

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Diseño de sistema de monitoreo predictivo de motores eléctricos mediante análisis de vibración
y parámetros eléctricos.

Proyecto Integrador

Previo a la obtención del Título de:

Ingeniero en Electrónica y Automatización

Presentado por:

Ricardo Raúl Carranza Delgado

Michael Anthony Castro Empuño

Guayaquil – Ecuador

2025

Dedicatoria

Este logro no es solo mío, es resultado de toda una red de apoyo incondicional.

Dedico y comparto este logro con mi familia, de manera particular a mis padres, quienes creyeron en mí desde un principio incluso cuando yo dudaba. A mis hermanos, quienes fueron mi refugio y motivación.

A mis amigos y a quienes hayan estado presente en esta travesía. A ustedes, que compartieron mis noches de estudio, momentos de frustración y pequeñas victorias. Gracias por la amistad sincera y recordarme que el camino se disfruta mejor cuando es compañía.

Gracias por ser fuente de motivación para seguir adelante, esto es para para ustedes.

Atentamente,

Ricardo Raúl Carranza Delgado

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a Dios, por haberme dado la fortaleza y la paciencia para enfrentar cada desafío. Por guiarme durante toda esta etapa, y recordarme que con fe y esfuerzo todo es posible.

A quienes se convirtieron en mi brújula en momentos de incertidumbre, a quienes me impulsaron a seguir adelante con un consejo o con palabras de superación. No solo es un agradecimiento por el apoyo, es un reconocimiento a la paciencia y sabiduría que me dieron sin pedir nada a cambio.

Su presencia en mi vida es el verdadero tesoro de esta travesía.

Atentamente,

Ricardo Raúl Carranza Delgado

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi madre y a mi abuela, pilares fundamentales en mi vida, quienes siempre me brindaron su apoyo incondicional durante todo este camino, también a mi familia, por su cariño y aprecio, a mis compañeros y amigos, por compartir este recorrido conmigo, haciéndolo más llevadero y llenándolo de gratos recuerdos. Por último, a cada persona que creyó en mí desde el inicio de esta etapa académica.

Atentamente,

Michael Castro E.

Agradecimientos

Primeramente, agradecer a Dios por darme la fortaleza para seguir y haberme permitido culminar esta etapa, también expresar mi gratitud a aquellos profesores y técnicos docentes por su orientación, paciencia y valiosos consejos que contribuyeron significativamente a la realización de este trabajo.

Finalmente, agradezco a la institución, por transmitirme sus conocimientos y guiarme en mi formación profesional.

Atentamente,

Michael Castro E.

Declaración Expresa

Nosotros Ricardo Raúl Carranza Delgado y Michael Anthony Castro Empuño acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 10 de jul. del 2025.

Ricardo Raúl Carranza Delgado

Michael Anthony Castro Empuño

Evaluadores

MSc. Dennys Dick Cortez Álvarez

Profesor de Materia

MSc. Daniel Andrés Cevallos Valdiviezo

Tutor de Proyecto

RESUMEN

El mantenimiento predictivo es una técnica clave para anticipar fallas en motores eléctricos industriales. Este proyecto tiene como objetivo diseñar e implementar un sistema de monitoreo predictivo para un motor de 120V, con la finalidad de detectar fallas mecánicas en etapas tempranas. El sistema busca cubrir la necesidad de una herramienta de formación práctica para estudiantes de ingeniería, con la hipótesis de que el análisis de vibraciones permitirá un diagnóstico efectivo.

Se desarrolló un sistema que integró un CompactDAQ de National Instruments para la adquisición de datos eléctricos y de vibración, aplicando técnicas de procesamiento de señales y la norma ISO 10816. Se implementó una interfaz SCADA en LabVIEW que permitió la visualización en tiempo real y la activación de alertas. El protocolo MQTT se utilizó para la visualización remota.

Los resultados más relevantes incluyeron la correcta adquisición de datos en tiempo real y la capacidad del sistema para distinguir el comportamiento del motor en condiciones normales y con fallas simuladas. Las mediciones de vibración y los análisis espectrales mostraron un comportamiento anómalo que permitía la detección de la falla antes de un daño mayor.

En conclusión, el sistema diseñado es funcional y se considera una herramienta pedagógica valiosa para la formación de futuros ingenieros, alineando su aprendizaje con las demandas industriales y fortaleciendo las capacidades de investigación del laboratorio.

Palabras clave: Monitoreo predictivo, mantenimiento, LabVIEW, vibraciones.

ABSTRACT

Predictive maintenance is a key technique for anticipating failures in industrial electric motors. This project aims to design and implement a predictive monitoring system for a 120V motor, with the goal of detecting mechanical failures at an early stage. The system seeks to meet the need for a practical training tool for engineering students, based on the hypothesis that vibration analysis will enable effective diagnosis.

A system was developed that integrated a National Instruments CompactDAQ for electrical and vibration data acquisition, applying signal processing techniques and the ISO 10816 standard. A SCADA interface was implemented in LabVIEW that allowed real-time visualization and the activation of alerts. The MQTT protocol was used for remote visualization.

The most relevant results included the correct acquisition of real-time data and the system's ability to distinguish between the behavior of the motor under normal conditions and with simulated faults. Vibration measurements and spectral analyses showed anomalous behavior that allowed the fault to be detected before further damage occurred.

In conclusion, the designed system is functional and is considered a valuable educational tool for training future engineers, aligning their learning with industrial demands and strengthening the laboratory's research capabilities.

Keywords: Predictive monitoring, maintenance, LabVIEW, vibrations.

ÍNDICE

1 Capítulo 1	1
1.1 Introducción	2
1.2 Descripción del problema.....	3
1.3 Justificación del problema.....	4
1.4 Objetivos.....	4
1.4.1 Objetivo general.....	4
1.4.2 Objetivos específicos	5
1.5 Marco teórico	5
1.5.1 Sistema de monitoreo de condición.....	5
1.5.2 Mantenimiento Predictivo	6
1.5.3 Motor Eléctrico	7
1.5.4 Vibraciones en Motores Eléctricos	8
1.5.5 Tarjetas de Adquisición de datos.....	9
1.5.6 CompactDAQ	9
1.5.6.1 NI 9225.....	10
1.5.6.2 NI 9227	11
1.5.6.3 NI 9234.....	11
1.5.6.4 NI 9485.....	12
1.5.7 Sensor Piezoeléctrico.....	13

1.5.8	LabVIEW	14
1.5.9	Protocolo MQTT	14
1.5.10	Grafana Labs	15
1.5.11	Norma ISO 10816	16
1.6	Diagnóstico de vibraciones	18
2	Capítulo 2	19
2.1	Metodología	20
2.2	Ánalysis de vibraciones y normas ISO 10816	21
2.3	Diagnóstico de vibración	22
2.4	Arquitectura del sistema	24
2.5	Componentes del Hardware de adquisición de datos	24
2.5.1	Módulo NI 9225 – Medición de voltaje	25
2.5.2	Módulo NI 9227 – Medición de corriente	25
2.5.3	Módulo NI 9234 – Medición de vibraciones	26
2.5.4	Módulo NI 9485 – Salidas digitales	26
2.5.5	Sensor Piezoelectrónico – Acelerómetro	27
2.6	Configuración del entorno de programación LabVIEW	27
2.7	Adquisición de señales eléctricas	27
2.8	Adquisición de la señal de vibraciones	30
2.9	Procesamiento de señal de vibración	31
2.10	Determinación del estado inicial del motor	34

2.11	Pruebas que se realizarán al motor (desalineaciones al eje).....	37
2.11.1	Prueba 1: Desbalanceo estático.....	37
2.11.2	Prueba 2: Desbalanceo por Par	38
2.11.3	Prueba 3: Desbalanceo Angular.....	39
2.11.4	Prueba 4: Condición de referencia	40
2.12	Desarrollo de la Interfaz de usuario en LabVIEW	40
2.12.1	Modo manual	41
2.12.2	Modo automático.....	41
2.12.3	Configuración de Waveform Charts y Waveform Graph	42
2.12.4	Indicadores Visuales	43
2.13	Desarrollo de la Interfaz Gráfica con Grafana Labs.....	44
2.13.1	Creación del Broker.....	44
2.13.2	Envío de datos desde LabVIEW.....	45
2.13.3	Topología de red	48
2.13.4	Creación de Base de datos en InfluxDB	49
2.13.5	Dashboard en Grafana Labs	49
2.13.6	Envío de alertas	50
3	Capítulo 3	52
3.1	Resultados y análisis	53
3.1.1	Condiciones iniciales.....	53
3.1.2	Prueba 1: Desbalanceo estático.....	55

3.1.3	Prueba 2: Desbalanceo por par.....	57
3.1.4	Prueba 3: Desbalanceo angular	58
3.1.5	Prueba 4: Condición referencia	59
4	Capítulo 4	61
4.1	Conclusiones y recomendaciones.....	62
4.1.1	Conclusiones.....	62
4.1.2	Recomendaciones	64
5	Referencias.....	65
6	Anexos.....	70
6.1	Diagrama de control.....	70
6.2	Diagrama de fuerza	71
6.3	Diagrama de conexiones módulo CompactDAQ	72
6.4	Tabla ilustrada de diagnóstico de vibraciones.....	73
6.5	Normas ISO 10816	75
6.6	Estructura recibida antes de la tesis.....	78
6.7	Estructura entrega luego de la tesis.....	79

ABREVIATURAS

LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
IEPE	Integrated Electronics Piezo-Electric
NI	National Instruments
FFT	Fast Fourier Transform
CC	Corriente Continua
CA	Corriente Alterna

SIMBOLOGÍA

Vrms	Voltaje cuadrático medio
Arms	Corriente cuadrática media
kS/s	Kilomuestras por segundo
mV/g	Milivoltios por g (g = aceleración de la gravedad)
Hz	Hertz

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ejemplo de sistema de monitoreo continuo con sensores conectados a PLC (AMAQ, 2022)	5
Figura 1.2 Ejemplo de visualización gráfica de datos en un monitoreo de condición (DEWEsoft, 2025)	6
Figura 1.3 Mantenimiento predictivo de un motor eléctrico.....	7
Figura 1.4 Vista esquemática de un motor eléctrico estándar utilizado en aplicaciones industriales (Xinnuo, 2022).....	8
Figura 1.5 Chasis NI cDAQ-9174 de National Instruments (National Instruments, 2023).....	10
Figura 1.6 Módulo NI 9225 de National Instruments (National Instruments, 2025).	10
Figura 1.7 Módulo NI 9227 de National Instruments (National Instruments, 2025).....	11
Figura 1.8 Módulo NI 9234 de National Instrument (National Instruments, 2025).....	12
Figura 1.9 Módulo NI 9485 de National Instruments (National Instruments, 2025).....	12
Figura 1.10 Model 352C33 – ICP® quartz accelerometer (PIEZOTRONICS, 2021).....	13
Figura 1.11 Logotipo oficial del entorno de programación LabVIEW de National Instruments (Instruments, National, 2025).	14
Figura 1.12 Diagrama de arquitectura MQTT mostrando el flujo de datos (Paessler, 2019)....	15
Figura 1.13 Logotipo de Grafana Labs (Labs, 2024)	16
Figura 1.14 Límites permisibles en base a la norma ISO 10816 (Castro, 2024)	17
Figura 2.1 Diagrama de flujo del proceso de adquisición, transmisión y análisis de datos.	20
Figura 2.2 Bloque DAQ Assistant.....	28
Figura 2.3 Configuración del DAQ Assistant para la adquisición de voltaje.....	28
Figura 2.4 Configuración del DAQ Assistant para la adquisición de corriente.	29
Figura 2.5 Configuración del DAQ Assistant para adquisición de vibración.....	31
Figura 2.6 Bloque de filtro digital.....	32
Figura 2.7 Bloque de Integración	32

Figura 2.8 Bloque Spectral Measurements para el análisis FFT	32
Figura 2.9 Configuración del bloque Spectral Measurements.	33
Figura 2.10 Pestaña "Tools".....	35
Figura 2.11 Pestaña "Measurement & Automation Explorer"	36
Figura 2.12 Motor desconectado del eje de desbalances.....	37
Figura 2.13 Masa añadida para el desbalanceo estático.....	38
Figura 2.14 Masa añadida para el desbalanceo por par.....	39
Figura 2.15 Masa añadida para el desbalanceo angular	39
Figura 2.16 Masa añadida para la condición referencia	40
Figura 2.17 Ventana de selección de modo de operación	41
Figura 2.18 Diagrama de Bloques control con NI 9485	42
Figura 2.19 Waveform Graph de Voltaje y Corriente.	42
Figura 2.20 Waveform de Acelerómetros y análisis Espectral.	43
Figura 2.21 Indicadores Visuales de Amplitud y Frecuencia.	43
Figura 2.22 Leds indicadores	44
Figura 2.23 Nodo Aedes Broker.	45
Figura 2.24 Diagrama de Bloques: envío de datos de Corriente y Voltaje.....	46
Figura 2.25 Diagrama de bloques envío de datos de Amplitud y Frecuencia.	47
Figura 2.26 Conexión en Node-RED.....	48
Figura 2.27 Bucket parámetros del motor	49
Figura 2.28 Dashboard en Grafana.....	50
Figura 2.29 Envío de alertas	51
Figura 3.1 Resultados obtenidos de las condiciones iniciales del motor	53
Figura 3.2 Resultados obtenidos del desbalanceo estático	55
Figura 3.3 Resultados obtenidos del desbalanceo por par	57
Figura 3.4 Resultados obtenidos del desbalanceo angular	58

Figura 3.5 Resultados obtenidos de la condición referencia.....59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Tabla de severidad de vibración.....	22
Tabla 2.2 Tabla de diagnóstico de vibraciones por Desequilibrio	23
Tabla 2.3 Tabla de diagnóstico de vibración por Holgura mecánica.....	24
Tabla 2.4 Especificaciones técnicas del módulo NI 9225	25
Tabla 2.5 Especificaciones técnicas del módulo NI 9227.	25
Tabla 2.6 Especificaciones técnicas del módulo NI 9234	26
Tabla 2.7 Especificaciones técnicas del módulo NI 9485.	26
Tabla 2.8 Especificaciones técnicas del sensor piezoeléctrico.	27
Tabla 2.9 Datos del motor del Laboratorio de Instrumentación Industrial	34

CAPÍTULO 1

1.1 Introducción

En la actualidad, los motores eléctricos son componentes fundamentales en los procesos industriales, ya que su correcto funcionamiento garantiza la continuidad y eficiencia de la producción (Ferreira de Souza, Fernandes da Silva , Sauer , de Almeida , & Tatizawa , 2024). Sin embargo, las fallas mecánicas pueden ser progresivas, como desgaste en rodamientos o desalineaciones que pueden pasar desapercibidas hasta causar daños graves afectando la eficiencia del sistema, generando pérdidas económicas sino se detectan a tiempo (International Energy Agency , 2011).

El monitoreo predictivo se ha consolidado como una técnica eficaz para anticipar estas fallas mediante el análisis de parámetros clave como las vibraciones, la corriente y el voltaje. Esta metodología permite detectar anomalías en etapas tempranas, facilitando el mantenimiento preventivo y evitando interrupciones no planificadas (Ferreira de Souza et al., 2024)

En el ámbito académico, es fundamental que los estudiantes de Ingeniería en Electrónica y Automatización, e Ingeniería en Mecatrónica adquieran competencias prácticas en instrumentación de sensores, adquisición y procesamiento de señales, desarrollo de interfaces gráficas, integración de sistemas SCADA y análisis de condiciones operativas, ya que representan habilidades esenciales en la industria moderna.

Actualmente, el laboratorio de Instrumentación Industrial cumple un rol clave como espacio de formación aplicada, permitiendo a los estudiantes interactuar con equipos reales y simular escenarios industriales. No obstante, este espacio carece de un sistema funcional de monitoreo predictivo en tiempo real, limitando la experiencia práctica y la preparación de los futuros profesionales.

Por ello, esta tesis propone la implementación de un sistema de monitoreo predictivo basado en un motor eléctrico de 120V y un sistema CompactDAQ con módulos especializados

para la medición de voltaje, corriente y vibraciones. Esta solución permitirá a los estudiantes aplicar conocimientos teóricos en un entorno práctico, acercándolos a las condiciones reales de la industria y fortaleciendo su formación profesional.

1.2 Descripción del problema

Hoy en día, los motores eléctricos son piezas clave para el funcionamiento de la mayoría de los procesos productivos (Ferreira de Souza et al., 2024). Si estos motores fallan, pueden detener toda la operación y causar pérdidas económicas importantes (MCB, 2025). Muchas veces, los problemas en los motores, como desalineaciones, desequilibrios o desgaste de piezas aparecen poco a poco y no se detectan a tiempo, lo que puede llevar a daños graves y paros inesperados (Manjare & Patil, 2021).

El mantenimiento predictivo, se basa en la monitorización continua de variables de un proceso industrial, en este caso la medición de vibraciones y parámetros eléctricos permiten detectar signos de deterioro en componentes eléctricos o mecánicos (Martinez Garcia). Además, esta técnica ha demostrado ser eficaz para anticipar fallas potenciales, ya que permite identificar condiciones como desalineaciones, desequilibrios o sobrecargas antes de que evolucionen hacia estados críticos (Martinez Garcia, págs. 18 - 19).

En el Laboratorio de Instrumentación Industrial, tanto los estudiantes de Ingeniería en Electrónica y Automatización como los de Ingeniería en Mecatrónica realizan prácticas relacionadas con la adquisición de datos, el análisis de señales y la integración de sistemas de control. Sin embargo, actualmente no cuentan con un sistema que les permita aplicar técnicas modernas de monitoreo predictivo. Esta limitación dificulta el desarrollo de competencias aplicadas en diagnóstico de fallas y mantenimiento basado en condición, conocimientos cada vez más demandados en entornos industriales modernos.

1.3 Justificación del problema

La confiabilidad operativa es esencial para la productividad de los procesos industriales ya que fallas inesperadas en equipos como motores eléctricos pueden ocasionar pérdidas económicas (Ferreira de Souza et al., 2024). Dentro de este contexto el monitoreo predictivo permite detectar posibles fallas de manera anticipada, mediante el análisis de parámetros como vibraciones, corriente y voltaje (Martinez Garcia). De esta forma, se mejora la eficiencia y seguridad de los sistemas automatizados (Manjare & Patil, 2021).

Desde el punto de vista académico, la implementación de un sistema de monitoreo predictivo en un Laboratorio ofrece a los estudiantes de Ingeniería en Electrónica y Automatización e Ingeniería en Mecatrónica una experiencia práctica similar a la que enfrentarán en la industria. Este entorno de aprendizaje facilitaría el desarrollo de competencias prácticas en instrumentación, procesamiento de señales, diagnóstico de fallas y uso de herramientas de software como LabVIEW, alineando su formación con las demandas actuales del sector productivo.

Además, incorporar esta tecnología en el laboratorio no solo fortalecería el perfil profesional de los estudiantes, sino que también ampliaría las capacidades del espacio académico como plataforma para el desarrollo de proyectos, investigación aplicada y formación especializada en mantenimiento basado en condición.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Diseñar un sistema de monitoreo de motores eléctricos mediante una interfaz SCADA en LabVIEW para el análisis de vibraciones, voltaje y corriente, con la finalidad de detectar fallas en etapas tempranas y formación práctica de los estudiantes en técnicas de diagnóstico industrial.

