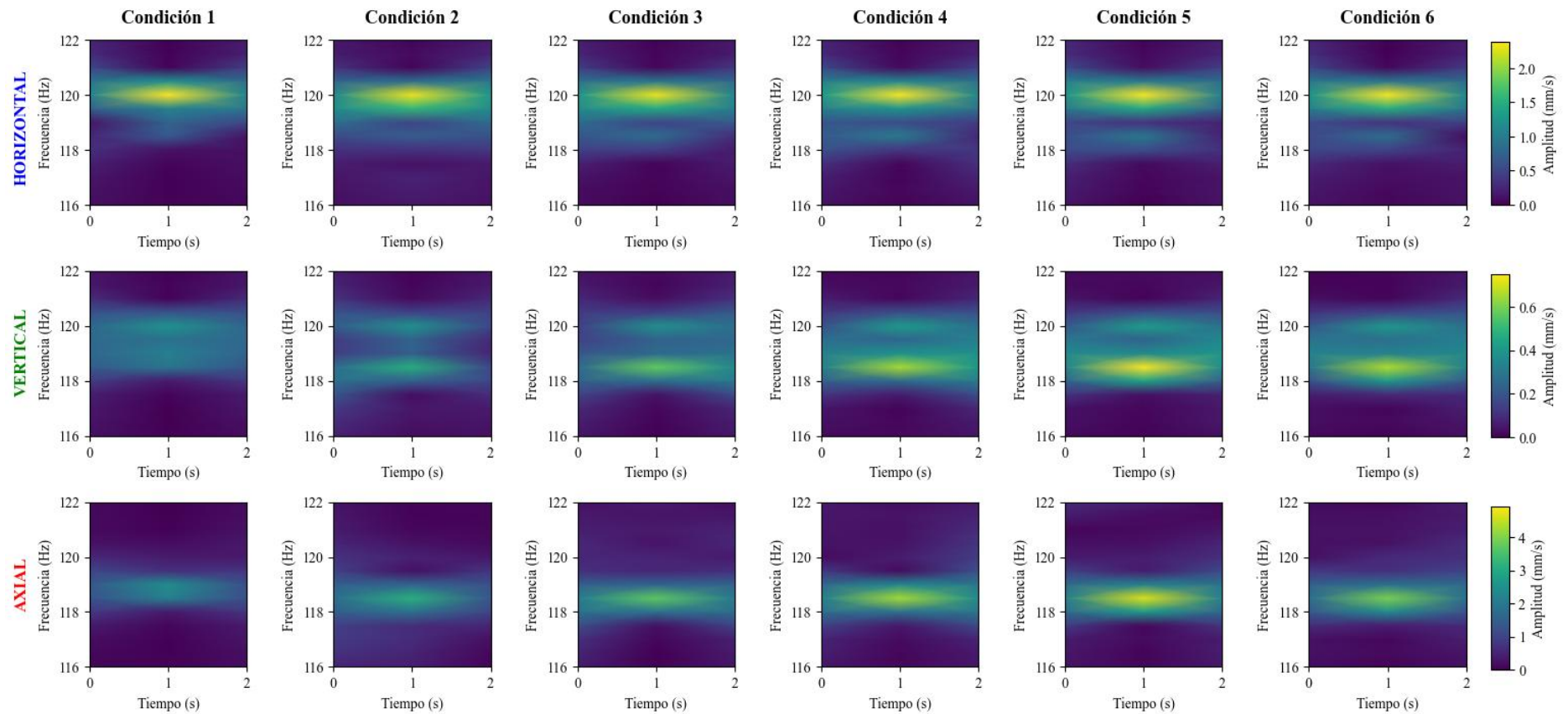
Espectrogramas STFT entre 115Hz y 125Hz en velocidad de la posición 1 para diferentes condiciones con un ancho de ventana de 1024 puntos



*Fuente: Elaboración propia.

Figura 40

Espectrogramas STFT entre 116Hz y 122Hz en velocidad de la posición 1 para diferentes condiciones con un ancho de ventana de 8192 puntos

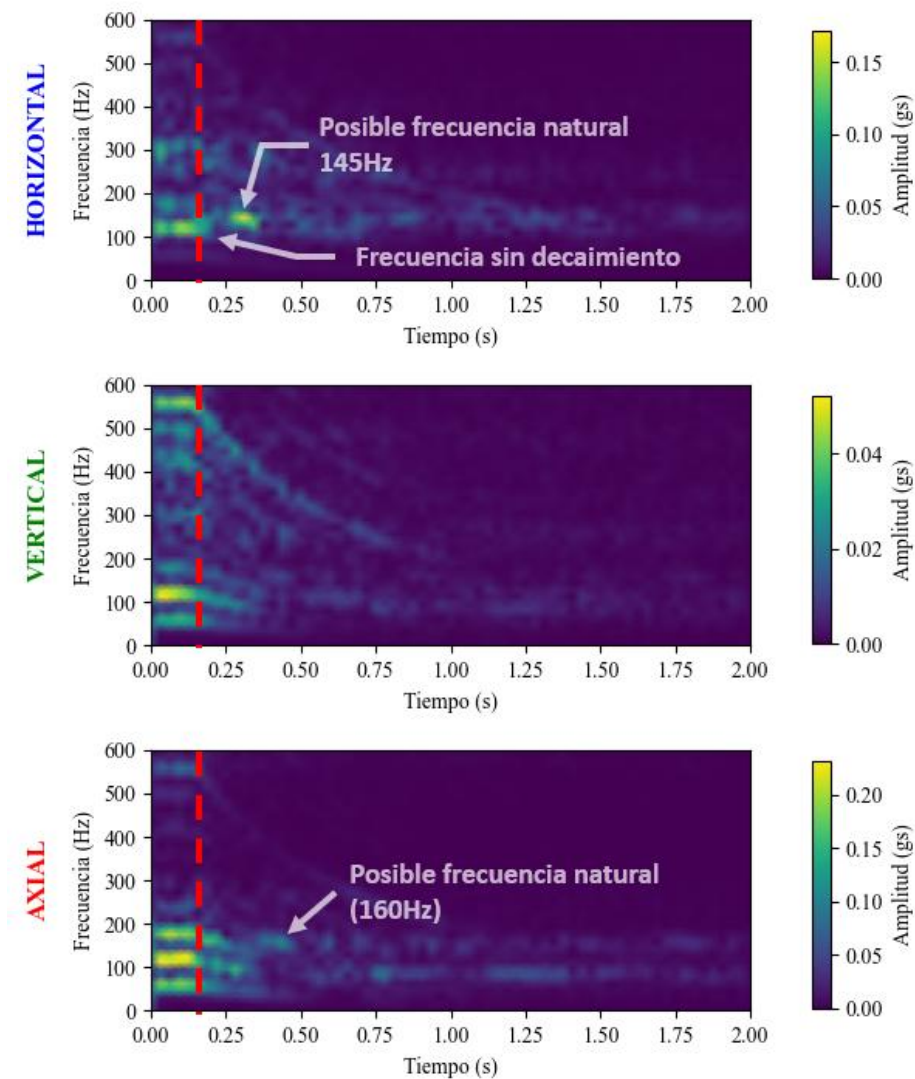


*Fuente: Elaboración propia.

El análisis de tiempo-frecuencia nos permite visualizar el apagado de la máquina. En la Figura 41 se presenta la vibración en aceleración durante el apagado en la posición 1 de los tres ejes. Se puede observar posibles excitaciones que podrían estar relacionadas a frecuencias naturales: 145 Hz en la dirección horizontal y 160 Hz en la dirección axial. La frecuencia de 120 Hz no presenta el mismo decaimiento que las otras frecuencias ya que desaparece instantáneamente cuando inicia el apagado, lo que se relaciona con su naturaleza eléctrica.

Figura 41

Espectrograma STFT de la Posición 1 durante el apagado en aceleración con ancho de ventana de 256 puntos



*Fuente: Elaboración propia

III.5.2 Posición 2 Lado Acoplado Motor

En las figuras 42, 43, 44 y 45 se muestran los espectrogramas STFT en aceleración y velocidad de la posición 2. La visualización general está configurada para la frecuencia máxima de 600Hz.

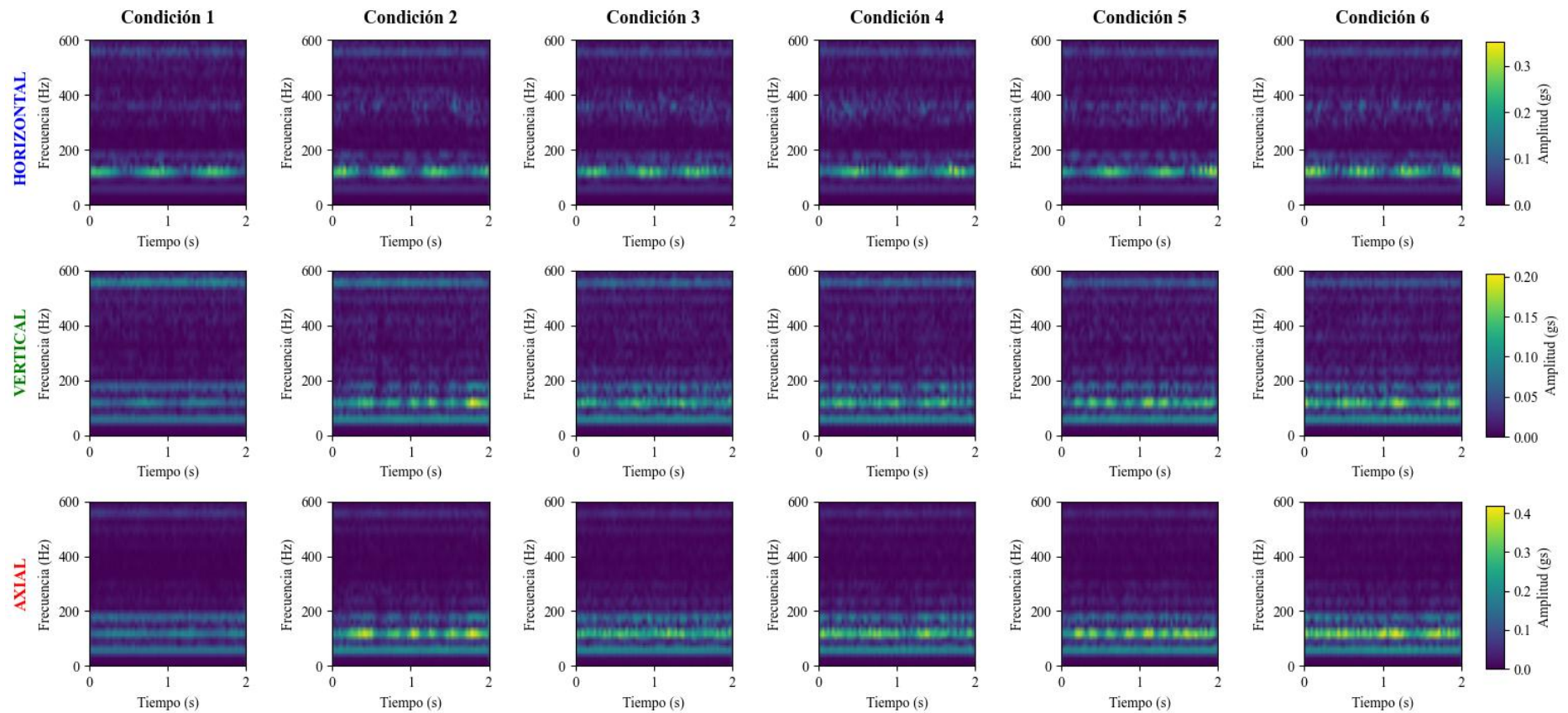
En la dirección horizontal predomina establemente la frecuencia 2FL, con valor máximo amplitud aproximada de 4.2mm/s. Además, existen una frecuencia menor en la 3x. Existe una zona de frecuencias caóticas entre 200 y 400Hz que podría estar relacionado a fallas en los rodamientos o ruido ambientales.

En la dirección vertical, presenta vibraciones moderadas en las frecuencias de la 1x y 2x y leves a la 2FL.

En la dirección axial, las vibraciones son significativas en las frecuencias de la 1x y 2x. Lo que podría sugerir problemas de alineación o fuerzas axiales inusuales.

Figura 42

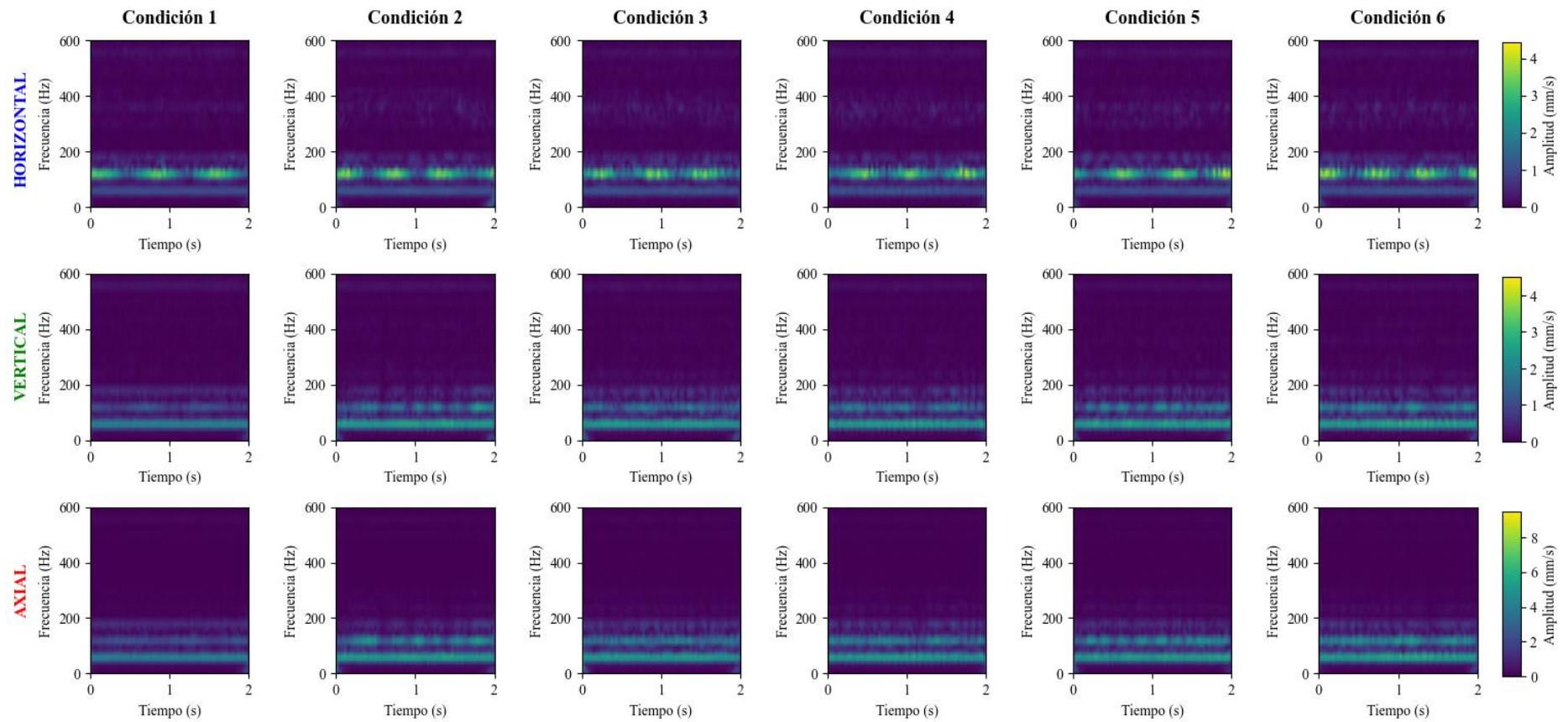
Espectrogramas STFT general en aceleración de la posición 2 para diferentes condiciones con un ancho de ventana de 256 puntos



*Fuente: Elaboración propia. ** Frecuencia máxima 600Hz.

Figura 43

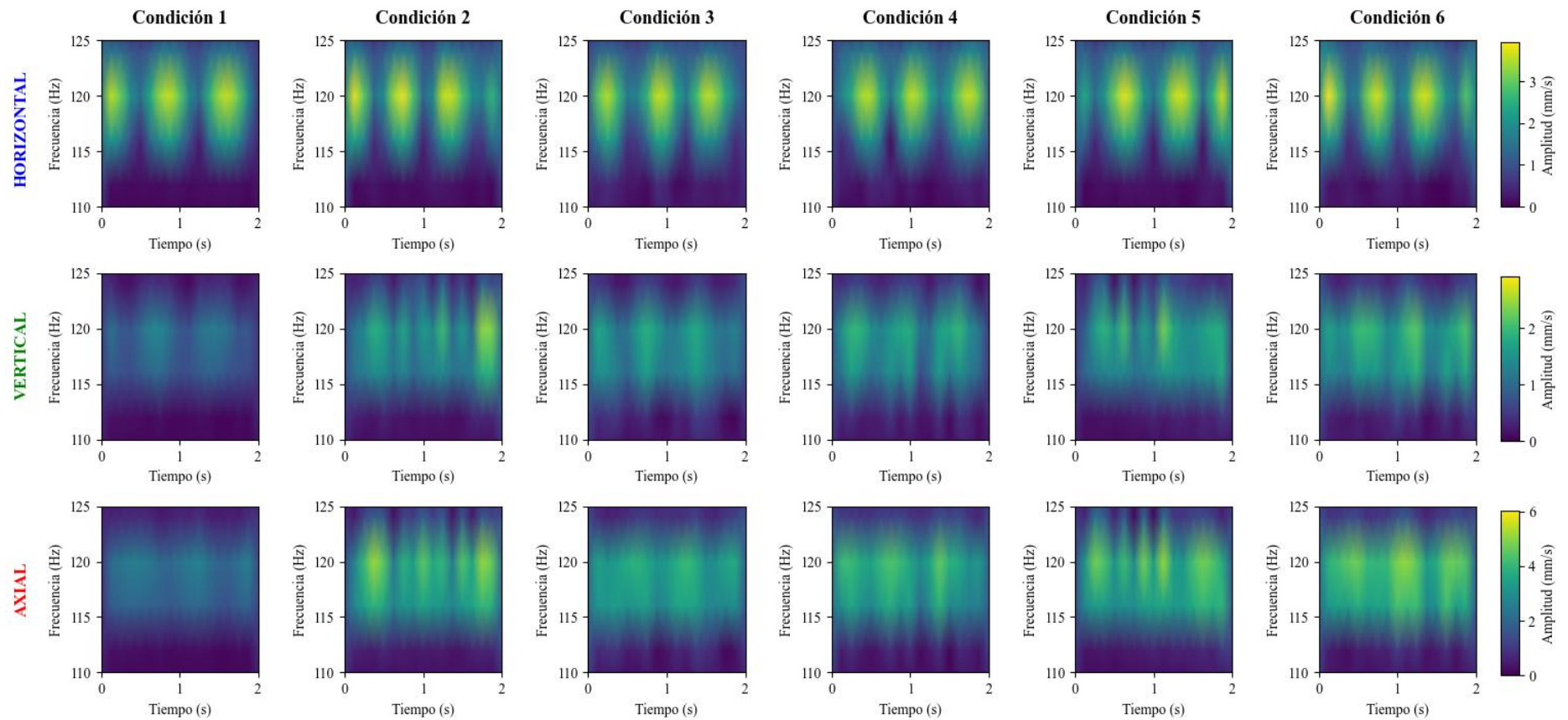
Espectrogramas STFT general en velocidad de la posición 2 para diferentes condiciones con un ancho de ventana de 256 puntos



*Fuente: Elaboración propia. ** Frecuencia máxima 600Hz.

Figura 44

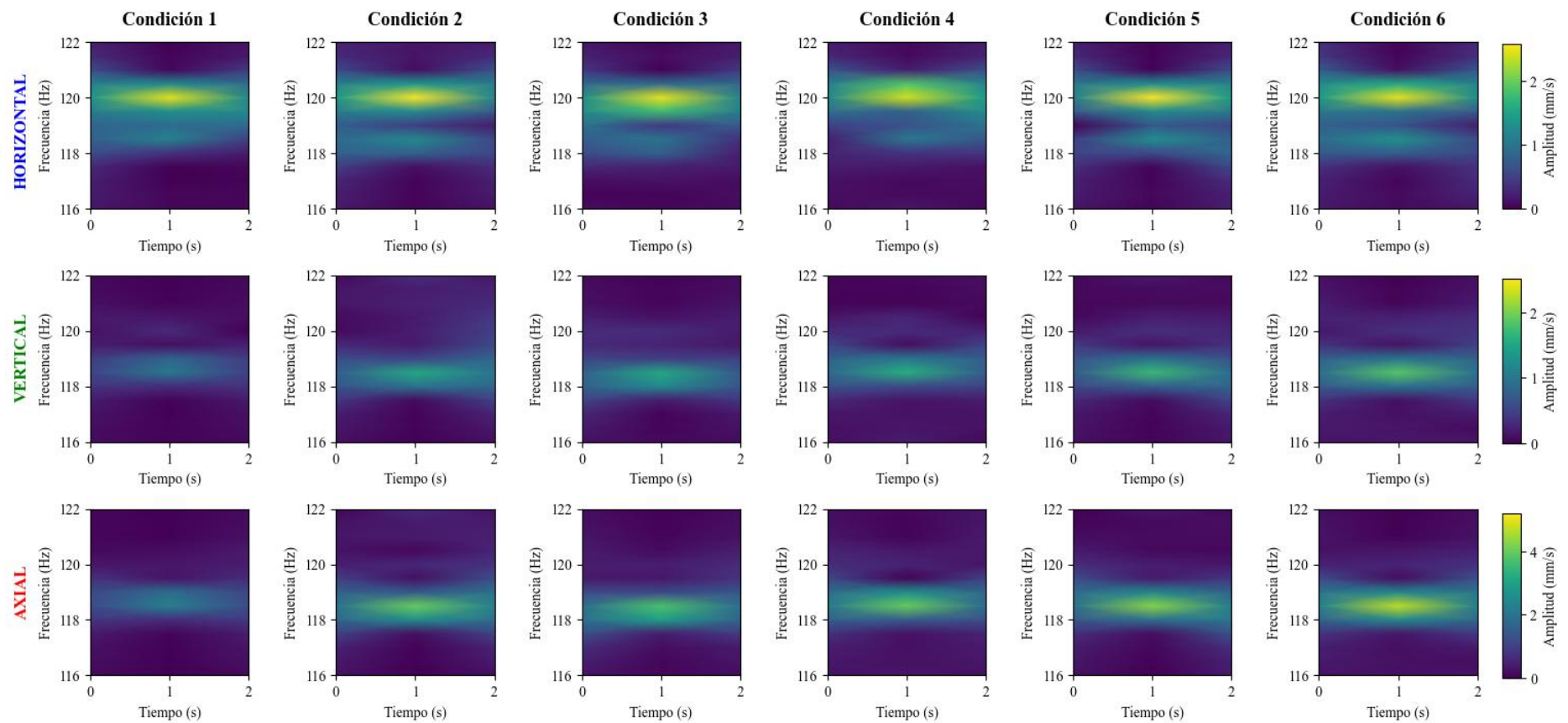
Espectrogramas STFT entre 115Hz y 125Hz en velocidad de la posición 2 para diferentes condiciones con un ancho de ventana de 1024 puntos



*Fuente: Elaboración propia.

Figura 45

Espectrogramas STFT entre 116Hz y 122Hz en velocidad de la posición 2 para diferentes condiciones con un ancho de ventana de 8192 puntos

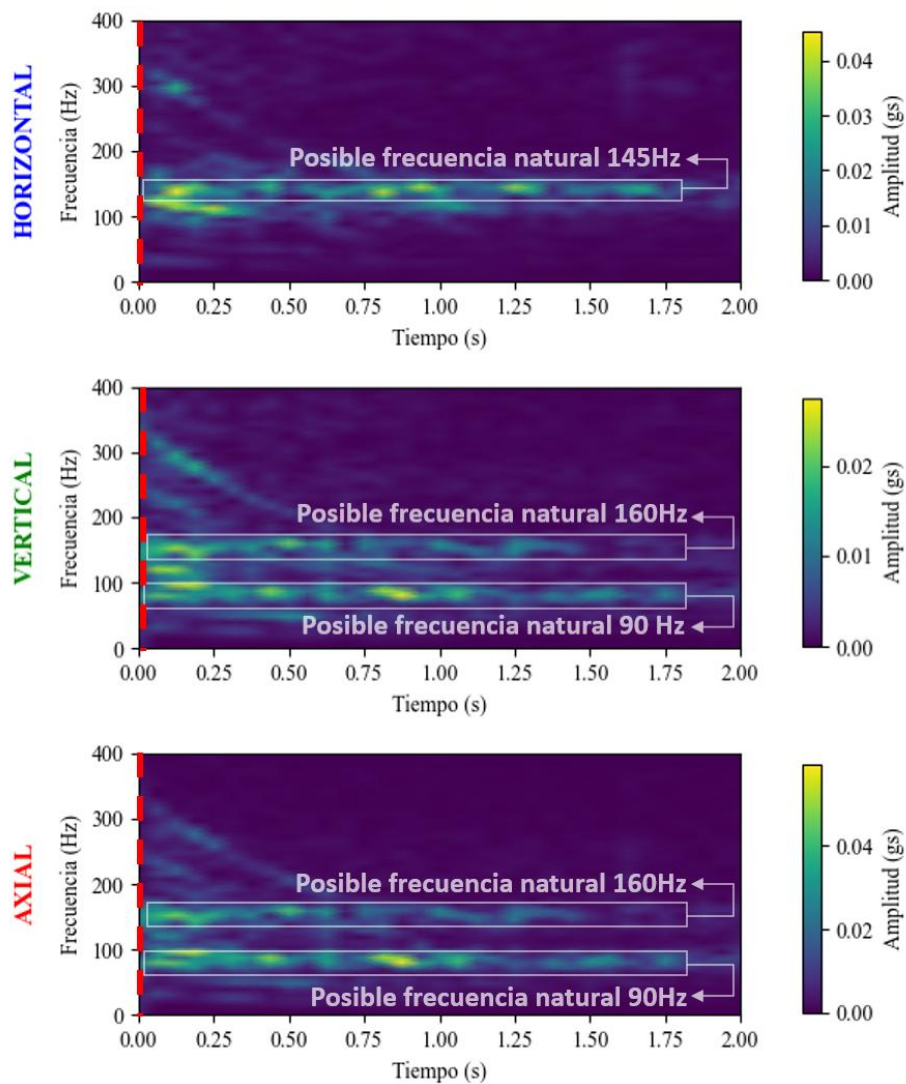


*Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 46 se muestra la STFT del apagado de la máquina en la posición 2, podemos observar que algunas frecuencias continúan estimulándose incluso después de que la máquina se ha apagado. Estas frecuencias pueden corresponder a frecuencias naturales. Cuando una frecuencia que depende de la velocidad de rotación, coincide en la misma dirección y frecuencia con una frecuencia natural, puede excitar y amplificar la vibración en esta frecuencia.

Figura 46

Espectrograma STFT de la Posición 2 durante el apagado en aceleración con ancho de ventana de 512 puntos



*Fuente: Elaboración propia

III.5.3 Posición 3 Lado Acoplado Bomba

En las figuras 47 y 48, se muestran los espectrogramas STFT en aceleración y velocidad de la posición 3. En la Figura 49 se muestra en el rango 100 a 150Hz.

En todos los espectrogramas en aceleración está presente la frecuencia de 555Hz con un nivel de vibración significativo.