1.4.2 Objetivos específicos

- Integrar sensores de vibración y módulos de adquisición de corriente y voltaje usando el chasis modular CompactDAQ de National Instruments, para la medición de parámetros físicos del motor eléctrico.
- Desarrollar una interfaz gráfica de usuario que permita la visualización en tiempo real de las señales eléctricas y mecánicas adquiridas mediante el entorno gráfico LabVIEW.
- Analizar las señales obtenidas para la identificación de patrones anómalos que indiquen el inicio de posibles fallas en el motor haciendo uso de las gráficas de velocidad de los sensores piezoelectrinos.
- Implementar un sistema de alertas y generación de reportes basado en umbrales definidos de vibración aplicando las normas ISO 10816, con el objetivo de anticipar necesidades de mantenimiento.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Sistema de monitoreo de condición



Figura 1.1 Ejemplo de sistema de monitoreo continuo con sensores conectados a PLC (AMAQ, 2022)

Los sistemas de monitoreo de condición permiten supervisar en tiempo real el estado operativo de equipos industriales, como motores eléctricos, mediante el análisis continuo de variables físicas relevantes (Goundar, Pillai, Mamun, Islam, & Deo, 2015). Estas soluciones

recopilan datos a través de sensores instalados en puntos críticos y los procesan para identificar patrones anómalos o señales tempranas de deterioro.

Esta capacidad de anticipación permite tomar decisiones informadas antes de que ocurran fallas críticas, lo cual mejora la confiabilidad del sistema y reduce los tiempos de inactividad no planificados (Manjare & Patil, 2021).



Figura 1.2 Ejemplo de visualización gráfica de datos en un monitoreo de condición (DEWESoft, 2025)

En entornos industriales, la implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real ha demostrado ser altamente efectiva para prevenir daños en maquinaria, optimizar el mantenimiento y aumentar la seguridad operativa. En particular, su aplicación en motores eléctricos permite monitorear parámetros como vibración, corriente y temperatura para detectar variaciones fuera de lo normal, facilitando intervenciones correctivas antes de que se presenten fallas graves (Goundar et al., 2015).

1.5.2 Mantenimiento Predictivo

El mantenimiento predictivo es una estrategia avanzada dentro del mantenimiento basado en condición (CBM) que tiene como objetivo anticipar fallos en equipos antes de que se manifiesten de forma crítica, se apoya en el monitoreo de parámetros físicos como vibraciones,

corriente, voltaje y temperatura para evaluar el estado real del equipo en operación. Esta metodología permite intervenir únicamente cuando el análisis de los datos indica un desvío significativo respecto al comportamiento normal del activo. Esto reduce costes operativos, minimiza tiempos de parada no planificados y extiende la vida útil de los componentes (Martinez Garcia).



Figura 1.3 Mantenimiento predictivo de un motor eléctrico.

1.5.3 Motor Eléctrico

Un motor eléctrico es una máquina que convierte la energía eléctrica en energía mecánica mediante la interacción de campos magnéticos. El principio de funcionamiento se basa en la fuerza que experimenta un conductor por el que circula una corriente eléctrica cuando se encuentra inmerso en un campo magnético, conocida como f.e.m. (Fuerza Electromotriz) inducida (Fraile Mora, 2008). La clasificación de los motores eléctricos se realiza principalmente según el tipo de alimentación: motores de corriente continua (CC) que incluyen excitación independiente, serie, shunt y compound; y motores de corriente alterna (CA) que se dividen en síncronos (velocidad constante igual a la de sincronismo) y asíncronos (velocidad ligeramente inferior al sincronismo) (Fraile Mora, 2008, pág. 165).

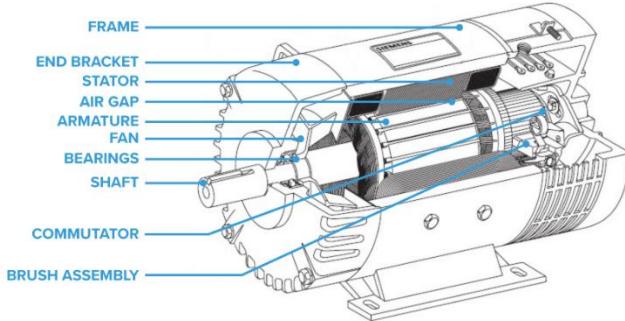


Figura 1.4 Vista esquemática de un motor eléctrico estándar utilizado en aplicaciones industriales (Xinnuo, 2022).

1.5.4 Vibraciones en Motores Eléctricos

Las vibraciones en motores eléctricos constituyen un indicador fundamental del estado de salud de la maquinaria industrial, que resultan de la interacción entre fuerzas electromagnéticas y fuerzas mecánicas, aunque cierto nivel de vibración es normal en un motor, el incremento significativo en su magnitud constituye un indicador de componentes defectuosos que pueden comprometer el rendimiento y la vida útil del equipo (Mejía Morales , 2009).

Los principales mecanismos que generan vibraciones en motores eléctricos incluyen desbalances en el rotor (estático, par y dinámico), falta de alineamiento entre ejes, problemas de excentricidad en el entrehierro rotor-estator, defectos en rodamientos, roturas de barras en rotores tipo jaula de ardilla, y fallas electromagnéticas causadas por alteraciones en el campo magnético (Mejía Morales , 2009). Cada uno de estos factores genera patrones vibratorios característicos que pueden ser identificados y analizados mediante técnicas de monitoreo predictivo, lo que permite detectar fallas de forma anticipada. De hecho, se ha comprobado que la firma de vibración de una máquina ofrece una visión más detallada de su estado interno que otras pruebas no destructivas (White, 2010).

1.5.5 Tarjetas de Adquisición de datos

La década de los 80's marcaron un punto de inflexión en la historia de la instrumentación científica con la explotación del microprocesador en un único chip de silicón, seguido rápidamente por el desarrollo del verdadero analizador de señales digitales portátil activado por baterías (White, 2010, pág. 71). Paralelamente, a mediados de esta década, empresas como National Instruments Corporation comenzaron a comercializar componentes elementales como tarjetas de adquisición de datos GPIB y tarjetas convertidoras analógico-digitales (tarjetas DAQ) que podían instalarse en computadoras personales de bajo costo, democratizando así el acceso a sistemas de medición sofisticados (National Instruments, 2000).

Una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) es un dispositivo que convierte señales analógicas en digitales para su procesamiento en computadoras (Johnson & Jennings, 2006). En síntesis, las tarjetas DAQ actúan como puentes críticos entre el mundo físico y el digital, transformando señales analógicas como vibraciones, temperatura o presión en datos digitales procesables por software especializado (National Instruments, 2025). Esta innovación no solo desplazó a los obsoletos registradores de cinta magnética y gráficos en papel de la era pre-1980, sino que revolucionó la instrumentación industrial al habilitar la adquisición simultánea de múltiples canales con alta precisión.

1.5.6 CompactDAQ

El CompactDAQ (Compact Data Acquisition) de National Instruments es un sistema modular de adquisición de datos diseñado para aplicaciones industriales que requieren portabilidad, robustez y alta precisión. Su arquitectura se basa en un chasis cDAQ-91784 que se conecta a una computadora mediante interfaces USB 3.0, y admite hasta 4 módulos

intercambiables en caliente para acondicionamiento de señales y conexión directa de sensores (National Instruments, 2023).



Figura 1.5 Chasis NI cDAQ-9174 de National Instruments (National Instruments, 2023).

Módulos Especializados:

1.5.6.1 NI 9225

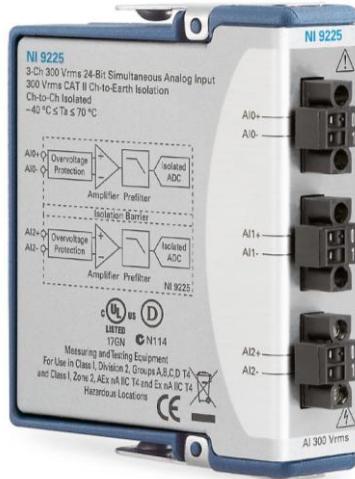


Figura 1.6 Módulo NI 9225 de National Instruments (National Instruments, 2025).

El NI 9225 es un módulo de adquisición de datos analógicos de alta precisión diseñado por National Instruments para aplicaciones con voltajes, integrado a sistemas CompactDAQ. Posee 3 canales diferenciales simultáneos con aislamiento galvánico y una resolución de 24 bits, con un rango de entrada de hasta 300 Vrms. Tiene un muestreo máximo de 50 kS/s por canal, por lo

cual resulta esencial para el análisis detallado de formas de onda en sistemas eléctricos, monitoreo de la calidad de energía y otras mediciones eléctricas (National Instruments, 2025).

1.5.6.2 NI 9227

El NI 9227 es un módulo de entrada analógica de corriente desarrollado por National Instruments, diseñado para efectuar mediciones, monitoreo de energía y análisis de calidad de potencia. Este dispositivo cuenta con cuatro canales analógicos simultáneos, una resolución de 24 bits y una frecuencia máxima de muestreo de 50 kS/s por canal. Gracias a su alta precisión y bajo nivel de ruido, es adecuado para la medición de corriente, potencia y calidad de energía en sistemas eléctricos, incluyendo el análisis de ruido, frecuencia y armónicos (National Instruments, 2025).

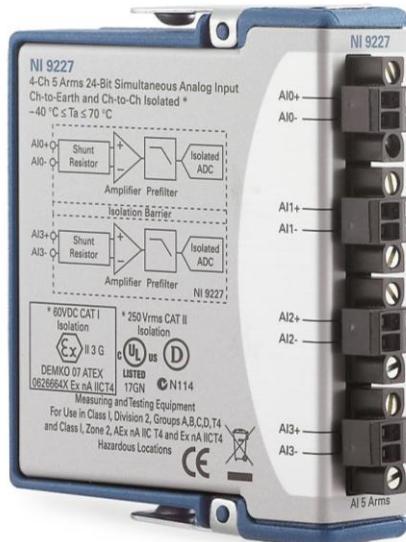


Figura 1.7 Módulo NI 9227 de National Instruments (National Instruments, 2025)

1.5.6.3 NI 9234

El NI 9234 es un módulo de adquisición de datos orientado a la medición de sonido y vibración, desarrollado por National Instruments para la serie C. Este dispositivo cuenta con

cuatro canales analógicos de entrada simultánea y ofrece una resolución de 24 bits, permitiendo la captura precisa de señales provenientes de sensores piezoeléctricos y otros transductores. Su tasa máxima de muestreo es de 51.2 kS/s por canal, con un rango de entrada de ± 5 V (National Instruments, 2025).



Figura 1.8 Módulo NI 9234 de National Instruments (National Instruments, 2025)

1.5.6.4 NI 9485



Figura 1.9 Módulo NI 9485 de National Instruments (National Instruments, 2025).

El NI 9485 es un módulo digital de salida desarrollado por National Instruments para plataformas CompactDAQ y CompactRIO. Está diseñado para controlar cargas industriales mediante ocho salidas digitales de relé de estado sólido (SSR). Cada canal puede conmutar cargas de hasta 60 VDC y 750 mA, permitiendo controlar actuadores como contactores, solenoides o indicadores visuales en aplicaciones de automatización y monitoreo. Su velocidad de conmutación y capacidad de soportar ambientes industriales lo hacen adecuado para tareas como la activación de alarmas o el control de procesos en sistemas SCADA desarrollados en LabVIEW (National Instruments, 2024).

1.5.7 Sensor Piezoeléctrico

Los sensores piezoeléctricos son transductores que convierten energía mecánica (vibraciones) en señales eléctricas proporcionales, gracias al efecto piezoeléctrico de materiales como el cuarzo o la cerámica PZT (Gautschi, 2002). Su alta sensibilidad y rango de frecuencia (0.1 Hz – 20 kHz) los hace indispensables para diagnóstico de fallos en maquinaria rotativa (ISO 5348:2021) (International Organization for Standardization (ISO), 2021).



Figura 1.10 Model 352C33 – ICP® quartz accelerometer (PIEZOTRONICS, 2021).

En sistemas de monitoreo predictivo, los acelerómetros piezoeléctricos tipo IEPE (Integrated Electronics Piezo-Electric), como los de la serie 352 de PCB Piezotronics, destacan

por su capacidad para medir vibraciones en rangos típicos de 0.5–10,000 Hz con sensibilidades del orden de 100 mV/g. Estos sensores, al conectarse a módulos de adquisición como el NI 9234 mediante interfaces BNC permiten capturar fenómenos mecánicos característicos como armónicos y frecuencias fundamentales (PCB Piezotronics, 2023).

1.5.8 LabVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un programa desarrollado por National Instruments que facilita la creación de sistemas para medir, analizar y controlar datos usando una forma visual de programación basada en diagrama de bloques, en lugar de escribir código complicado. Su integración nativa con hardware como tarjetas y módulos de adquisición de datos propios de National Instruments y su flexibilidad para procesar señales en tiempo real y su compatibilidad con protocolos industriales lo hacen idóneo para sistemas SCADA. (National Instruments, 2025).



Figura 1.11 Logotipo oficial del entorno de programación LabVIEW de National Instruments (Instruments, National, 2025).

1.5.9 Protocolo MQTT

Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) es un protocolo de comunicación industrial que destaca por su arquitectura ligera y eficiente lo que lo ha convertido en un estándar para la comunicación en ambientes industriales (OASIS Standard, 2019). Su

modelo publish/subscribe permite la transmisión de datos desde sensores y dispositivos de adquisición hacia plataformas de supervisión, su arquitectura permite que múltiples dispositivos (clientes MQTT) envíen y reciban mensajes a través de un servidor central llamado bróker, el cual administra las publicaciones y distribuye los mensajes a los suscriptores correspondientes (Hunkeler, Truong, & Stanford-Clark, 2008).

Una de las ventajas clave de MQTT es su integración nativa con LabVIEW a través de bibliotecas como MQTT Client API, lo que permite configurar flujos de datos bidireccionales entre sistemas de adquisición y servidores centralizados (National Instruments, 2024). Al utilizar este protocolo, los datos adquiridos pueden ser enviados de forma continua o bajo eventos específicos hacia interfaces SCADA o plataformas en la nube, permitiendo la visualización remota, el análisis y la generación de alarmas (IEEE, 2023).

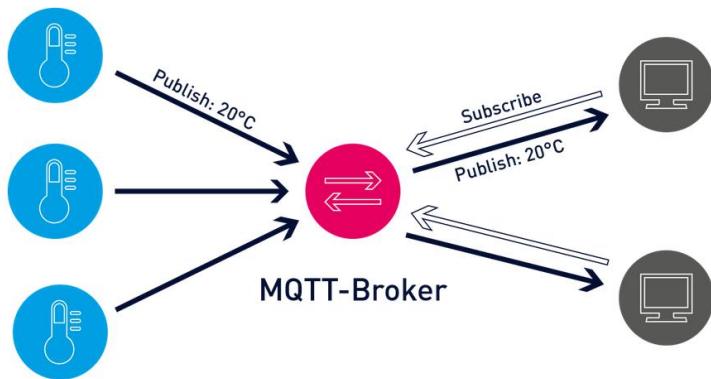


Figura 1.12 Diagrama de arquitectura MQTT mostrando el flujo de datos (Paessler, 2019).

1.5.10 Grafana Labs

Grafana Labs es una plataforma de código abierto especializada en visualización y análisis de series temporales, ampliamente adoptada en entornos industriales para el monitoreo predictivo (Grafana Labs, s.f.). Su capacidad para integrar múltiples fuentes de datos, incluyendo sistemas de adquisición como tarjetas de adquisición y protocolos como MQTT, lo posiciona como una solución robusta para el análisis de condiciones (Mccollam, 2022).

Su arquitectura escalable y basada en web permite el acceso remoto a los datos de condición de máquinas, facilitando el monitoreo distribuido en plantas industriales (Grafana Labs, s.f.). Esta característica resulta particularmente valiosa para sistemas de mantenimiento predictivo que requieren supervisión en tiempo real desde múltiples ubicaciones.



Figura 1.13 Logotipo de Grafana Labs (Labs, 2024)

1.5.11 Norma ISO 10816

Las normas ISO 10816 son un estándar internacional que establece las directrices y criterios para la medición y evaluación de vibración en máquinas industriales rotativas, utilizando principalmente el valor eficaz (RMS) de la velocidad de vibración en partes no giratorias del equipo (Rodesprex, 2025). Esta norma clasifica las máquinas en diferentes categorías según características como potencia, velocidad, y define límites de vibración aceptables para asegurar su funcionamiento fundamental para el mantenimiento predictivo, permitiendo detectar problemas tempranos en la maquinaria, optimizar la planificación del mantenimiento y prolongar la vida útil de los equipos, además de facilitar el control de calidad y la comparación del estado operativo entre distintas máquinas.

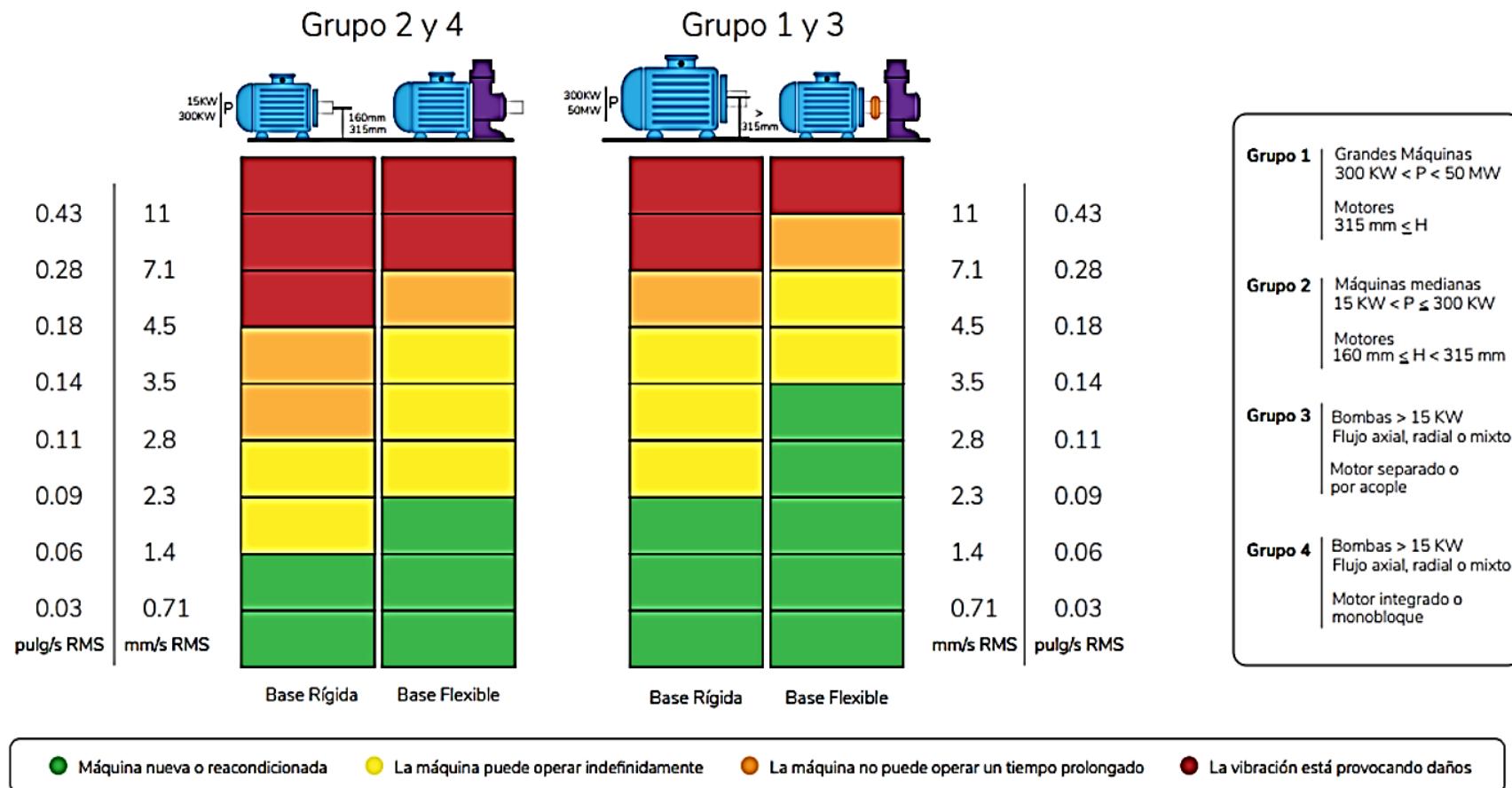


Figura 1.14 Límites permisibles en base a la norma ISO 10816 (Castro, 2024)

1.6 Diagnóstico de vibraciones

El diagnóstico de vibraciones se considera como uno de los pilares principales en la ingeniería de mantenimiento de las máquinas de la industria, ya que permite validar problemas que pueden estar afectando la operatividad de máquinas con sus respectivos equipos. Las vibraciones generadas por una máquina pueden deberse a distintos factores, como por ejemplo desequilibrios en los rotores, desalineamientos, fallos de los cojinetes, resonancias de tipo estructural, etc. Las vibraciones suelen generar frecuencias que pueden ser utilizadas para realizar espectros de vibración, permitiendo que se pueda determinar la naturaleza del problema, así como la localización de este dentro del sistema en el que está. Un punto muy importante de la analítica es el análisis de fase, permitiendo observar las frecuencias en distintos puntos de la máquina y de esta forma detectando problemas como el fenómeno del desequilibrio estático, dinámico y desequilibrio de par, así como otro tipo de problemas mecánicos haciendo uso de la Tabla ilustrada de diagnóstico de vibraciones (Technical Associates of Charlotte, s.f.).

CAPÍTULO 2

2.1 Metodología

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo de desarrollo tecnológico orientado al diseño, implementación y validación de un sistema de monitoreo predictivo para motores eléctricos. Esta metodología permite integrar el análisis sistemático de datos con la validación experimental del sistema en condiciones controladas, cumpliendo tanto objetivos didácticos como de aplicación industrial.

Este proyecto se enmarca en una investigación aplicada, ya que busca resolver un problema concreto: la carencia de herramientas de monitoreo predictivo accesibles y didácticas en el Laboratorio de Instrumentación Industrial. Asimismo, se emplea el método experimental para evaluar el comportamiento del motor eléctrico bajo diferentes condiciones operativas mediante la adquisición, procesamiento y análisis de parámetros físicos.

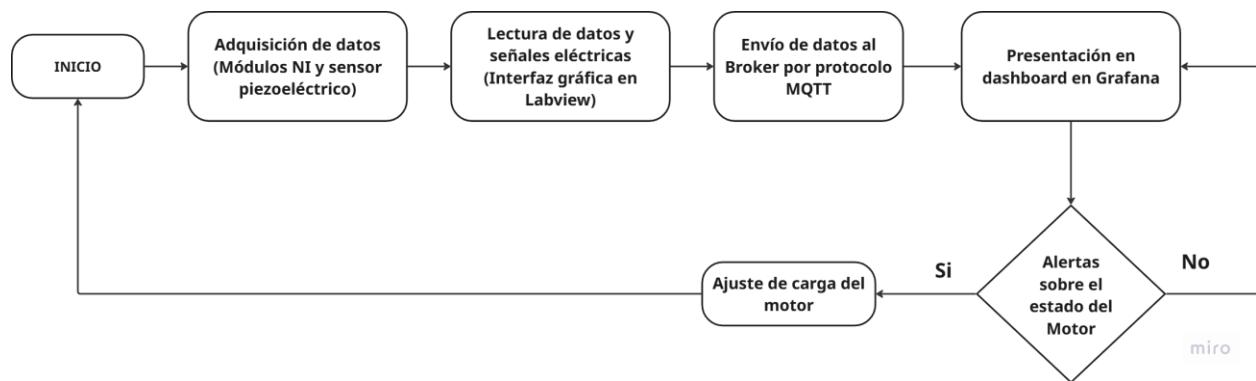


Figura 2.1 Diagrama de flujo del proceso de adquisición, transmisión y análisis de datos.

La Figura 2.1 representa la arquitectura a utilizar en el sistema de monitoreo predictivo a implementar, el cual se enfoca en tener un procesamiento distribuido y comunicación en tiempo real. El flujo de información comprende cinco módulos interconectados que operan de manera secuencial y cíclica, con un sistema de retroalimentación para ajuste de parámetros operacionales.

El diseño asegura la escalabilidad del sistema y su adaptabilidad a diferentes configuraciones de motores eléctricos, cumpliendo con los requerimientos tanto de formación académica como de aplicación en entornos industriales.

2.2 Análisis de vibraciones y normas ISO 10816

El método empleado en la realización de las mediciones en los motores consiste en el análisis de vibraciones, ejecutado conforme a las directrices de la norma ISO 10816. En donde, se establece los límites permisibles para las vibraciones, considerando valores globales de velocidad en el rango de 10 Hz a 1000 Hz y de aceleración entre los 500 Hz y 16 kHz, tomando en cuenta además la clasificación de las máquinas rotativas según su tamaño como grandes, medianas o bombas, refiriéndose a las pequeñas. Para este análisis se utilizaron los gráficos que relacionan los límites de velocidad teniendo como unidades de medición mm/s sobre Hz, y la velocidad de operación del motor, lo que permitió determinar si la maquina está en condiciones óptimas, aceptable para la operación continua, si requiera de atención próxima o si el nivel de vibración es crítico y pueda generar daños.

En este contexto, el análisis de vibraciones se convierte en una herramienta fundamental para las industrias, ya que permite estudiar las posibles fallas en los equipos bajo condiciones normales de operación, prevenir interrupciones no planificadas y riesgos operativos. Además, ayuda a definir acciones de mantenimiento que contribuyan a mejorar la seguridad y la calidad del trabajo realizado.

Por otro lado, los estándares ISO proporcionan marcos normativos que establecen la calidad de los motores, en particular define los criterios para los valores de vibración en

maquinaria, presentando tablas con los límites máximos permisibles en función del tipo de máquina, rigidez y potencia, tales como se observa en la siguiente tabla.

Tabla 2.1
Tabla de severidad de vibración

Máquina			Caso I	Caso II	Caso III	Caso IV
Velocidad de la vibración V_{rms}	[pulg/s]	[mm/s]	Máquina pequeña	Máquina mediana	Máquina grande con fundación rígida	Máquina grande con fundación no rígida
	0.01	0.28				
	0.02	0.45				
	0.03	0.71			Bueno	
	0.04	1.12				
	0.07	1.80				
	0.11	2.80			Satisfactorio	
	0.18	4.50				
	0.28	7.10			Insatisfactorio	
	0.44	11.2				
	0.70	18.0				
	0.71	28.0			Inaceptable	
	1.10	45.0				

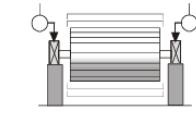
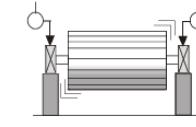
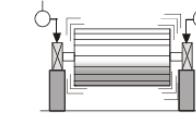
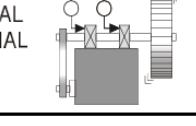
Fuente: Normas ISO 10816 (Montaño, 2023)

2.3 Diagnóstico de vibración

Para el diagnóstico de las vibraciones en sistemas rotativos se empleará un procedimiento de diagnóstico que está basado en la medición y el análisis de las frecuencias que son generadas por las vibraciones. En primer lugar, se desplegarán sensores de vibración en los puntos donde se espera que la máquina vibre de forma extrema, como, por ejemplo, en un punto axial (cerca del eje), en un punto radial (cerca del ventilador) y en una de las dos chumaceras.

Tabla2.2

Tabla de diagnóstico de vibraciones por Desequilibrio

FUENTE DEL PROBLEMA	ESPECTRO TÍPICO	RELACIÓN DE FASE	OBSERVACIONES
DESEQUILIBRIO DE MASA	1X RADIAL		El Desequilibrio Estático estará en fase y fijo. La amplitud debida al desequilibrio se elevará al cuadrado de la velocidad de giro debajo de la primera frecuencia crítica del rotor (un incremento de velocidad de $3X$ = vibración más alta en $9X$). 1X RPM siempre está presente y por lo general domina al espectro. Se puede corregir al colocar únicamente un peso de corrección de equilibrio en un plano en el centro de gravedad (CG) del Rotor. Debe existir una diferencia de fase de 0° aprox. entre los horizontales OB e IB, así como entre los verticales OB e IB. Además, por lo general existe una diferencia de fase de 90° aprox. entre las lecturas horizontales y verticales en cada apoyo de rotor desequilibrado ($\pm 30^\circ$).
A. DESEQUILIBRIO ESTÁTICO	1X RADIAL		El Desequilibrio Tipo Par origina un movimiento fuera de fase de 180° en el mismo eje. 1X RPM siempre se presenta y por lo general domina al espectro. La amplitud varía con el cuadrado de la velocidad en incremento debajo de la primera velocidad crítica del rotor. Puede causar una alta vibración axial así como radial. Para su corrección se requiere colocar pesos de equilibrio en por lo menos 2 planos. Observe que debe existir una diferencia de fase de 180° aprox. entre los horizontales OB e IB, así como entre los verticales OB e IB. Además, por lo general existe una diferencia de fase de 90° aprox. entre las lecturas horizontales y verticales en cada apoyo ($\pm 30^\circ$).
B. DESEQUILIBRIO TIPO PAR	1X RADIAL		El Desequilibrio Dinámico es el más común y es una combinación de desequilibrio de estático y de par. 1X RPM domina el espectro, y realmente requiere una corrección de 2 planos. Aquí, la diferencia de fase radial entre los apoyos internos y externos puede abarcar un rango de 0° a 180° . Sin embargo, la diferencia en fase de los apoyos horizontales será similar a la diferencia entre las fases verticales ($\pm 30^\circ$). Así mismo, en caso de que predomine el desequilibrio, una diferencia de fase de 90° aprox. resultará entre las lecturas horizontal y vertical de cada apoyo ($\pm 40^\circ$).
C. DESEQUILIBRIO DINÁMICO	1X RADIAL		El Desequilibrio del Rotor En Cantilibré causa 1X RPM alto en ambas direcciones axial y radial. Las lecturas axiales tienden a estar en fase mientras que las lecturas radiales pueden ser inestables. Sin embargo, las diferencias de la fase horizontal coincidirán por lo general con las diferencias de fase vertical en el rotor desequilibrado ($\pm 30^\circ$). Estos rotores presentan desequilibrios estático y par. Por lo tanto, los pesos de corrección siempre tendrán que colocarse en 2 planos para contrarrestarlos.
D. DESEQUILIBRIO DE ROTORES EN CANTILIBRE	1X AXIAL & RADIAL		

Fuente: Technical Associates of Charlotte

A continuación se llevarán a cabo mediciones dinámicas en condiciones operativas en distintas masas que se han cargado al eje en distintas posiciones separadas por ángulos de 90° , de manera que obtenemos dicho espectro para analizarlo y poder corroborar las frecuencias dominantes y las frecuencias armónicas de la misma, comparando todas ellas con los patrones de fallo más comunes en sistemas rotativos, como puede ser el caso de un cierto desequilibrio, la posibilidad de un desalineamiento, defectos en los tambores, etc. También se recurre al análisis de fase como una metodología de estudio para poder apreciar la existencia de variaciones en las fases de las señales de las vibraciones y poder asociarlas a las características estructurales del sistema.

Tabla 2.3

Tabla de diagnóstico de vibración por Holgura mecánica

FUENTE DEL PROBLEMA	ESPECTRO TÍPICO	RELACIÓN DE FASE	OBSERVACIONES
HOLGURA MECÁNICA	RADIAL TIPO A	PLACA BASE PATA DE LA MAQUINA BASE DE CONCRETO	La Holgura Mecánica se indica a través de un espectro de vibración de Tipo A, B o C. El Tipo A se debe a una holgura/fragilidad estructural de las bases de la máquina, de la placa base o del cimiento; también se debe a un mortero deteriorado, a pernos de sujeción sueltos en la base; y a la distorsión del armazón o de la base (i.e. pata suave). El análisis de fase puede revelar una diferencia de fase de aprox. 90° a 180° entre las lecturas verticales en el perno, en la base de la máquina, en la placa base y en la base en sí. El Tipo B por lo general se debe a pernos de soporte flojos, a fracturas en la estructura del armazón o en el pedestal del rodamiento.
	RADIAL TIPO B		El Tipo C normalmente se genera a causa de un ajuste inadecuado entre las partes componentes originando muchas armónicas debido a la respuesta no lineal de las partes sueltas a las fuerzas dinámicas del rotor. Causa un truncamiento de la forma de onda y un piso de ruido mayor en el espectro. Con frecuencia el Tipo C se debe a que el eje exterior del rodamiento está flojo en su tapa, a un rodamiento suelto y que da vueltas en su eje, a un claro excesivo en cojinetes planos y rodamientos, o por un impulsor suelto en su eje, etc. Con frecuencia la Fase del Tipo C es inestable y puede variar entre lectura y lectura, sobre todo si el rotor cambia de posición en el eje de un arranque a otro. A menudo, la Holgura Mecánica es altamente direccional y puede provocar lecturas notablemente diferentes si se comparan los niveles en incrementos de 30° en dirección radial en toda la caja del rodamiento. Además, tenga en cuenta que la holgura con frecuencia provoca múltiples sub-armónicas a exactamente $\frac{1}{3}$ RPM (.5X, 1.5X, 2.5X, etc.).
	TIPO C OBSERVE EL PISO DE RUIDO ELEVADO QUE INDICA LA HOLGURA		
ROZAMIENTOS DEL ROTOR	ONDA APLANADA TRUNCADA	RADIAL	Un rozamiento del rotor produce un espectro similar al de la Holgura Mecánica cuando las partes rotativas tocan los componentes estacionarios. El contacto puede ser parcial o a lo largo de toda la revolución del eje. Normalmente se genera una serie de frecuencias, que por lo general excitan una o más resonancias. Con frecuencia excitan sub-armónicas de 1X (1/2, 1/3, 1/4, 1/5, ..., 1/n), dependiendo de la ubicación de las frecuencias naturales del rotor. El rozamiento puede excitar muchas altas frecuencias (similar al ruido de banda ancha cuando un gis se pasa por el pizarrón). Puede ser muy serio y de corta duración si se debe a un eje que toca el metal babbitt del cojinete plano. En el caso de cojinetes planos el problema se puede convertir en severo cuando se presenta rozamiento en toda la periferia del cojinete y el rotor se encuentra vibrando a la frecuencia de latigüeo de aceite.

Fuente: Technical Associates of Charlotte

2.4 Arquitectura del sistema

El modelo presentado para este proyecto busca la integración de sensores y módulos de adquisición de datos orientados al ámbito académico, por lo que se utilizará LabVIEW y hardware de National Instruments. Estos elementos nos permiten monitorear en tiempo real parámetros de un motor eléctrico y transmitirlos a plataformas webs para su visualización.

2.5 Componentes del Hardware de adquisición de datos

A continuación, se describen los principales componentes de hardware utilizados para la adquisición de datos, enfocados en el monitoreo de vibraciones, corriente y voltaje en el motor eléctrico.

2.5.1 Módulo NI 9225 – Medición de voltaje

Tabla 2.4
Especificaciones técnicas del módulo NI9225

Característica	Especificación
Tipo de Entrada	Analógica
Canales	3
Rango	± 300 Vrms
Resolución	24 bits
Frecuencia de muestreo	Hasta 50 kS/s por canal
Compatibilidad	CompactDAQ, CompactRIO

Fuente: National Instruments. User manual NI 9225.

2.5.2 Módulo NI 9227 – Medición de corriente

Tabla 2.5
Especificaciones técnicas del módulo NI 9227.

Característica	Especificación
Tipo de Entrada	Analógica
Canales	4
Rango	± 5 Arms
Resolución	24 bits
Frecuencia de muestreo	Hasta 50 kS/s por canal
Compatibilidad	CompactDAQ, CompactRIO
Impedancia de Entrada analógica	250 Vrms aislamiento entre canales

Fuente: National Instruments. NI 9227 Product page.

2.5.3 Módulo NI 9234 – Medición de vibraciones

Tabla 2.6
Especificaciones técnicas del módulo NI 9234

Característica	Especificación
Tipo de Entrada	Analógica
Canales	4
Resolución	24 bits
Rango	± 5 V
Frecuencia de muestreo	Hasta 51.2 kS/s por canal
Tipo de Conexión frontal	BNC
Compatibilidad	CompactDAQ, CompactRIO
Aplicación principal	Sensores IEPE

Fuente: National Instruments. NI 9234 Specifications.

2.5.4 Módulo NI 9485 – Salidas digitales

Tabla 2.7
Especificaciones técnicas del módulo NI 9485.

Características	Especificación
Tipo de Salida	Digital (relé de estado sólido)
Canales	8 relés SSR (SPST-NO)
Rango	5 – 60 VDC
Corriente	1 A máximo por canal
Tiempo de respuesta	< 100 μ s
Compatibilidad	CompactDAQ, CompactRIO
Aplicación principal	Activación de dispositivos externos

Fuente: National Instruments. NI 9234 Specifications.

2.5.5 Sensor Piezoelectrónico – Acelerómetro

Tabla 2.8

Especificaciones técnicas del sensor piezoelectrónico.

Características	Especificación
Tipo de sensor	IEPE
Rango de medición	± 50g
Sensibilidad	~100 mV/g
Frecuencia de respuesta	0.5 Hz – 10 kHz
Tipo de salida	Analógica
Alimentación	excitación constante de 2–20 mA
Modelo	352C33

Fuente: PCB Piezotronics. (2023). Model 352C33 – ICP® Accelerometer.

2.6 Configuración del entorno de programación LabVIEW

Una vez integrados los componentes físicos del sistema, es necesario establecer la interfaz de comunicación entre el hardware de adquisición y la plataforma de supervisión en tiempo real del motor eléctrico. Esta interfaz se implementa mediante el entorno de programación gráfica LabVIEW, que ofrece herramientas específicas para la configuración de drivers, adquisición y procesamiento digital de señales, así como la ejecución de algoritmos de análisis en tiempo real.

2.7 Adquisición de señales eléctricas

En esta etapa se capturan las señales de voltaje y corriente generadas por el motor eléctrico durante su operación, a través del bloque DAQ Assistant en el entorno LabVIEW, este bloque fue configurado para realizar una adquisición continua de datos en tiempo real,

estableciendo una frecuencia de muestreo específica y definiendo los canales de entrada correspondientes a cada parámetro eléctrico monitoreado.

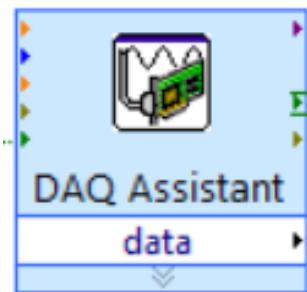


Figura 2.2 Bloque DAQ Assistant

La configuración comprende dos canales uno para la medición de voltaje y el otro para la medición de corriente, tal como se muestra a continuación en las siguientes figuras.