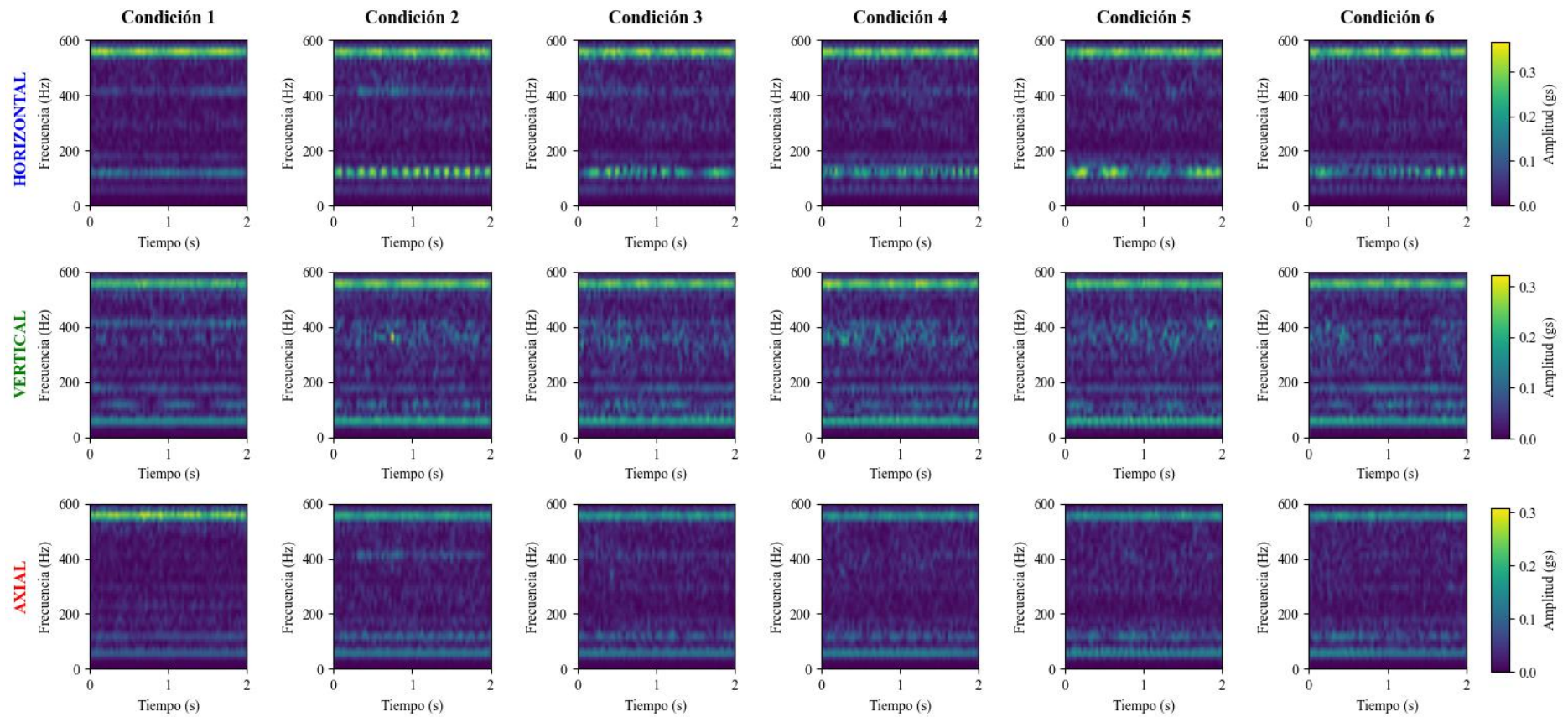
En la dirección horizontal predomina la 2x. Se observan bandas laterales en las condiciones 2,3 4,5 y 6 alrededor de la 2x que podría estar relacionado al flujo

En la dirección vertical, presenta vibraciones significativas en las frecuencias de la 1x. Esto podría sugerir algún desbalance.

En la dirección axial, las vibraciones son significativas a la 1x y moderadas a la 2x. Lo que podría sugerir problemas de alineación o fuerzas axiales inusuales.

Figura 47

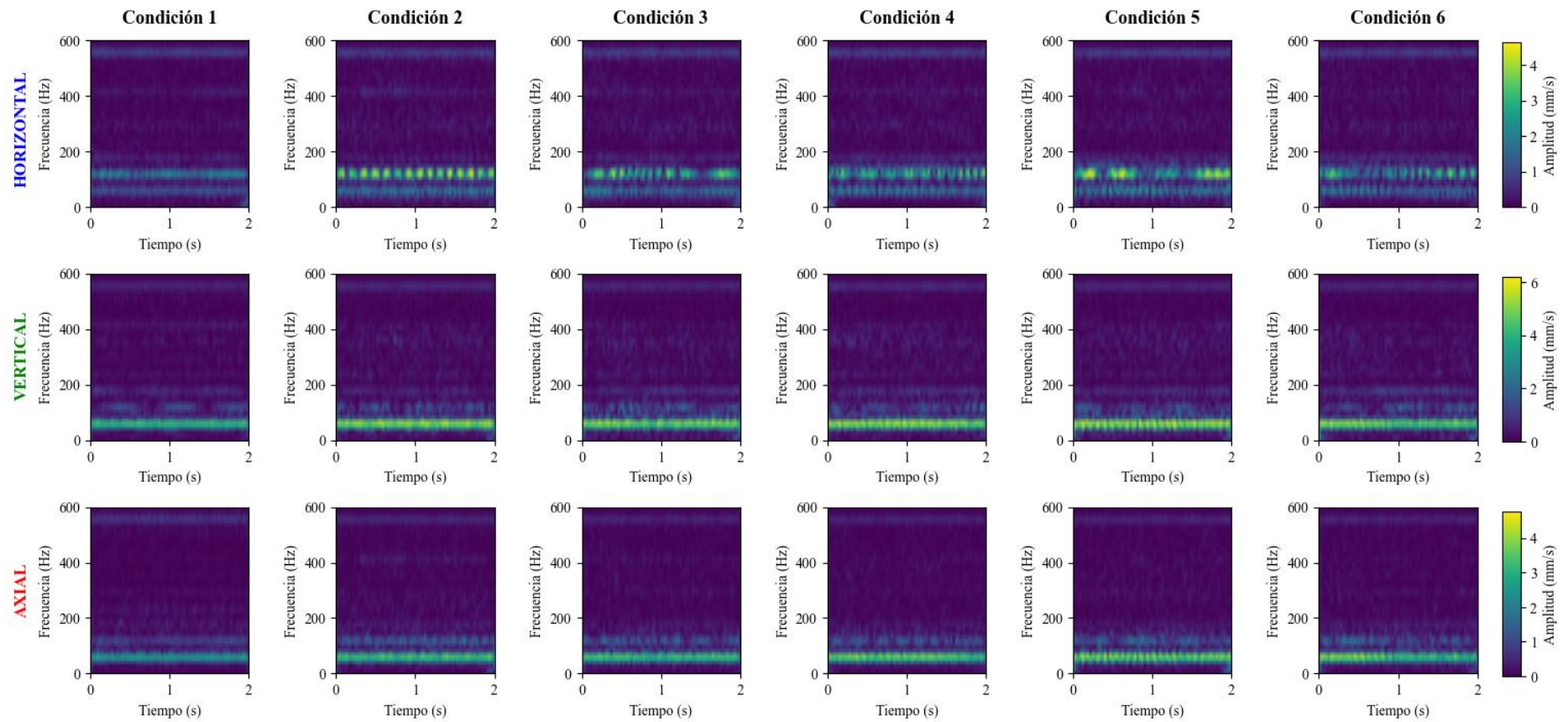
Espectrogramas STFT general en aceleración de la posición 3 para diferentes condiciones con un ancho de ventana de 256 puntos



*Fuente: Elaboración propia. ** Frecuencia máxima 600Hz.

Figura 48

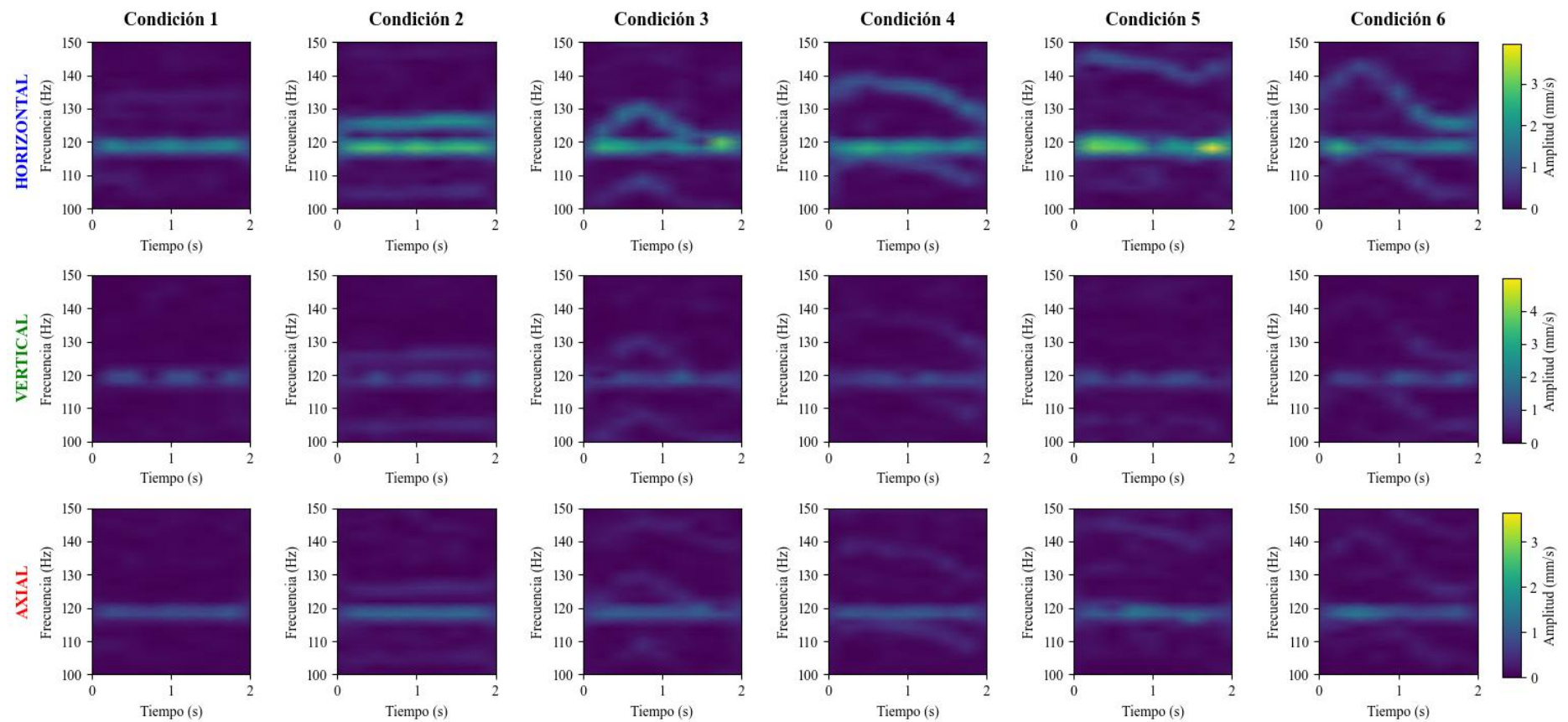
Espectrogramas STFT general en velocidad de la posición 3 para diferentes condiciones con un ancho de ventana de 256 puntos



*Fuente: Elaboración propia. ** Frecuencia máxima 600Hz.

Figura 49

Espectrogramas STFT entre 100Hz y 150Hz en velocidad de la posición 3 para diferentes condiciones con un ancho de ventana de 2048 puntos



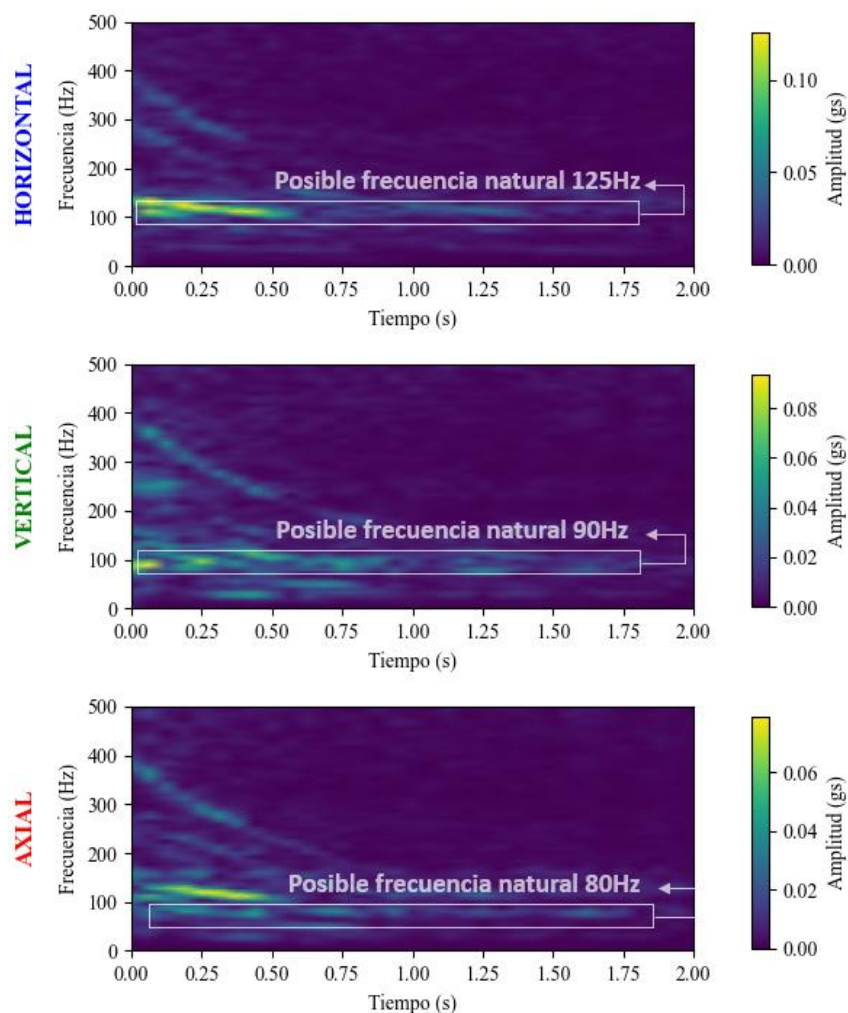
*Fuente: Elaboración propia.

En la figura 50 se muestra el espectro durante el apagado de la máquina en la posición 3 y se puede observar algunas frecuencias que son excitadas.

En la dirección horizontal, se observa una posible frecuencia natural alrededor de 125 Hz. En la dirección vertical, una posible frecuencia natural cercana a los 90 Hz y finalmente, en la dirección axial, una posible frecuencia natural alrededor de los 80 Hz.

Figura 50

Espectrograma STFT de la Posición 3 durante el apagado en aceleración con ancho de ventana de 512 puntos



*Fuente: Elaboración propia.

III.5.4 Posición 4 Lado Libre Bomba

En la figura 51 y 52 se muestran los espectrogramas STFT en aceleración y velocidad de la posición 4. En la Figura 53 y Figura 54 se muestra en el rango de bajas frecuencias.

Al igual que en la posición 3 en todos los espectrogramas en aceleración está presente la frecuencia de 558Hz, pero con menor nivel de vibración, y la también la frecuencia de 414Hz.

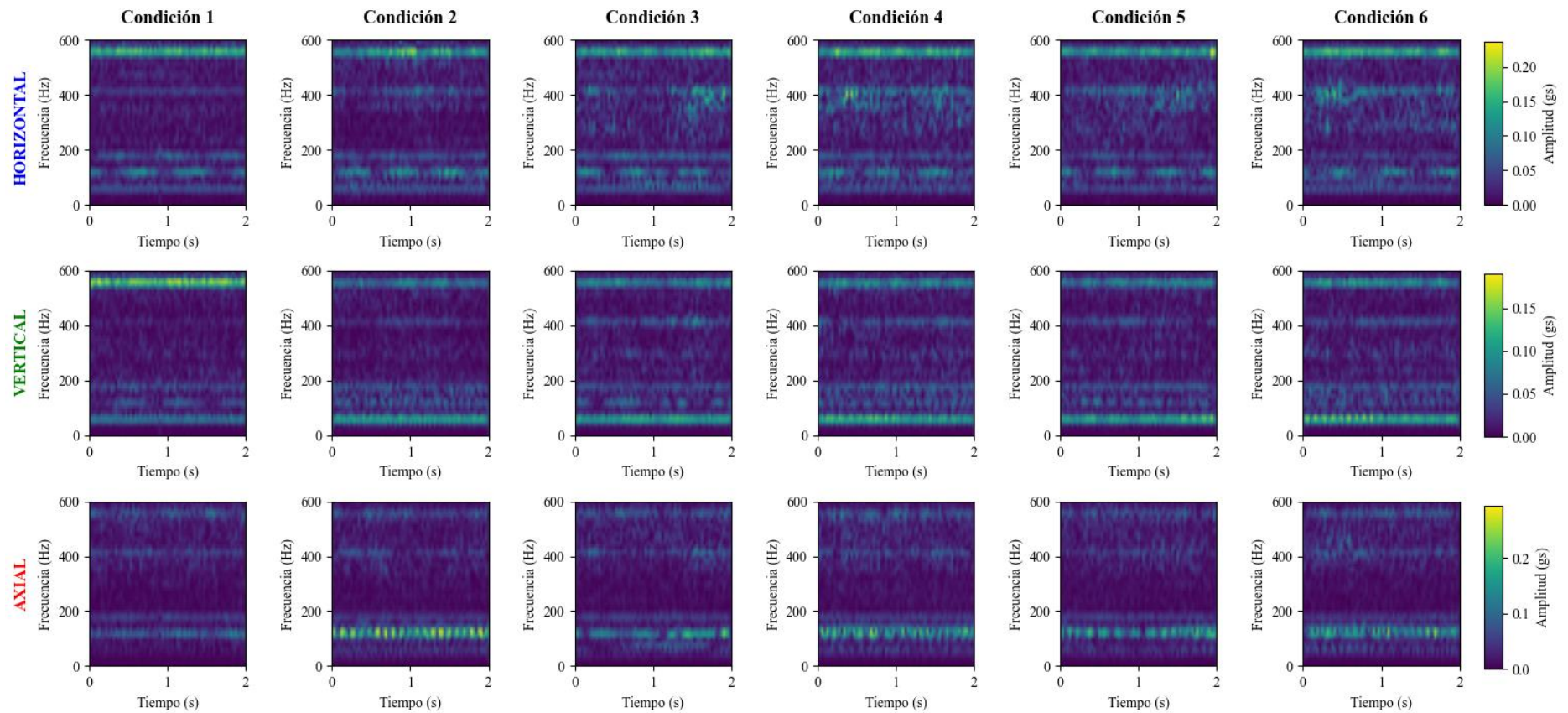
En la dirección horizontal predomina la 1x y 2x. Se observa vibraciones moduladas en frecuencia que son ligeramente visibles alrededor de la 2x, y frecuencias caóticas frecuencias menores a la velocidad de rotación, junto con una frecuencia mayor a 80Hz (1.3x).

En la dirección vertical, presenta vibraciones moderadas en las frecuencias de la 1x. Esto podría sugerir algún desbalance.

En la dirección axial, las vibraciones son significativas a la 1x y moderadas a la 2x. Existe presencia fuertes vibraciones moduladas en frecuencia alrededor de 125z y 140Hz en las condiciones 2,3,4,5 y 6.; y vibraciones moderas alrededor de 80Hz (1.34x) y 40 Hz (0.67x). Estas frecuencias podrían estar relacionadas a fuerzas hidráulicas o recirculación.

Figura 51

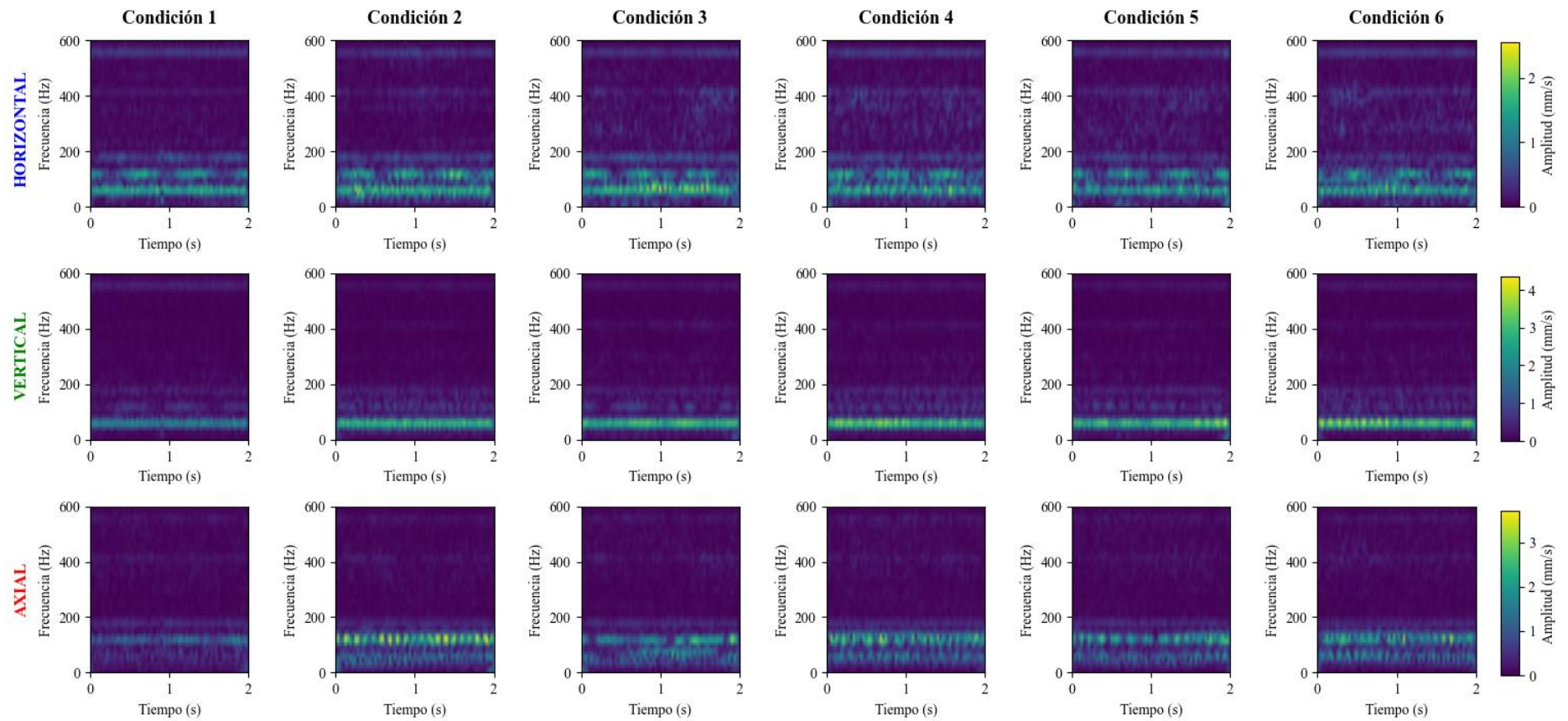
Espectrogramas STFT general en aceleración de la posición 4 para diferentes condiciones con un ancho de ventana de 256 puntos



*Fuente: Elaboración propia. ** Frecuencia máxima 600Hz.

Figura 52

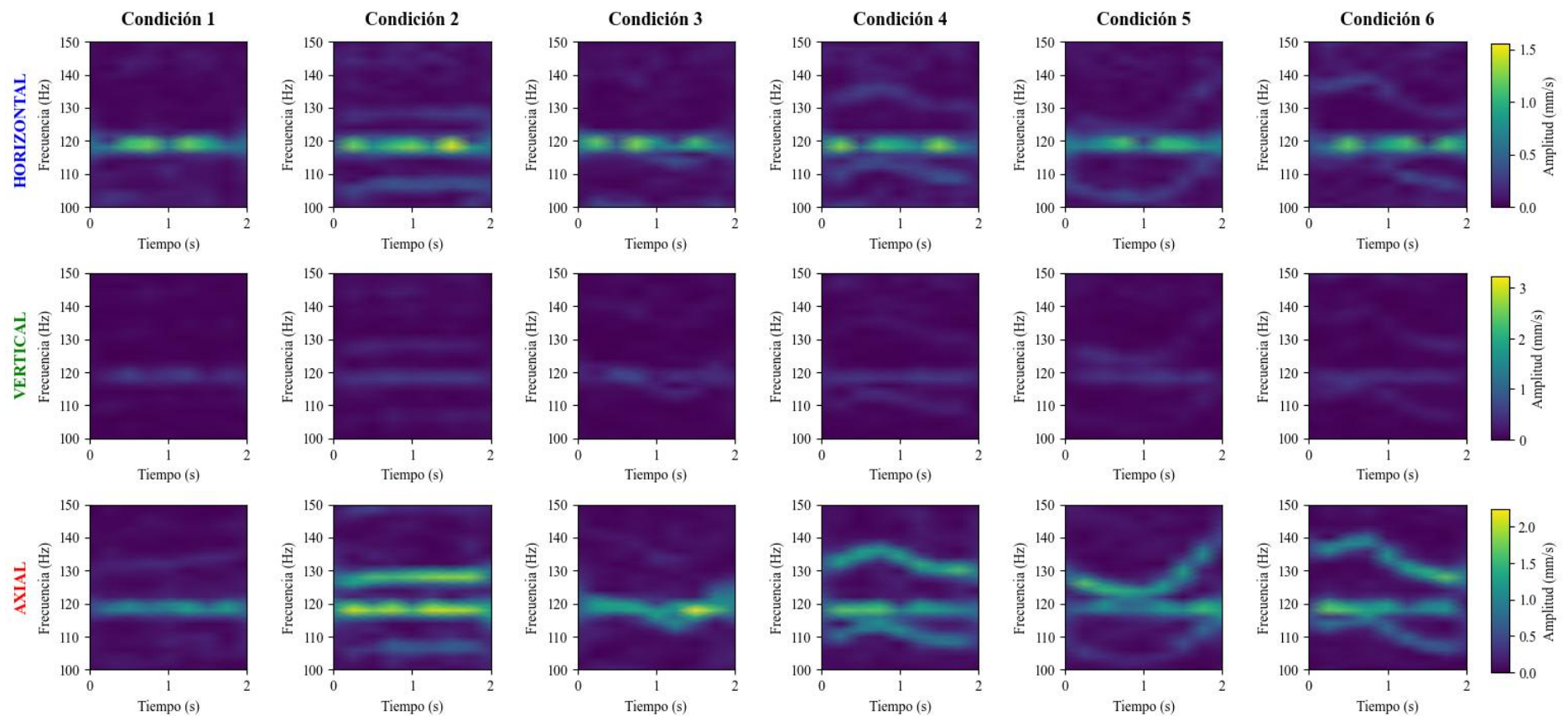
Espectrogramas STFT general en velocidad de la posición 4 para diferentes condiciones con un ancho de ventana de 256 puntos



*Fuente: Elaboración propia. ** Frecuencia máxima 600Hz.

Figura 53

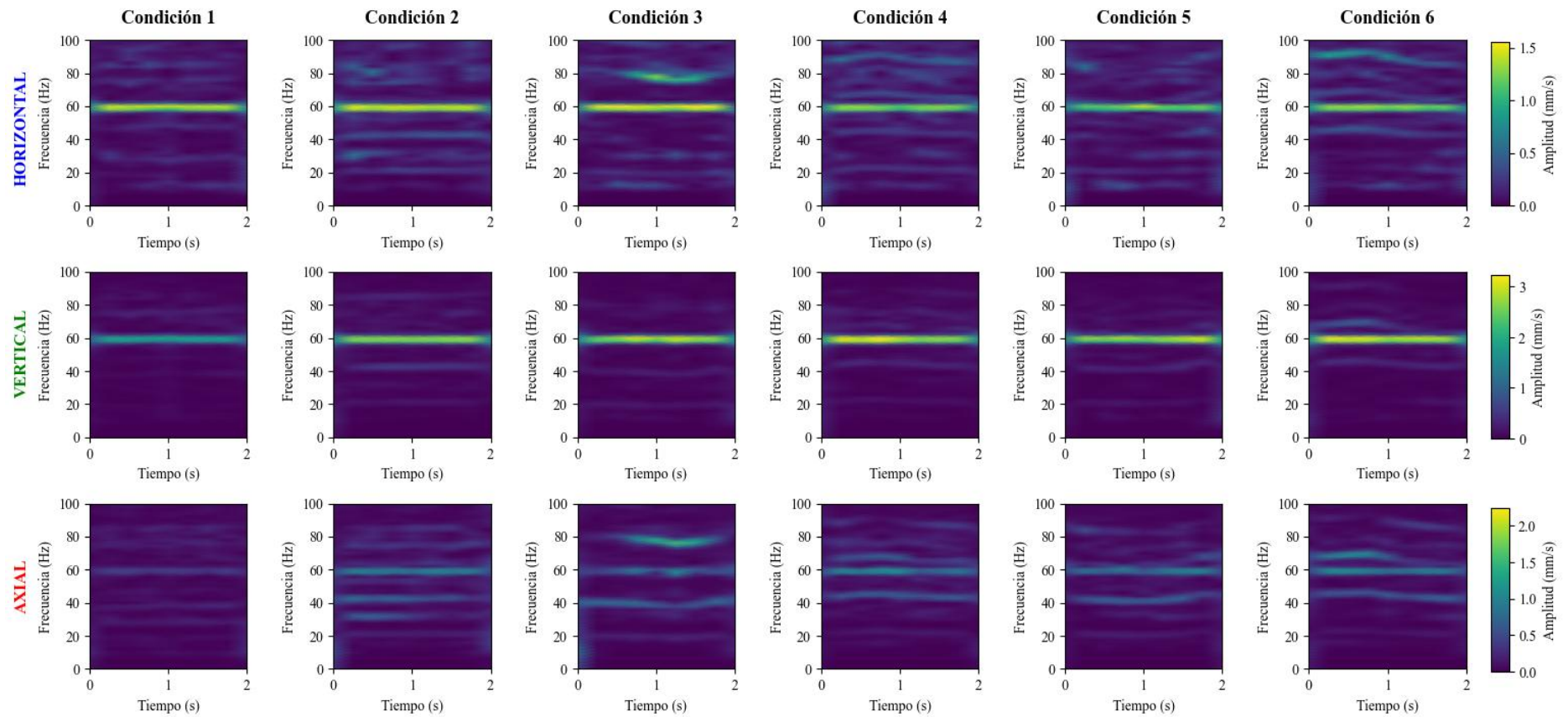
Espectrogramas STFT entre 100Hz y 150Hz en velocidad de la posición 4 para diferentes condiciones con un ancho de ventana de 2048 puntos



*Fuente: Elaboración propia.

Figura 54

Espectrogramas STFT entre 0Hz y 100Hz en velocidad de la posición 4 para diferentes condiciones con un ancho de ventana de 2048 puntos



*Fuente: Elaboración propia.

III.6. Análisis de Transformada Wavelet

Para el análisis de la transformada wavelet, se realizó una comparación entre diferentes tipos de wavelets madre. Inicialmente, se presentarán las comparaciones entre los diferentes tipos de wavelets, y posteriormente se analizarán las condiciones de la máquina en las posiciones 1, 2, 3 y 4.

III.6.1 Comparación entre diferentes tipos de Wavelets

Aplicar diferentes tipos de wavelets madre y diferentes ajustes de ancho de banda y frecuencia central en una misma señal produce diferentes espectrogramas. Estos ajustes permiten que cada wavelet capture diferentes frecuencias de la señal, lo que resulta en distintos espectrogramas con diferentes niveles de detalle y precisión. En las figuras 55 y 56 se muestran varios espectrogramas para una misma señal.

Figura 55

Espectrograma de diferentes wavelets madre en la posición 1 condición 5 en aceleración dirección horizontal

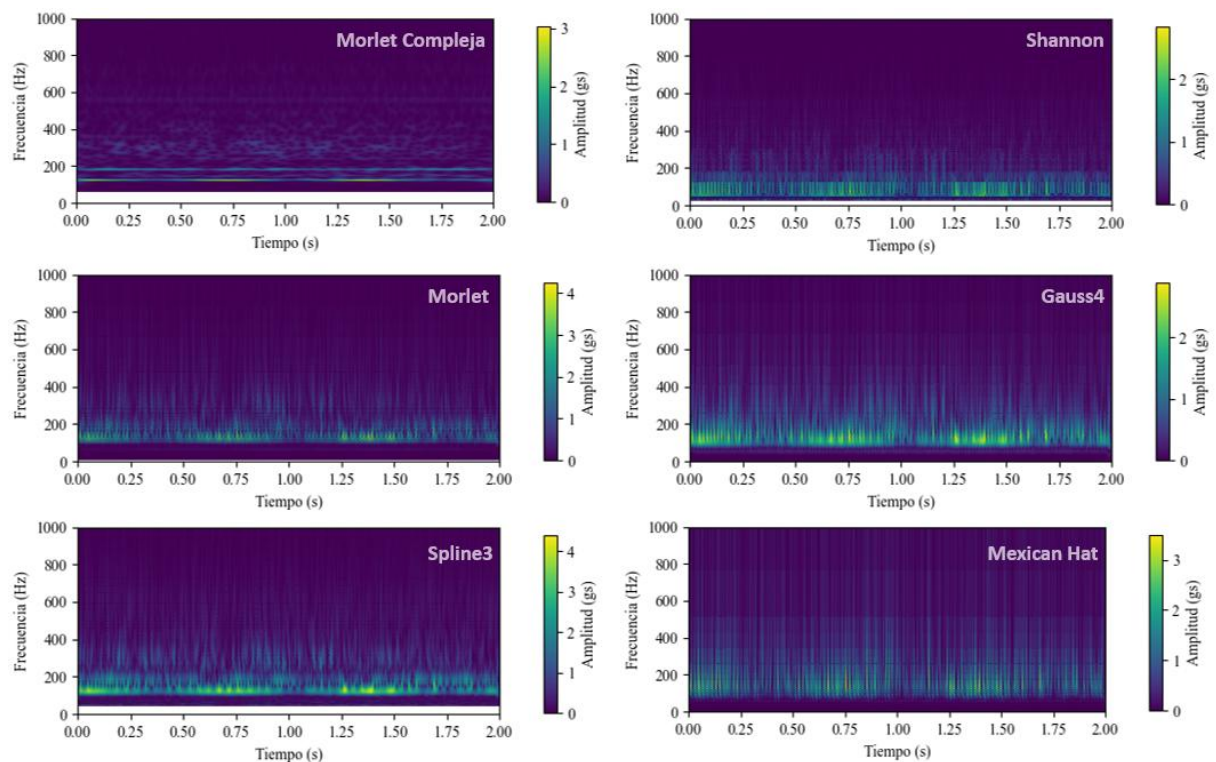
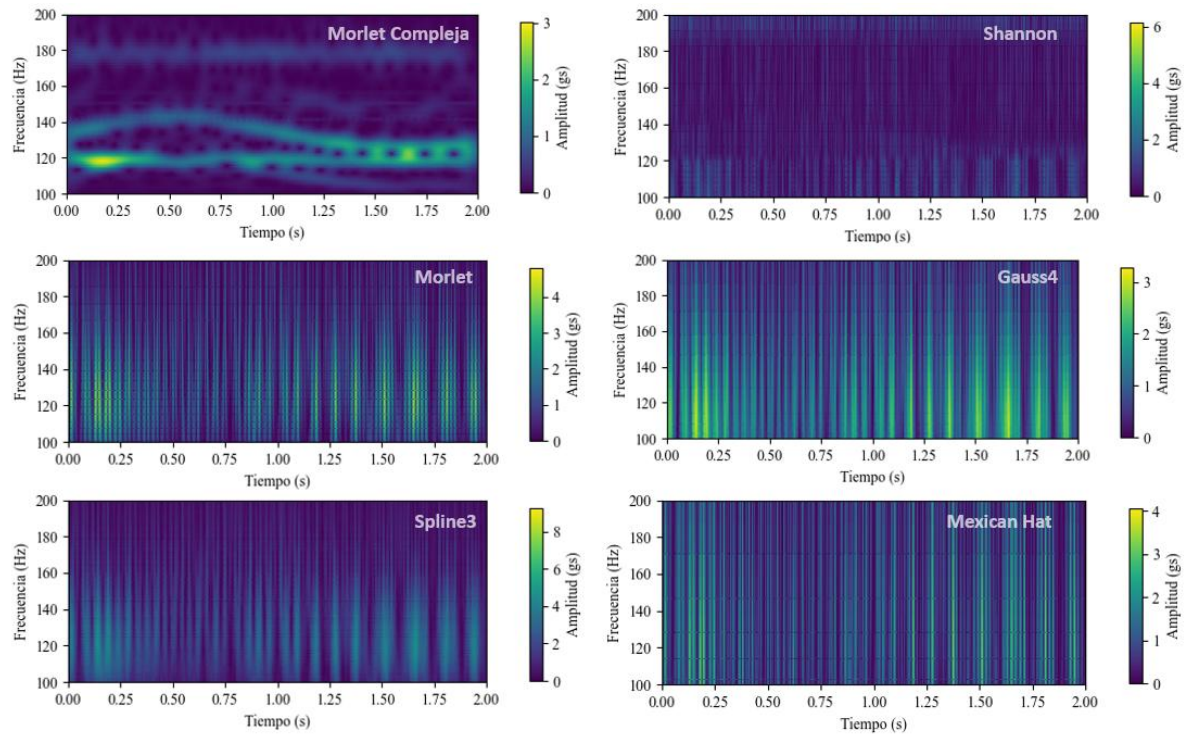


Figura 56

Espectrograma de diferentes wavelets madre en la posición 3 condición 6 en aceleración dirección horizontal



La wavelet Morlet Compleja parece capturar los detalles más finos tanto en el tiempo como en la frecuencia. Las otras wavelets, aunque proporcionan una idea general de los patrones de frecuencia, muestran una distribución más dispersa debido a las líneas verticales que aparecen en los espectrogramas.

III.6.2 Búsqueda de fallas con la Wavelet Morlet Compleja

La wavelet Morlet Compleja es la que mejor representa las frecuencias de la señal de la bomba que se están analizando. A continuación, se presentarán los resultados para cada una de las posiciones.

Posición 1 Lado Libre Motor

En las figuras 57 y 58 se enfocan los espectrogramas Wavelet Morlet compleja en aceleración y velocidad de la posición 1, configurados con una frecuencia máxima de 600Hz. En la Figura 59 y Figura 60 se enfoca las frecuencias de 2FL y 2x para poder diferenciarlas.

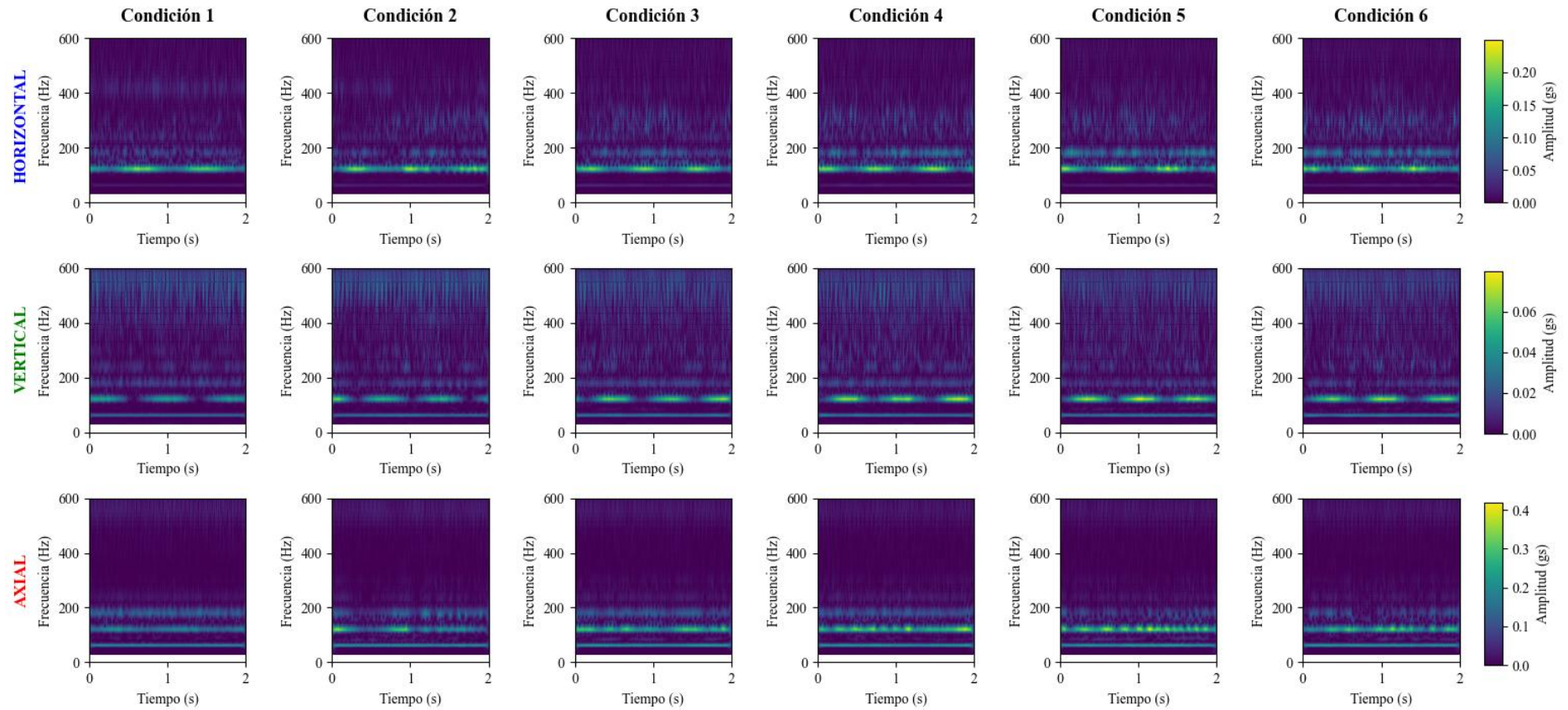
En la dirección horizontal predomina la frecuencia 2FL. Se puede observar la modulación de su amplitud. Esto podría estar relacionado a problemas eléctricos.

En la dirección vertical, presenta vibraciones leves en las frecuencias a la 1x, 2x y 2FL.

En la dirección axial, las vibraciones son significativas en las frecuencias de la 1x y 2x, lo que sugiere problemas de alineación o fuerzas axiales inusuales.

Figura 57

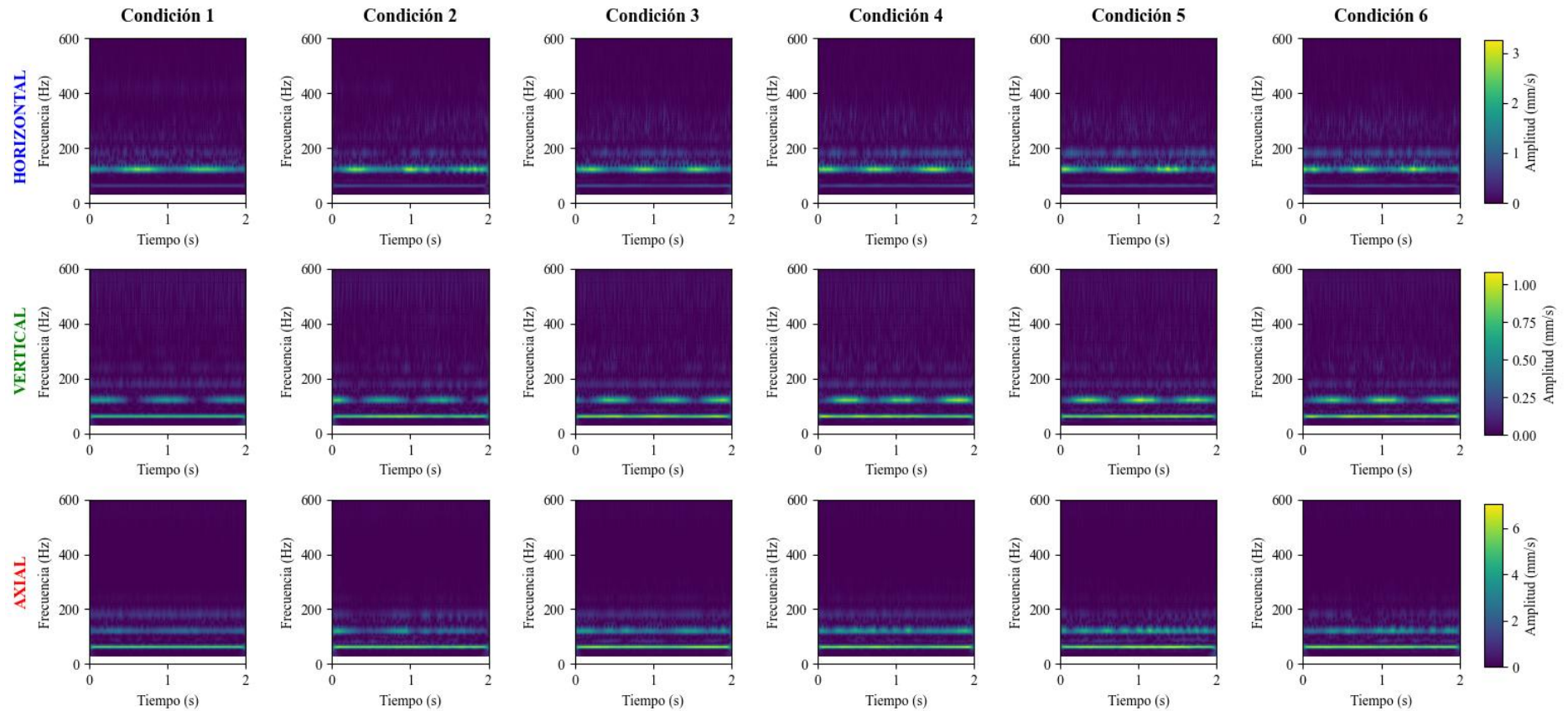
Espectrograma Wavelet Morlet Compleja general en aceleración de la posición 1 para diferentes condiciones



*Fuente: Elaboración propia. ** Frecuencia máxima 600Hz. $f_b = 2$, $f_c = 2$ y ancho de ventana de 256 puntos

Figura 58

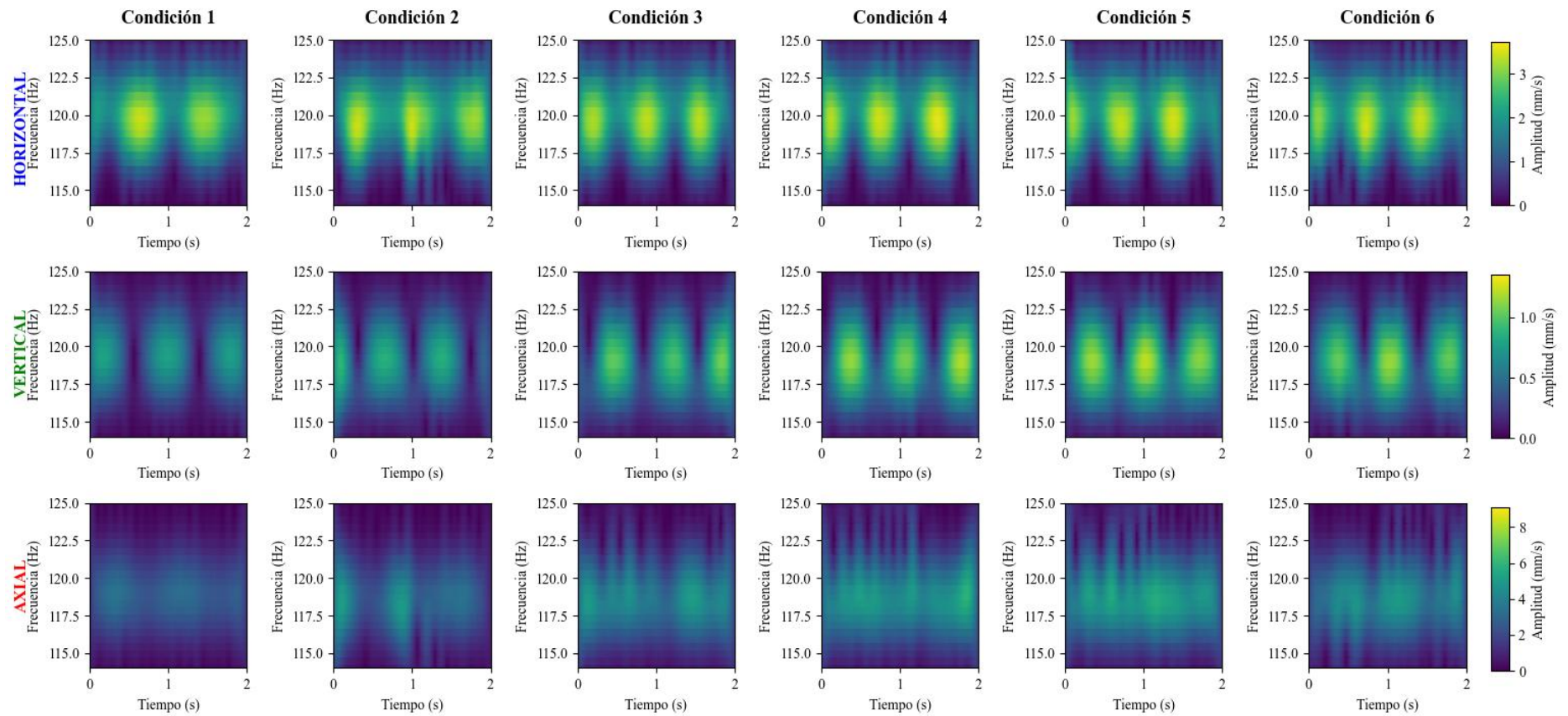
Espectrograma Wavelet Morlet Compleja general en velocidad de la posición 1 para diferentes condiciones



*Fuente: Elaboración propia. ** Frecuencia máxima 600Hz. $f_b = 2$, $f_c = 2$ y ancho de ventana de 256 puntos

Figura 59

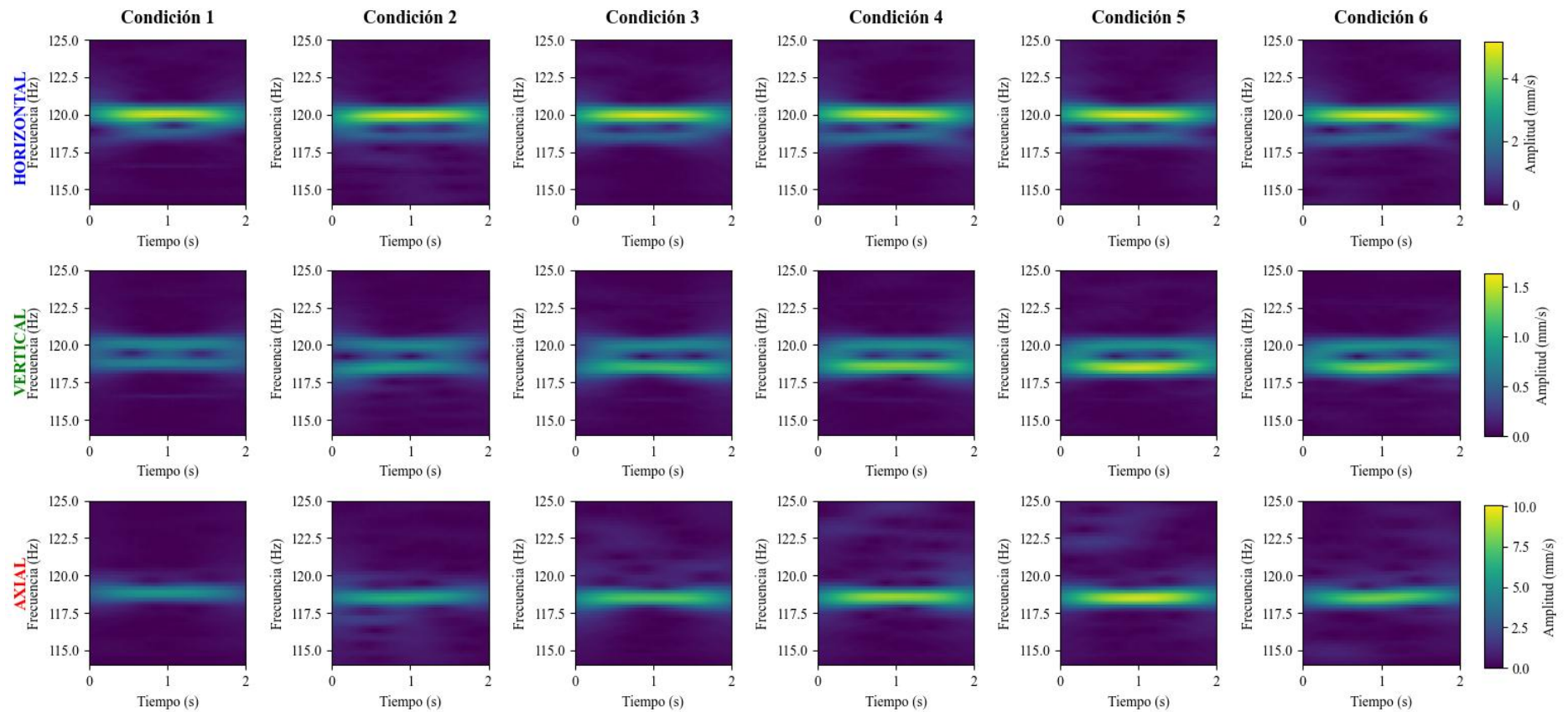
Espectrograma Wavelet Morlet Compleja 115Hz y 125Hz en velocidad de la posición 1 para diferentes condiciones, ancho de ventana 256, $fb=10$ y $fc=3.5$



*Fuente: Elaboración propia.

Figura 60

Espectrograma Wavelet Morlet Compleja 114Hz y 125Hz en velocidad de la posición 1 para diferentes condiciones, ancho de ventana 512, $fb=25$ y $fc=14$



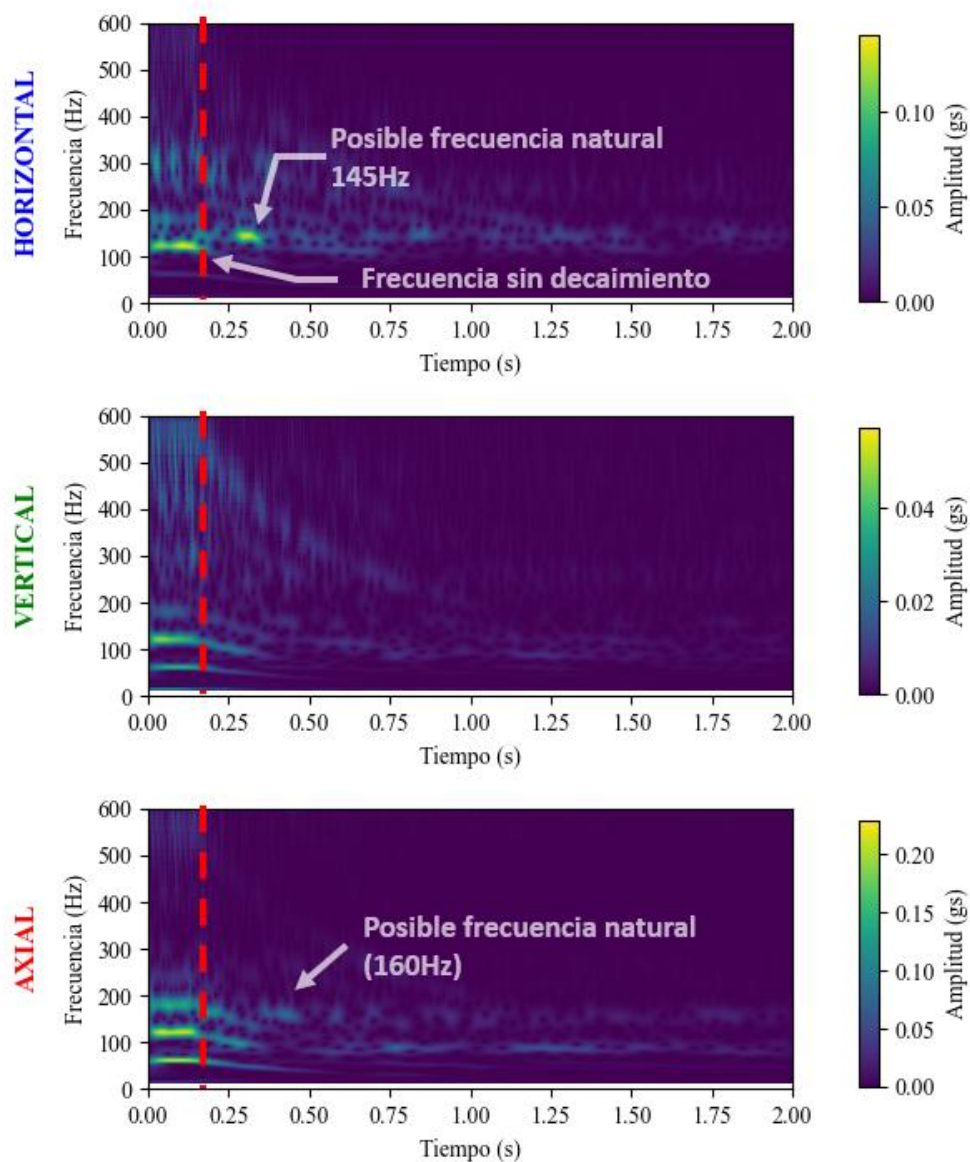
*Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en la Transformada de Fourier corta, durante el apagado se busca posibles frecuencias que son excitadas.

En la Figura 61 se identifican las siguientes posibles frecuencias naturales en la posición 1: en la dirección horizontal: una posible frecuencia natural a 145 Hz y en la dirección axial: una posible frecuencia natural a 160 Hz. También se observa la frecuencia de 120 Hz en la dirección horizontal que desaparece cuando inicia el apagado

Figura 61

Espectrograma Wavelet Morlet Compleja en aceleración de la posición 1 durante el apagado



*Fuente: Elaboración propia. ** $f_b = 2$, $f_c = 1$ y ancho de ventana de 512 puntos

Posición 2 Lado Acoplado Motor

En las figuras 62 y 63 se muestran los espectrogramas Wavelet Morlet compleja en aceleración y velocidad de la posición 2, configurados con una frecuencia máxima de 600Hz. En la Figura 64 y Figura 65 se enfoca las frecuencias de 2FL y 2x para poder diferenciarlas.