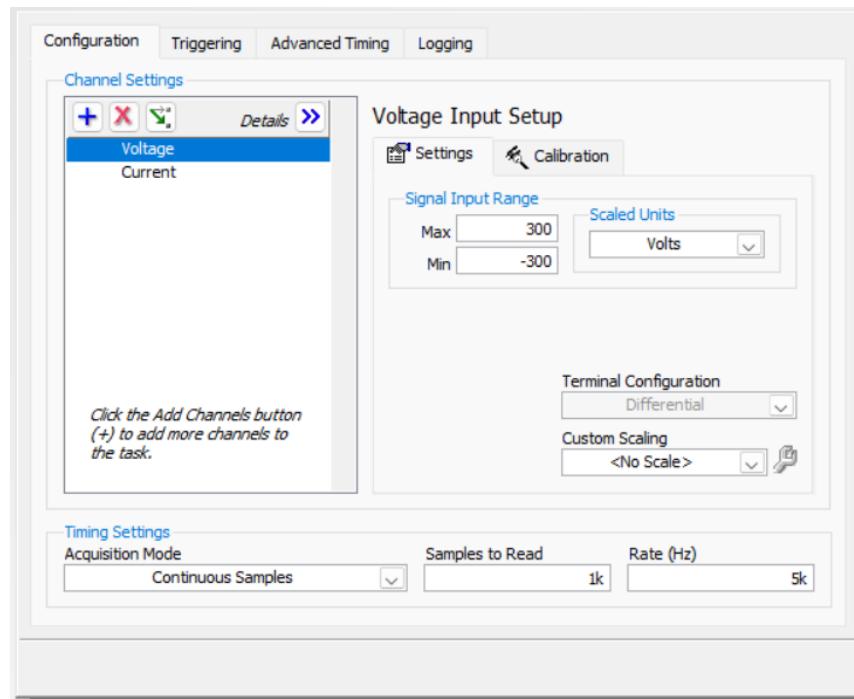


Figura 2.3 Configuración del DAQ Assistant para la adquisición de voltaje.

La Figura 2.3 presenta la ventana de configuración del bloque *DAQ Assistant* en LabVIEW, donde se establecen los parámetros de entrada como el rango de voltaje (-300 V a 300 V), la

frecuencia de muestreo (5 kHz) y la cantidad de muestras por lectura (1000). Esta configuración asegura una toma de datos de las señales eléctricas provenientes del motor eléctrico.

Considerando que el sistema opera con motores eléctricos alimentados por una red de 120 V RMS (aproximadamente 170 V pico), se estableció un rango de medición de ± 300 V. Esta configuración proporciona un margen de seguridad adecuado para prevenir la saturación de la señal durante variaciones transitorias o condiciones operacionales fuera de los parámetros nominales.

Esta elección también va de acuerdo con las especificaciones técnicas del módulo NI 9225, garantizando lecturas estables en todas las condiciones de prueba. Adicionalmente, la implementación del modo diferencial de medición minimiza la interferencia por ruido eléctrico, mientras que la frecuencia de muestreo de 5 kHz permite la captura de componentes armónicos relevantes para el posterior análisis.

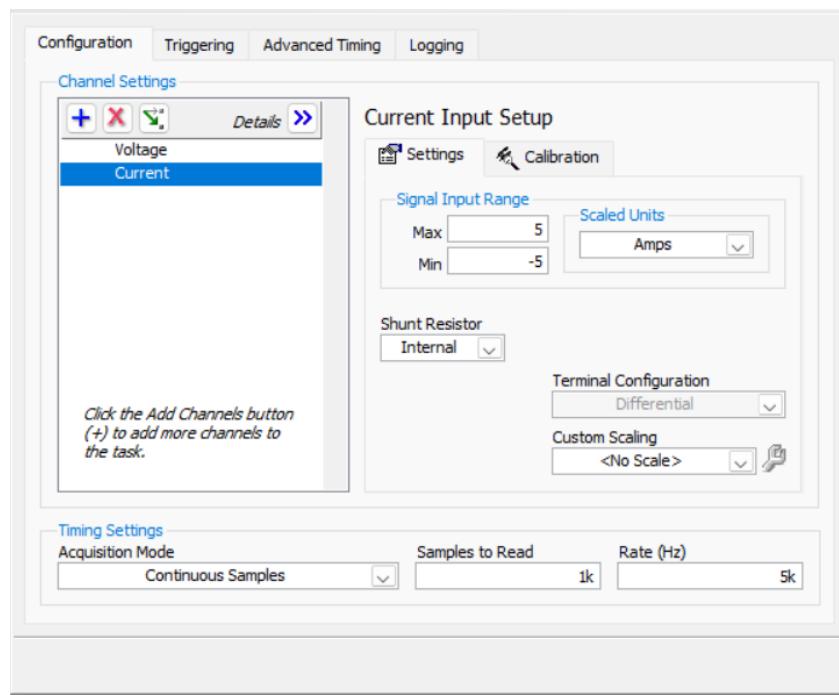


Figura 2.4 Configuración del DAQ Assistant para la adquisición de corriente.

La Figura 2.4 detalla la configuración específica del canal de entrada para la medición de corriente en el bloque *DAQ Assistant* de LabVIEW. Los parámetros establecidos comprenden un

rango de medición de -5 A a 5 A, modo de adquisición continua, frecuencia de muestreo de 5 kHz y 1000 muestras por ciclo de lectura. Esto permite monitorear el comportamiento de la corriente mientras el motor se encuentre en operación.

El rango de medición de ± 5 A se dimensiona para abarcar los niveles de corriente esperados del motor tanto en condiciones operacionales normales como en estados transitorios. Esta selección permite capturar eventos como picos de arranque o fluctuaciones asociadas a variaciones de carga mecánica, mientras que el muestreo continuo garantiza un monitoreo ininterrumpido sin pérdida de información, proporcionando la base de datos necesaria para el análisis predictivo del comportamiento eléctrico del motor.

2.8 Adquisición de la señal de vibraciones

Para la medición de vibraciones mecánicas en el motor eléctrico, se implementa un segundo bloque DAQ Assistant independiente, debido a los requerimientos específicos de acondicionamiento que demandan las señales provenientes del sensor piezoelectrónico. Esta configuración utiliza el módulo de entrada NI 9234, diseñado específicamente para la adquisición de señales dinámicas, el cual presenta características de muestreo y acondicionamiento distintas respecto a los módulos destinados a señales eléctricas.

La implementación de bloques de adquisición independientes permite la optimización individual de parámetros como el tipo de acoplamiento (AC), la frecuencia de muestreo y los filtros de procesamiento, garantizando la captura adecuada de vibraciones de alta frecuencia sin comprometer el rendimiento del sistema de adquisición de señales eléctricas.

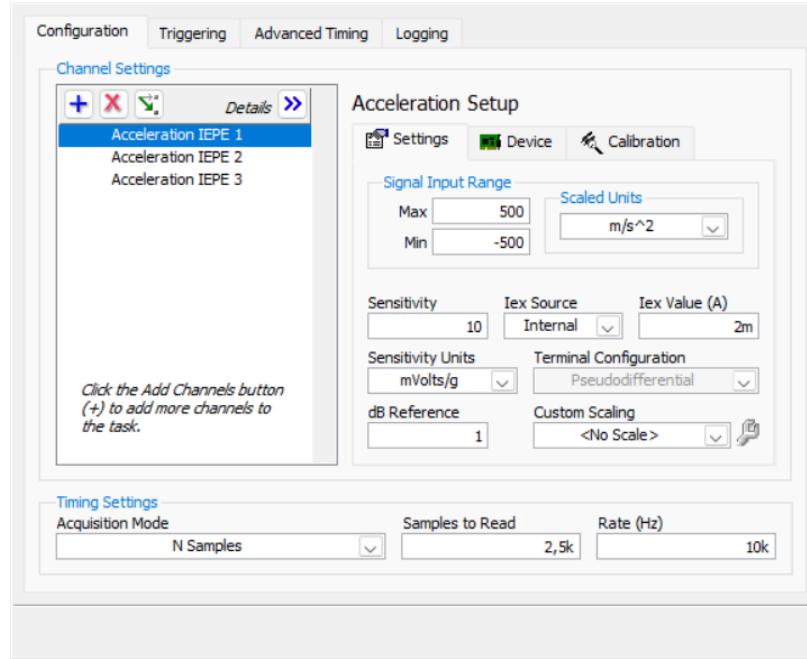


Figura 2.5 Configuración del DAQ Assistant para adquisición de vibración.

Como se observa en la Figura 2.5 la configuración del bloque DAQ Assistant establece los parámetros específicos para la adquisición de señales dinámicas de vibración. La sensibilidad configurada de 10 mV/g corresponde al valor nominal del sensor mientras que la fuente de corriente IEPE interna proporciona los 2 mA requeridos para la correcta alimentación del acelerómetro. Se eligió un rango amplio de ± 500 m/s² para prevenir saturaciones durante picos transitorios de vibración, garantizando la integridad de la señal en todas las condiciones operacionales.

La habilitación del modo de muestreo continuo facilita el monitoreo ininterrumpido del comportamiento vibratorio del motor eléctrico proporcionando la base de datos necesaria para el análisis de condiciones mecánicas.

2.9 Procesamiento de señal de vibración

El procesamiento de la señal de vibración se implementa mediante tres bloques funcionales en LabVIEW: filtrado, integración y análisis espectral (FFT). Esta arquitectura modular

acondiciona la señal del acelerómetro reduciendo ruido, transformando aceleración en velocidad mediante integración y extrayendo el contenido frecuencial para la detección temprana de fallas mecánicas.

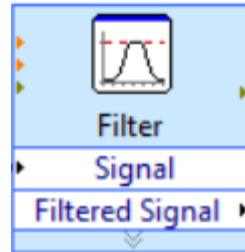


Figura 2.6 Bloque de filtro digital.

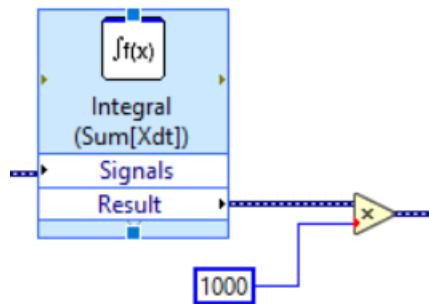


Figura 2.7 Bloque de Integración

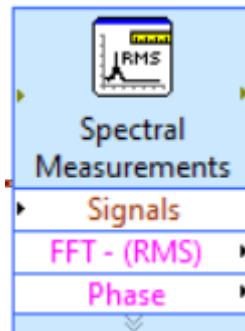


Figura 2.8 Bloque Spectral Measurements para el análisis FFT.

Para el acondicionamiento de las señales de vibración se implementa un filtro digital pasa banda IIR Butterworth de orden 3, con frecuencias de corte establecidas en 10 Hz y 1000 Hz. Esta selección paramétrica elimina el ruido de baja frecuencia y las interferencias

electromagnéticas de alta frecuencia, preservando exclusivamente el contenido espectral relevante para la identificación de patrones característicos de fallas mecánicas.

La conversión de señales de aceleración a velocidad se realiza mediante integración numérica utilizando el bloque Time Domain Math de LabVIEW. Se selecciona la operación integral (sum [Xdt]) en modo de cálculo continuo, permitiendo la transformación en tiempo real de las mediciones del acelerómetro a valores de velocidad de vibración.

Como ya se ha mencionado antes según las normas ISO 10816, el correcto eje en Y para la evaluación de la vibración tiene que ser en mm/s, dado esto se procede a usar una ganancia de 1000 multiplicando la salida de la operación integral dándonos el resultado requerido.

Para análisis espectral se implementa mediante el bloque Spectral Measurements configurado para calcular la magnitud RMS con ventana Hanning para minimizar las discontinuidades en los bordes de la señal temporal. Se eligió el formato Lineal para los resultados, con el objetivo de representar la intensidad de las componentes frecuenciales de forma directa.

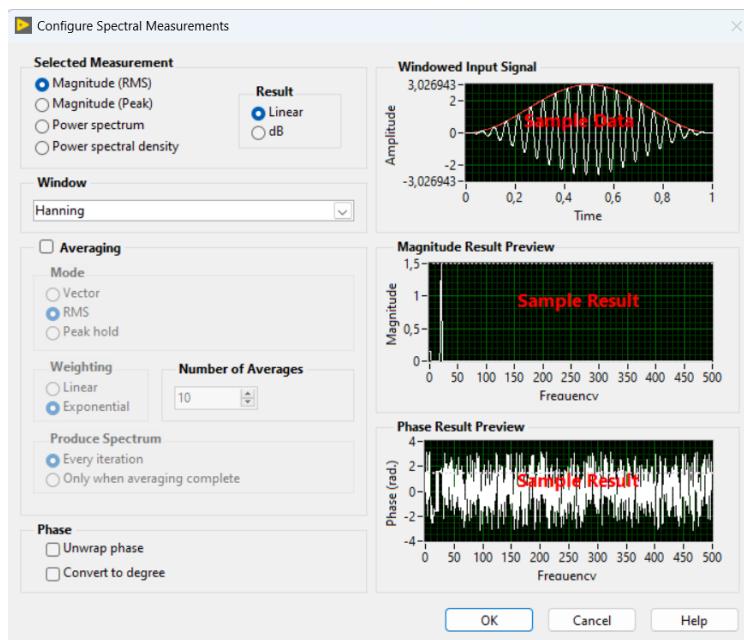


Figura 2.9 Configuración del bloque Spectral Measurements.

Cabe recalcar que la configuración Magnitud (RMS) nos permite enfocarnos directamente en la velocidad de la vibración, además nos ayuda a mantener las unidades de mm/s, estableciendo las condiciones para el criterio de evaluación.

2.10 Determinación del estado inicial del motor

Tabla 2.9
Datos del motor del Laboratorio de Instrumentación Industrial

Característica	Especificación
Marca	TEKNO
Voltaje	110 V
Corriente	2.1 A
Frecuencia	60 Hz
RPM	3450
Potencia	0.37 kW

Fuente: Laboratorio de Instrumentación Industrial (Placa del motor).

Antes de realizar las pruebas para identificación de niveles de falla en el motor, es de vital importancia conocer el estado inicial del motor, esto incluye tanto componentes internos como externos y saber en qué condiciones se encuentra operando. Este análisis es fundamental ya que nos permitió tener una base de la cual se pudo partir para poder realizar una comparación de datos conforme se realizaron las pruebas. Además, este proceso ayuda a garantizar la condición de los componentes internos del motor.

- Cabe recalcar que para la obtención de datos del estado del motor no se hizo uso de un variador de frecuencia, el motor ya ha tenido tiempo en el Laboratorio de Instrumentación Industrial sin mantenimiento y se ha usado para proyectos anteriores.
- Se usaron 2 acelerómetros ubicados estratégicamente para obtener las vibraciones con un significativo tipo de intensidad. El primero ubicado cerca del eje del motor, y el segundo ubicado en la parte del ventilador.

- Finalmente, se utilizó la norma de límites permisibles de vibraciones ISO10816, de tal manera que se pudo identificar las fallas de desalineación, desbalanceo, holgura mecánica o desgaste de rodamientos.

Proceso de medición de parámetros del motor

Para un mejor entendimiento detallado del motor de la forma en la que se tomó las mediciones mediante los acelerómetros, es necesario saber que el motor se encuentra en conectado mediante un arranque usando pulsadores de inicio (Verde) y parada (rojo).

También cuenta con un sistema de protección de la fuente de alimentación a través de un breaker, que protege tanto el sistema eléctrico del Laboratorio de Instrumentación Industrial como el motor.

Una vez conectado el motor, es necesario asegurarse que todo el equipo de medición de datos está funcionando de manera correcta, para eso se debe verificar la conexión del CompactDAQ así como todos sus módulos. Se describe el procedimiento de la siguiente manera:

- Dentro del archivo del Block Diagram, se va a la pestaña “Tools” en donde se elegirá la opción de “Measurement & Automation Explorer”

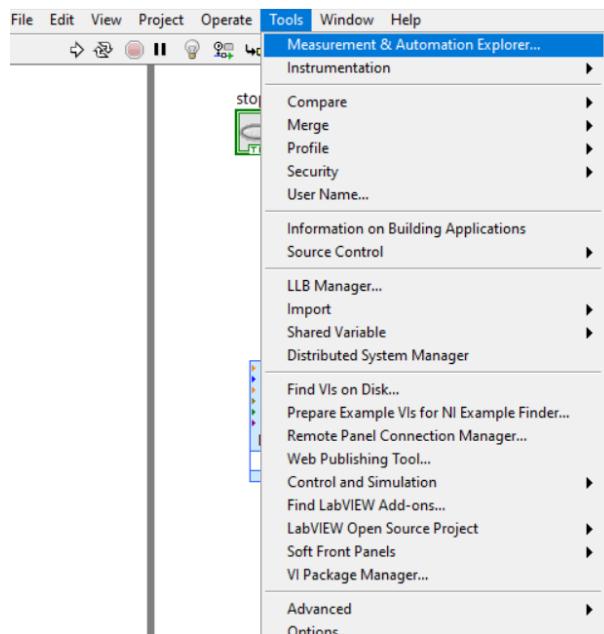


Figura 2.10 Pestaña "Tools"

- Dentro de la ventana de la pestaña de “Measurement & Automation Explorer”, ir a “Devices and Interfaces”, luego a “NI Cdaq-9174” en donde se desplegarán los módulos del CompactDAQ y su estado, estos deben tener un visto verde para saber que están conectados. Si tienen error de conexión se deben reiniciarlos o usar otro cable tipo B.

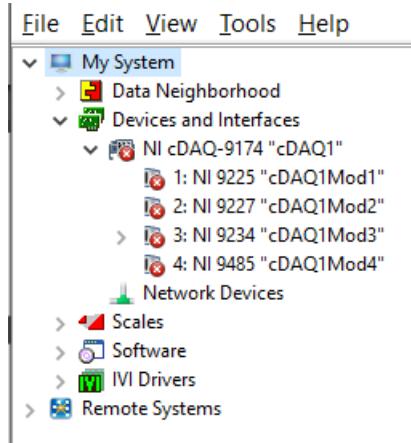


Figura 2.11 Pestaña "Measurement & Automation Explorer"

- Una vez que todo se encuentre correctamente conectado y funcionando, se procede a encender el motor, cabe recalcar que al probar el motor para saber su condición inicial no debe estar conectado al eje en el cual se procederá a realizar las pruebas de las fallas.

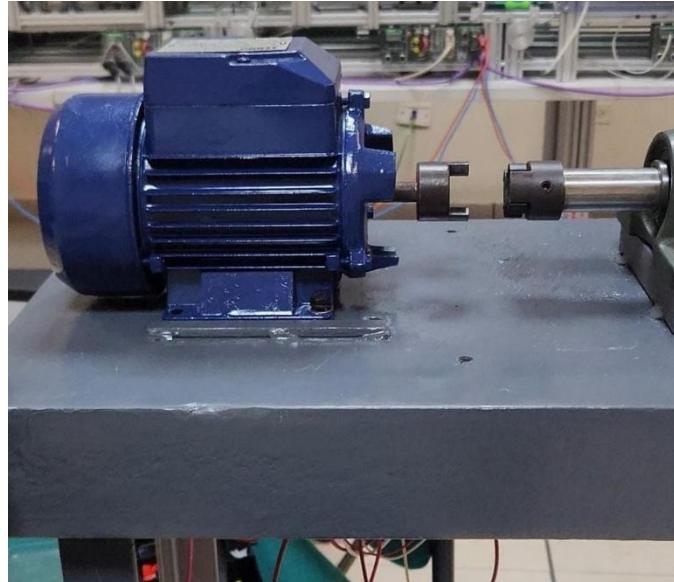


Figura 2.12 Motor desconectado del eje de desbalances

2.11 Pruebas que se realizarán al motor (desalineaciones al eje)

Para el desarrollo de esta investigación, se diseñó una metodología experimental que permitió recrear y estudiar diferentes escenarios de desbalanceo en el motor. Para ello, se utilizó un disco con orificios montado en el eje, lo que facilitó controlar de manera controlada la masa añadida o retirada mediante tuercas. Con este sistema, se llevaron a cabo pruebas, cada una con la intención de simular un tipo particular de desequilibrio. La recolección de datos de vibración se realizó mediante condiciones de operación constantes, garantizando la consistencia de las mediciones y permitiendo establecer una relación clara entre la distribución de las masas añadidas y los niveles de observación.