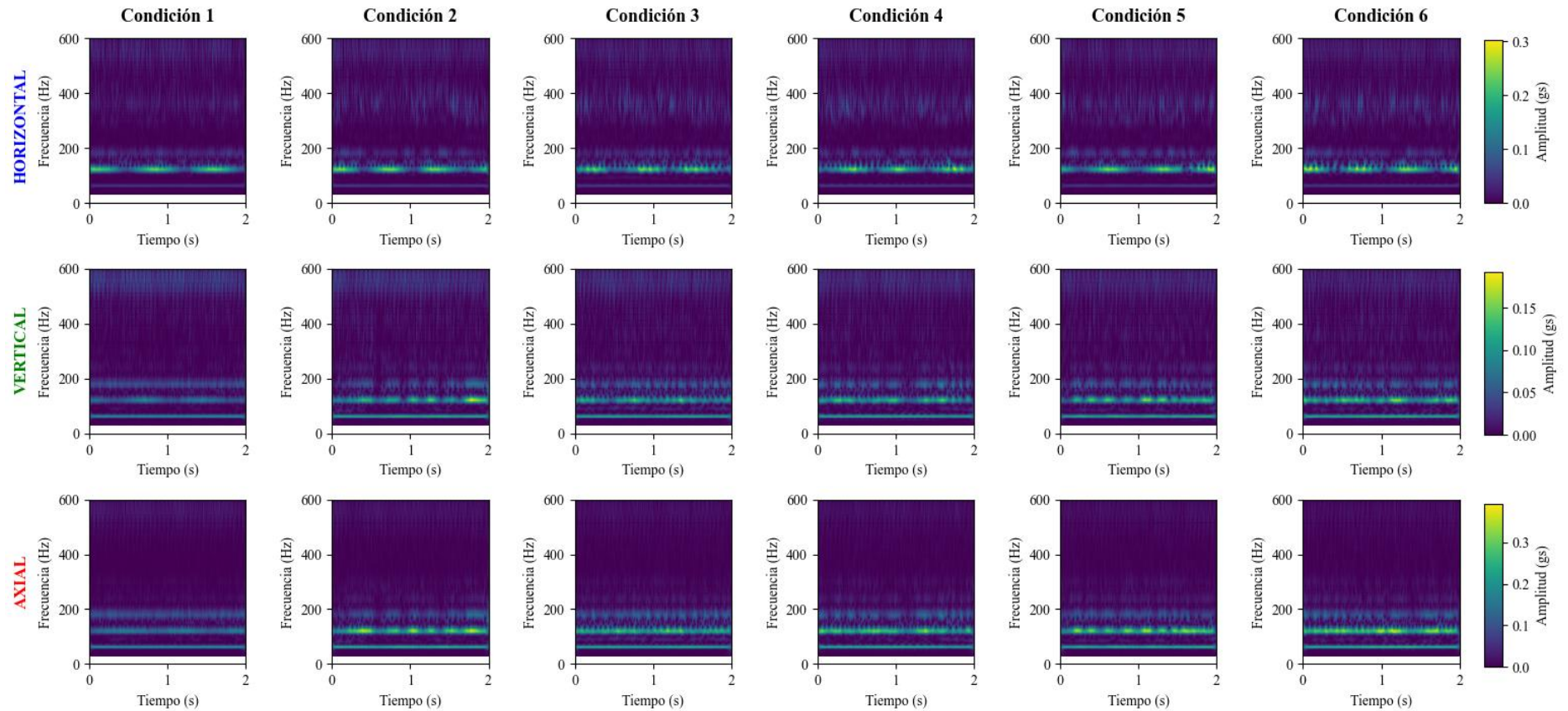
En la dirección horizontal predomina la frecuencia 2FL y la 1x en menor medida. Se puede observar modulación de amplitud en la 2FL que está relacionado a problemas eléctricos.

En la dirección vertical, presenta vibraciones leves en las frecuencias a la 1x, 2x.

En la dirección axial, las vibraciones son significativas en las frecuencias de la 1x y 2x, lo que sugiere problemas de alineación o fuerzas axiales inusuales.

Figura 62

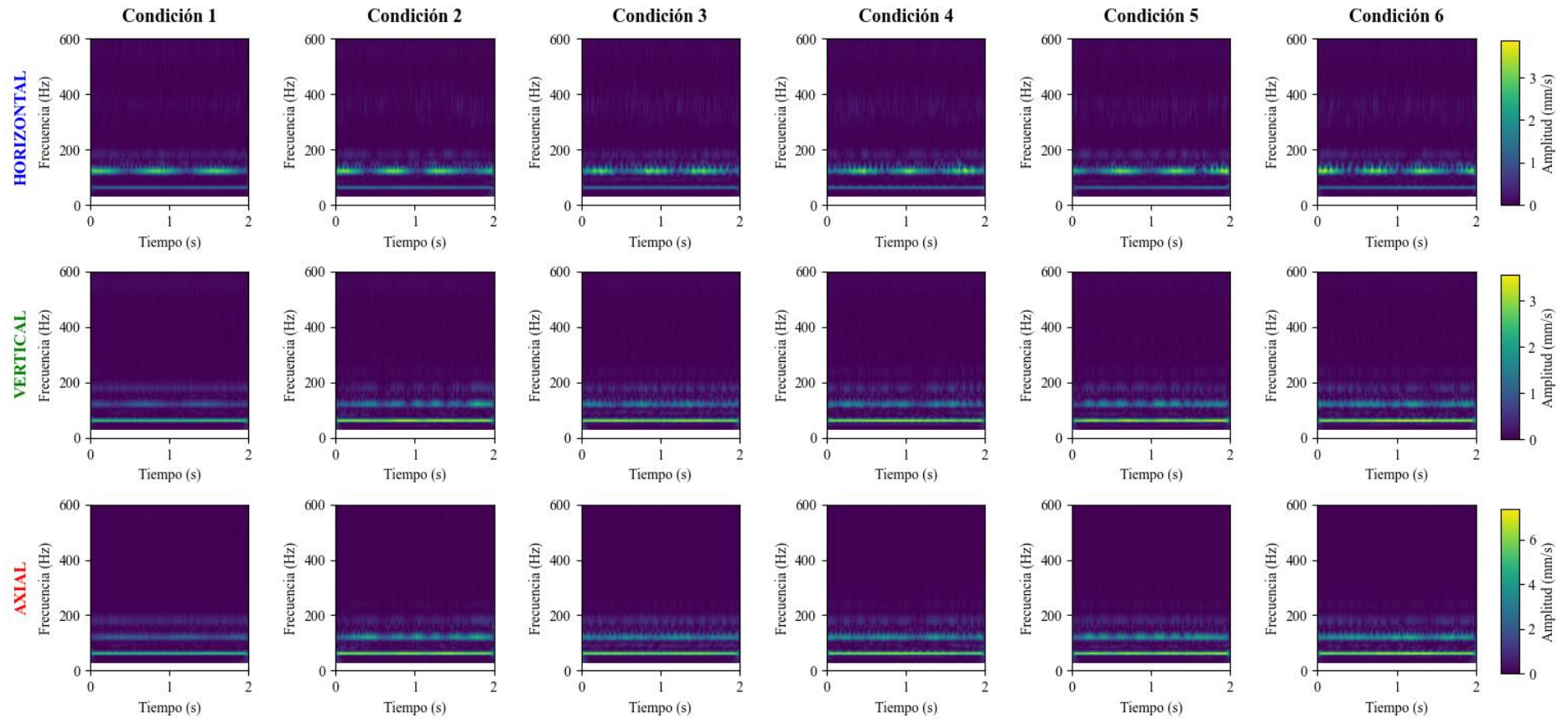
Espectrograma Wavelet Morlet Compleja general en aceleración de la posición 2 para diferentes condiciones



*Fuente: Elaboración propia. ** Frecuencia máxima 600Hz. $f_b = 2$, $f_c = 2$ y ancho de ventana de 256 puntos

Figura 63

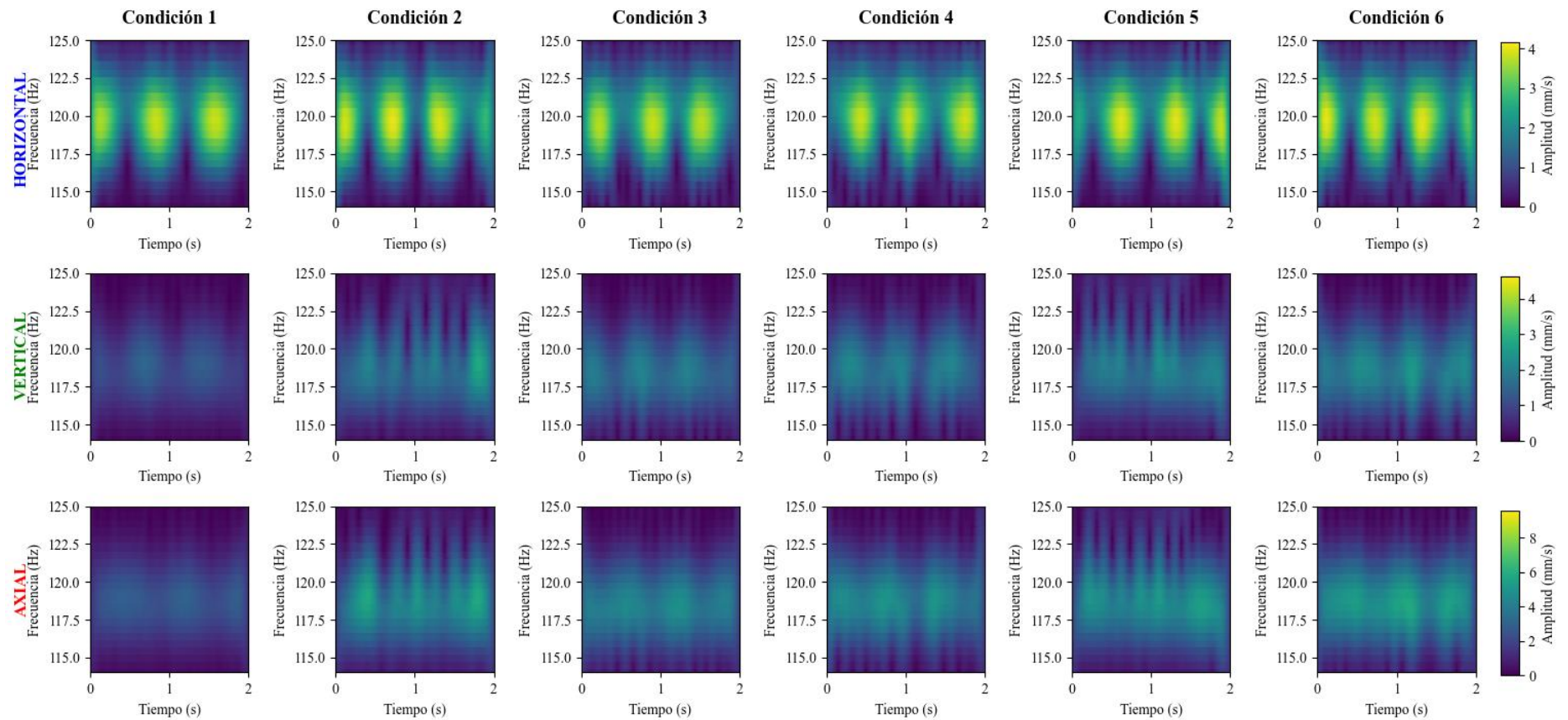
Espectrograma Wavelet Morlet Compleja general en velocidad de la posición 2 para diferentes condiciones



*Fuente: Elaboración propia. ** Frecuencia máxima 600Hz. $f_b = 2$, $f_c = 2$ y ancho de ventana de 256 puntos

Figura 64

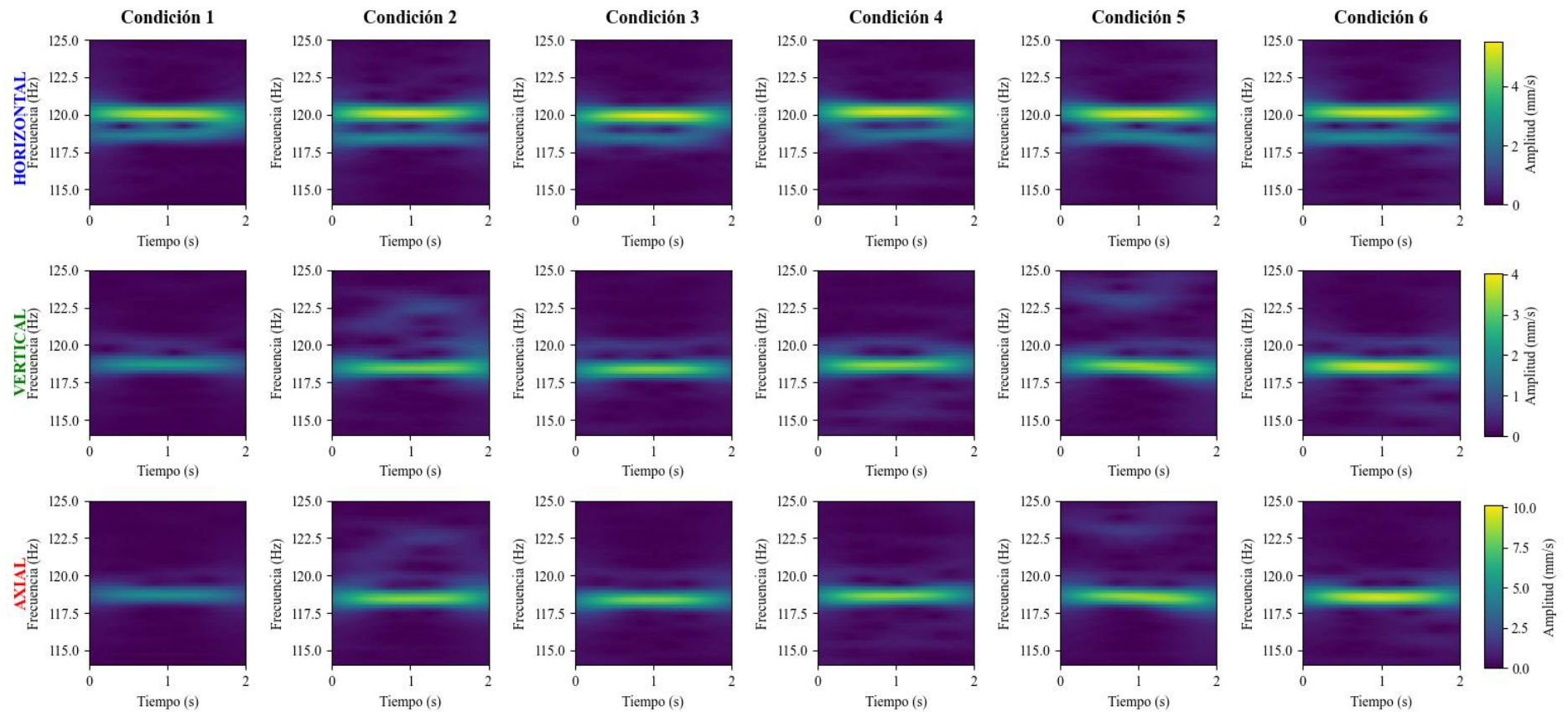
Espectrograma Wavelet Morlet Compleja 114Hz y 125Hz en velocidad de la posición 2 para diferentes condiciones, ancho de ventana 256, $fb=10$ y $fc=3.5$



*Fuente: Elaboración propia.

Figura 65

Espectrograma Wavelet Morlet Compleja 114Hz y 125Hz en velocidad de la posición 2 para diferentes condiciones, ancho de ventana 512, $f_b=25$ y $f_c=14$

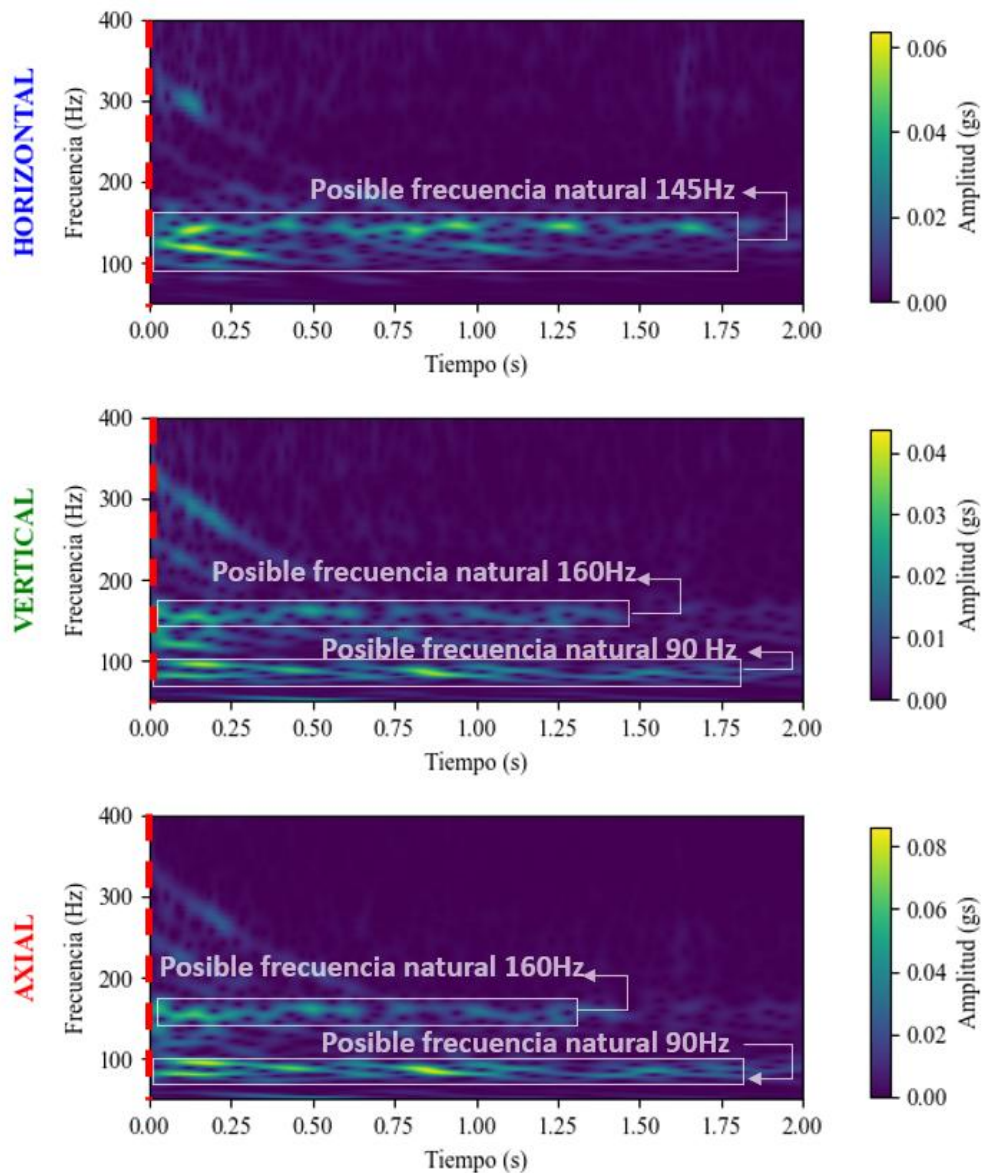


*Fuente: Elaboración propia. ** $f_b = 25$, $f_c = 14$ y ancho de ventana de 256 puntos

En la Figura 66 se identifican las siguientes posibles frecuencias naturales en la posición 2: en la dirección horizontal a 145 Hz; en la dirección vertical a 160 Hz y 90 Hz; y en la dirección axial a 160 Hz y 90 Hz.

Figura 66

Espectrograma Wavelet Morlet Compleja en aceleración de la posición 2 durante el apagado



*Fuente: Elaboración propia. ** $f_b = 1$, $f_c = 6.25$ y ancho de ventana de 256 puntos

Posición 3 Lado Acoplado Bomba

En las figuras 67 y 69 se muestran los espectrogramas Wavelet Morlet compleja en aceleración y velocidad de la posición 3, configurados con una frecuencia máxima de 600Hz. La energía está dispersa en alta frecuencia es por eso que en la Figura 68 se enfoca la vibración dentro del rango de 550 y 565 Hz y muestra la presencia de 557Hz en todos los espectros de aceleración. En la Figura 71 se enfoca en mostrar las vibraciones dentro del rango de 100 a 150Hz.

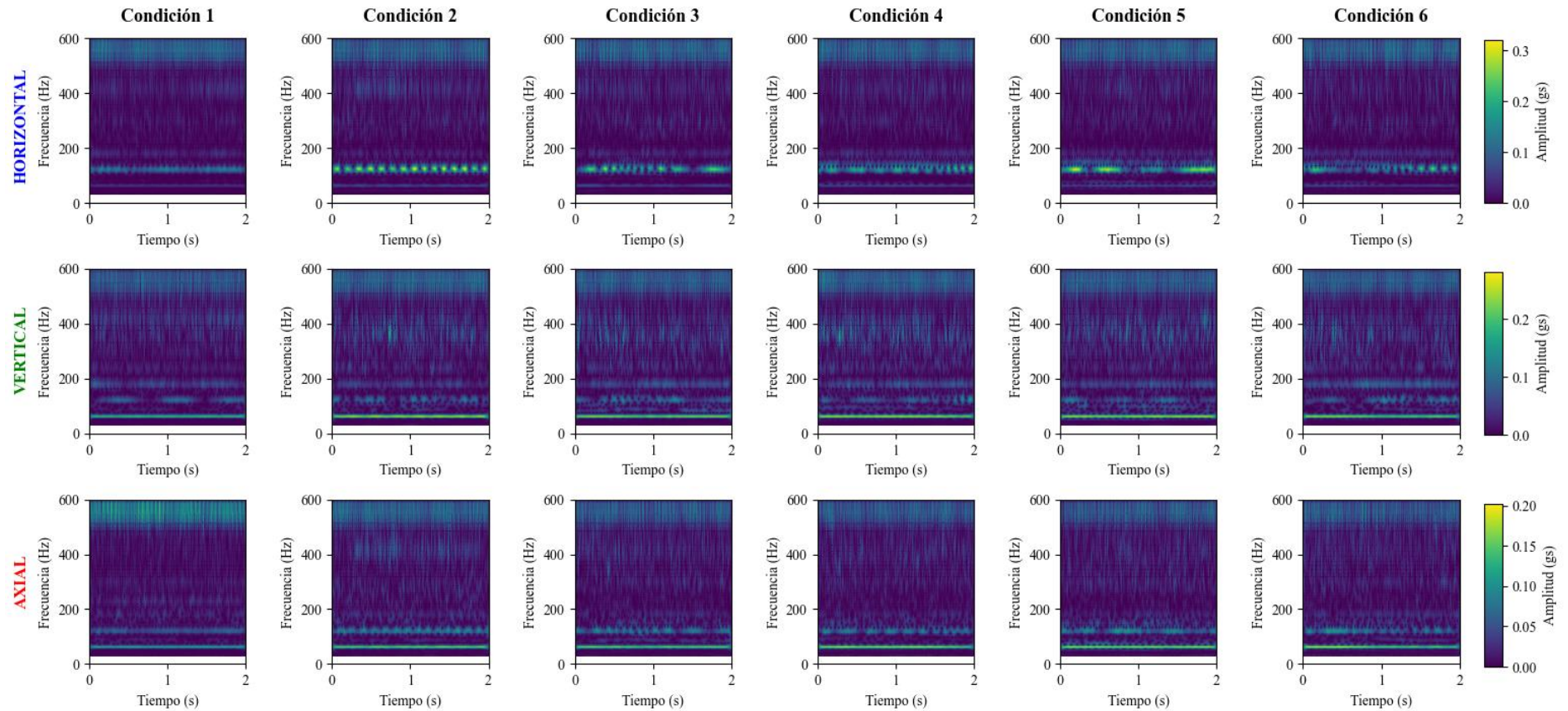
En la dirección horizontal predomina la frecuencia 2x. Se observar frecuencias alrededor de la 2x (entre 100 y 150Hz) que está relacionado al flujo.

En la dirección vertical, presenta vibraciones significativas en las frecuencias de la 1x.

En la dirección axial, las vibraciones son significativas a la 1x y moderadas a la 2x. Lo que sugiere problemas de alineación o fuerzas axiales inusuales.

Figura 67

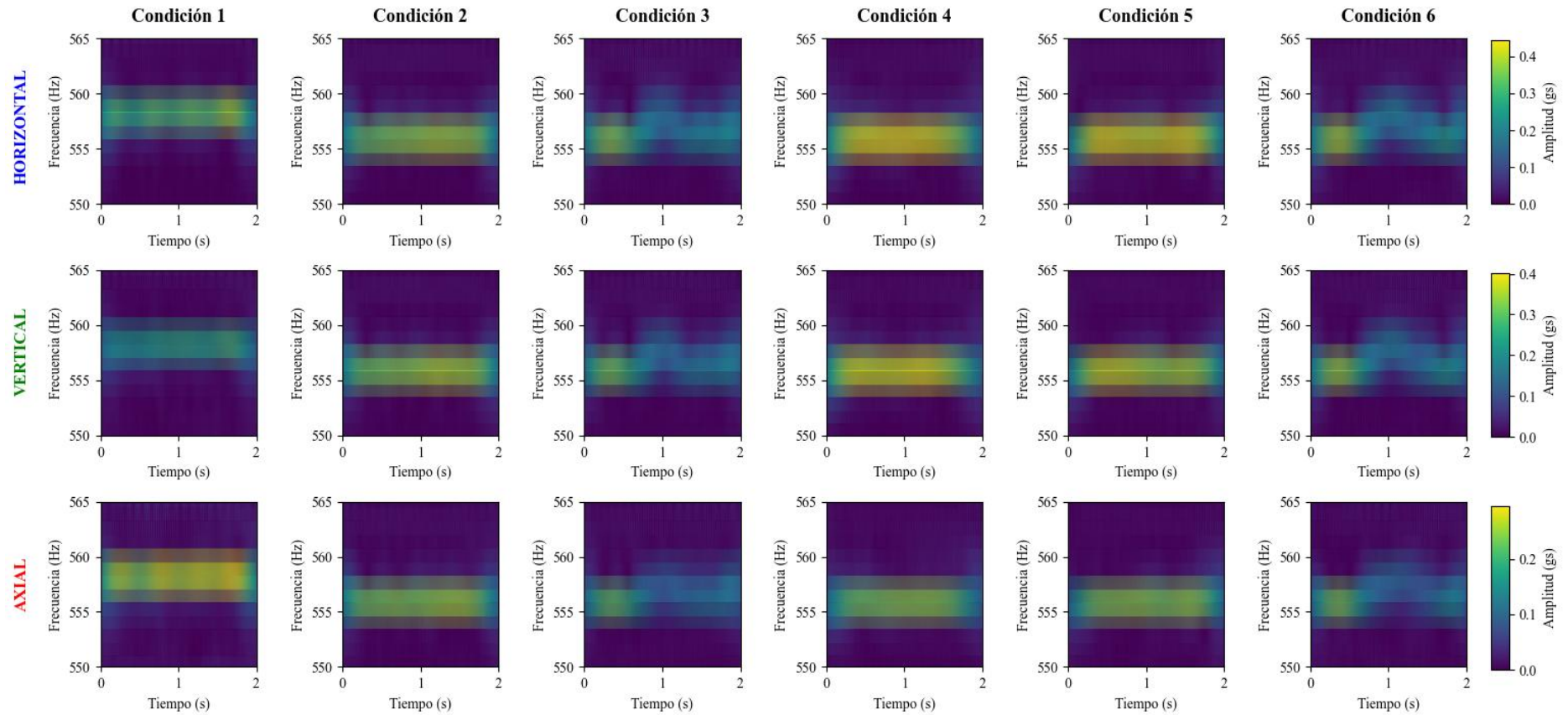
Espectrograma Wavelet Morlet Compleja general en aceleración de la posición 3 para diferentes condiciones



*Fuente: Elaboración propia. ** Frecuencia máxima 600Hz. $f_b = 2$, $f_c = 2$ y ancho de ventana de 256 puntos

Figura 68

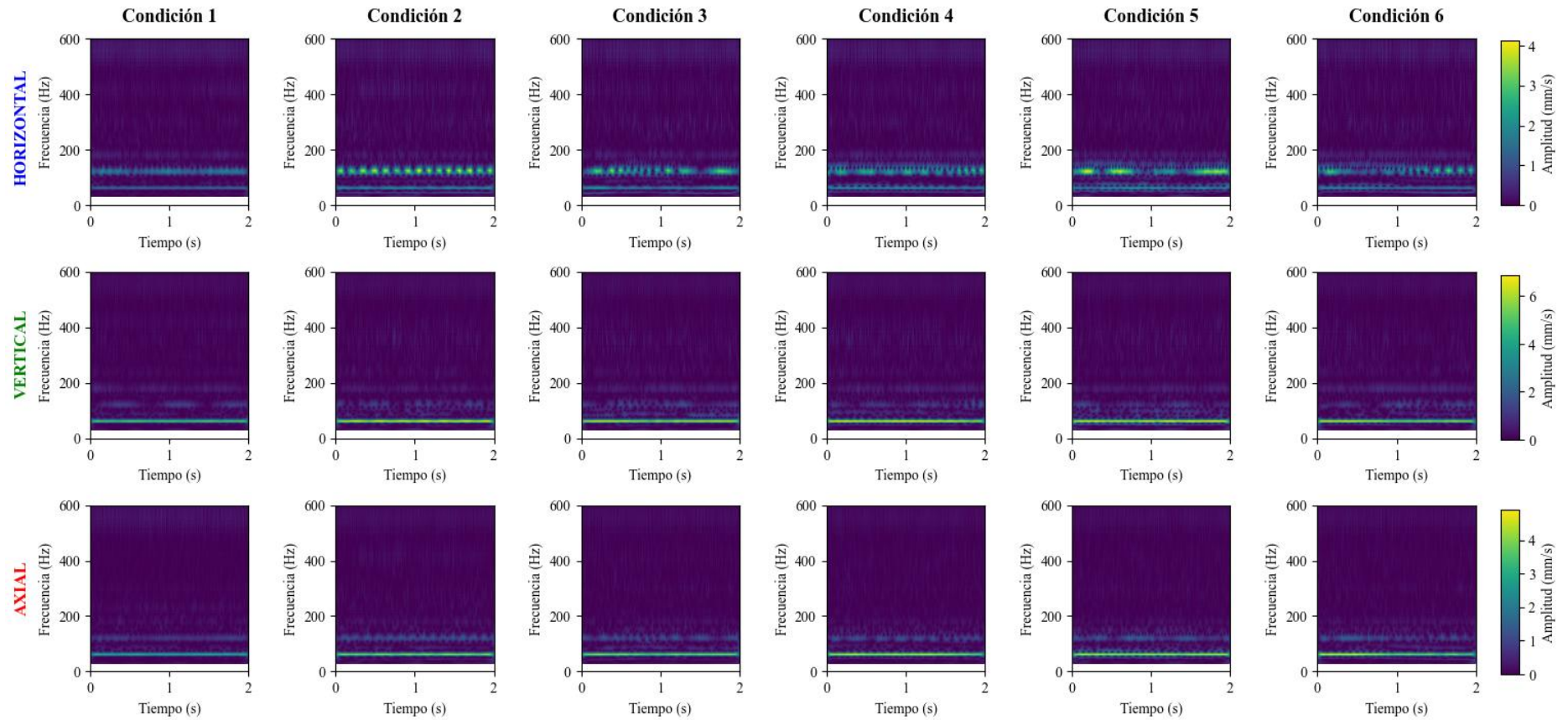
Espectrograma Wavelet Morlet Compleja 550Hz y 565Hz en velocidad de la posición 3 para diferentes condiciones



*Fuente: Elaboración propia. ** Frecuencia máxima 100Hz. $f_b = 10$, $f_c = 2$ y ancho de ventana de 256 puntos

Figura 69

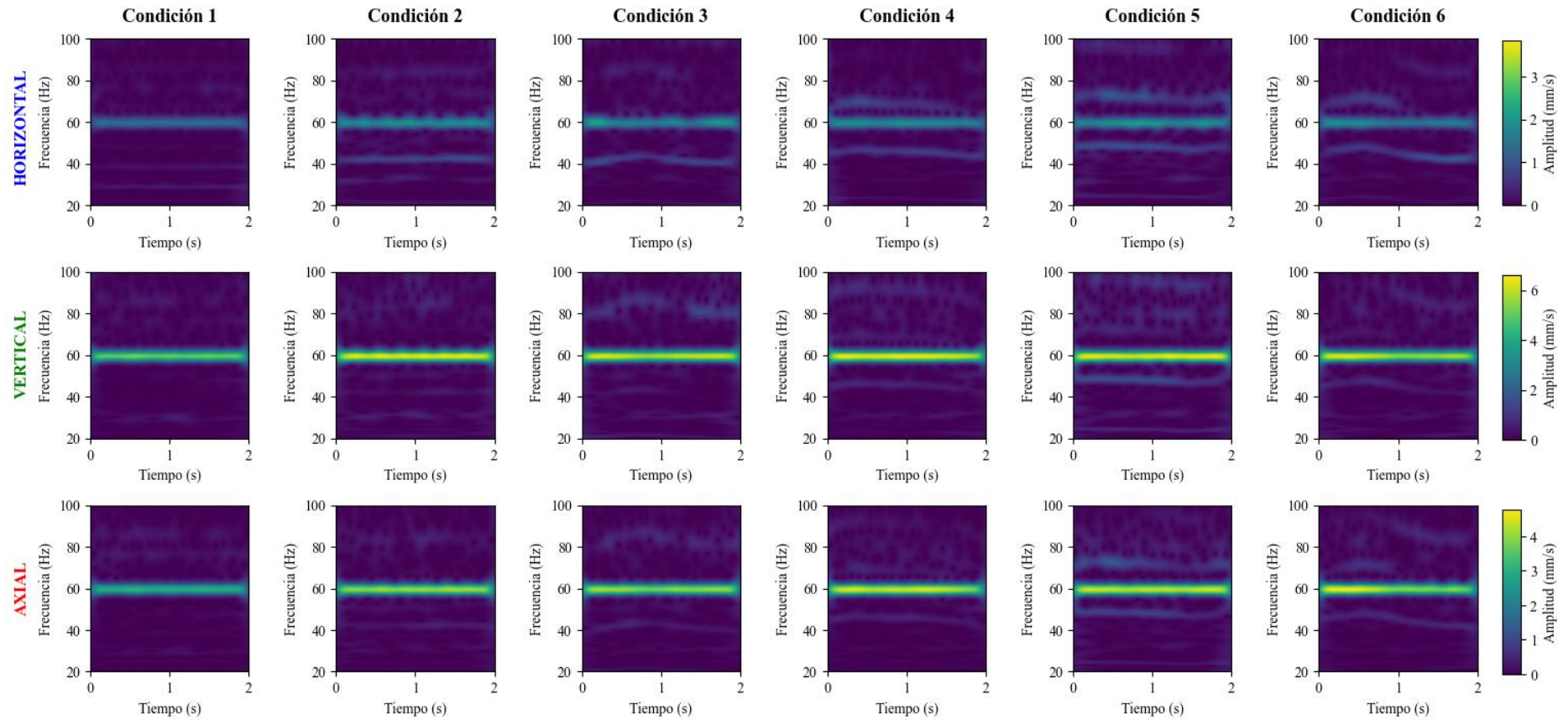
Espectrograma Wavelet Morlet Compleja general en velocidad de la posición 3 para diferentes condiciones



*Fuente: Elaboración propia. ** Frecuencia máxima 600Hz. $f_b = 2$, $f_c = 2$ y ancho de ventana de 256 puntos

Figura 70

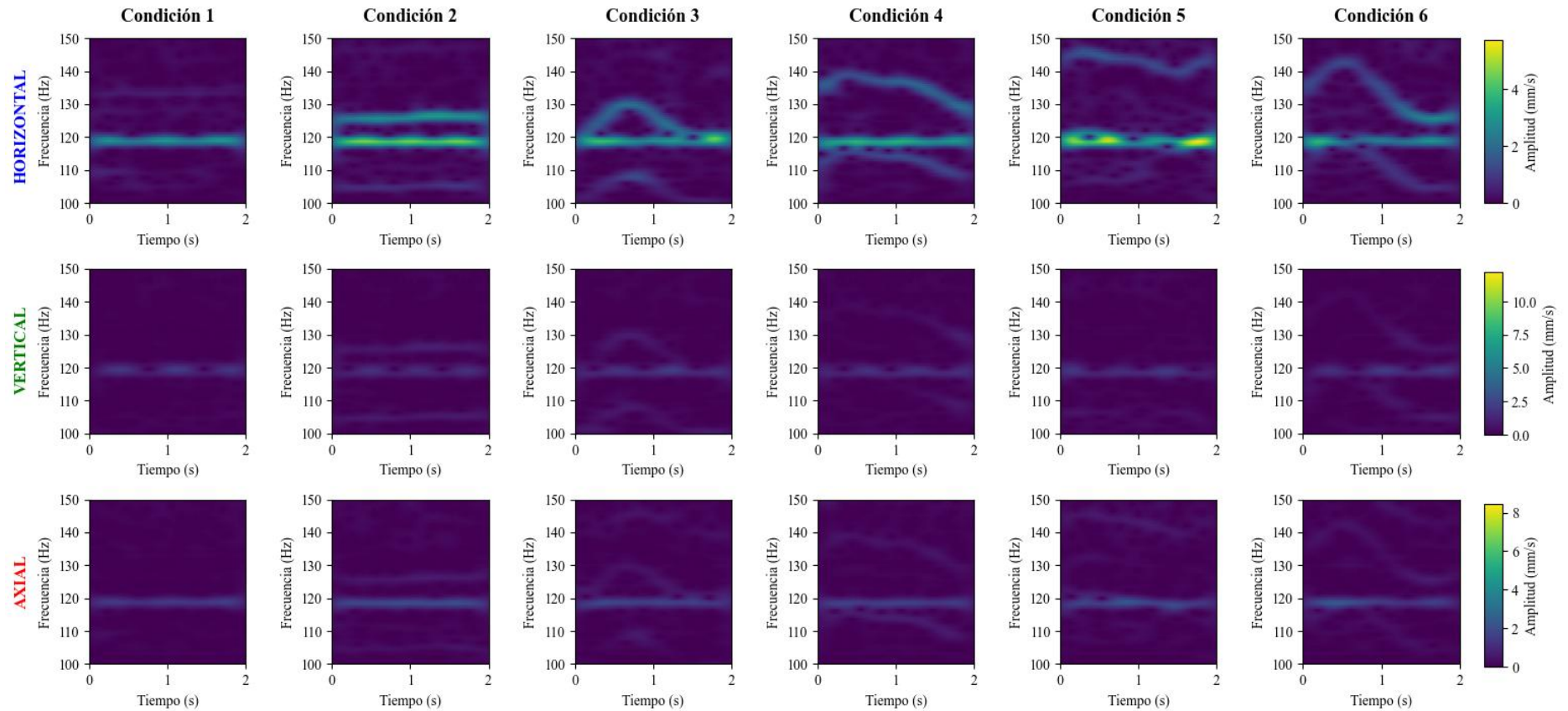
Espectrograma Wavelet Morlet Compleja 20Hz y 100Hz en velocidad de la posición 3 para diferentes condiciones



*Fuente: Elaboración propia. ** $f_b = 10$, $f_c = 2$ y ancho de ventana de 512 puntos

Figura 71

Espectrograma Wavelet Morlet Compleja 100Hz y 150Hz en velocidad de la posición 3 para diferentes condiciones

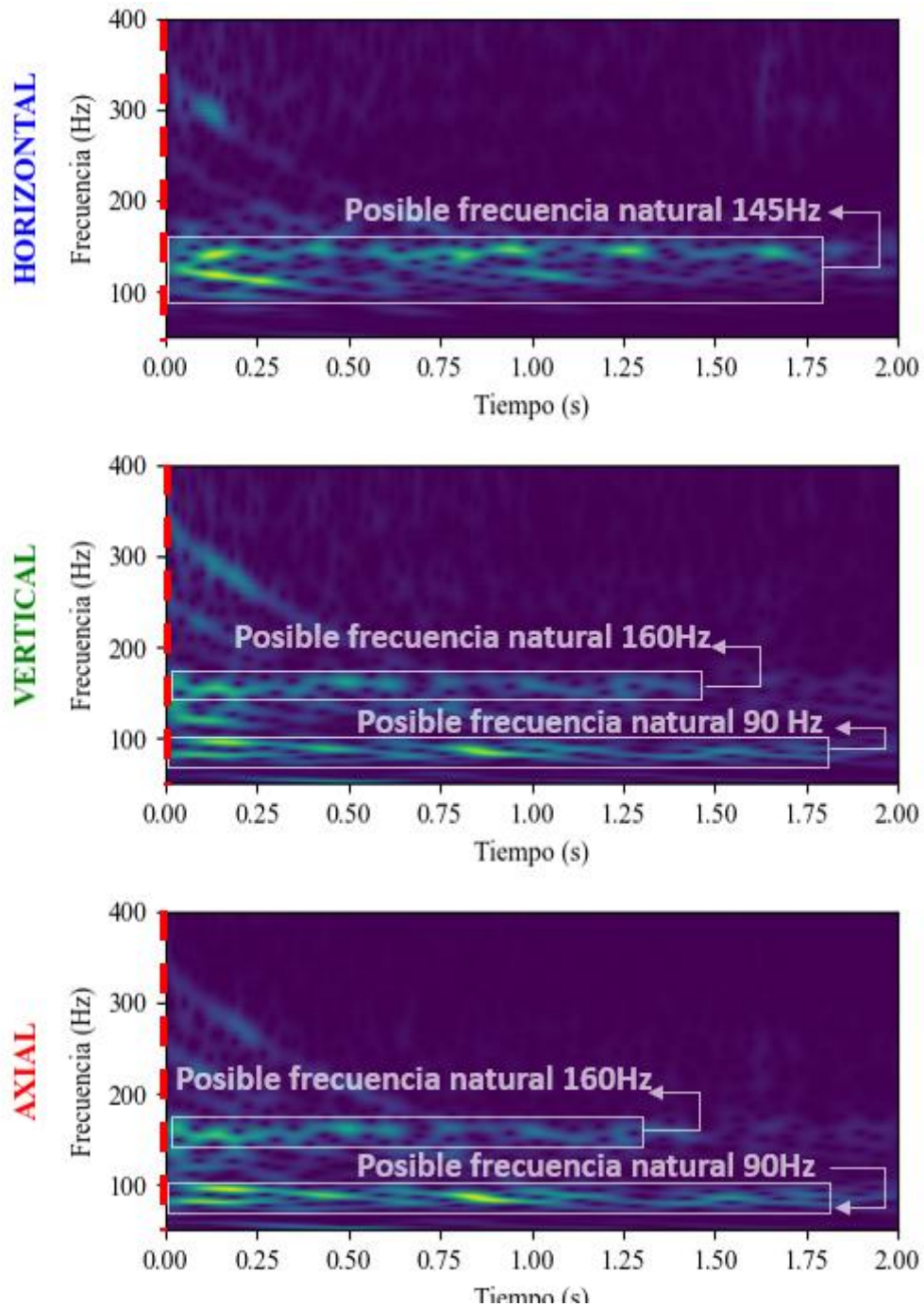


*Fuente: Elaboración propia. ** $f_b = 10$, $f_c = 7$ y ancho de ventana de 512 puntos

En la Figura 72 se identifican posibles frecuencias naturales en la posición 3: en la dirección horizontal de 100- a 145 Hz; en la dirección vertical a 160 Hz y 90 Hz; y en la dirección axial a 160 Hz y 90 Hz.

Figura 72

Espectrograma Wavelet Morlet Compleja en velocidad de la posición 3 durante el apagado



*Fuente: Elaboración propia. ** $f_b = 15$, $f_c = 3$ y ancho de ventana de 512 puntos

Posición 4 Lado Libre Bomba

En las figuras 73 y 74, se muestran los espectrogramas Wavelet Morlet compleja en aceleración y velocidad de la posición 4, configurados con una frecuencia máxima de 600Hz. En Figura 75 y Figura 76 se enfoca en mostrar las vibraciones dentro del rango de baja frecuencia.

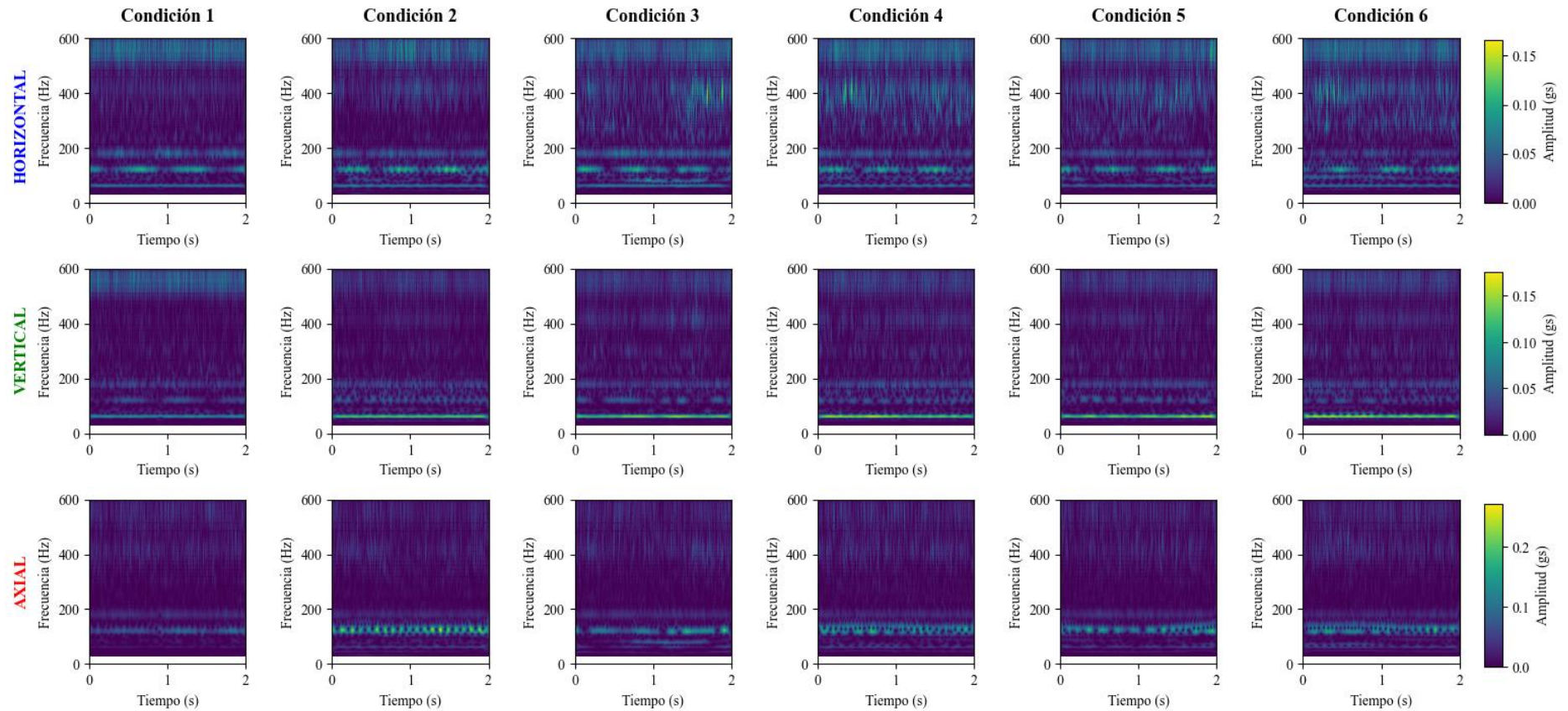
En la dirección horizontal predomina la frecuencia la 1x y la 2x. Se observan frecuencias que son moduladas en frecuencia entre 70 a 80Hz.

En la dirección vertical, presenta vibraciones moderadas en las frecuencias de la 1x.

En la dirección axial, predomina vibraciones moderadas a la 2x. Existe presencia fuertes vibraciones moduladas en frecuencia alrededor de 100 y 140Hz, y vibraciones moderadas en 40 Hz (0.67) y 80Hz (1.34x), las cuales están relacionadas a fuerzas hidráulicas o recirculación.

Figura 73

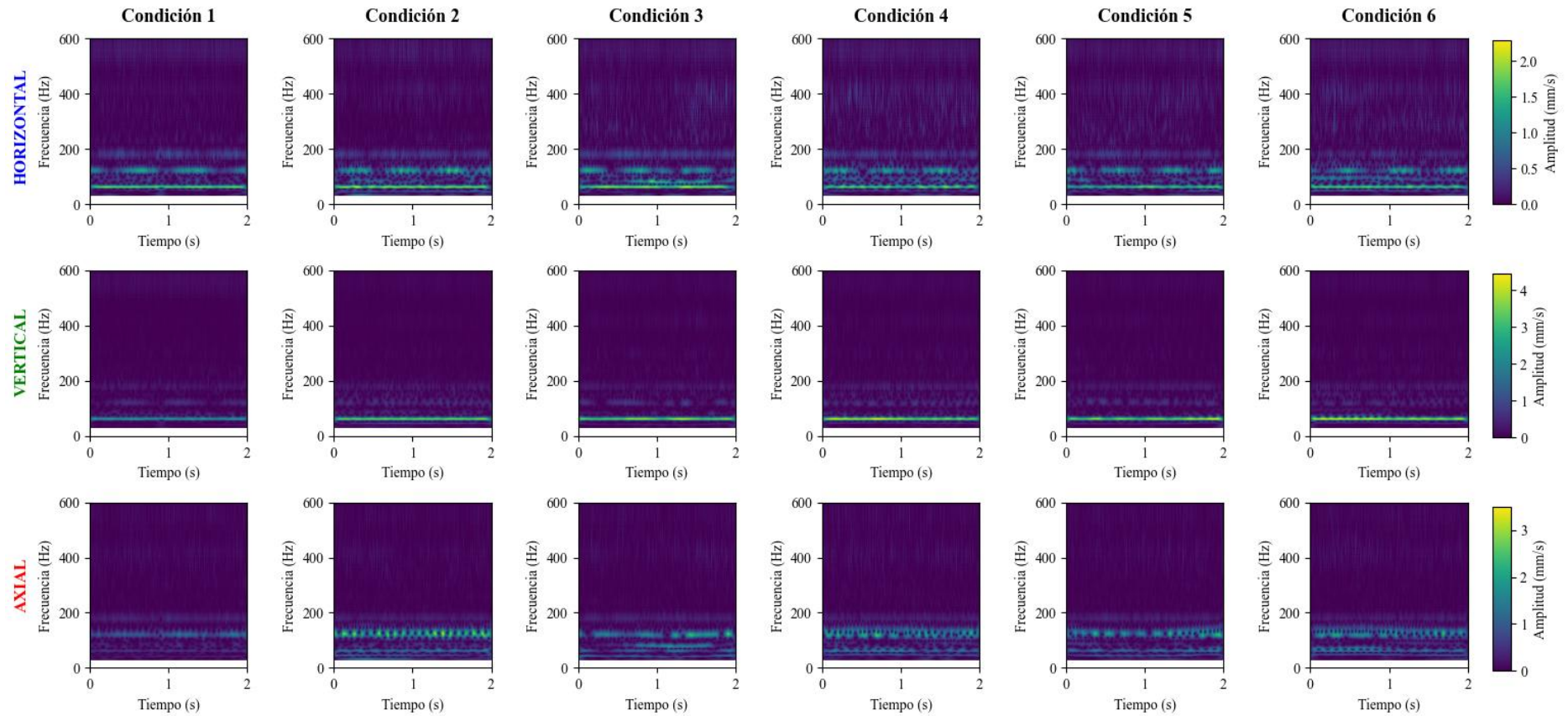
Espectrograma Wavelet Morlet Compleja general en aceleración de la posición 4 para diferentes condiciones



*Fuente: Elaboración propia. ** Frecuencia máxima 600Hz. $f_b = 2$, $f_c = 2$ y ancho de ventana de 256 puntos

Figura 74

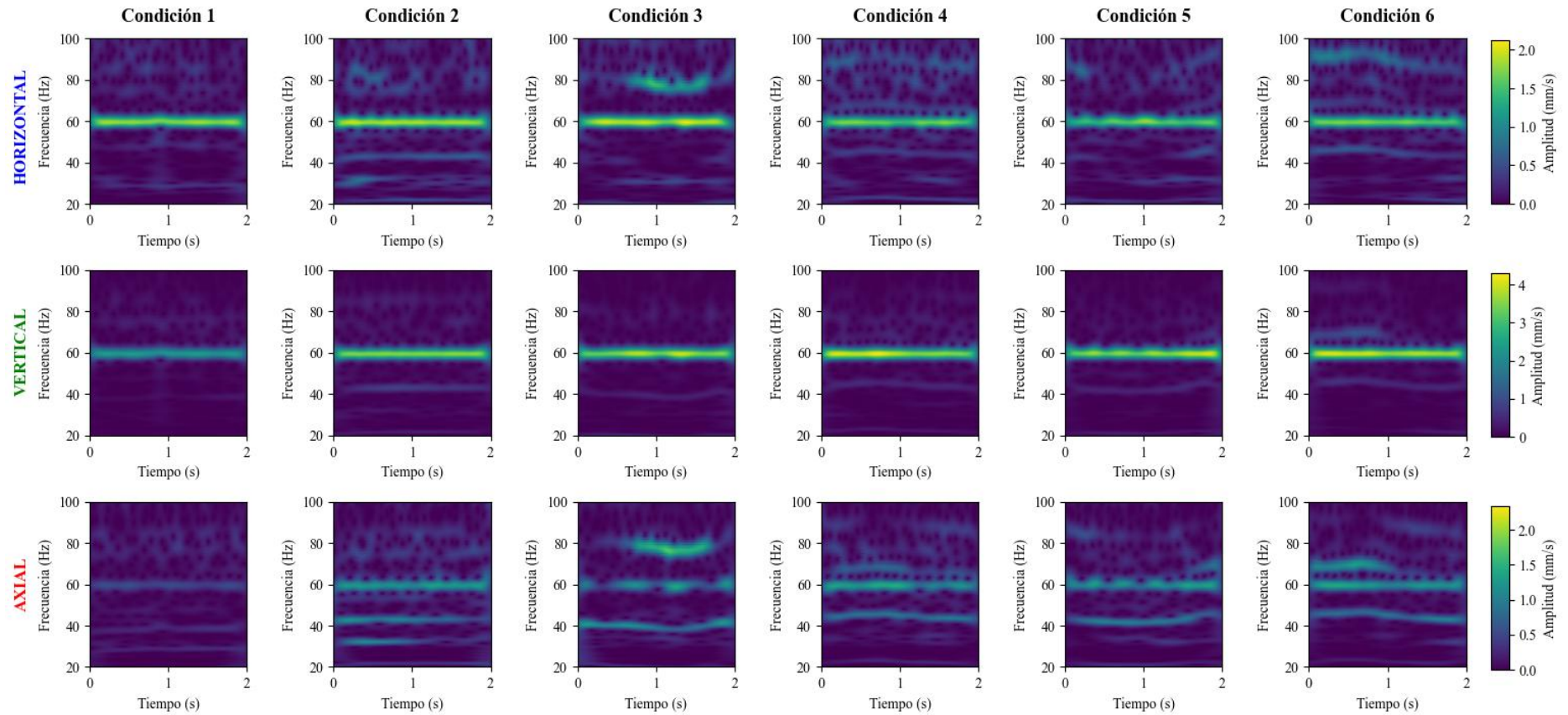
Espectrograma Wavelet Morlet Compleja general en velocidad de la posición 4 para diferentes condiciones



*Fuente: Elaboración propia. ** Frecuencia máxima 600Hz. $f_b = 2$, $f_c = 2$ y ancho de ventana de 256 puntos

Figura 75

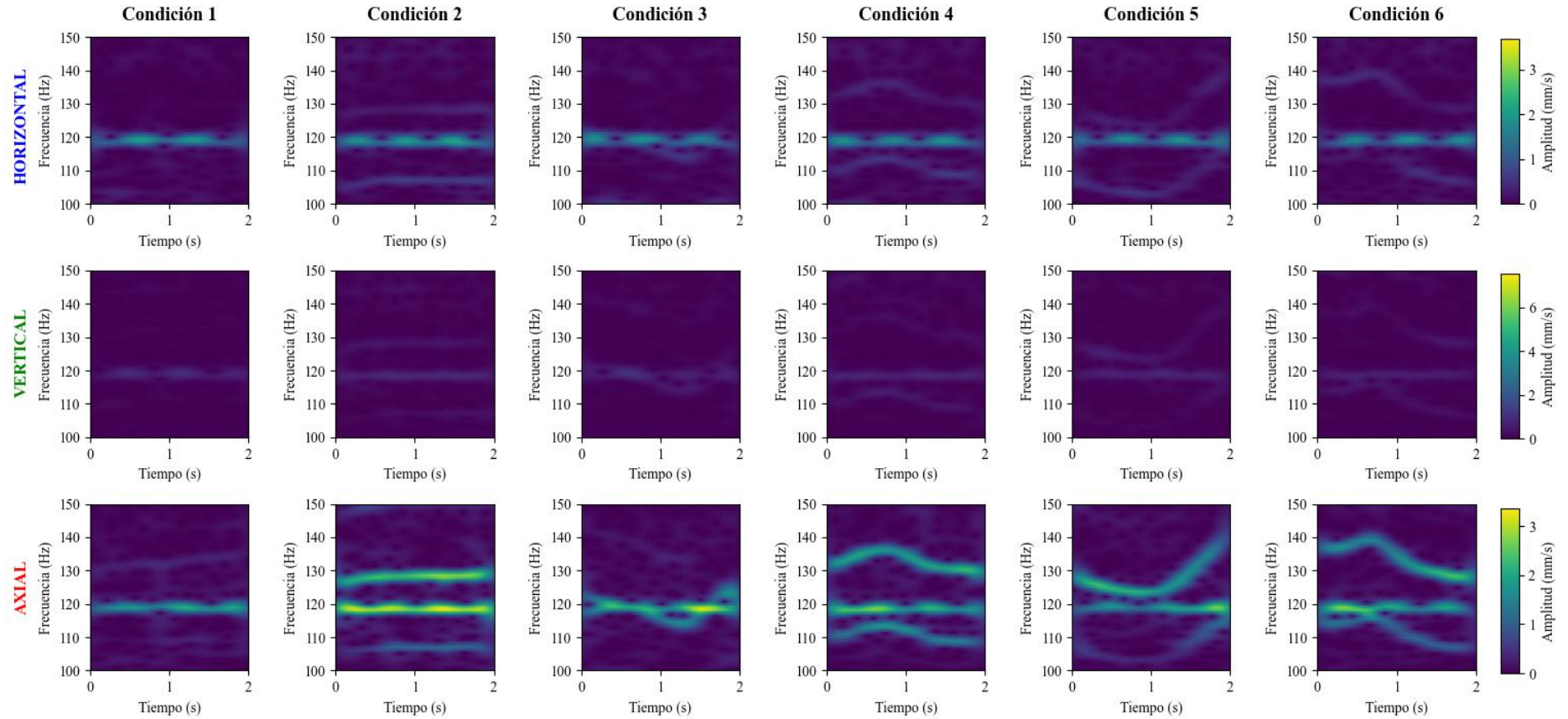
Espectrograma Wavelet Morlet Compleja 20Hz y 100Hz en velocidad de la posición 4 para diferentes condiciones



*Fuente: Elaboración propia. ** $f_b = 10$, $f_c = 2$ y ancho de ventana de 512 puntos

Figura 76

Espectrograma Wavelet Morlet Compleja 100Hz y 150Hz en velocidad de la posición 4 para diferentes condiciones



*Fuente: Elaboración propia. ** $f_b = 10$, $f_c = 7$ y ancho de ventana de 512 puntos

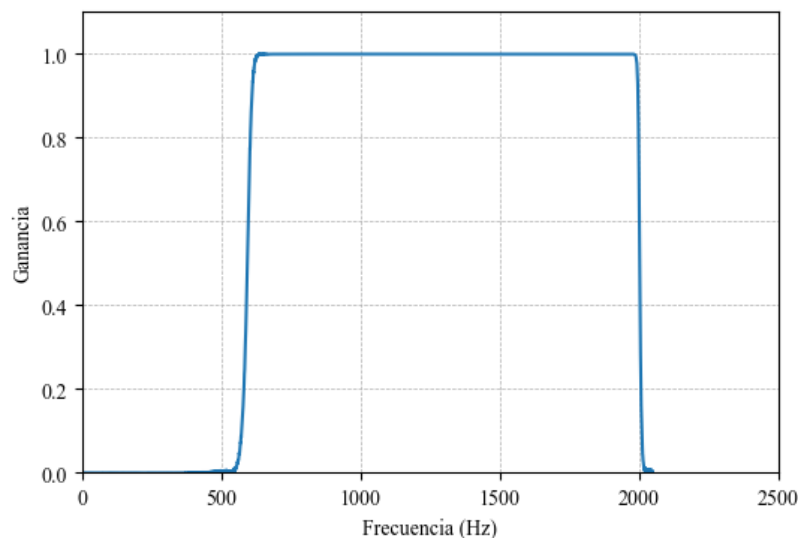
III.7. Análisis de Aceleración Envelope

Para realizar el análisis de aceleración envelope se requiere utilizar un rango de frecuencias, esto se logra utilizando un filtro pasabanda. Las recomendaciones para el filtro pasabanda se centran en eliminar las zonas de baja frecuencia para enfocarse en la resonancia a alta frecuencia. Howard (n.d.) recomienda eliminar las frecuencias bajas por debajo de la $10 \times (595\text{Hz})$, en este caso se fijará en 600Hz. Para la frecuencia de corte alta, se utilizará una frecuencia cercana a la frecuencia de Nysquit (2048Hz), fijándola en 2000Hz. La ganancia de la combinación de los dos filtros (pasa alta y pasa baja) se puede observar en la Figura 77.