2.11.1 Prueba 1: Desbalanceo estático

El objetivo de esta primera prueba fue simular una condición de desbalanceo estático significativo. Para ello, se concentró toda la masa adicional en un solo punto del disco, colocando 2 tuercas en una única perforación. Esta configuración creó un desequilibrio de peso que se manifestó como una fuerza centrífuga constante en una sola dirección radial.



Figura 2.13 Masa añadida para el desbalanceo estático

La hipótesis central de este experimento era que la configuración generaría un patrón de vibración característico y fácilmente identificable. Se esperaba observar un pico de amplitud dominante en la frecuencia de rotación del motor (1X) en el espectro de vibración. La medición de la amplitud de este pico serviría como un valor de referencia para una condición de desbalanceo severo.

2.11.2 Prueba 2: Desbalanceo por Par

En esta segunda prueba, se buscó algo similar una condición de desbalanceo por par, a diferencia del balanceo estático, en esta configuración la masa se distribuyó de manera que el centro de masa permaneciera sobre el eje de rotación, pero creando un momento de fuerza. Para lograrlo, se colocaron 2 tuercas en dos perforaciones opuestas, separadas por 180° entre sí.

El análisis de esta prueba buscó identificar el impacto de este tipo de desbalanceo en el espectro de vibración. Se anticipó un pico de vibración en la frecuencia de rotación (1X) con una amplitud considerable. Sin embargo, se esperaba que el análisis de la fase de la vibración proporcionara información adicional y distinta a la de la primera prueba, lo que permitiría diferenciar claramente esta configuración y un desbalanceo estático.



Figura 2.14 Masa añadida para el desbalanceo por par

2.11.3 Prueba 3: Desbalanceo Angular

En esta última prueba se enfocó en simular una condición de desbalanceo angular, que es una situación común en la industria. Para crear este desequilibrio, se colocaron 2 tuercas en tres de las cuatro perforaciones, dejando una de ellas vacías.



Figura 2.15 Masa añadida para el desbalanceo angular

El análisis de esta configuración fue clave para entender cómo se manifiesta un desbalanceo combinado en el espectro de vibración. Se esperaba un pico en 1x tuviera una amplitud intermedia, mayor a la de la prueba 3 pero potencialmente menor que los desbalances concentrados de la prueba 1 y 2.

2.11.4 Prueba 4: Condición de referencia

La tercera prueba se diseñó para establecer una línea de base, representando la condición más cercana a un balanceo ideal del sistema. Para conseguirlo, se distribuyó la masa de manera uniforme en las cuatro perforaciones del disco, colocando 2 tuercas en cada una de las perforaciones. Al distribuir el peso de forma simétrica de 90° entre cada par, se buscó neutralizar las fuerzas centrifugas, minimizando así la vibración del conjunto.



Figura 2.16 Masa añadida para la condición referencia

Se hipotetizó que esta configuración produciría los menores niveles de vibración de todas las pruebas. El análisis espectral resultante mostraría una gráfica con una amplitud significativamente menor que en las otras condiciones de desbalanceo. Esta medición sería crucial para evaluar la severidad de las vibraciones generadas por los desbalances de las pruebas anteriores.

2.12 Desarrollo de la Interfaz de usuario en LabVIEW

Como hay dos maneras de arrancar el motor se implementó que al iniciar el programa en LabVIEW se despliega una pequeña ventana de diálogo que consulta al usuario sobre el tipo de control que está utilizando.

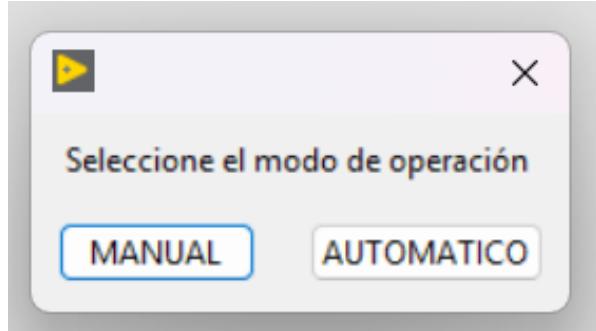


Figura 2.17 Ventana de selección de modo de operación

2.12.1 MODO MANUAL

Si se escoge el modo manual, el programa inicia inmediatamente la lectura y adquisición de datos del motor, manteniendo un monitoreo continuo de todos los parámetros hasta que el operador presione físicamente el botón de marcha ubicado en el tablero de control. Esta configuración permite realizar un seguimiento completo del comportamiento del motor desde el estado de reposo hasta su arranque, capturando datos valiosos durante la transición operativa.

2.12.2 MODO AUTOMÁTICO

En este modo el operador puede controlar digitalmente el arranque del motor y parada del motor a través de la interfaz desarrollada en LabVIEW. El diagrama de bloques muestra la implementación de salidas digitales que activan los relés correspondientes a través del modulo NI 9485 donde los botones "Automático" y "stop" permiten al usuario controlar remotamente el estado del motor sin necesidad de intervención física en el tablero. El LED indicador proporciona retroalimentación visual del estado operativo, mientras que el sistema continúa adquiriendo datos de monitoreo durante todo el proceso automatizado.

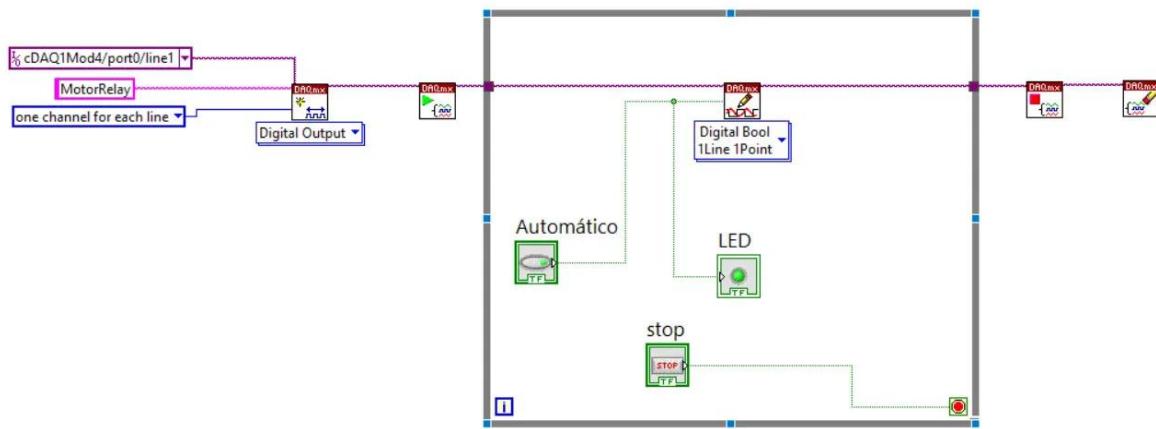


Figura 2.18 Diagrama de Bloques control con NI 9485

El bloque DAQmax Create Virtual Channel establece la comunicación directa entre LabVIEW y el módulo NI 9485. Este bloque gestiona las señales de control que activan los relés del motor.

2.12.3 CONFIGURACIÓN DE WAVEFORM CHARTS Y WAVEFORM GRAPH

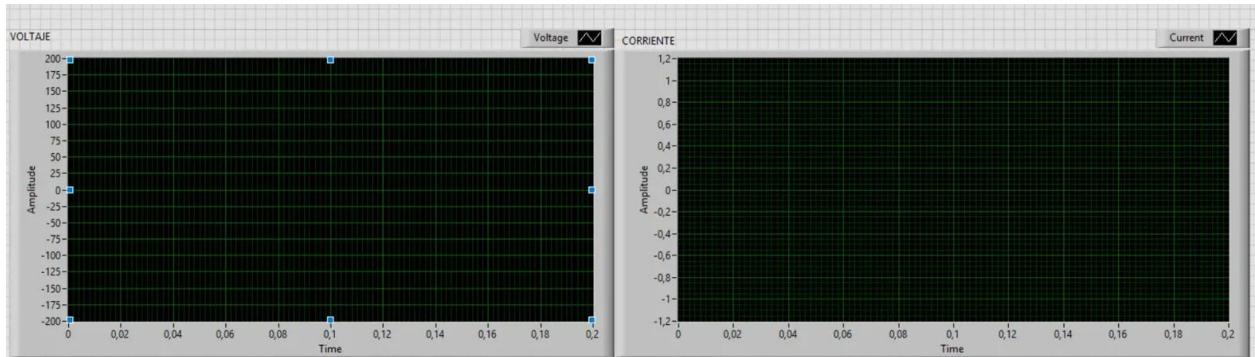


Figura 2.19 Waveform Graph de Voltaje y Corriente.

Los waveform iniciales corresponden a las señales de corriente y voltaje del motor, estos waveform graph permiten visualizar en tiempo real el comportamiento de las señales eléctricas y detectar cualquier variación o anomalía durante la operación del sistema de monitoreo.

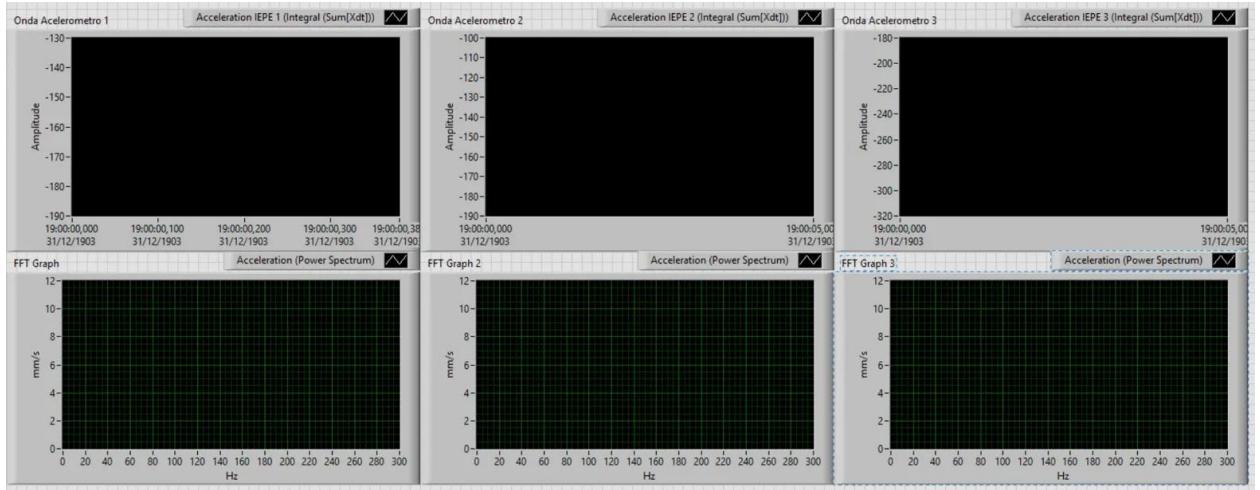


Figura 2.20 Waveform de Acelerómetros y análisis Espectral.

Los waveform charts superiores corresponden a las ondas originales de los sensores de vibración (Acceleration IEPE), mostrando la señal temporal directa de cada acelerómetro, los waveform graph inferiores corresponden al análisis spectral FFT (Power Spectrum) de estas señales, desplegando el contenido frecuencial hasta 300 Hz. Como configuración del sistema, los waveform de onda acelerómetro 1 y 2 corresponden a sensores que van a estar fijos mientras que el waveform de onda acelerómetro 3 representa un tercer sensor móvil que el operador puede posicionar estratégicamente en diferentes puntos del sistema para realizar mediciones comparativas.

2.12.4 Indicadores Visuales

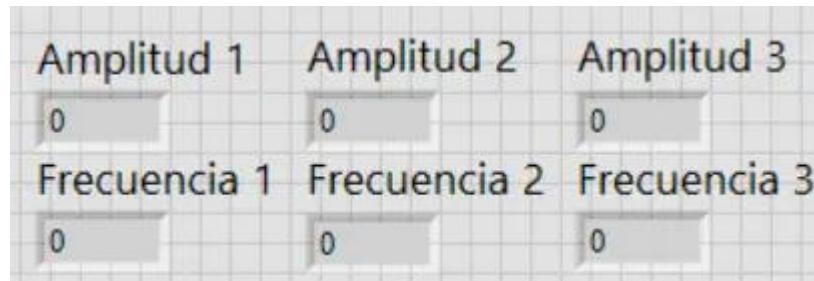


Figura 2.21 Indicadores Visuales de Amplitud y Frecuencia.

Los indicadores numéricos muestran las amplitudes y frecuencias dominantes extraídas automáticamente del análisis espectral FFT de cada acelerómetro. Los campos "Amplitud 1", "Amplitud 2" y "Amplitud 3" despliegan en tiempo real los valores máximos de vibración detectados en cada sensor, mientras que los indicadores "Frecuencia 1", "Frecuencia 2" y "Frecuencia 3" muestran las frecuencias correspondientes a estos picos dominantes en Hz.

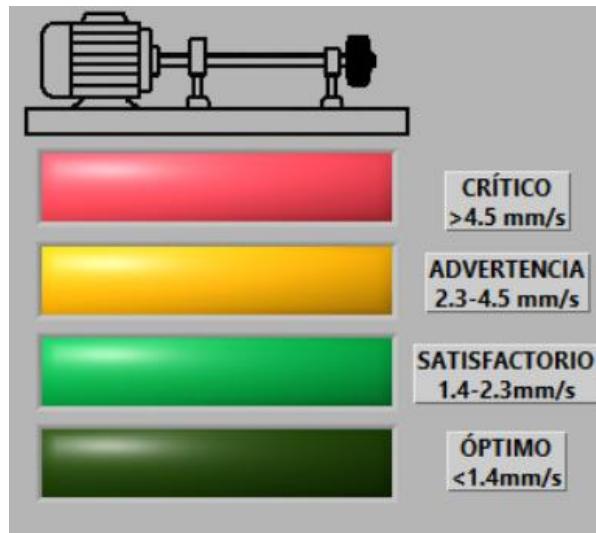


Figura 2.22 Leds indicadores

Los LEDs implementados funcionan como un sistema de semáforo que se activa de acuerdo a los valores de magnitud de los armónicos detectados, permitiendo al operador conocer instantáneamente el estado operativo del motor. Esta codificación por colores está fundamentada en la norma ISO 10816, que establece los criterios de evaluación de vibraciones mecánicas para maquinaria rotativa.

2.13 Desarrollo de la Interfaz Gráfica con Grafana Labs

2.13.1 Creación del Broker

El sistema desarrollado se fundamenta en una arquitectura de tres elementos interconectados que operan bajo el paradigma publish-subscribe característico del protocolo MQTT. El componente central del sistema es el Broker MQTT, que actúa como servidor intermediario de mensajería y constituye el núcleo de toda la comunicación.

El segundo componente esencial son los Publicadores (Publishers), que representan los clientes responsables de generar y enviar datos hacia el broker. Estos elementos actúan como productores de información dentro del ecosistema, estableciendo conexiones con el broker para transmitir mensajes asociados a topics específicos. Complementando la arquitectura se encuentran los Suscriptores (Subscribers), que constituyen los clientes consumidores de datos dentro del sistema. Estos componentes establecen suscripciones a topics específicos de interés, recibiendo automáticamente todos los mensajes publicados en dichos canales temáticos.

Para la implementación práctica de los componentes publicadores y suscriptores se utilizó Eclipse Mosquitto, una implementación open-source del protocolo MQTT ampliamente reconocida en la industria por su robustez y eficiencia facilitando la creación de publicadores mediante mosquitto_pub y suscriptores a través de mosquitto_sub, lo que permite una validación integral del comportamiento del broker bajo diferentes escenarios de carga y patrones de comunicación (Eclipse Mosquitto Project, s.f.).

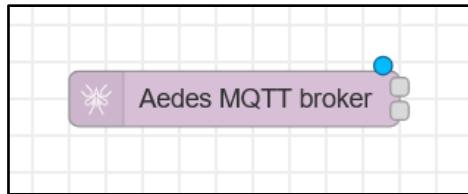


Figura 2.23 Nodo Aedes Broker.

Para la simplificación de la creación del broker se utilizó el nodo Aedes Broker, una solución integrada en Node-RED que proporciona funcionalidades completas de servidor MQTT sin requerir configuraciones complejas de infraestructura.

2.13.2 Envío de datos desde LabVIEW

Debido a incompatibilidades y problemas de estabilidad encontrados con las librerías nativas del MQTT Client en LabVIEW, se implementó un método alternativo para la comunicación con el broker MQTT. La solución adoptada se basó en el uso del bloque System Exec.vi, que

permite ejecutar comandos del sistema operativo directamente desde LabVIEW, facilitando así la invocación de herramientas de línea de comandos de Mosquitto.

Este enfoque requirió la utilización de bloques de String Manipulation para construir dinámicamente los comandos mosquitto_pub con los parámetros apropiados.

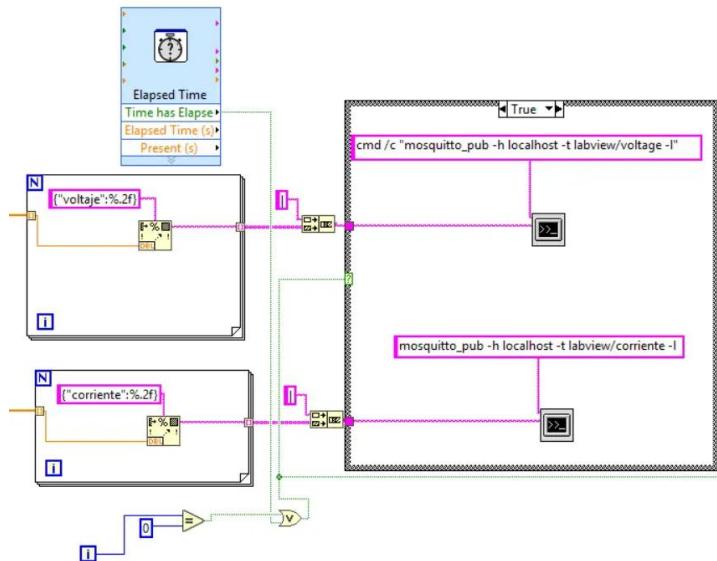


Figura 2.24 Diagrama de Bloques envío de datos de Corriente y Voltaje.

El Elapsed Time Express VI constituye el elemento de control temporal del sistema, configurado con un período de 120 segundos que define el intervalo de duración durante el cual se ejecutará la transmisión de datos hacia el broker MQTT. Dentro de las estructuras For Loop se implementaron bloques Format Into String que realizan la conversión de los valores numéricicos de voltaje y corriente a formato de cadena de caracteres con el patrón de formato específico requerido. Los indicadores numéricos implementados mediante controles de formato de cadena permiten la visualización y formateo de las variables de voltaje y corriente, estos elementos utilizan especificadores de formato del tipo "%,.2f" para mantener precisión decimal constante en la representación de los datos.

El bloque Concatenate Strings actúa como integrador de las cadenas formateadas, combinando los diferentes componentes textuales para construir los comandos MQTT

completos. La salida de este proceso alimenta directamente al System Exec.vi, que constituye el componente central de comunicación MQTT ejecutando comandos del sistema operativo para invocar `mosquitto_pub` con parámetros dinámicos incluyendo la dirección del broker (localhost) y los topics específicos (LabVIEW/voltaje, LabVIEW/corriente).

Los operadores lógicos OR proporcionan control condicional para coordinar la transmisión simultánea de múltiples variables cuando se cumplen las condiciones temporales del Elapsed Time Express VI.