En las figuras 78, 79, 80 y 81 se muestran los espectros de aceleración envelope después de aplicar los filtros y la transformada Hilbert. En la Tabla 21, se puede observar la aceleración envelope pico para cada condición y posición de la bomba.

Figura 77

Ganancia en frecuencia del filtro pasabanda obtenido de la combinación de un filtro pasabaja y un filtro pasaalta

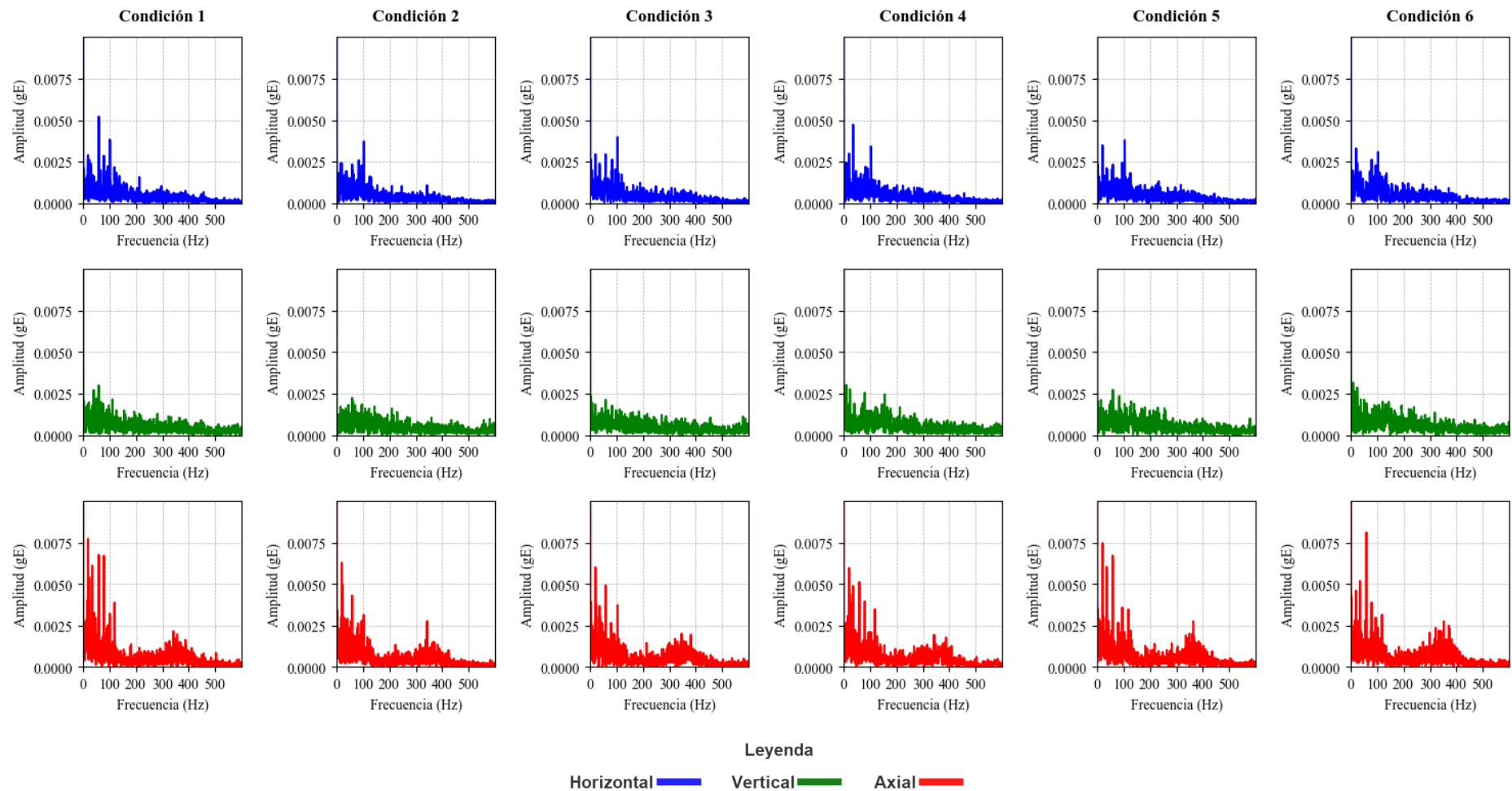


*Fuente: Elaboración propia. ** Filtro pasalta: frecuencia de corte: 600Hz, orden: 42.

*** Filtro pasabaja: frecuencia de corte: 2000Hz, orden: 10.

Figura 78

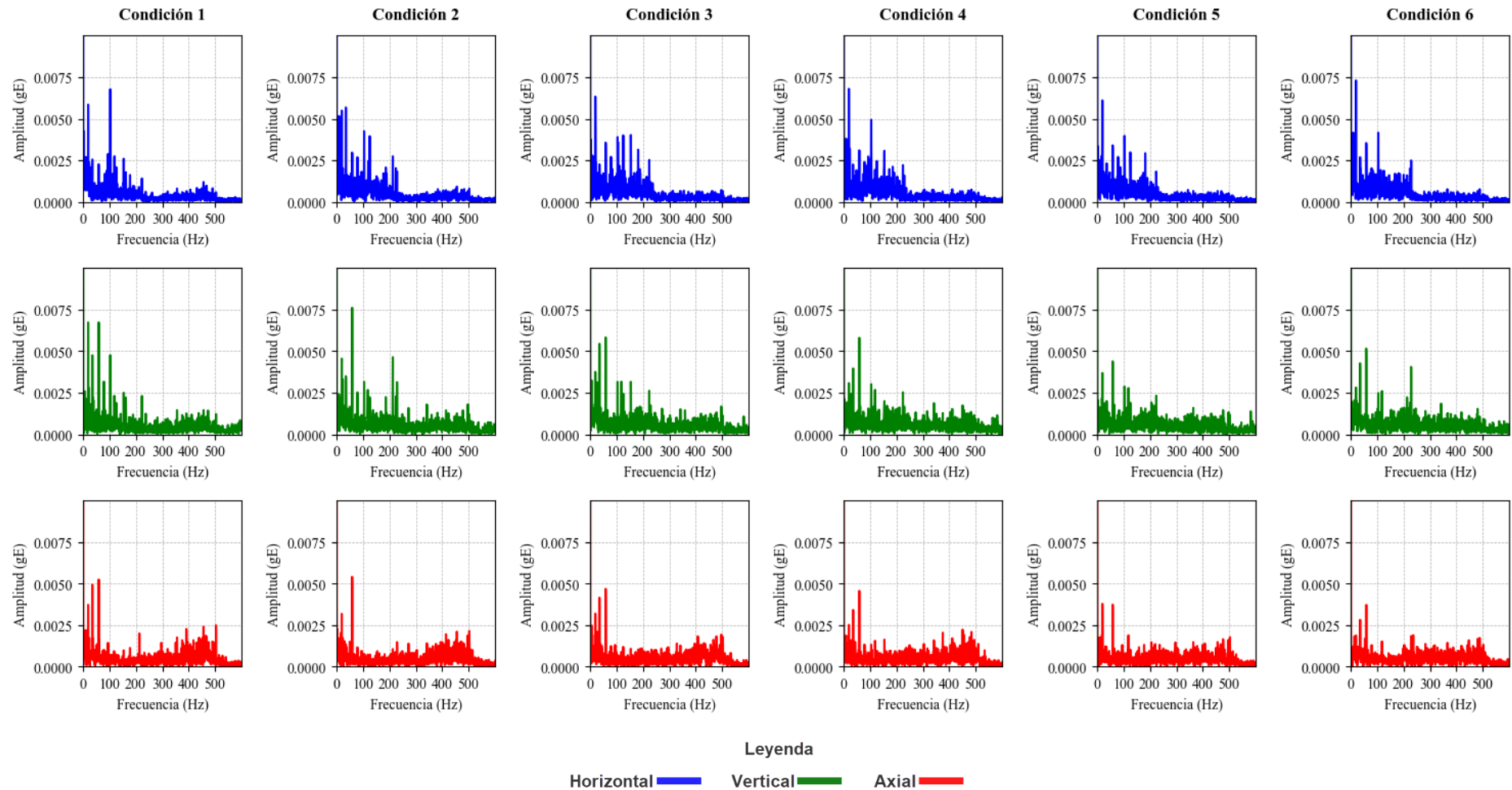
Espectro de la Aceleración Envelope de la posición 1



*Fuente: Elaboración propia. ** Frecuencia máxima: 600Hz, Número de puntos: 16384

Figura 79

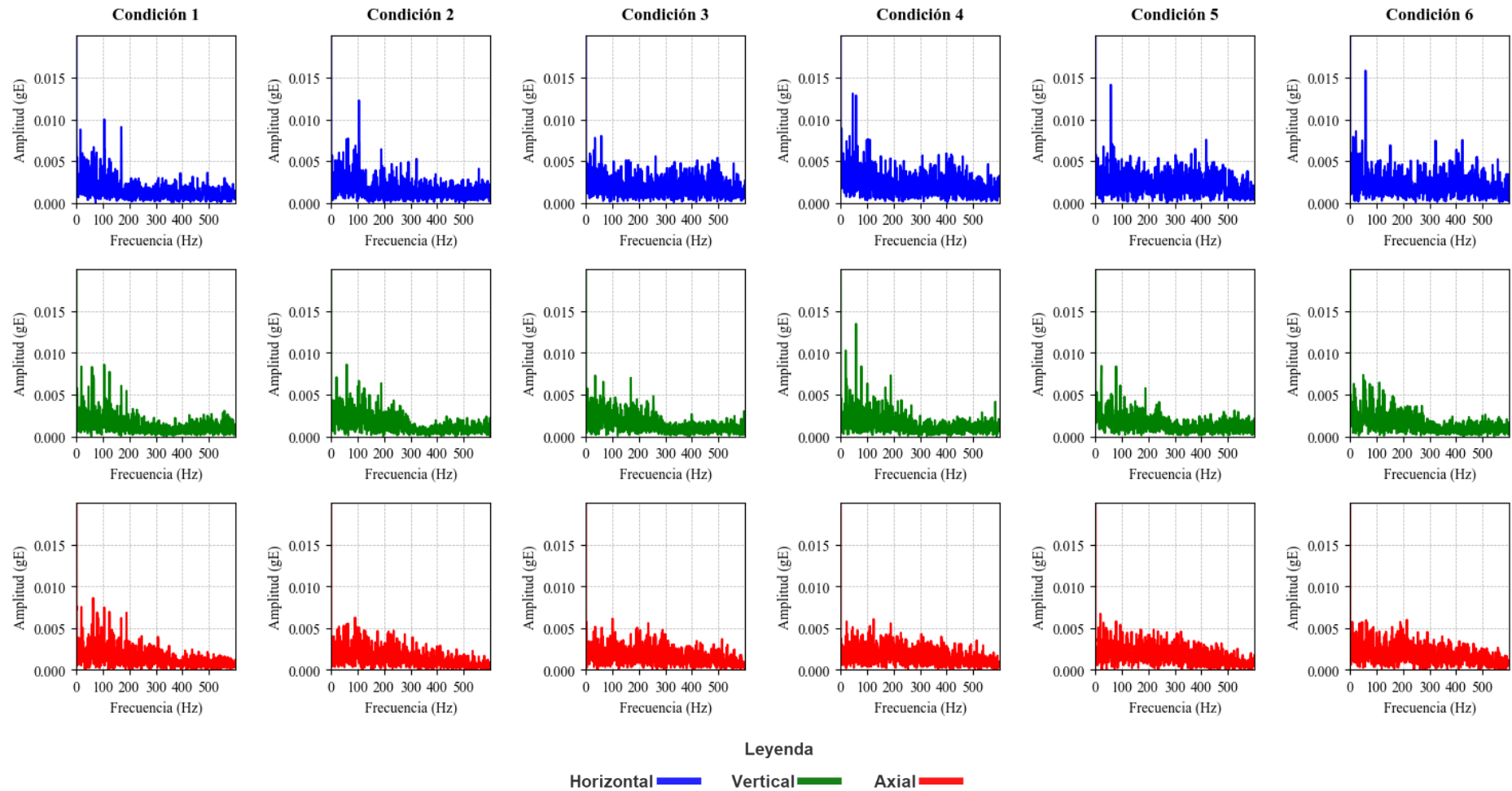
Espectro de la Aceleración Envelope de la posición 2



*Fuente: Elaboración propia. ** Frecuencia máxima: 300Hz, Número de puntos: 16384

Figura 80

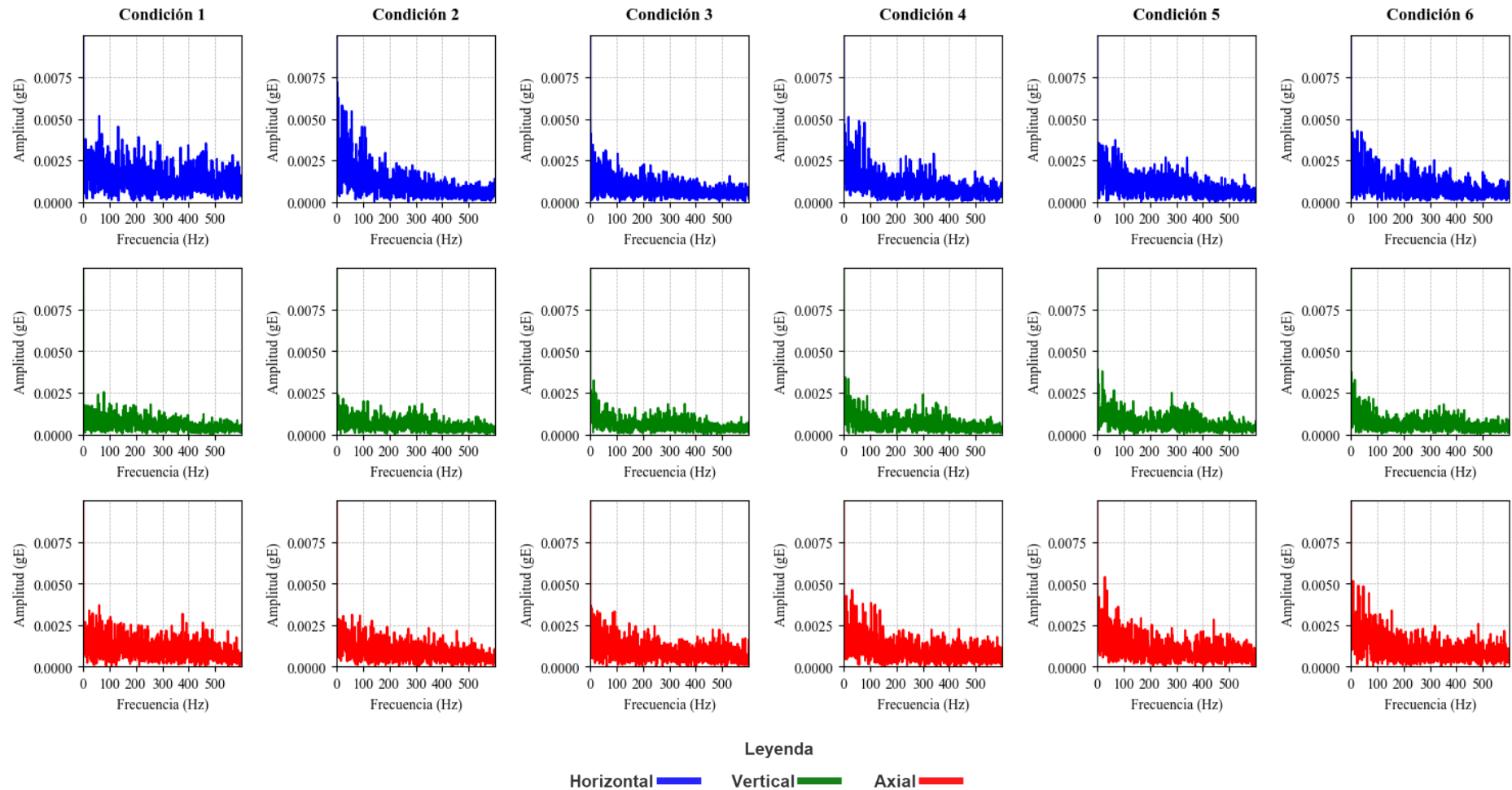
Espectro de la Aceleración Envelope de la posición 3



*Fuente: Elaboración propia. ** Frecuencia máxima: 300Hz, Número de puntos: 16384

Figura 81

Espectro de la Aceleración Envelope de la posición 4



*Fuente: Elaboración propia. ** Frecuencia máxima: 300Hz, Número de puntos: 16384

Tabla 21

Resumen de Valores Pico de Aceleración Envelope en gE para diferentes posiciones

Posición	Condición	Ejes		
		Horizontal	Vertical	Axial
Posición 1	Condición 1	0.1634	0.1799	0.2891
	Condición 2	0.1688	0.1735	0.2145
	Condición 3	0.1579	0.1614	0.2560
	Condición 4	0.1544	0.1802	0.2434
	Condición 5	0.1513	0.1672	0.2394
	Condición 6	0.1527	0.2177	0.2684
Posición 2	Condición 1	0.2009	0.2347	0.2010
	Condición 2	0.2015	0.2619	0.2137
	Condición 3	0.1978	0.2207	0.1814
	Condición 4	0.2003	0.2369	0.1828
	Condición 5	0.1726	0.2393	0.1881
	Condición 6	0.1834	0.2195	0.1644
Posición 3	Condición 1	0.6532	0.6207	0.4911
	Condición 2	0.5808	0.5236	0.4766
	Condición 3	0.6538	0.4716	0.5943
	Condición 4	0.7410	0.5136	0.5771
	Condición 5	0.9163	0.5783	0.5394
	Condición 6	0.6631	0.5086	0.5730
Posición 4	Condición 1	0.4574	0.2526	0.3773
	Condición 2	0.3771	0.1921	0.3365
	Condición 3	0.3013	0.2450	0.4071
	Condición 4	0.3286	0.2269	0.3649
	Condición 5	0.3858	0.2447	0.3795
	Condición 6	0.2876	0.2473	0.3292

Leyenda:

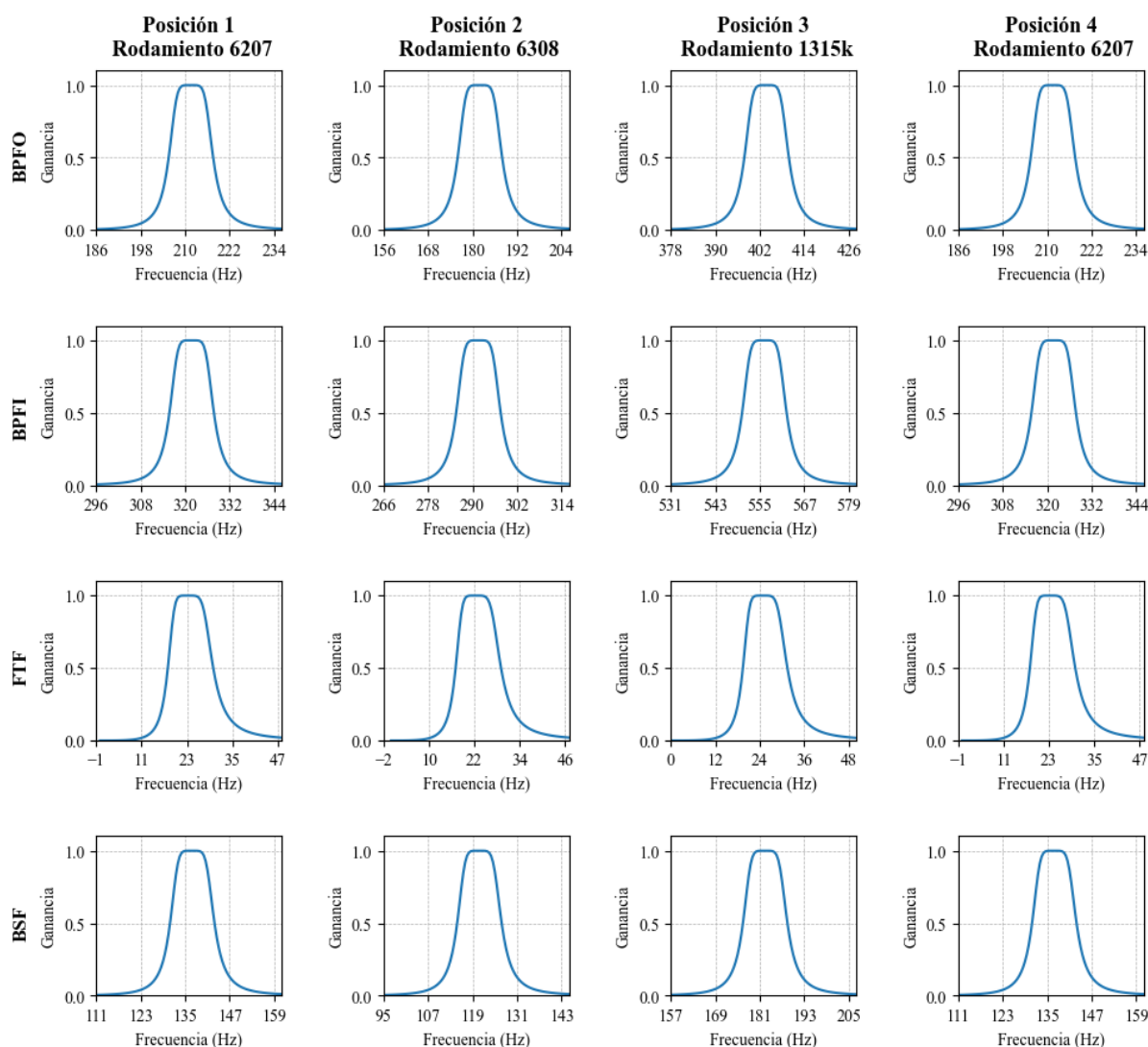
 Bueno
  Satisfactorio
  Insatisfactorio
  Inaceptable

*Fuente: Elaboración propia.

Para evaluar el aporte de cada frecuencia de falla de rodamiento (BPFI,BPFO,FTF y BSF), se aplica un filtro pasabanda cercano a cada frecuencia de falla con un margen de $\pm 5\text{Hz}$.La ganancia de cada filtro aplicado a las señales se observa en la Figura 82. En las tablas 22, 23, 24 y 25 se observan los valores de aceleración envelope en g's pico después de aplicar los flitros pasabanda de cada frecuencia de falla.

Figura 82

Ganancia en frecuencia del filtro pasabanada a las frecuencias de falla de cada rodamiento



*Fuente: Elaboración propia. *Orden de todos los fitros: 3

Tabla 22

Valores Pico de Aceleración Envelope en gs en el Lado Libre Motor

Nombre de Fallas	Condición	Ejes		
		Horizontal	Vertical	Axial
BPFO	Condición 1	0.0094	0.0102	0.0080
	Condición 2	0.0056	0.0087	0.0073
	Condición 3	0.0065	0.0167	0.0093
	Condición 4	0.0066	0.0103	0.0079
	Condición 5	0.0076	0.0096	0.0060
	Condición 6	0.0061	0.0091	0.0053
BPFI	Condición 1	0.0046	0.0063	0.0103
	Condición 2	0.0042	0.0056	0.0076
	Condición 3	0.0053	0.0061	0.0116
	Condición 4	0.0050	0.0060	0.0099
	Condición 5	0.0051	0.0087	0.0103
	Condición 6	0.0072	0.0073	0.0163
FTF	Condición 1	0.0165	0.0139	0.0351
	Condición 2	0.0152	0.0135	0.0311
	Condición 3	0.0186	0.0135	0.0393
	Condición 4	0.0159	0.0156	0.0314
	Condición 5	0.0161	0.0148	0.0313
	Condición 6	0.0174	0.0191	0.0358
BSF	Condición 1	0.0096	0.0119	0.0088
	Condición 2	0.0081	0.0091	0.0088
	Condición 3	0.0066	0.0104	0.0082
	Condición 4	0.0092	0.0104	0.0084
	Condición 5	0.0063	0.0116	0.0097
	Condición 6	0.0121	0.0206	0.0084

Leyenda:

 Bueno
  Satisfactorio
  Insatisfactorio
  Inaceptable

*Fuente: Elaboración propia. **Número de rodamiento: 6207. Posición 1

Tabla 23

Valores Pico de Aceleración Envelope en gs en el Lado Acoplado Motor

Nombre de Fallas	Condición	Ejes		
		Horizontal	Vertical	Axial
BPFO	Condición 1	0.0091	0.0066	0.0049
	Condición 2	0.0150	0.0103	0.0056
	Condición 3	0.0166	0.0131	0.0066
	Condición 4	0.0127	0.0111	0.0075
	Condición 5	0.0155	0.0115	0.0074
	Condición 6	0.0108	0.0122	0.0054
BPFI	Condición 1	0.0025	0.0047	0.0069
	Condición 2	0.0037	0.0052	0.0102
	Condición 3	0.0036	0.0066	0.0084
	Condición 4	0.0044	0.0062	0.0074
	Condición 5	0.0038	0.0098	0.0118
	Condición 6	0.0039	0.0071	0.0097
FTF	Condición 1	0.0285	0.0277	0.0177
	Condición 2	0.0279	0.0272	0.0190
	Condición 3	0.0320	0.0226	0.0171
	Condición 4	0.0288	0.0381	0.0214
	Condición 5	0.0241	0.0225	0.0221
	Condición 6	0.0259	0.0188	0.0153
BSF	Condición 1	0.0195	0.0110	0.0055
	Condición 2	0.0189	0.0186	0.0063
	Condición 3	0.0213	0.0183	0.0067
	Condición 4	0.0152	0.0149	0.0073
	Condición 5	0.0161	0.0154	0.0091
	Condición 6	0.0115	0.0105	0.0076

Leyenda:

 Bueno
  Satisfactorio
  Insatisfactorio
  Inaceptable

*Fuente: Elaboración propia. **Número de rodamiento: 6308. Posición 2

Tabla 24

Valores Pico de Aceleración Envelope en gs en el Lado Acoplado Bomba

Nombre de Fallas	Condición	Ejes		
		Horizontal	Vertical	Axial
BPFO	Condición 1	0.0171	0.0120	0.0191
	Condición 2	0.0180	0.0116	0.0201
	Condición 3	0.0255	0.0144	0.0147
	Condición 4	0.0319	0.0143	0.0321
	Condición 5	0.0336	0.0120	0.0283
	Condición 6	0.0423	0.0161	0.0240
BPFI	Condición 1	0.0202	0.0223	0.0108
	Condición 2	0.0230	0.0167	0.0121
	Condición 3	0.0286	0.0133	0.0148
	Condición 4	0.0263	0.0139	0.0124
	Condición 5	0.0264	0.0177	0.0148
	Condición 6	0.0263	0.0217	0.0150
FTF	Condición 1	0.0435	0.0340	0.0451
	Condición 2	0.0613	0.0430	0.0328
	Condición 3	0.0565	0.0323	0.0317
	Condición 4	0.0519	0.0532	0.0383
	Condición 5	0.0437	0.0876	0.0489
	Condición 6	0.0625	0.0323	0.0869
BSF	Condición 1	0.0210	0.0205	0.0229
	Condición 2	0.0227	0.0293	0.0314
	Condición 3	0.0257	0.0311	0.0231
	Condición 4	0.0400	0.0293	0.0419
	Condición 5	0.0356	0.0243	0.0275
	Condición 6	0.0308	0.0270	0.0351

Leyenda:

 Bueno
  Satisfactorio
  Insatisfactorio
  Inaceptable

*Fuente: Elaboración propia. **Número de rodamiento: 1315K. Posición 3

Tabla 25

Valores Pico de Aceleración Envelope en gs en el Lado Libre Bomba

Nombre de Fallas	Condición	Ejes		
		Horizontal	Vertical	Axial
BPFO	Condición 1	0.0190	0.0085	0.0148
	Condición 2	0.0121	0.0110	0.0148
	Condición 3	0.0131	0.0085	0.0128
	Condición 4	0.0148	0.0087	0.0150
	Condición 5	0.0187	0.0123	0.0194
	Condición 6	0.0118	0.0091	0.0131
BPFI	Condición 1	0.0201	0.0077	0.0139
	Condición 2	0.0122	0.0135	0.0101
	Condición 3	0.0144	0.0101	0.0100
	Condición 4	0.0132	0.0114	0.0115
	Condición 5	0.0144	0.0083	0.0198
	Condición 6	0.0121	0.0113	0.0155
FTF	Condición 1	0.0369	0.0137	0.0395
	Condición 2	0.0508	0.0170	0.0247
	Condición 3	0.0240	0.0176	0.0240
	Condición 4	0.0330	0.0219	0.0222
	Condición 5	0.0290	0.0206	0.0249
	Condición 6	0.0348	0.0217	0.0270
BSF	Condición 1	0.0294	0.0117	0.0165
	Condición 2	0.0182	0.0105	0.0268
	Condición 3	0.0161	0.0080	0.0189
	Condición 4	0.0146	0.0070	0.0174
	Condición 5	0.0193	0.0093	0.0145
	Condición 6	0.0125	0.0089	0.0177

Leyenda:

 Bueno
  Satisfactorio
  Insatisfactorio
  Inaceptable

*Fuente: Elaboración propia. **Número de rodamiento: 6207. Posición 4

Capítulo IV. Resultados, Contrastación de Hipótesis y

Discusión de Resultados

IV.1. Resultados

IV.1.1 Resultados de las observaciones de la Forma de Onda

Las zonas de mayor amplitud de vibración son en la posición 1, en la dirección axial, y en la posición 2, tanto en la dirección horizontal como axial. En general las formas de onda de las vibraciones de la bomba son consistentes, excepto en la posición 4 dirección axial, esto puede indicar fuerzas caóticas que están relacionadas al flujo dentro de la bomba.

IV.1.2 Resultados de la Evaluación de Severidad

Para la evaluación de severidad se aumentó un 25% más los niveles aceptables de vibración que recomienda la norma ISO 10816-7 según lo recomendado por el fabricante de motores WEG cuando se analizan bases flexibles, debido a que no se cuenta con historial de la bomba. En la dirección axial, bajo la condición 6 en la posición 1, los niveles de vibración se ubican dentro de la Zona D. Asimismo, se registran niveles correspondientes a la Zona C en la dirección axial de las posiciones 1 y 2, así como en la dirección vertical de la posición 3. El resto de posiciones y direcciones evaluadas presentan niveles de vibración comprendidos dentro de las Zonas A y B.

IV.1.3 Resultados del Análisis de Fourier

El resumen de los resultados del Análisis de Fourier se explica en la Tabla 26. Las frecuencias asociadas a problemas significativos deben ser consideradas para el mantenimiento preventivo.

Tabla 26

Resumen de los resultados encontrados en el análisis espectral FFT.

Posición	Dirección	Nombre de Frecuencia	Valor	Severidad	Problema asociado
1	Horizontal	2FL	120Hz	Leves	Problemas eléctricos
	Vertical	1x	59.5Hz	Leves	Desbalance
	Vertical	2x	118.5Hz		Desalineamiento
	Axial	1x	59.5Hz	Significativas	Desalineamiento
	Axial	2x	118.5Hz	Importantes	Desalineamiento
2	Horizontal	2FL	120Hz	Moderadas	Problemas eléctricos
	Vertical	1x	59.5Hz	Leves	Desbalance
	Vertical	2x	118.5Hz		Desalineamiento
	Axial	1x	59.5Hz	Significativas	Desalineamiento
	Axial	2x	118.5Hz	Importantes	Fuerzas axiales
3	Todas	BPFI	557Hz	Significativas	Problemas en los rodamientos
	Horizontal	1x	59.5Hz	Leve	Desbalance
	Horizontal	2x	118.5Hz	Moderadas	Desalineamiento
	Vertical	1x	59.5Hz	Significativas	Desbalance
	Axial	1x	59.5Hz	Significativas	Desalineamiento
4	Todas	BPFI	557Hz	Significativas	Problemas en los rodamientos
	Todas	BPF	414Hz	Moderadas	Operación
	Horizontal	1x	59.5Hz	Moderadas	Desbalance
	Horizontal	2x	118.5Hz	Moderadas	Desalineamiento
	Vertical	1x	59.5Hz	Moderadas	Desbalance
	Axial	2x	118.5Hz	Moderadas	Desalineamiento
	Axial	Turbulencias	30-150Hz	Moderadas	Fuerzas hidráulicas y Recirculación

*Fuente: Elaboración propia

IV.1.4 Resultados del Análisis Tiempo-Frecuencia

El resumen de los resultados del Análisis Tiempo-Frecuencia se explica en la Tabla 27. Las frecuencias asociadas a problemas significativos deben ser consideradas para el mantenimiento preventivo.

Tabla 27

Resumen de los resultados encontrados en el análisis tiempo-frecuencia STFT.

Posición	Dirección	Nombre de Frecuencia	Valor	Severidad	Problema asociado
1	Horizontal	2FL	120Hz	Moderadas	Problemas eléctricos
	Horizontal	3x	177.5Hz	Baja	Desalineamiento
	Horizontal	Turbulencias	200-400Hz	Bajas	Ruido ambiental
	Vertical	1x	59.5Hz	Leves	Desbalance
	Vertical	2x	118.5Hz	Leves	Desalineamiento
	Vertical	2FL	120Hz	Leves	Problemas eléctricos
	Axial	1x	59.5Hz	Significativas	Desalineamiento
	Axial	2x	118.5Hz	Importantes	Desalineamiento
2	Horizontal	2FL	120Hz	Significativa	Problemas eléctricos
	Vertical	1x	59.5Hz	Moderadas	Desbalance
	Vertical	2x	118.5Hz	Moderadas	Desalineamiento
	Axial	1x	59.5Hz	Significativas	Desalineamiento
	Axial	2x	118.5Hz	Importantes	Fuerzas axiales
3	Todas	BPFI	557Hz	Significativas	Problemas en los rodamientos
	Horizontal	2x	118.5Hz	Significativas	Desalineamiento
	Vertical	1x	59.5Hz	Significativas	Desbalance
	Axial	1x	59.5Hz	Significativas	Desalineamiento
		2x	118.5	Moderadas	Desalineamiento
4	Todas	BPFI	557Hz	Significativas	Problemas en los rodamientos
	Todas	BPF	414Hz	Moderadas	Operación
	Horizontal	1x	59.5Hz	Moderadas	Desbalance
	Horizontal	2x	118.5Hz	Moderadas	Desalineamiento
		1.3x	70-80Hz	Leves	Fuerzas hidráulicas y Recirculación
	Vertical	1x	59.5Hz	Moderadas	Desbalance
	Axial	2x	118.5Hz	Moderadas	Desalineamiento
	Axial	Turbulencias	30-140Hz	Moderadas	Fuerzas hidráulicas y Recirculación

*Fuente: Elaboración propia

IV.1.5 Resultados del Análisis de la Transformada Wavelet

La Wavelet Morlet Compleja capturó los detalles más finos tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia, por lo que se utilizó en el análisis de la Transformada Wavelet en la bomba.

El resumen de los resultados del Análisis de la Transformada Wavelet se explica en la Tabla 28. Las frecuencias asociadas a problemas significativos deben ser consideradas para el mantenimiento preventivo.

Tabla 28

Resumen de los resultados encontrados en el análisis Wavelet Morlet compleja.

Posición	Dirección	Nombre de Frecuencia	Valor	Severidad	Problema asociado
1	Horizontal	2FL	120Hz	Moderadas	Problemas eléctricos
	Horizontal	3x	177.5Hz	Baja	Desalineamiento
	Vertical	1x	59.5Hz	Leves	Desbalance
	Vertical	2x	118.5Hz	Leves	Desalineamiento
	Vertical	2FL	120Hz	Leves	Problemas eléctricos
	Axial	1x	59.5Hz	Significativas	Desalineamiento
2	Axial	2x	118.5Hz	Importantes	Desalineamiento
	Horizontal	1x	59.5Hz	Leve	Desbalance
	Horizontal	2FL	120Hz	Significativa	Problemas eléctricos
	Vertical	1x	59.5Hz	Moderadas	Desbalance
	Vertical	2x	118.5Hz	Moderadas	Desalineamiento
	Axial	1x	59.5Hz	Significativas	Desalineamiento
3	Axial	2x	118.5Hz	Importantes	Fuerzas axiales
	Todas	BPFI	557Hz	Significativas	Problemas en los rodamientos
	Horizontal	2x	118.5Hz	Significativas	Desalineamiento
	Horizontal	Turbulencias	100-150Hz	Leves	Flujo hidráulico
	Vertical	1x	59.5Hz	Significativas	Desbalance
	Axial	1x	59.5Hz	Significativas	Desalineamiento
4	Axial	2x	118.5	Moderadas	Desalineamiento
	Todas	BPFI	557Hz	Significativas	Problemas en los rodamientos
	Horizontal	1x	59.5Hz	Moderadas	Desbalance
	Horizontal	2x	118.5Hz	Moderadas	Desalineamiento
	Horizontal	Turbulencias	70-80Hz	Leves	Fuerzas hidráulicas y Recirculación
	Vertical	1x	59.5Hz	Moderadas	Desbalance
	Axial	2x	118.5Hz	Moderadas	Desalineamiento
	Axial	Turbulencias	30-140Hz	Moderadas	Fuerzas hidráulicas y Recirculación

*Fuente: Elaboración propia

IV.1.6 Resultados del Análisis Envelope

Los resultados de valores de aceleración envelope son buenos o satisfactorios. Además, el nivel de aceleración envelope de los valores filtrados indica que no hay modulación en la frecuencia de falla de los rodamientos. Sin embargo, estos valores de referencia no necesariamente indican la ausencia de problemas en los rodamientos ya que la aceleración envelope es mayor cuando en las etapas tempranas de desgaste de los rodamientos, cuando los impactos son mayores. Cuando las fallas están distribuidas existe mayor desgaste en los rodamientos lo que puede suavizar la superficie y minimizar los golpes

IV.1.7 Comparación de los diferentes métodos

La comparación de los diferentes métodos se presenta en las tablas 29 y 30. Las técnicas de la Transformada Rápida de Fourier, el análisis Tiempo-Frecuencia con la Transformada Corta de Fourier y Transformada Wavelet permiten identificar las fallas de manera similar. Sin embargo, la severidad de algunas vibraciones es más significativa cuando se usan las técnicas de frecuencia-tiempo, ya que estas amplitudes tienen un mayor pico temporal.

El Análisis de Criticidad ISO 20816 y el Análisis de Envolvente permiten evaluar la severidad de la vibración de manera específica, proporcionando un valor global de la misma.

Tabla 29

Comparación de los Diferentes Métodos de Análisis de Vibraciones - Parte 1: Posiciones 1 y 2

Posición	Dirección	Frecuencia	Valor	Severidad					Posible Causa
				Análisis de Criticidad ISO 20816	Transformada Rápida de Fourier	Análisis Tiempo- Frecuencia	Transformada Wavelet	Análisis Envelope	
1	Horizontal	2FL	120Hz	Zona A	Moderadas	Moderadas	Moderadas	Bueno	Problemas eléctricos
1	Horizontal	3x	177.5Hz	Zona A	Baja	Baja	Baja	Bueno	Desalineamiento
1	Horizontal	Turbulencias	200-400Hz	Zona A	Leves	Baja	Baja	Bueno	Ruido ambiental
1	Vertical	2x	118.5Hz	Zona A	Leves	Leves	Leves	Bueno	Desalineamiento
1	Vertical	2x	120Hz	Zona A	Leves	Leves	Leves	Bueno	Problemas eléctricos
1	Axial	1x	59.5Hz	Zona C	Significativas	Significativas	Significativas	Bueno	Desalineamiento
1	Axial	2x	118.5Hz	Zona C	Significativas	Significativas	Significativas	Bueno	Desalineamiento
2	Horizontal	2FL	120Hz	Zona A	Moderadas	Significativa	Significativa	Bueno	Problemas eléctricos
2	Vertical	1x	59.5Hz	Zona A	Leves	Moderadas	Moderadas	Bueno	Desbalance
2	Vertical	2x	118.5Hz	Zona A	Leves	Moderadas	Moderadas	Bueno	Desalineamiento
2	Axial	1x	59.5Hz	Zona D	Significativas	Significativas	Significativas	Bueno	Desalineamiento
2	Axial	2x	118.5Hz	Zona D	Significativas	Significativas	Significativas	Bueno	Desalineamiento

Fuente Elaboración Propia

Tabla 30

Comparación de los Diferentes Métodos de Análisis de Vibraciones - Parte 2: Posiciones 3 y 4

Posición	Dirección	Frecuencia	Valor	Severidad					Posible Causa
				Análisis de Criticidad ISO 20816	Transformada Rápida de Fourier	Análisis Tiempo- Frecuencia	Transformada Wavelet	Análisis Envelope	
3	Todas	BPFI	557Hz	-	Significativas	Significativas	Significativas	Satisfactorio	Problemas en los rodamientos
3	Horizontal	1x	59.5Hz	Zona A-B	Leves	Leves	Leves	Satisfactorio	Desbalance
3	Horizontal	2x	118.5Hz	Zona A-B	Moderadas	Significativas	Significativas	Satisfactorio	Desalineamiento
3	Vertical	1x	59.5Hz	Zona C	Significativas	Significativas	Significativas	Satisfactorio	Desbalance
3	Axial	1x	59.5Hz	Zona B	Significativas	Significativas	Significativas	Satisfactorio	Desalineamiento
3	Axial	2x	118.5Hz	Zona B	Leves	Moderadas	Moderadas	Satisfactorio	Desalineamiento
4	Todas	BPFI	557Hz	-	Significativas	Significativas	Significativas	Bueno	Problemas en los rodamientos
4	Todas	BPF	414Hz	-	Moderadas	Moderadas	Moderadas	Bueno	Operación
4	Horizontal	1x	59.5Hz	Zona A	Moderadas	Moderadas	Moderadas	Bueno	Desbalance
4	Horizontal	2x	118.5Hz	Zona A	Moderadas	Moderadas	Moderadas	Bueno	Desalineamiento
4	Horizontal	Turbulencias	70-80Hz	Zona A	Leves	Leves	Leves	Bueno	Recirculación
4	Vertical	1x	59.5Hz	Zona B	Moderadas	Moderadas	Moderadas	Bueno	Desbalance
4	Axial	2x	118.5Hz	Zona B	Moderadas	Moderadas	Moderadas	Bueno	Desalineamiento,
4	Axial	Turbulencias	140-150Hz	Zona B	Moderadas	Moderadas	Moderadas	Bueno	Recirculación

Fuente Elaboración Propia

IV.2. Contrastación de la Hipótesis

IV.2.1 Contrastación de Hipótesis General

Hi: Los métodos avanzados de análisis de vibraciones permitirán una identificación precisa de las fallas en la bomba del Laboratorio 5 de Máquinas Térmicas e Hidráulicas de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Ho: Los métodos avanzados de análisis de vibraciones no permitirán una identificación precisa de las fallas en la bomba de 15 HP.

Decisión: Los resultados obtenidos utilizando diferentes métodos de análisis de vibración han permitido identificar las fallas con precisión. Por lo tanto, se confirma la hipótesis de investigación (Hi) y se rechaza la hipótesis nula (Ho).

IV.2.2 Contrastación de Hipótesis Específicas

Hipótesis Específica 1

Hi1: Las características de las vibraciones antes de aplicar diferentes métodos de análisis permitirán conocer las condiciones y zonas de mayor vibración de la bomba.

Ho1: Las características de las vibraciones antes de aplicar diferentes métodos de análisis no permitirán conocer las condiciones y zonas de mayor vibración de la bomba.

Decisión: Las observaciones de las formas de onda en velocidad permitieron identificar las zonas de mayor vibración y la consistencia de las vibraciones. Por lo tanto, se confirma la hipótesis de investigación específica (Hi1) y se rechaza la hipótesis nula específica (Ho1).

Hipótesis Específica 2

Hi2: El análisis de Fourier, el análisis de Tiempo-Frecuencia, el análisis de Transformada Wavelet y el análisis de Envolvente identificaran fallas en las vibraciones mecánicas de la bomba.

Ho2: El análisis de Fourier, el análisis de Tiempo-Frecuencia, el análisis de Transformada Wavelt y el análisis de Envolvente no identificaran fallas en las vibraciones mecánicas de la bomba.

Decisión: El análisis de Fourier, el análisis de Tiempo-Frecuencia, el análisis de Transformada Wavelt y el análisis de Envolvente identificaran fallas en las vibraciones mecánicas de la bomba revelando niveles altos de vibración. Por lo tanto, se confirma la hipótesis de investigación específica (Hi2) y se rechaza la hipótesis nula específica (Ho2).

Hipótesis Específica 3

Hi7: Las técnicas avanzadas de análisis de vibraciones identificarán diferentes tipos de fallas, por lo que será necesario implementar una combinación de técnicas para lograr una identificación completa de las fallas en la bomba.

Ho7: Las técnicas avanzadas de análisis de vibraciones identificarán las mismas fallas, por lo que no será necesario implementar una combinación de técnicas para lograr una identificación completa de las fallas en la bomba.

Decisión: Aunque algunas técnicas permiten la detección de fallas (Análisis de Fourier, Análisis Tiempo-Frecuencia y Análisis Envelope) no son completas en sí misma. Para evaluar la criticidad de esas fallas es necesario complementar con el Análisis de Criticidad ISO 20816. Además para identificar fallas incipientes en los rodamientos es necesario el Análisis de Envolvente. Por lo cual es necesario una combinación de técnicas para lograr una identificación completa de las fallas en la bomba. Por lo tanto, se confirma la hipótesis de investigación específica (Hi/) y se rechaza la hipótesis nula específica (Ho7).

IV.3. Discusión de Resultados

Según Eshleman (2020), la forma de onda proporciona información básica sobre el estado de la máquina, el ruido de flujo aparece como vibraciones aleatorias y los patrones se asocian con el comportamiento interno de la máquina. Los resultados obtenidos a través de la visualización de las vibraciones a través de la forma de onda revelaron las zonas de mayor amplitud de vibración, así como la presencia de vibraciones aleatorias, lo que sugiere la influencia de fuerzas caóticas dentro de la bomba.

Piotrowski (2007) indica que el desalineamiento tiene varias firmas en los espectros de vibración. El más común es cuando la $1x$ y la $2x$ en la dirección axial tiene niveles altos de vibración. Sin embargo no existe relación entre la severidad de vibración con la severidad del desalineamiento. Este patrón está presente en el análisis de vibración realizado, lo que indica la presencia del desalineamiento, más no la severidad.

Karassik, Messina, Cooper, & Heald (2008) indican que las frecuencias a las 2FL que son muy direccionales indican problemas en el estator incluyendo: excentricidad en el estator y láminas en corto circuito. Las vibraciones observadas a las 2FL predominan en la dirección horizontal lo que sugiere problemas en el estator. Eshleman (2020) indica que los problemas eléctricos desaparecen cuando la máquina se apaga. Esto se observa en los espectrogramas durante el apagado de la máquina.

Karassik, Messina, Cooper, & Heald (2008) señalan que la recirculación interna del flujo puede producir vórtices fuertes que causan modulación en la $1x$ y en las frecuencias de paso de las palas. La modulación de amplitud se da en un amplio rango de frecuencias debido a la variabilidad de las velocidades de rotación de los vórtices. Esto se observa en los espectrogramas de la posición 4 en la dirección axial, en las cuales aparecen vibraciones no sincrónicas. Estas vibraciones están relacionadas con la velocidad de rotación de los vórtices, los cuales se vuelven caóticas en las condiciones 3, 4, 5 y 6.

White (2010) indica que en la Transformada de Fourier es imposible determinar señales aleatorias o transientes. Esto se observa en los espectros de la posición 4 dirección

axial, los cuales presentan un amplio rango de vibraciones no definidas. Cuando se compara con el análisis de Tiempo-Frecuencia y Análisis Wavelet se puede observar la naturaleza de esas vibraciones no definidas.

Gaberson (2002) indica que las técnicas de la STFT y la Transformada Wavelet Continua presentan resultados similares, sin embargo la Wavelet Morlet Compleja presenta líneas verticales que pueden indicar impactos no encontrados. Esto se observa en los resultados al aplicar los Análisis de Tiempo-Frecuencia y de Transformada Wavelet, los cuales dan resultados muy similares. Además la Transformada Wavelet presenta mayor dispersión de la energía en altas frecuencias, esto se corrige ajustando la frecuencia central y el ancho de banda.

Gaberson (2006) refiere a McFadden y Wang (1995) concluyendo que la Wavelet Morlet es la que mejor proporciona información de las fallas de engranajes. En este estudio se observa que la Wavelet Morlet Compleja es la que mejor proporciona información de las señales de vibración de la bomba.

Bond Randall (2011) señala que en los rodamientos, a medida que las áreas defectuosas se desgastan, los impactos generados pueden disminuir en intensidad, aunque en las etapas iniciales sean más evidentes. Esto ocurre incluso cuando el desgaste es extenso y no produce impactos agudos, lo que no impide su detección y diagnóstico. Esto se observa en los espectros y espectrogramas de la posición 3 en los cuales la frecuencia de falla de la pista interna de los rodamientos son predominantes, sin embargo en el Análisis envelope los impactos no son lo suficientemente fuertes para clasificarlos como falla.

Conclusiones

Con el análisis de vibraciones realizado en la bomba, se han identificado varias fallas importantes que requieren atención. En las posiciones 1 y 2, se observó un nivel de vibración significativo en la dirección axial que está clasificado entre la Zona C y D según los niveles de severidad establecido, lo cual indica un problema crítico relacionado con un desalineamiento. Además, se ha podido identificar la frecuencia de falla de la 2FL con fuerte presencia en la dirección horizontal, pero no son tan significativos. En la posición 3 se ha encontrado en todos los espectros y espectrogramas de aceleración la frecuencia de fallo de la pista interna (BPFI) a 557 Hz. Sin embargo, el Análisis Envelope no muestra modulación causada por fallas en los rodamientos. Esto podría deberse a que el desgaste ha suavizado la superficie con el tiempo, reduciendo los impactos. La presencia de la 1x en las posiciones 3 y 4 en las direcciones horizontales y verticales está relacionada con un pequeño desbalance del impulsor. En las posiciones 3 y 4, durante las condiciones 2, 3, 4, 5 y 6, se presentan vibraciones caóticas no definidas relacionadas con turbulencias y fuerzas hidráulicas. Estas turbulencias en la dirección horizontal se presentan entre 100 y 150Hz, y en la dirección axial entre 30 y 150Hz. Las turbulencias en la dirección axial están relacionadas con la recirculación en la entrada de la bomba, ya que la entrada de flujo se da en la misma dirección.

Las características de la vibración en la forma de onda en aceleración y velocidad en las diferentes condiciones muestran que la mayoría de las formas de onda son uniformes. Sin embargo, se observa inestabilidad en la forma de onda de la dirección axial en la posición 4, lo que está relacionado con la turbulencia de los flujos en la entrada y salida del impulsor.

La evaluación de la severidad identifica que los niveles de vibración en la dirección axial en las posiciones 1 y 2 se encuentran dentro de la Zona C y D, lo que indica la aparición de un problema crítico. Adicionalmente, se observan niveles de vibración en la Zona C en las direcciones vertical que también indica problemas, aunque menos severos. En las

demás posiciones y ejes el nivel de vibración está dentro de las Zonas A y B, lo cual corresponde a un nivel satisfactorio de vibración.

El análisis espectral FFT se utilizó la ventana Hanning para compensar la frecuencia y la amplitud. Además, se utilizaron 16384 puntos, que no se cambiaron debido a que afectaban la resolución del espectro. Los resultados se presentaron en espectros de frecuencia. Se detectaron problemas eléctricos, de desbalance y desalineamiento. La presencia de turbulencias en la posición 4 dirección axial indica problemas de flujo, aunque se desconoce su comportamiento exacto.

En el análisis tiempo-frecuencia (STFT) los resultados se presentaron en espectrogramas STFT, usando la ventana Hanning en todos los cálculos. Para poder diferenciar algunas frecuencias de otras se tuvo que variar el ancho de ventana. Si se requería tener precisión en el tiempo se usaba un ancho de ventana más pequeño y se necesitaba tener más precisión en la frecuencia, se usaba un ancho de ventana más amplio. El espectrograma permitió detectar todos los problemas mencionados anteriormente, también se pudo observar la forma de vibración de las frecuencias turbulentas, así como posibles frecuencias naturales.

En el análisis Wavelet se comparó diferentes tipos de wavelets, siendo la más precisa la Wavelet Morlet compleja, por lo cual se procedió al análisis de todas las condiciones y posiciones con esta. Los resultados de aplicar la Wavelet Morlet compleja fueron presentados en espectrogramas. Para identificar fallas con la wavelet Morlet compleja se tuvo que variar el ancho de banda (f_b) y la frecuencia central (f_c). El aumento del ancho de banda permitía más precisión en la frecuencia, pero la pérdida en precisión del tiempo. La frecuencia central permitía tener precisión en tiempo y frecuencias bajas, sin embargo, en altas frecuencias los valores se dispersan, lo que dificultaba la identificación de frecuencias altas. Se pudo identificar los mismos problemas y comportamientos de las vibraciones que en el análisis STFT.

En el análisis de envolvente, se aplicó un filtro pasabanda a las señales con una frecuencia de corte baja de 600 Hz y una frecuencia de corte alta de 2000 Hz.

Posteriormente, se utilizó la transformada de Hilbert para obtener los valores de aceleración de envolvente. Luego, se obtuvo el espectro utilizando la FFT. Los valores globales pico se muestran en la Tabla 21. Para evaluar el aporte de cada frecuencia de falla de los rodamientos, se utilizó un filtro pasabanda centrado en esa frecuencia con un margen de ± 5 Hz. El nivel de vibración de la aceleración envelope es bueno y satisfactorio en todas las condiciones. El contraste con las demás técnicas indica que la frecuencia BPFI no genera modulación de alta frecuencia. Esto indica que el desgaste en la pista interna del rodamiento ha sido suavizado con el tiempo, además, no se conoce la frecuencia natural del rodamiento y no se puede evaluar si esta última se encuentra fuera del rango analizado con la envolvente.

Es necesario utilizar una combinación de técnicas para un análisis exhaustivo de las vibraciones. El análisis de Criticidad ISO 20816 proporciona una evaluación global de la severidad de la vibración en cada posición y condición, pero no es suficiente para un diagnóstico detallado de todas las fallas. Para una identificación completa de las fallas en la bomba puede ser necesario usar solo una de las técnicas siguientes: Transformada Rápida de Fourier, la Transformada Corta de Fourier o la Transformada Wavelet. La FFT es efectiva para identificar problemas comunes pero presenta dificultades para identificar variación en las vibraciones, como turbulencias del flujo y modulación de la amplitud en vibraciones eléctricas. El Análisis de Envolvente proporciona un valor global de aceleración envelope y puede ofrecer un diagnóstico temprano de las fallas en los rodamientos. Sin embargo, cuando las fallas están avanzadas, los impactos ya no se producen de manera significativa, lo que reduce la efectividad del análisis de envolvente. Para el seguimiento del nivel de vibración, se puede utilizar el análisis de criticidad ISO 20816 o el Análisis Envelope.

Cabe señalar que la aplicación de los criterios de severidad fue ajustada en un 25% respecto a los valores de la norma ISO 10816-7, considerando que la bomba está instalada sobre una base flexible. Esta adaptación permitió una evaluación más realista del comportamiento vibratorio del sistema.”

Recomendaciones

Se recomienda realizar el alineamiento de los ejes de la bomba y el motor, con instrumentos de precisión para prevenir posibles fallas futuras.

Se recomienda cambiar el rodamiento del Lado libre de la bomba debido a que tiene la mayor amplitud y podría indicar daños a largo plazo.

Inspeccionar el estado de la bomba y el impulsor debido a la presencia de frecuencias caóticas y turbulencias en las condiciones 2,3,4,5 y 6. Verificar si el B-gap está en un rango adecuado.

Verificar las frecuencias naturales encontradas con un análisis modal.

Verificar el rango de las frecuencias naturales del rodamiento utilizando un acelerómetro más potente para establecer el ancho de banda adecuado para el análisis de envolvente en la bomba.

Realizar nuevas mediciones de vibraciones después de implementar estos cambios para evaluar la efectividad de las medidas tomadas.

Referencias Bibliográficas

Barboza, A. P. (2013). Sistema de detección de fallas para una bomba centrífuga. Lima.

Bastias Ramirez,, C. (2023). Diagnóstico de fallas en rodamientos mediante imágenes tiempo-frecuencia utilizando aprendizaje profundo. Tesis de Maestría, Universidad de Concepción, Concepción. Obtenido de <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/11191>

Bejarano, G. (2022). Reingeniería del Módulo de Pruebas de Bombeo de Slurry para Aislamiento de las Vibraciones en la Bomba. Tesis de Titulación profesional, Universidad Católica de Santa María, Arequipa. Obtenido de <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/12087>

Bhave, S. (2010). Mechanical Vibrations: Theory and Practice. Pearson.