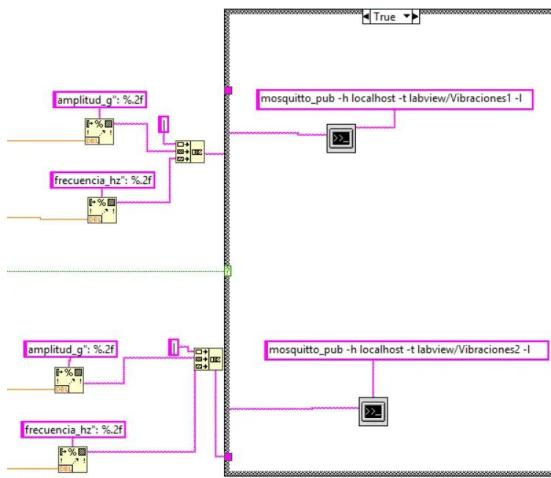


Figura 2.25 Diagrama de bloques envío de datos de Amplitud y Frecuencia.

Para la transmisión de datos de vibraciones se implementó una estructura similar utilizando indicadores de formato de cadena para las variables de amplitud y frecuencia (`amplitud_g` y `frecuencia_hz`) con especificadores `"%.2f"`. Los bloques `Format Into String` procesan estos valores dentro de estructuras iterativas, mientras que `Concatenate Strings` construye los comandos para los topics especializados (`LabVIEW/Vibraciones1` y `LabVIEW/Vibraciones2`). El `System Exec.vi` ejecuta estos comandos de manera coordinada, permitiendo la transmisión simultánea de múltiples parámetros de vibración hacia el broker MQTT con la misma robustez y control temporal establecido en la implementación principal.

2.13.3 Topología de red

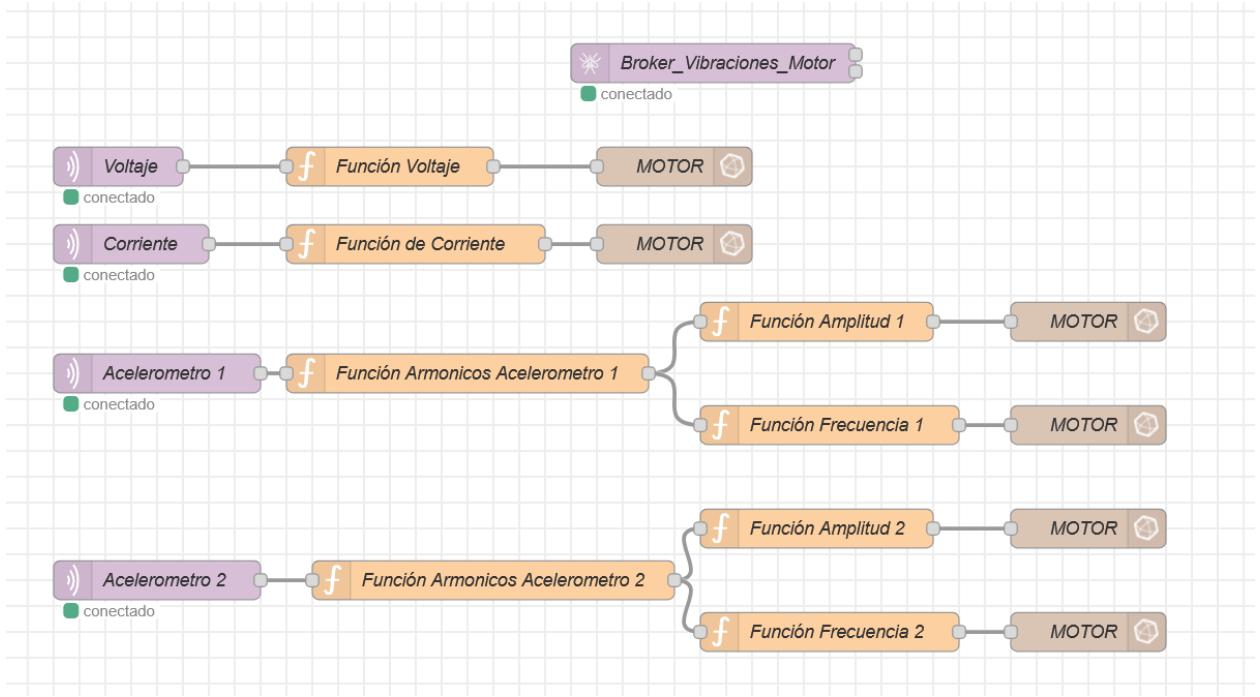


Figura 2.26 Conexión en Node-RED.

El sistema de procesamiento implementado en Node-RED utiliza nodos MQTT In configurados para recibir mensajes de topics específicos los cuales son voltaje, corriente y los valores de magnitud y frecuencia de cada acelerómetro usado.

Los datos recibidos son procesados mediante funciones de transformación especializadas: la función Voltaje convierte las cadenas de datos a arrays numéricos y calcula el valor RMS del voltaje, mientras que la función de Corriente ejecuta operaciones similares para determinar el valor RMS de corriente. Las Funciones de Armónicos de Acelerómetros 1 y 2 se encargan de separar las cadenas de frecuencia y amplitud, transformándolas a valores numéricos para su posterior procesamiento. Los datos procesados son direccionados hacia nodos InfluxDB, una base de datos de series temporales optimizada para el almacenamiento y consulta eficiente de datos con marca temporal (InfluxData, Inc., s.f.). La integración con InfluxDB facilita la visualización posterior en Grafana y proporciona capacidades avanzadas de consulta y análisis temporal de los datos del sistema motor.

2.13.4 Creación de Base de datos en InfluxDB

Para la configuración de InfluxDB, se tuvo que crear una organización que funcionaría como el contenedor principal para todos los recursos del sistema de monitoreo. Dentro de esta organización se creó un bucket denominado "Motor_Parameters" para almacenar de forma persistente todos los datos de los parámetros del motor.

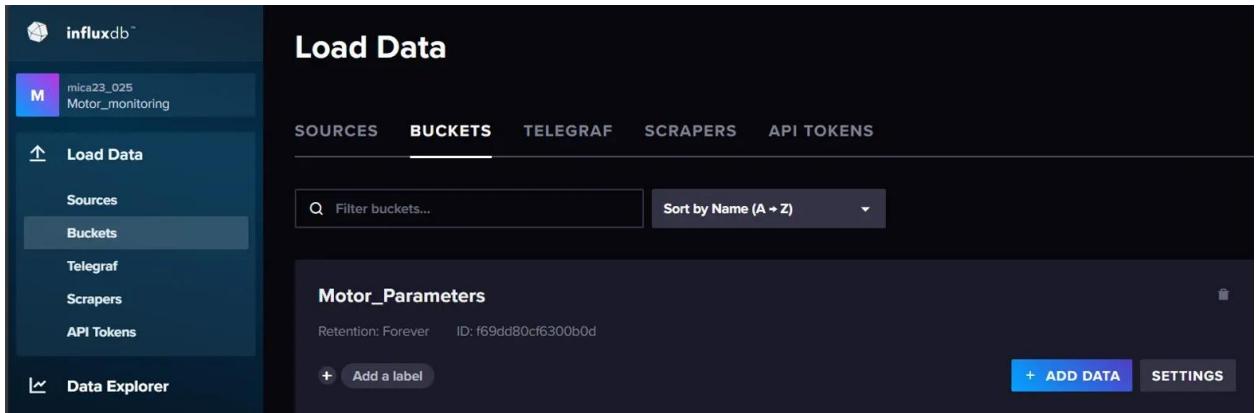


Figura 2.27 Bucket parámetros del motor

La autenticación y comunicación con la base de datos se estableció mediante la creación de un token de API específico. Este token proporciona acceso de lectura y escritura a buckets específicos dentro de la organización garantizando que los nodos de Node-RED puedan enviar datos de manera segura.

Esta configuración permite que InfluxDB funcione como el repositorio centralizado para almacenar las mediciones de corriente, voltaje y temperatura del motor, manteniendo la integridad de los datos y facilitando consultas futuras para análisis y visualización.

2.13.5 DASHBOARD EN GRAFANA LABS

El dashboard desarrollado presenta una interfaz de monitoreo en tiempo real que visualiza los parámetros críticos del motor. Los medidores circulares tipo gauge muestran de manera

inmediata el voltaje RMS y la corriente RMS, utilizando escalas de color que permiten identificar rápidamente si los valores se encuentran dentro de rangos operativos normales.



Figura 2.28 Dashboard en Grafana

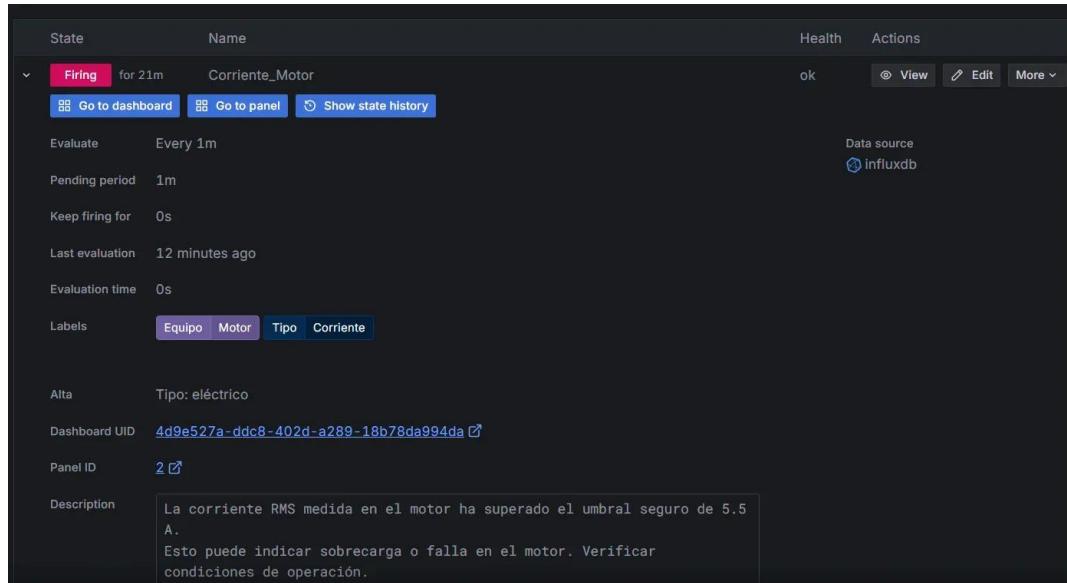
La sección de análisis vibracional incluye gráficos de amplitud dominante que registran las vibraciones en el dominio del tiempo, mostrando picos de hasta 15 mm/s^2 con líneas de referencia rojas que indican umbrales de alerta. Complementariamente, los indicadores de frecuencia dominante revelan las componentes espectrales más significativas de las vibraciones, datos fundamentales para el diagnóstico de posibles desbalances o problemas mecánicos. Esta configuración del dashboard permite a los operadores realizar un monitoreo continuo y detectar anomalías de forma temprana, combinando mediciones eléctricas básicas con análisis avanzado de vibraciones para un diagnóstico integral del estado del motor.

2.13.6 Envío de alertas

Se incluye también el envío de alertas como parte integral del sistema de monitoreo, que garantiza la detección temprana de condiciones anómalas en el motor eléctrico. La configuración de alertas se basa en la evaluación continua de corriente, frecuencia y magnitud de los armónicos de vibración estableciendo umbrales específicos para cada variable monitoreada.

El sistema de alertas está configurado para evaluar múltiples condiciones simultáneamente: sobrecargas eléctricas cuando la corriente supera valores seguros,

desviaciones en las frecuencias dominantes que podrían indicar desbalances mecánicos, y amplitudes de vibración excesivas que sugieren problemas en rodamientos o alineación.



The screenshot shows a monitoring interface with the following details:

- State:** Firing for 21m (Corriente_Motor)
- Name:** Corriente_Motor
- Health:** ok
- Actions:** View, Edit, More
- Evaluate:** Every 1m
- Pending period:** 1m
- Keep firing for:** 0s
- Last evaluation:** 12 minutes ago
- Evaluation time:** 0s
- Labels:** Equipo, Motor, Tipo, Corriente
- Alta:** Tipo: eléctrico
- Dashboard UID:** 4d9e527a-ddc8-402d-a289-18b78da994da
- Panel ID:** 2
- Description:** La corriente RMS medida en el motor ha superado el umbral seguro de 5.5 A. Esto puede indicar sobrecarga o falla en el motor. Verificar condiciones de operación.

Figura 2.29 Envío de alertas

Cada alerta incluye una descripción contextual que especifica la condición detectada y las acciones recomendadas, como "verificar condiciones de operación", proporcionando a los operadores un protocolo claro de respuesta ante situaciones críticas.

El sistema permite a los usuarios aprender sobre umbrales críticos, técnicas de análisis de vibraciones y diagnóstico de fallas eléctricas en un entorno práctico y controlado. Esto minimiza el riesgo de daños mayores en equipos reales mientras proporciona experiencia valiosa en la interpretación de datos de monitoreo, optimizando tanto los tiempos de respuesta

CAPÍTULO 3

3.1 Resultados y análisis

El objetivo principal de este capítulo es evaluar cómo la adición de masas desbalanceadas afecta las vibraciones del motor, manifestadas a través de la amplitud y frecuencia de las señales captadas. La metodología experimental consistió en la utilización de tres acelerómetros estratégicamente ubicados para monitorear las vibraciones en dos direcciones ortogonales: un sensor se colocó en la carcasa del motor, cerca del eje, para captar vibraciones axiales (paralelas al eje de rotación), mientras que los otros sensores se colocaron en la carcasa del ventilador para detectar vibraciones radiales (perpendiculares al eje de rotación) y en la chumacera más cercana al disco en el que se añaden masas.

En cada prueba se analizó en el dominio de la frecuencia mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT), lo que permitió identificar las frecuencias de vibración dominantes y correlacionarlas con la operación del motor y el tipo de desbalance inducido. Cabe recalcar que en las siguientes figuras se mostrará las señales obtenidas en cada prueba donde del lado izquierdo estarán las FFT's de los sensores, la gráfica superior corresponde al eje axial y la del centro al eje radial cerca del ventilador y la última en la chumacera.

3.1.1 Condiciones iniciales

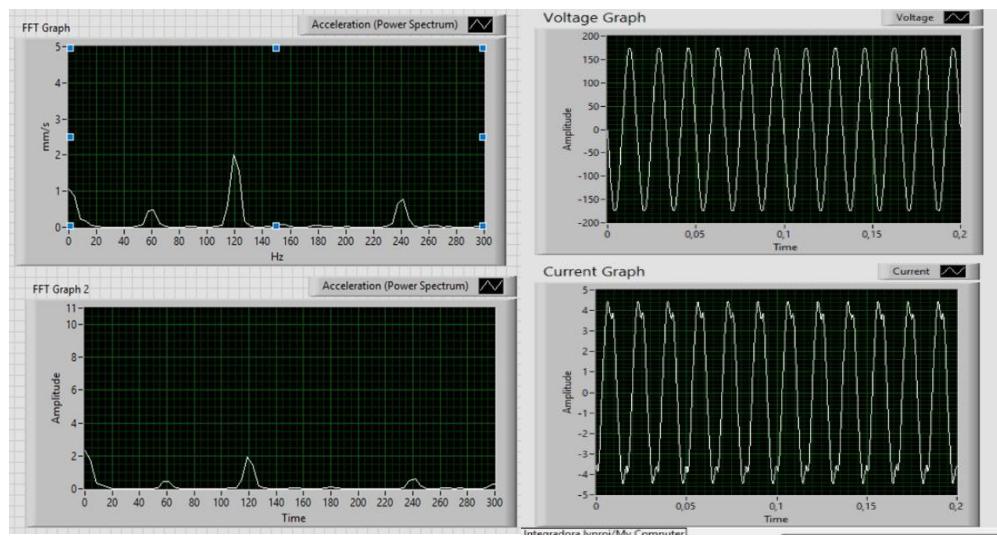


Figura 3.1 Resultados obtenidos de las condiciones iniciales del motor

En cuanto a la gráfica del sensor axial, muestra un espectro de frecuencia con una amplitud significativamente baja al igual que el sensor radial. La frecuencia dominante en ambas gráficas es alrededor de 120Hz, con una amplitud de 2mm/s, esta amplitud según la evaluación de acuerdo con las normas ISO 10816 hace que el motor se encuentre en una zona de condición B (satisfactorio), es decir “puede operar indefinidamente”. Lo que indica que el motor se encuentra en un estado aceptable. No obstante, se ve un indicio de holgura o desbalance, lo que se analizará en la evolución de ambos picos a lo largo de las pruebas realizadas.

El gráfico de voltaje muestra una onda sinusoidal perfecta, lo que indica un suministro estable de voltaje y sin distorsiones. La amplitud pico a pico es de 340 V (de -170 a +170 V), lo que es coherente con una tensión Vrms de 120V a 60Hz. Por otro lado, la corriente no se muestra sinusoidal completamente, se observa cierta distorsión armónica que puede ser causada por la no linealidad del circuito magnético, estando al vacío la corriente tiene una amplitud pico a pico de 4.5 A, lo que corresponde a 1.41 Arms.

3.1.2 Prueba 1: Desbalanceo estático

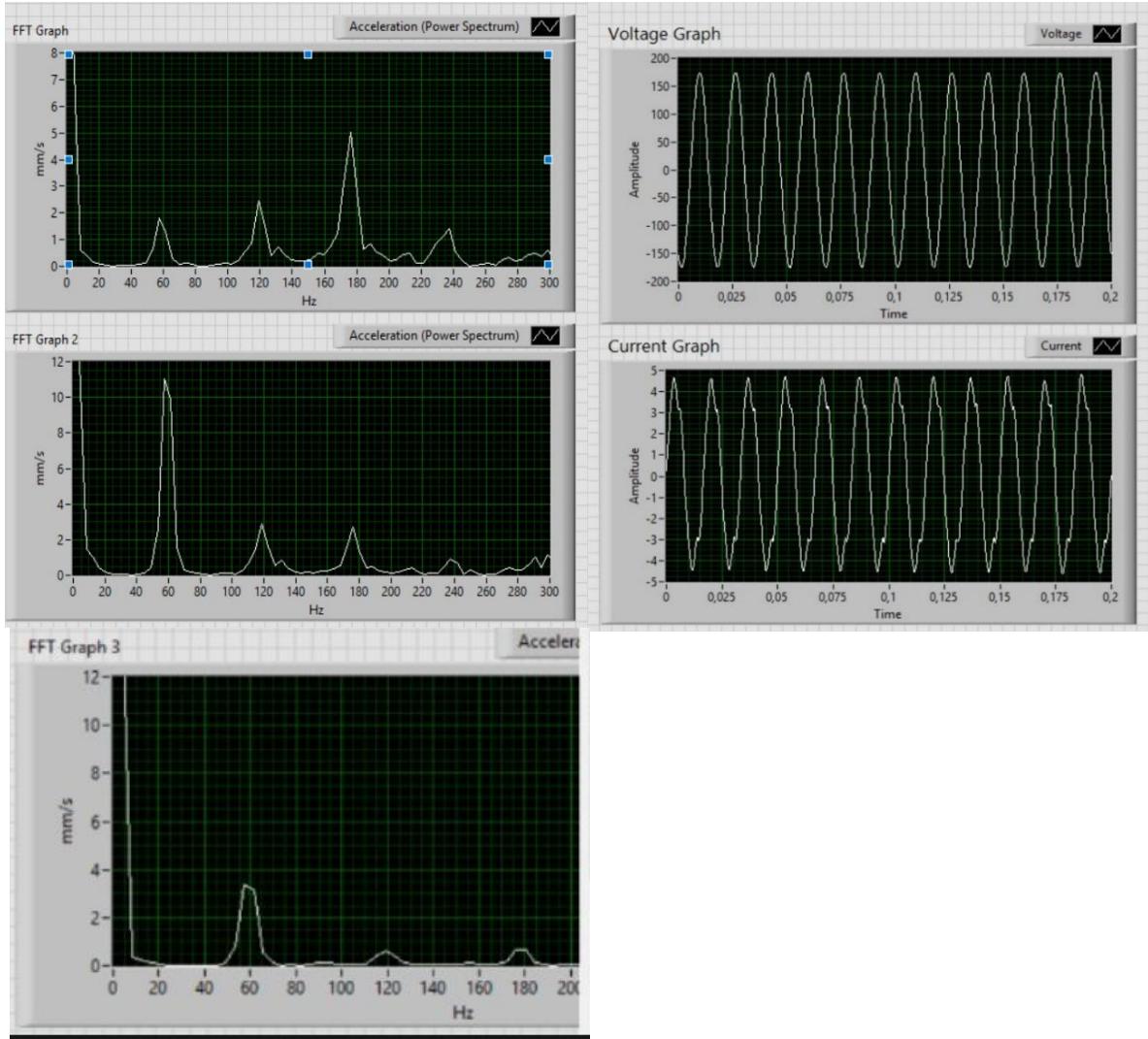


Figura 3.2 Resultados obtenidos del desbalanceo estático

En esta prueba se puede observar que el pico dominante en eje axial se encuentra en el tercer armónico, además de que se observa un patrón de picos de forma ascendente desde el primer armónico hasta el tercero lo que indica una posible holgura mecánica. Por otro lado, en el eje radial se observa un pico dominante en el primer armónico con una amplitud alrededor de 11 mm/s lo que claramente confirma el desbalanceo estático. Además, en el sensor que se encuentra en la chumacera se observa un pico en el primer armónico el cual indica que la fuerza centrífuga generada por el desequilibrio está impactando directamente la chumacera.