Bond Randall, R. (2011). Vibration-based Condition Monitoring. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd.

Chu, T., Nguyen, T., Yoo, H., & Wang, J. (2024). ESP vibration prediction based on pump operating conditions in laboratory using machine learning. *Geoenergy Science and Engineering*, 240, 213039. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.213039>

Cid, J. (2021). ¿Es suficiente el monitoreo de vibraciones de la bomba para evitar fallas? Obtenido de Chesterton: <https://www.chesterton.com.mx/es-suficiente-el-monitoreo-de-vibraciones-de-la-bomba-para-evitar-fallas/>

Countréach, J., & Gaudet, M. (s.f.). Envelope analysis - the key to rolling-element bearing diagnosis. Obtenido de Brüel & Kjær: <https://www.bksv.com/media/doc/BO0187.pdf>

De la Cruz, J. (2021). Diagnóstico de Parámetros de Operación que mitigan la vibración excesiva de bombas de lodo en la Compañía Minera Antamina S.A. Tesis de Titulación profesional, Universidad Nacional del Centro Del Perú, Huancayo. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12894/8171>

Dynamox. (s.f.). ¿El análisis de vibraciones mejora la calidad de la producción? Obtenido de <https://dynamox.net/es/blog/el-analisis-de-vibraciones-mejora-la-calidad-de-la-produccion>

Eshleman, R. (2020). CAT I: Introduction to Machinery Vibrations. Vibration Institute.

Gaberson, H. (2002). The Use of Wavelets for Analyzing Transient Machinery Vibration. Sound and Vibration.

Gaberson, H. (Nov-Dec de 2006). Continuous wavelet machinery vibration analysis calculations. The Shock and Vibration Digest, 38(6). Recuperado el 03 de 06 de 2024, de <https://link.gale.com/apps/doc/A152997093/AONE>

Galdir, R. (2021). Electric submersible pump vibration analysis under several operational conditions for vibration fault differential diagnosis. Ocean Engineering. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108249>

Girdhar, P., & Moniz, O. (2005). Practical Centrifugal Pumps: Design, Operation and Maintenance. Newnes.

Hernández-Montero, F., & Gutierrez García, M. (2010). Enfoques del análisis de envolvente al procesamiento de vibraciones para el diagnóstico de maquinarias. Ingeniería Mecánica, 31-40.

Howard, M. (n.d.). Erbesd Instruments. Recuperado el 05 de junio de 2024, de <https://www.erbessd-instruments.com>: <https://www.erbessd-instruments.com/es/articulos/envolvente-de-aceleracion-para-analisis-de-fallas-en-rodamientos/>

ISO. (2016). ISO 20816-1: Vibraciones mecánicas: Medición y evaluación de la vibración de máquinas con partes rotativas y alternativas.

ISO. (2017). Mechanical vibration: Rotor balancing - Part 2: Vocabulary (ISO 21940-2:2017).

Karassik, I. J., Messina, J. P., Cooper, P., & Heald, C. C. (2008). Pump Handbook. Mc Graw Hill.

Khaire, P., Dalvi, G., Varkute, N., & Kaleeckal, L. (Junio de 2019). Condition Monitoring of Centrifugal Pumps Using Vibration Analysis and Artificial Neural Networks. 6th INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRODUCTION AND INDUSTRIAL ENGINEERING.

Lu, J., Wang, Y., Wang, B., Zhou, Y., Liu, X., & Si, Q. (2024). Study on the vibration characteristics induced by rotating stall in a centrifugal pump based on improved variational mode decomposition. *Flow Measurement and Instrumentation*, 102(102761).

Lu, Y. T. (2024). Experiment on cavitation-vibration correlation of a centrifugal pump under steady state and start-up conditions in energy storage station. *Journal of Energy Storage*, 83(110763). Obtenido de <https://doi.pucp.elogim.com/10.1016/j.est.2024.110763>

Łuczak, D. (2024). Machine Fault Diagnosis through Vibration Analysis: Continuous Wavelet Transform with Complex Morlet Wavelet and Time–Frequency RGB Image Recognition via Convolutional Neural Network. *Electronics*, 13(2), 452.

Magadán, L. (2020). Real-Time Monitoring of Electric Motors for Detection of Operating Anomalies and Predictive Maintenance. *Science and Technologies for Smart Cities*. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-51005-3_25

Martínez, C. (2014). Una Introducción a las Pruebas de Máquinas. Lima, Perú: Vibration Institute.

Mott, R. L., & Untener, J. A. (2015). *Mecánica de fluidos* (7ma ed.). México: Pearson Educación.

Muñoz Flores, M. (2024). Factibilidad de la determinación de características del daño en rodamientos a partir de vibraciones. Tesis de Maestría, Universidad de Concepción, Concepción. Obtenido de <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/11760>

Newland, D. (2005). *An Intoduction to: Random Vibration, Spectra & Wavelet Analysis*. New York: Dover Publicantions.

Newland, D. (2005). *An Introduction to Random Vibrations, Spectral & Wavelet Analysis*. New York: Dover Publications, Inc.

Oppenheim, A., & Schafer, R. (2009). Tratamiento de señales en tiempo discreto. Madrid: Pearson Education S.A.

Osorio Santander, E. (2014). Herramienta virtual para identificación de fallas en rodamientos. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.

Pacombia, J. (2017). Influencia de las vibraciones en la vida útil de bombas centrífugas. Arequipa.

Piotrowski, J. (2007). Shaft Alignment Handbook (3ra ed.). New York: Taylor & Francis Group.

Rojas, H. (2018). Reducción de fallas en bombas centrífugas mediante técnicas predictivas - Planta Gold Mill - Yanacocha.

Santa María González, I. (2022). Algoritmo para determinar el origen de la vibración sincrónica en rotores rígidos verticales. Tesis de Maestría, Universidad de Concepción, Concepción. Obtenido de <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/9457>

Scheffer, C., & Gidhar, P. (2004). Practical Machinery Vibration Analysis & Predictive Maintenance. Elsevier.

Serruto, N. (2020). Implementación de Metodología para el diagnóstico de fallas mediante el análisis vibracional en motores eléctricos en la empresa A.E.I. SRL. Tesis de Titulación profesional, Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, Arequipa. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12773/125>

Siano, D., & Panza, M. (2018). Diagnostic method by using vibration analysis for pump fault detection. Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.013>

Siemens. (29 de 08 de 2019). Siemens Community. Recuperado el 6 de junio de 2024, de <https://community.sw.siemens.com/s/article/window-types-hanning-flattop-uniform-tukey-and-exponential>

Ullah, N. (2023). An Intelligent Framework for Fault Diagnosis of Centrifugal Pump Leveraging Wavelet Coherence Analysis and Deep Learning. Sensors. doi:<https://doi.org/10.3390/s23218850>

Viet-Hung, V. (2016). Operational modal analysis on a pump operating at varying speeds: an industrial history case. *Mechanics & Industry*. doi:<https://doi.org/10.1051/meca/2015043>

WEG. (2020). Motor Scan: Nota técnica de medición de vibración. Recuperado el 31 de 03 de 2025, de <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h50/h86/WEG-motor-scan-vibration-measurement-technical-note-10008451145-pt-en-es.pdf>

White, G. (2010). Introducción al Análisis de Vibraciones. Azima DLI.

Yuan, S., Yang, J., & et al. (2012). Experimental investigation on the flow-induced noise under variable conditions for centrifugal pumps. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 25, 456-462.

Zhang et al. (2014). Investigation on Vibration Characteristics in a Centrifugal Pump with Special Slope Volute.

Zhang, Y. &. (s.f.). Computational study of the noise radiation in a centrifugal pump when flow rate changes. *Energies*, 10(2)(221). Obtenido de <https://doi.org/10.3390/en10020221>

Zhou, J., Jin, G., Ye, T., & Wang, X. (s.f.). Fluid-induced vibration analysis of centrifugal pump including rotor system based on Computational Fluid Dynamics and Computational Structural Dynamics coupling approach. *Ocean Engineering*, 288(Part 1)(115993).

Anexos

Anexos A Matriz de consistencia.....	1
Anexos B Código usado.....	2
Anéxo B.1 Código usado para el acondicionamiento de datos.....	2
Anéxo B.2 Código usado para visualizar las señales	3
Anéxo B.3 Código usado para el Análisis de análisis de criticidad ISO 20816	4
Anéxo B.4 Código usado para el Análisis de Fourier	5
Anéxo B.5 Código usado para el Análisis Tiempo Frecuencia STFT	6
Anéxo B.6 Código usado para el Análisis Wavelet.....	7
Anéxo B.7 Código usado para el Análisis Envelope	8

Anexos A Matriz de consistencia

Nivel	Problema	Objetivo	Hipótesis
General	Problema General:	Objetivo General:	Hipótesis General:
	¿La aplicación de métodos de análisis de vibraciones permitirá identificar fallas en la bomba centrífuga con base flexible del Laboratorio 5 de la FIM-UNI?	Aplicar diferentes métodos de análisis de vibraciones en la bomba centrífuga con base flexible del Laboratorio 5 de la FIM-UNI para identificar y evaluar fallas.	La aplicación de métodos de análisis de vibraciones permitirá identificar fallas en la bomba centrífuga con base flexible del Laboratorio 5 de la FIM-UNI.
	Problemas Específicos:	Objetivo Específico:	Hipótesis Específica:
Específico 1	¿Cuál es el comportamiento inicial de las vibraciones mecánicas de la bomba antes de aplicar los métodos avanzados de análisis de vibraciones?	Describir el comportamiento de las vibraciones mecánicas en la bomba antes de aplicar los diferentes métodos de análisis.	Las características de las vibraciones antes de aplicar diferentes métodos de análisis permitirán conocer las condiciones y zonas de mayor vibración de la bomba.
Específico 2	¿Los análisis como el de Fourier, Tiempo-Frecuencia, Transformada Wavelet y el análisis de Envolvente identificarán condiciones anómalas en las vibraciones mecánicas de la bomba?	Evaluar cómo el análisis de Fourier, el análisis de Tiempo-Frecuencia, el análisis de Transformada Wavelet y el análisis de Envolvente permite identificar fallas en las vibraciones mecánicas en la bomba.	El análisis de Fourier, el análisis de Tiempo-Frecuencia, el análisis de Transformada Wavelet y el análisis de Envolvente identificarán fallas en las vibraciones mecánicas de la bomba.
Específico 7	¿Será necesario utilizar todas las técnicas de análisis de vibraciones para identificar completamente las fallas en la bomba, o algunas técnicas serán suficientes?	Determinar si todas las técnicas identifican las mismas fallas en la bomba y evaluar si es necesario implementar todas las técnicas o solo algunas.	Las técnicas avanzadas de análisis de vibraciones identificarán diferentes tipos de fallas, por lo que será necesario implementar una combinación de técnicas para lograr una identificación completa de las fallas en la bomba.

Anexos B Código usado

Anéxo B.1 Código usado para el acondicionamiento de datos

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import scipy
from scipy import fftpack
from scipy.signal import hilbert, butter, filtfilt, freqz, stft, cwt
import pywt
import cupy as cp
from matplotlib.lines import Line2D
import matplotlib.font_manager as fm

tm = 2 # Tiempo de muestra de las señales

datosc_aceleracion=np.zeros((4096*tm,4,6,4))

for c in range(datosc_aceleracion.shape[2]):
    for p in range(datosc_aceleracion.shape[3]):
        segmento=data(datos,c,p)
        datosc_aceleracion[:,c,p]=segmento[-4096*tm-1:-1]
        datosc_aceleracion[0:len(segmento),0,c,p]=datosc_aceleracion[0,0,c,p]
        datosc_aceleracion[0:len(segmento),1,c,p]=np.mean(datosc_aceleracion[:,1,c,p])
        datosc_aceleracion[0:len(segmento),2,c,p]=np.mean(datosc_aceleracion[:,2,c,p])
        datosc_aceleracion[0:len(segmento),3,c,p]=np.mean(datosc_aceleracion[:,3,c,p])

fs = 4096
ts = 1 / fs
low_cutoff = 1000 # Frecuencia de corte del filtro pasa bajas
high_cutoff = 10 # Frecuencia de corte del filtro pasa altas

rms = np.zeros((1, 3, 6, 4))

datos_rms = np.zeros((4096 * tm, 4, 6, 4))
datosc_velocidad = np.zeros((4096 * tm, 4, 6, 4))
datosc_desplazamiento = np.zeros((4096 * tm, 4, 6, 4))

for c in range(datosc_aceleracion.shape[2]):
    for p in range(datosc_aceleracion.shape[3]):
        time = datosc_aceleracion[:, 0, c, p]
        signals = datosc_aceleracion[:, 1:, c, p]

        # Integrar la señal una vez para obtener la velocidad (mm/s^2)
        velocidad = np.cumsum(signals * ts, axis=0) * 9810
        velocidad = highpass(velocidad, high_cutoff, fs) # Asegurarse de pasar fs

        # Integrar la señal de velocidad para obtener el desplazamiento (mm)
        desplazamiento = np.cumsum(velocidad * ts, axis=0)
        desplazamiento = highpass(velocidad, high_cutoff, fs) # Asegurarse de pasar fs

        datosc_velocidad[:, 0, c, p] = time
        datosc_desplazamiento[:, 0, c, p] = time
        datos_rms[:, 0, c, p] = time

        datosc_velocidad[:, 1:, c, p] = velocidad
        datosc_desplazamiento[:, 1:, c, p] = desplazamiento
```

Anéxo B.2 Código usado para visualizar las señales

```
def plot_wf_c(datos, p, ct=6, tsignal=0.5, fs=4096, units=""):
    max_vals = [np.max(np.abs(datos[:, i, :, p])) for i in range(1, 4)]
    fig, axs = plt.subplots(3, ct, figsize=(14, 7))

    n_muestras = int(tsignal * fs)
    tiempo_desplazamiento = 0.2
    n_muestras_desplazadas = int(fs * tiempo_desplazamiento)

    for c in range(ct):
        time = datos[:, n_muestras, 0, c, p]
        signals = [datos[:, n_muestras+n_muestras_desplazadas, i, c, p] for i in range(1, 4)]
        signals_desplazadas = []

        for signal in signals:
            signal_desplazada = signal[n_muestras_desplazadas:n_muestras_desplazadas+n_muestras]
            signals_desplazadas.append(signal_desplazada)

        for i, (ax, signal, max_val, color) in enumerate(zip(axs[:, c], signals_desplazadas, max_vals, ['blue', 'green', 'red'])):
            ax.plot(time, signal, color=color)
            ax.set_xlim(0, tsignal * 1.01)
            ax.set_ylim(-max_val, max_val)
            ax.set_xlabel("Tiempo (s)", fontsize=10, fontproperties=times_new_roman)
            ax.set_ylabel(f"Amplitud ({units})", fontsize=10, fontproperties=times_new_roman)
            ax.set_xticks(np.arange(0, tsignal * 1.01, tsignal / 3))
            ax.grid(True, which='both', linestyle='--', linewidth=0.5)
            if i == 0:
                ax.text(0.5, 1.1, f'Condición {c + 1}', transform=ax.transAxes, fontproperties=times_new_roman_bold, font-
size=13, ha='center')
            ax.tick_params(axis='both', labelsize=10)
            for label in (ax.get_xticklabels() + ax.get_yticklabels()):
                label.set_fontproperties(times_new_roman)
                label.set_fontsize(10)

    fig.subplots_adjust(wspace=0.5, hspace=0.7)
    plt.tight_layout()
    plt.show()
```

Anéxo B.3 Código usado para el Análisis de análisis de criticidad ISO 20816

```
for c in range(datosc_velocidad.shape[2]):
    for p in range(datosc_velocidad.shape[3]):
        time = datosc_velocidad[:, 0, c, p]
        signals = datosc_velocidad[:, 1:, c, p]
        for i in range(rms.shape[1]):
            rms[0, i, c, p] = np.sqrt(np.mean(datosc_velocidad[:, 1:, c, p]**2))

columns = pd.MultiIndex.from_product([['Sensor 1', 'Sensor 2', 'Sensor 3', 'Sensor 4'],
                                      ['Horizontal', 'Vertical', 'Axial']],
                                    names=['Sensor', 'Eje'])
index = pd.Index([f'Condición {i+1}' for i in range(6)], name='Condición')

df_rms = pd.DataFrame(np.zeros((6, 4*3)), columns=columns, index=index)

for c in range(rms.shape[2]):
    for p in range(rms.shape[3]):
        for i in range(3):
            df_rms.loc[f'Condición {c+1}', (f'Sensor {p+1}', ['Horizontal', 'Vertical', 'Axial'][i])] = rms[0, i, c, p]

print(df_rms)
```

Anéxo B.4 Código usado para el Análisis de Fourier

```
def fft_f(data, fs):
    N = len(data)
    T = 1.0 / fs
    window = np.hanning(N)
    data_windowed = data * window
    yf = np.fft.fft(data_windowed)
    yf = 2.0/N * np.abs(yf[:N//2])
    f = np.fft.fftfreq(N, T)[:N//2]
    return f, yf

def plot_fft_c(datos, p, ct=6, fs=4096, fmin=0, fmax=1000, units="", n_max=3, dF=0.5, dA=0.1):
    max_vals = [np.max([np.max(np.abs(fft_f(datos[:, i, c, p], fs)[1])) for c in range(ct)]) for i in range(1, 4)]

    fig, axs = plt.subplots(3, ct, figsize=(14, 6.3))

    for c in range(ct):
        signals = [datos[:, i, c, p] for i in range(1, 4)]

        for i, (ax, signal, max_val, color) in enumerate(zip(axs[:, c], signals, max_vals, ['blue', 'green', 'red'])):
            f, fft_values = fft_f(signal, fs)
            ax.plot(f, fft_values, color=color)
            ax.set_xlim(fmin, fmax)
            ax.set_ylim(0, max_val*1.4)
            ax.set_xlabel("Frecuencia (Hz)", fontsize=10, fontproperties=times_new_roman)
            ax.set_ylabel(f"Amplitud ({units})", fontsize=10, fontproperties=times_new_roman)
            ax.grid(True, which='both', linestyle='--', linewidth=0.5)
            ax.set_xticks(np.arange(fmin, fmax, (fmax-fmin)/4))
            if i == 0:
                ax.text(0.5, 1.1, f'Condición {c+1}', transform=ax.transAxes, fontproperties=times_new_roman_bold, fontsize=13, ha='center')
                ax.tick_params(axis='both', labelsiz=10)
                for label in (ax.get_xticklabels() + ax.get_yticklabels()):
                    label.set_fontproperties(times_new_roman)
                    label.set_fontsize(10)
                sorted_indices = np.argsort(fft_values)[-n_max:][::-1] # Índices de los tres mayores picos
                max_amps = fft_values[sorted_indices]
                max_freqs = f[sorted_indices]
                for n, (max_amp, max_freq) in enumerate(zip(max_amps, max_freqs), start=1):
                    if n > 1:
                        second_min_diff = np.partition(np.abs(max_freqs[n - 1] -
max_freqs[:n]), 1)[1]
                    else:
                        second_min_diff = np.inf # Evitar comparación en el primer elemento
                    if second_min_diff > dF:
                        xtext = -3/7*(fmax-fmin)/max_freq if (max_freq-fmin) < 0.1 * (fmax-
fmin) else -10
                        ytext = 10
                        ax.annotate(
                            f'{max_amp:.2f}{units}\n{n}{max_freq}Hz',
                            xy=(max_freq, max_amp), xycoords='data',
                            xytext=(xtext, ytext), textcoords='offset points',
                            fontsize=8, fontproperties=times_new_roman_bold, color=color,
                            ha='left', va='center'
                        )
    fig.subplots_adjust(wspace=0.6, hspace=0.4)
    plt.show()
```

Anéxo B.5 Código usado para el Análisis Tiempo Frecuencia STFT

```
def stft_f(data, fs, nperseg=256, noverlap=None):
    f, t, Zxx = stft(data, fs, nperseg=nperseg, noverlap=noverlap)
    return f, t, np.abs(Zxx)

def plot_stft_c(datos, p, ct=6, fs=4096, fmin=0, fmax=1000, nperseg=256, units="gs", max_scala=""):

    fig, axs = plt.subplots(3, ct, figsize=(18, 8))
    cbar_axes = [fig.add_axes([0.9, 0.74- i * 0.285, 0.01, 0.2]) for i in range(3)]
    Zxx_values=[]

    for c in range(ct):
        signals = [datos[:, i, c, p] for i in range(1, 4)]
        Zxx1 = []
        for signal in signals:
            f, t, Zxx = stft_f(signal, fs, nperseg)
            Zxx1.append(Zxx)
        Zxx_values.append(Zxx1)

    Zxx_values = np.array(Zxx_values)
    if max_scala != "":
        max_values = np.array([max_scala, max_scala, max_scala])
    else:
        max_values = [np.max(np.abs(Zxx_values[:, i, :])) for i in range(3)]

    for c in range(ct):
        signals = [datos[:, i, c, p] for i in range(1, 4)]

        for i, (ax, Zxx_val, max_val, cbar_ax) in enumerate(zip(axs[:, c], Zxx_values[c], max_values, cbar_axes)):
            pcm = ax.pcolormesh(t, f, Zxx_val, shading='gouraud', cmap='viridis', vmin=0,
                                vmax=max_val)
            ax.set_xlim(0, 2)
            ax.set_ylim(fmin, fmax)
            ax.set_xlabel("Tiempo (s)", fontsize=10, fontproperties=times_new_roman)
            ax.set_ylabel(f"Frecuencia (Hz)", fontsize=10, fontproperties=times_new_roman)
            if i == 0:
                ax.text(0.5, 1.1, f'Condición {c+1}', transform=ax.transAxes, fontproper-
                        ties=times_new_roman_bold, fontsize=13, ha='center')
            ax.tick_params(axis='both', labelsize=10)
            ax.tick_params(axis='both', which='major', labelsize=10)
            for label in (ax.get_xticklabels() + ax.get_yticklabels()):
                label.set_fontproperties(times_new_roman)
                label.set_fontsize(10)

            cbar = fig.colorbar(pcm, cax=cbar_ax, label=f"Amplitud ({units})")
            cbar.ax.set_ylabel(f"Amplitud ({units})", fontsize=10, fontproperties=times_new_roman)
            cbar.ax.tick_params(labelsize=10)
            for label in cbar.ax.get_yticklabels():
                label.set_fontproperties(times_new_roman)
                label.set_fontsize(10)

            fig.text(0.1, 0.835, 'HORIZONTAL', va='center', ha='center', rotation='vertical', fontsize=12, color='blue',
                    fontproperties=times_new_roman_bold)
            fig.text(0.1, 0.56, 'VERTICAL', va='center', ha='center', rotation='vertical', fontsize=12, color='green', fontproper-
                    ties=times_new_roman_bold)
            fig.text(0.1, 0.275, 'AXIAL', va='center', ha='center', rotation='vertical', fontsize=12, color='red', fontproper-
                    ties=times_new_roman_bold)
    plt.tight_layout(rect=[0.1, 0.1, 0.9, 1])
    fig.subplots_adjust(wspace=0.55, hspace=0.4)
    plt.show()
```

Anéxo B.6 Código usado para el Análisis Wavelet

```
def cwt_f(data, fs, widths, wavelet='cmor1.5-1.0'):
    data_gpu = cp.asarray(data)
    coef_gpu, freqs = pywt.cwt(data_gpu.get(), widths, wavelet, 1/fs)
    coef = cp.asnumpy(coef_gpu)
    return freqs, coef

def plot_cwt_c(datos, p, ct=6, fs=4096, fmin=0, fmax=1000, widths=np.arange(1, 256), units="gs", wavelet="cmor1.5-1.0"):
    fig, axs = plt.subplots(3, ct, figsize=(18, 8))
    cbar_axes = [fig.add_axes([0.9, 0.74- i * 0.285, 0.01, 0.2]) for i in range(3)]
    freqs = []
    coefs = []
    for c in range(ct):
        signals = [datos[:, i, c, p] for i in range(1, 4)]
        freq1 = []
        coef1 = []
        for signal in signals:
            freq, coef = cwt_f(signal, fs, widths, wavelet=wavelet)
            freq1.append(freq)
            coef1.append(coef)
        freqs.append(freq1)
        coefs.append(coef1)

    freqs = np.array(freqs)
    coefs = np.array(coefs)/10

    max_values = [np.max(np.abs(coefs[:, i, :])) for i in range(3)]
    t = np.arange(signals[0].shape[0]) / fs

    for c in range(ct):
        for i, (ax, freq, coef, cbar_ax, max_val) in enumerate(zip(axs[:, c], freqs[c], coefs[c], cbar_axes, max_values)):
            pcm = ax.pcolormesh(t, freq, np.abs(coef), shading='gouraud', cmap='viridis', vmin=0, vmax=max_val)
            ax.set_xlim(0, 2)
            ax.set_ylim(fmin, fmax)
            ax.set_xlabel("Tiempo (s)", fontsize=10, fontproperties=times_new_roman)
            ax.set_ylabel(f"Frecuencia (Hz)", fontsize=10, fontproperties=times_new_roman)
            if i == 0:
                ax.text(0.5, 1.1, f'Condición {c+1}', transform=ax.transAxes, fontproperties=times_new_roman_bold, fontsize=13, ha='center')
            ax.tick_params(axis='both', which='major', labelsize=10)
            for label in (ax.get_xticklabels() + ax.get_yticklabels()):
                label.set_fontproperties(times_new_roman)
                label.set_fontsize(10)

        cbar = fig.colorbar(pcm, cax=cbar_ax, label=f"Amplitud ({units})")
        cbar.ax.set_ylabel(f"Amplitud ({units})", fontsize=10, fontproperties=times_new_roman)
        cbar.ax.tick_params(labelsize=10)
        for label in cbar.ax.get_yticklabels():
            label.set_fontproperties(times_new_roman)
            label.set_fontsize(10)

    fig.text(0.1, 0.835, 'HORIZONTAL', va='center', ha='center', rotation='vertical', fontsize=12, color='blue', fontproperties=times_new_roman_bold)
    fig.text(0.1, 0.56, 'VERTICAL', va='center', ha='center', rotation='vertical', fontsize=12, color='green', fontproperties=times_new_roman_bold)
    fig.text(0.1, 0.275, 'AXIAL', va='center', ha='center', rotation='vertical', fontsize=12, color='red', fontproperties=times_new_roman_bold)
    plt.tight_layout(rect=[0.1, 0.1, 0.9, 1])
    fig.subplots_adjust(wspace=0.55, hspace=0.4)
    plt.show()
```

Anéxo B.7 Código usado para el Análisis Envelope

```
def envelope_analysis(signal, fs, lowcut, highcut):
    filtered_signal = bandpass_filter(signal, lowcut, highcut, fs)
    analytic_signal = hilbert(filtered_signal)
    envelope = np.abs(analytic_signal)
    return envelope

envelopes = np.zeros((4096*2, 3, 6, 4, 4))
peak_envelopes = np.zeros((1, 3, 6, 4, 4))

for c in range(datosc_aceleracion.shape[2]):
    for p in range(datosc_aceleracion.shape[3]):
        time = datosc_aceleracion[:, 0, c, p]
        signals = datosc_aceleracion[:, 1:, c, p]

        for i, (fault_name, fault_freq) in enumerate(freq_falla_rodamiento[p + 1].items()):
            lowcut = fault_freq - 10
            highcut = fault_freq + 10

            for direction in range(signals.shape[1]):
                signal = signals[:, direction]
                envelope = envelope_analysis(signal, fs, lowcut, highcut)
                peak_envelope = np.max(envelope)
                envelopes[:, direction, c, p, i] = envelope
                peak_envelopes[0, direction, c, p, i] = peak_envelope

print(peak_envelopes.shape[0], peak_envelopes.shape[1], peak_envelopes.shape[2], peak_envelopes.shape[3], peak_envelopes.shape[4])

columns = pd.MultiIndex.from_product([['Horizontal', 'Vertical', 'Axial']],
                                     names=['Eje'])
index = pd.MultiIndex.from_product([['MOTOR LADO LIBRE', 'MOTOR LADO ACOPLADO', 'BOMBA LADO ACOPLADO',
                                     'BOMBA LADO LIBRE'],
                                    ['BPFO', 'BPFI', 'FTF', 'BSF'], [1, 2, 3, 4, 5, 6]],
                                   names=['Ubicación', 'Frecuencia de falla', 'Condición'])

df_peak_envelope = pd.DataFrame(np.zeros((96, 3)), columns=columns, index=index)

# Rellenar el DataFrame con los valores pico de la envolvente
for c in range(peak_envelopes.shape[2]):
    for p in range(peak_envelopes.shape[3]):
        for d in range(peak_envelopes.shape[1]): ##Dirección
            for f in range(peak_envelopes.shape[4]): ##Frecuencia de falla
                direccion = ['Horizontal', 'Vertical', 'Axial'][d]
                nombre_falla = ['BPFO', 'BPFI', 'FTF', 'BSF'][f]
                ubicacion = ['MOTOR LADO LIBRE', 'MOTOR LADO ACOPLADO', 'BOMBA LADO ACOPLADO', 'BOMBA LADO LI-
BRE'][p]
                df_peak_envelope.loc[(ubicacion, nombre_falla, c+1), direccion] = peak_envelopes[0, d, c, p, f]

print(df_peak_envelope)
```