La magnitud de la vibración es peligrosa lo que indica que el motor se encuentra en la zona D “La vibración está provocando daños” y se deben tomar medidas correctivas pronto. Además, de esta grafica se puede analizar que el desbalance no solo afecta al plano radial, sino que también interactúa con los problemas inherentes del motor como la holgura o desbalance que se había observado en las condiciones iniciales.

El voltaje mantiene la misma forma de onda sinusoidal clara y estable, lo mismo con la amplitud y la frecuencia son consistentes con la alimentación eléctrica, lo que indica que no se ve afectada por el desbalance. Al contrario, la corriente si se ve afectada, la amplitud pico a pico ha aumentado a 4.75 A. Este incremento, es una clara evidencia de que el motor está consumiendo más potencia para superar la carga mecánica adicional causada por el desbalance, además la distorsión de forma persiste lo que sugiere la causa de las vibraciones en el eje axial, posiblemente causadas por el capacitor o algún problema electromecánico.

3.1.3 Prueba 2: Desbalanceo por par

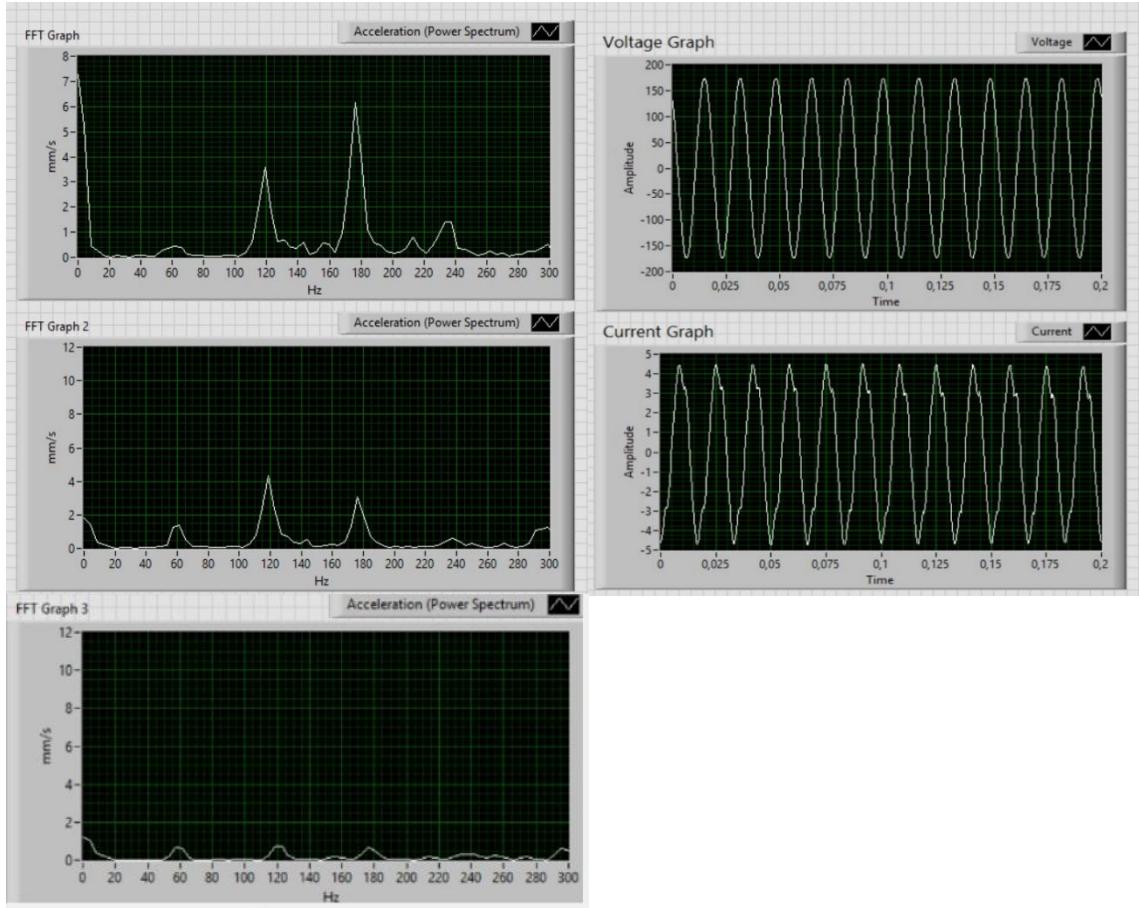


Figura 3.3 Resultados obtenidos del desbalanceo por par

En esta prueba se pude observar que el pico dominante en el eje axial se encuentra en el tercer armónico, cercana a 180 Hz, con una amplitud de 6mm/s. Esto sugiere que el desbalance por par ha causado más daño estructural algo que ha detectado en las anteriores pruebas, esto indica que se encuentra en la zona C, en donde su funcionamiento prolongado no es seguro. Por otra parte, en el eje radial, no se suele generar una vibración radial con esta prueba lo que se confirma en la gráfica con una vibración menos intensa como en el desbalance estático. Con una amplitud de 4mm/s se encuentra en el límite de la zona B y Zona C. Mientras tanto en el tercer sensor, no se encuentra ningún desbalance y se puede corroborar por las amplitudes de los picos en todos los armónicos visibles.

En cuanto a la gráfica de voltaje es consistentemente sinusoidal y estable, con una amplitud que se mantiene en los 170 V pico, lo que confirma que la alimentación no ha sido afectada. Al igual que en la prueba de desbalanceo estático, la amplitud ha aumentado pero esta vez no de manera significativa, no obstante, indica que el motor está trabajando más para mantener la velocidad de rotación.

3.1.4 Prueba 3: Desbalanceo angular

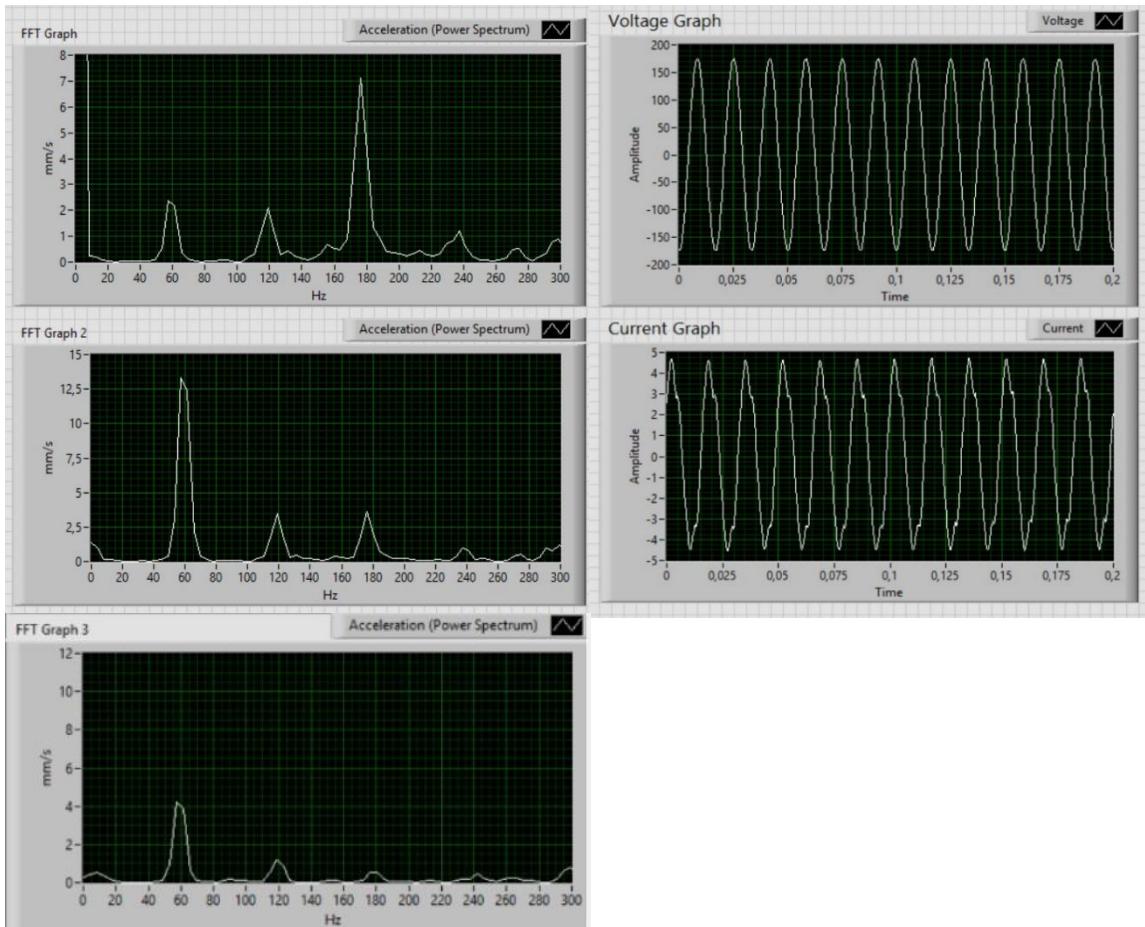


Figura 3.4 Resultados obtenidos del desbalanceo angular

El pico en el eje axial se mantiene en el tercer armónico alrededor de los 180 Hz, esta vez con una amplitud aproximada de 7mm/s, confirmando cada vez de manera significativa un daño en la estructura interna del motor, con esta amplitud se encontraría en la zona D lo cual indica un nivel de vibración inaceptable. En el eje radial, se encuentra un pico alrededor de los 60 Hz,

con una amplitud de 13mm/s situándolo en la zona D al igual que en el eje axial, esto comprueba que el desbalance angular tiene un impacto muy fuerte en la dirección radial, superando incluso el desbalance estático. En la chumacera hay una vibración de 4 mm/s, lo que indica que el desequilibrio es causa principal de la vibración.

La gráfica de voltaje continua siendo una onda perfecta y estable, lo que indica que no hay irregularidades en la alimentación. La amplitud de la corriente ha aumentado significativamente alcanzando los picos de 4.75 A. Este aumento refleja que a mayor carga mecánica que el motor experimenta debido al desbalance mayor va a ser la corriente dado que busca mantener la velocidad de rotación.

3.1.5 Prueba 4: Condición referencia

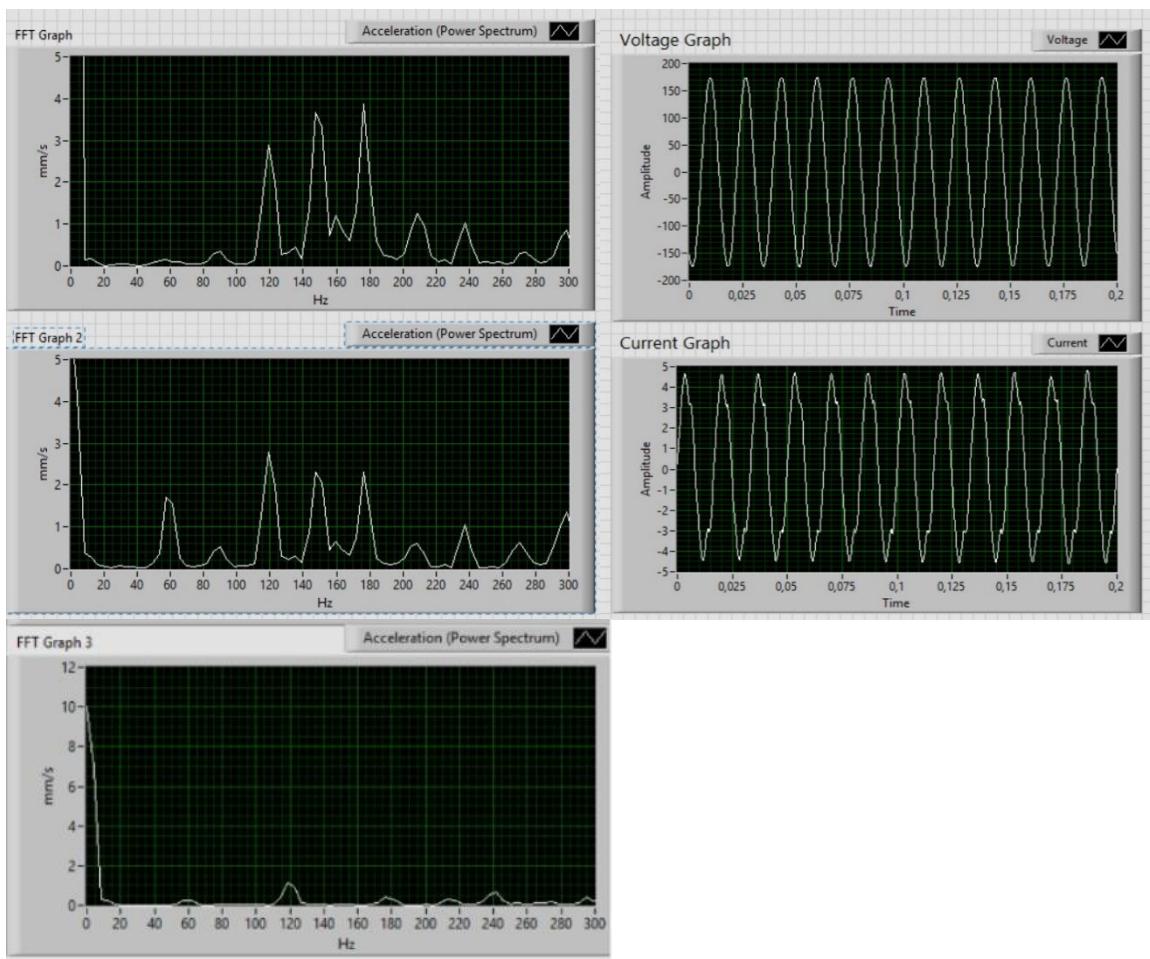


Figura 3.5 Resultados obtenidos de la condición referencia

En el eje axial se pude observar un pico prominente en alrededor de los 150 Hz, con una amplitud aproximada de 4mm/s, además se evidencia la presencia de una holgura mecánica, lo que genera vibraciones en las frecuencias de rotación en los demás armónicos. El motor podría tener problemas en los cojinetes o rodamientos. Sin embargo, se encuentra en la zona C. En el eje radial, se pude observar una similitud con el eje radial, tiene picos en las mismas frecuencias con la diferencia de la menor amplitud, en donde el pico más dominante se encuentra en el segundo armónico con una amplitud llegando a aproximarse a los 3mm/s ubicándolo en la zona B. Por otro lado, en el tercer sensor, no se muestra una vibración significativa lo que indica que el motor, el disco y el eje están en un estado de vibración mínimo.

En esta prueba, se observa una mejora en el eje radial, donde la vibración vuelve a la zona B, lo que indica que se ha reducido en cierta medida la vibración. Al mismo tiempo se ha reducido las vibraciones en el eje axial en comparación a las pruebas anteriores. Esto demuestra que la configuración de masas solo compensa la fuerza centrífuga, pero no resuelve los problemas de holgura o resonancia que son inherentes al motor.

La gráfica de voltaje se mantiene de la misma forma que en las pruebas anteriores, sinusoidal estable. La amplitud de la corriente se mantiene en 4.75 A de amplitud pico, esto se debe a la carga mecánica que se encuentra en el eje, reflejando el esfuerzo mecánico que debe realizar para superar el desbalance.

CAPÍTULO 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

4.1.1 Conclusiones

El análisis experimental de vibraciones en el sistema motor-disco, utilizando un motor monofásico a 3450 RPM y un disco con pesos ajustables, ha permitido validar las teorías fundamentales del diagnóstico de vibraciones en maquinaria rotativa. A través de cuatro pruebas distintas, se lograron las siguientes conclusiones detalladas:

La condición inicial del motor, sin el disco acoplado, presentó un nivel de vibración aceptable conforme a la norma ISO 10816, con una vibración radial de 0.5 mm/s (Zona A) y axial de 2 mm/s (Zona B). Sin embargo, el pico dominante dentro del espectro de frecuencia se localizó en el segundo armónico (2X) a 115 Hz, en la frecuencia de rotación (1X). Este patrón, dado también por la tabla de diagnóstico de vibraciones, es indicativo de la existencia de un problema de holgura mecánica o eléctrico en el motor.

La prueba de desbalance estático, al colocar una masa en un único punto, propició un aumento notable en el nivel de vibración radial, logrando un máximo de 13 mm/s a la frecuencia de rotación (57.5 Hz). Este valor es inaceptable según la norma ISO 10816, situando al motor en la Zona D (Roja). La alta vibración radial en 1X reafirma que la razón fundamental ese desbalance de masa, tal cual lo describe el informe de diagnóstico.

La prueba de desbalance angular produjo los niveles de vibración más altos en ambos ejes, lo que valida la severidad de esta condición. Con una vibración radial de 13 mm/s (Zona D) y axial de 7 mm/s (Zona D), el motor se encontró en una condición de riesgo de daño. Esto demuestra que la combinación de fuerza de desbalance y par, características del desbalance dinámico, es la condición más crítica para la integridad del equipo.

A pesar de que el balance de masas en la prueba de referencia redujo exitosamente la vibración radial a 1.5 mm/s (Zona B), las vibraciones en el eje axial no regresaron a sus niveles iniciales. El pico en el eje axial se mantuvo a 3.5 mm/s, lo que, según la norma ISO 10816, lo

sitúa en la Zona C (Insatisfactoria). Este resultado es una prueba de que el balance de masas no corrige la causa principal de la vibración axial, que parece ser la holgura mecánica

En cuanto a los parámetros eléctricos, especialmente en la corriente, mostraron una relación directa con el esfuerzo proporcionado por el desbalance. Mientras que el voltaje se mantuvo estable en todas las pruebas, la corriente aumentaba conforme el motor soportaba más cargas mecánicas más exigentes. Esto indica que, aunque el monitoreo eléctrico es útil, es menos sensible que el análisis de vibraciones.

Cabe destacar que incluso en las condiciones iniciales de referencia, se detectaron señales de holgura mecánica y posibles defectos en los rodamientos, lo que sugiere que el motor ya presenciaba cierto deterioro antes de las pruebas. Esto refuerza a su vez la importancia de contar con sistemas de monitoreo predictivo que permitan anticipar fallas internas y evitar daños que afecten la confiabilidad del equipo.

La implementación del sistema en el ámbito académico no solo validó su uso en la industria, sino que también brindará un gran valor educativo. Los estudiantes de Ingeniería en Electrónica y Automatización, y Mecatrónica tendrán la oportunidad de trabajar con un sistema real de diagnóstico, acercándose de manera significativa a situaciones propias de la industria moderna. Así, este proyecto aporta tanto a la formación profesional como al desarrollo de soluciones tecnológicas que pueden replicarse en entornos industriales.

La integración de LabVIEW, MQTT, Node-RED e InfluxDB con Grafana demostró ser una solución robusta y escalable para el monitoreo en tiempo real, al garantizar una operación continua y estable desde la adquisición de datos hasta su visualización remota. Este enfoque no solo valida la viabilidad técnica del sistema desarrollado, sino que también evidencia su potencial de adaptación a entornos industriales que demandan confiabilidad y expansión futura.

4.1.2 Recomendaciones

En base a las conclusiones planteadas, es posible dar las siguientes recomendaciones.

Es importante tener en cuenta el estado de los sensores piezoeléctricos y los cables de comunicación con el CompactDAQ dado que estos influyen de manera directa en la obtención de los datos de vibración y son capaces de producir lecturas no relacionadas con lo que se desea medir. Para ello siempre se debe realizar una prueba con el Test Panel del módulo Ni 9234 colocando el sensor una superficie estable y darle golpes suaves de tal manera que se visualicen las vibraciones.

Se sugiere ampliar las variables de análisis, incorporando la temperatura, el monitoreo de potencia eléctrica, con el objetivo de complementar información obtenida por las vibraciones. Esto permitirá diagnósticos más completos e integrar un enfoque multifactorial para la evaluación.

Se puede diversificar las pruebas existenciales incluyendo diferentes tipos de motores y las fallas más comunes, como desalineaciones, rodamientos defectuosos. Esto no los hará que el sistema sea más útil para diversas situaciones industriales, sino que enriquecerá el aprendizaje práctico de los estudiantes.

Finalmente, se propone que, en futuras investigaciones, los resultados obtenidos con el sistema desarrollado sean comparados con los de un equipo de medición especializado en análisis de vibraciones, como analizadores portátiles o sistemas industriales certificados. Debido a que en este trabajo no se contó con la disponibilidad de dicho instrumento, la validación de los datos se realizó únicamente con el sistema implementado. Esta comparación permitiría verificar la precisión de las mediciones, fortalecer la confiabilidad del sistema propuesto.

REFERENCIAS

- AMAQ. (11 de Noviembre de 2022). *A-MAQ*. Obtenido de <https://a-maq.com/la-importancia-de-un-sistema-de-monitoreo-continuo-en-maquinaria-critica-de-proceso/>
- Ballivian, A., Bamberger, M., Caso Raphael, A., Cooper, R., Diéguez, G., Farfán Mares, G., . . . Orozco, H. (Octubre de 2016). *iadb.org*. Obtenido de <https://publications.iadb.org/es/los-sistemas-de-monitoreo-y-evaluacion-hacia-la-mejora-continua-de-la-planificacion-estrategica-y>
- Castro, C. (18 de Enero de 2024). *Sedisa Servicios*. Obtenido de <https://sedisaservicios.com/activos-industria/normas-iso-para-evaluar-la-severidad-de-vibracion-en-maquinas-rotativas/>
- DEWESoft. (5 de Agosto de 2025). *DEWESoft*. Obtenido de <https://dewesoft.com/es/aplicaciones/monitoreo-de-condicion>
- EDN Network. (17 de octubre de 2023). *EDN Network*. Obtenido de EDN Network: <https://www.edn.com/the-story-of-ni-and-its-influence-on-instrument-control>
- Ferreira de Souza, D., Fernandes da Silva , P. P., Sauer , I. L., de Almeida , A. T., & Tatizawa , H. (1 de junio de 2024). Life cycle assessment of electric motors - A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 456. doi:<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652624018146>
- Fraile Mora, J. (2008). *Maquinas Eléctricas* (Sexta ed.). (J. L. Jurado, Ed.) Madrid, España: McGraw Hill.
- Gautschi, G. (2002). *Piezoelectric Sensorics: Force, Strain, Pressure, Acceleration and Acoustic Emission Sensors, Materials and Amplifiers*. Berlin: Springer.
- Goundar, S., Pillai, M., Mamun, K. A., Islam, F., & Deo, R. N. (2015). Real time condition monitoring system for industrial motors. *2015 2nd Asia-Pacific World Congress on*

Computer Science and Engineering (APWC on CSE).

doi:10.1109/APWCCSE.2015.7476232

Grafana Labs. (s.f.). *Grafana Labs.* Obtenido de Grafana Labs:

<https://grafana.com/docs/grafana/latest/>

Hunkeler, U., Truong, H. L., & Stanford-Clark, A. (2008). MQTT-S A Publish/Subscribe Protocol For Wireless Sensor Networks. Obtenido de <https://sites.cs.ucsb.edu/~rich/class/cs293b-cloud/papers/mqtt-s.pdf>

IEEE. (2023). *IEEE Standard for Maturity Index of the Internet of Things--Evaluation, Grading, and Ranking*. IEEE. doi:10.1109/IEEEESTD.2023.10367860

Instruments, National . (25 de Febrero de 2025). *ni*. Obtenido de <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-9234-specs/page/specs.html>

Instruments, National. (21 de Febrero de 2023). *ni*. Obtenido de <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/cdaq-9171-9174-9178-features/resource/372838e.pdf>

Instruments, National 2025. (28 de Abril de 2025). *NI*. Obtenido de NI: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-9227-seri/resource/325101f.pdf>

Instruments, National. (1 de Abril de 2025). *NI*. Obtenido de NI docs: <https://www.ni.com/es/shop/labview.html>

International Energy Agency . (2011). *Energy Efficiency for Electric Motor-Driven Systems*. Obtenido de https://iea.blob.core.windows.net/assets/d69b2a76-feb9-4a74-a921-2490a8fefcdf/EE_for_ElectricSystems.pdf

International Organization for Standardization (ISO). (2021). *ISO 5348:2021. Mechanical vibration — Guidelines for the selection of accelerometers*. Ginevra: ISO.

Johnson, G. W., & Jennings, R. (2006). *LabVIEW Graphical Programming* (Cuarta ed.). McGraw-Hill.

Kjær, H. B. (23 de Marzo de 2025). *bksv.com*. Obtenido de

<https://www.bksv.com/es/knowledge/blog/vibration/piezoelectric-accelerometers>

- Labs, G. (22 de Agosto de 2024). *Grafana*. Obtenido de <https://lsvp.com/company/grafana/>
- Manjare, A. A., & Patil, B. G. (2021). A Review: Condition Based Techniques and Predictive Maintenance for Motor. *2021 International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS)*. Coimbatore: IEEE. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/document/9395903>
- Martinez Garcia, J. (s.f.). *Mantenimiento Predictivo*. Catalunya: Fundació per a la Universitat Oberta de Catalunya. Obtenido de <https://openaccess.uoc.edu/server/api/core/bitstreams/d428dbbb-3746-42dd-aac9-4beb158489e3/content>
- MCB. (21 de Julio de 2025). *MCB*. Obtenido de <https://www.mcb.com.mx/costos-tiempo-muerto-industria-impacto-en-la-produccion-automotriz/#:~:text=Se%20estima%20que%20la,tiempos%20muertos.%20Esto%20puede>
- Mccollam, R. (2022). *Getting Started With Grafana Real-Time Dashboards for IT and Business Operations*. Somerville: Apress.
- Mejía Morales , J. E. (2009). ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN MOTORES ELÉCTRICOS ASÍNCRONOS TRIFÁSICOS. *TRABAJO DE GRADUACIÓN*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Ciudad de Guatemala, Guatemala. Obtenido de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0158_ME.pdf
- Montaño, D. V. (2023). *Aplicación de técnicas de mantenimiento predictivo en el Laboratorio de LTI de la ESFOT*. Quito.
- NATIONAL INSTRUMENS. (25 de noviembre de 2024). *ni.com*. Obtenido de [ni.com](https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-9485-specs/page/specs.html): <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-9485-specs/page/specs.html>
- National Instruments. (2000). *National Instruments*. Obtenido de NI Timeline (2000 Annual Report):

<https://www.ni.com/nati/annual/00/timeline?srsltid=AfmBOoorVeZtG2xP4Lt4wcsB7EsNBzB6I8x37unAIHzEEREhrtjTuCbj&utm>

National Instruments Corp. (7 de Julio de 2025). *National Instruments*. Obtenido de National Instruments : <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-9225-specs/resource/ni-9225-specs.pdf>

Ni. (16 de Mayo de 2024). *NI*. Obtenido de NI: <https://www.ni.com/en/solutions/industrial-machinery/smart-machine-control/a-practical-guide-for-connecting-labview-to-the-industrial-iot.html#section--1229534677>

OASIS Standard. (7 de Marzo de 2019). *Docs oasis*. (A. Banks , E. Briggs, K. Borgendale, & R. Gupta, Edits.) Obtenido de Docs oasis.

Paessler. (21 de Marzo de 2019). *Paessler.com*. Obtenido de <https://www.paessler.com/es/it-explained/mqtt>

PCB Piezotronics. (2023). *PCB*. Obtenido de PCB technical-information: <https://wwwpcb.com/resources/technical-information>

PIEZOTRONICS, P. (18 de Marzo de 2021). *PCB*. Obtenido de <https://wwwpcb.com/products?m=352c33>

Promelsa. (3 de Octubre de 2023). *Promelsa*. Obtenido de <https://www.promelsa.com.pe/blog/post/que-es-motor-electrico-trifasico.html>

Rodesprex. (24 de Julio de 2025). *Rodesprex S.L.* Obtenido de <https://www.rodesprex.com/assets/img/services/servbenf04.pdf>

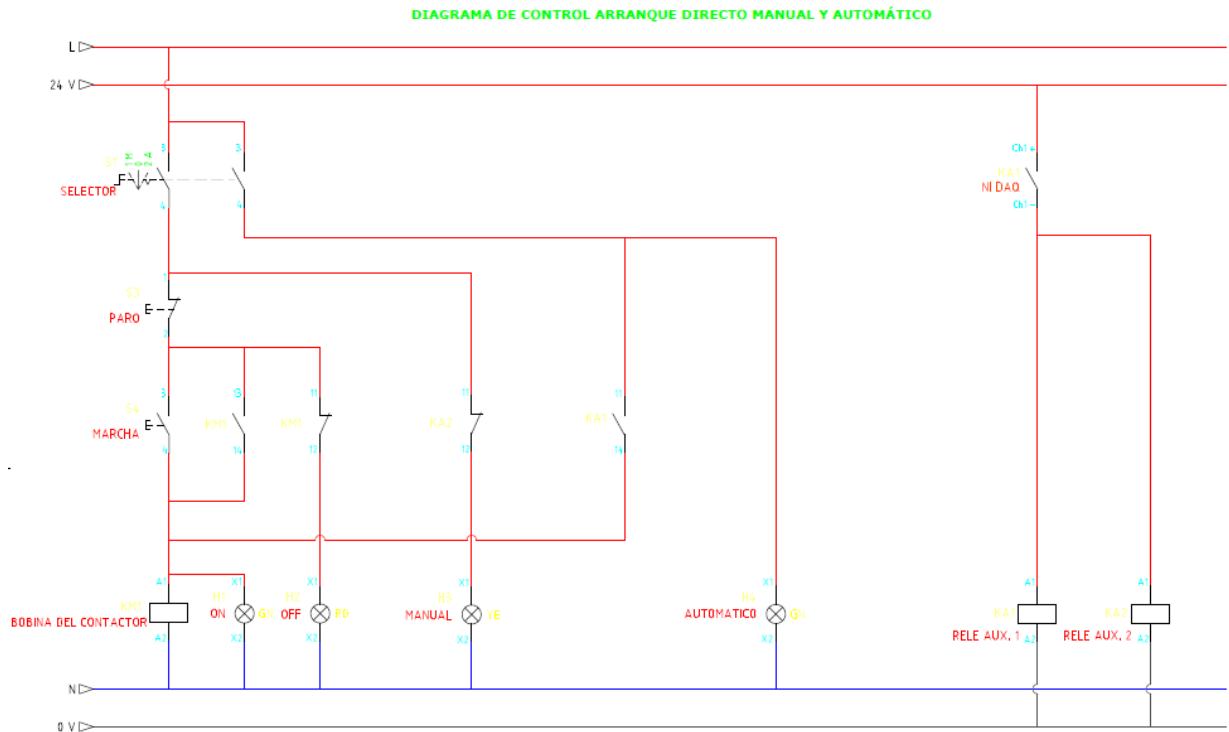
Technical Associates of Charlotte. (s.f.). *Technicalassociates*. Recuperado el 21 de Junio de 2025, de <https://www.technicalassociates.net/spanish-wall-chart-information>

White, G. (2010). *Introducción al Análisis de Vibraciones*. Azima DLI. Obtenido de <https://www.termogram.com/images/pdf/analisis-vibraciones/introduccion-al-analisis-de-vibraciones-azima-dli.pdf>

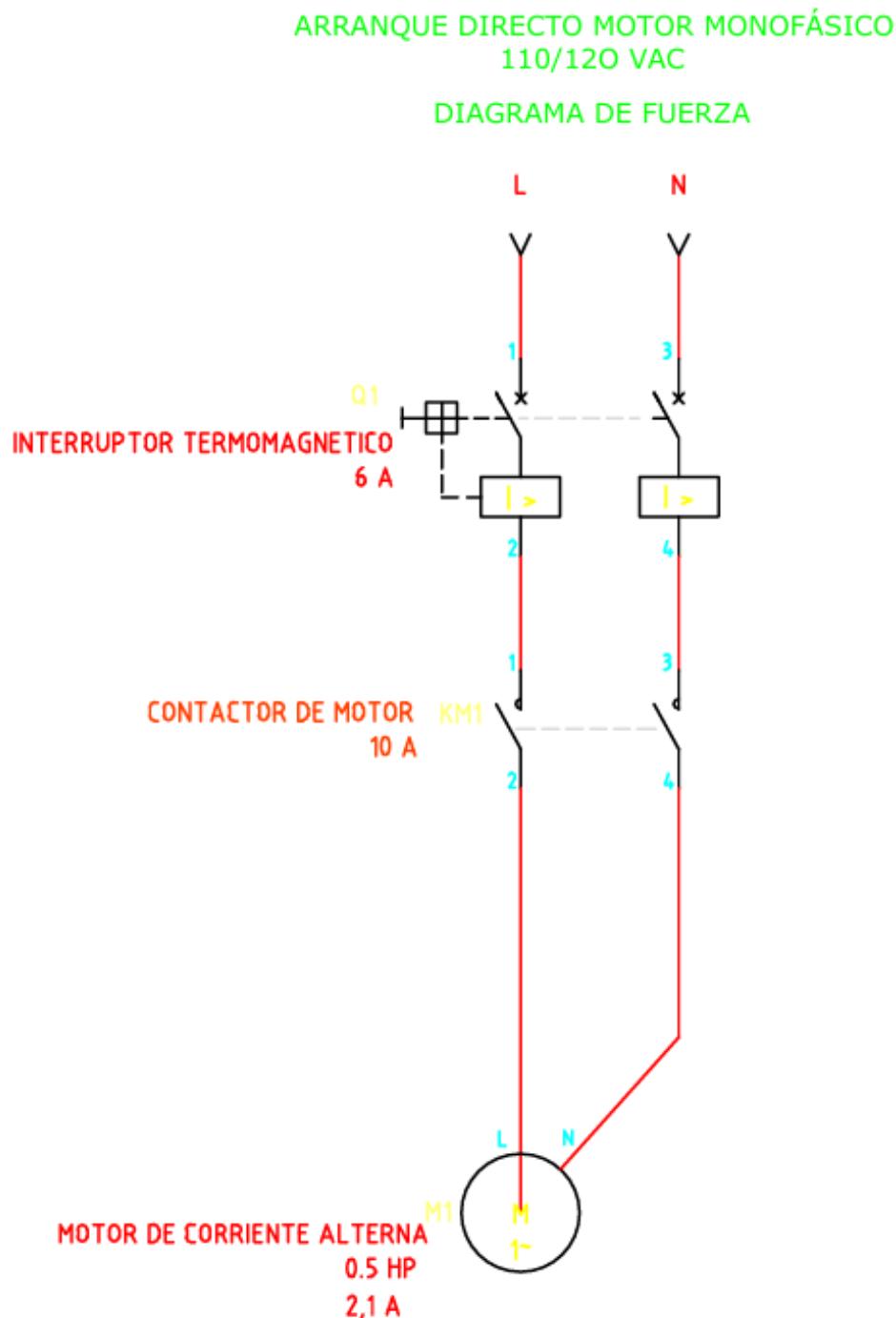
Xinnuo. (14 de Febrero de 2022). *Xinnuomotor.* Obtenido de
<https://www.xinnuomotor.com/es/5kw-electric-motor/>

ANEXOS

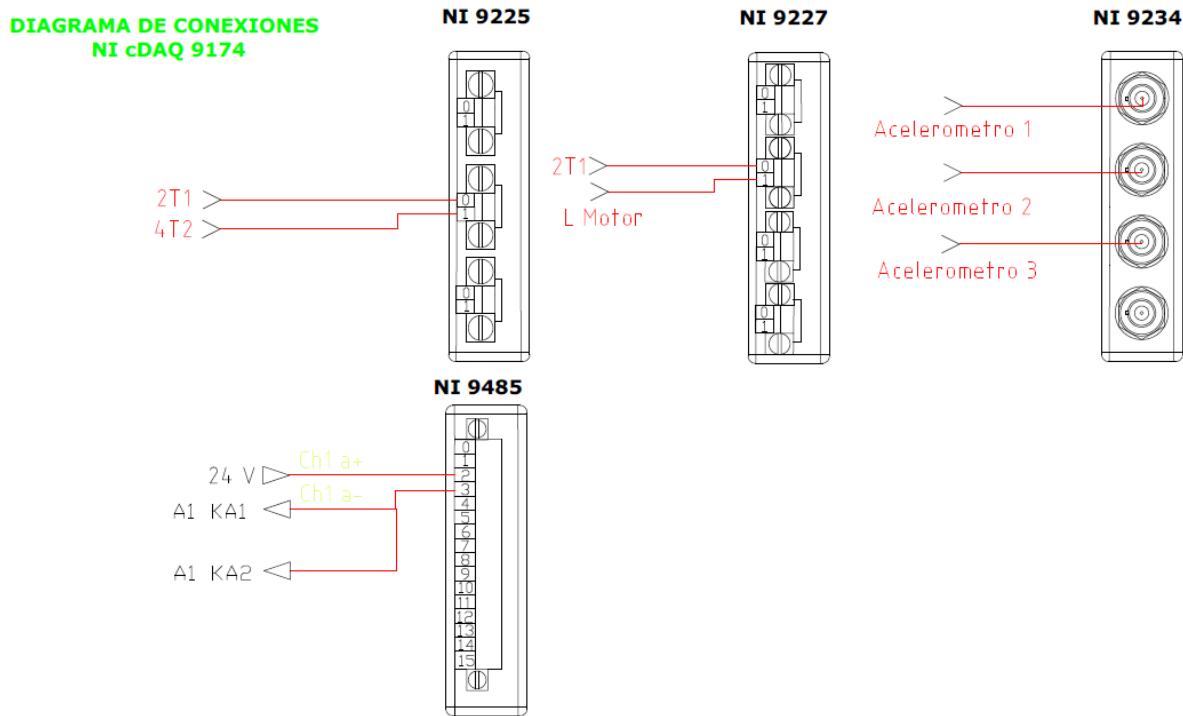
6.1 Diagrama de control



6.2 Diagrama de fuerza

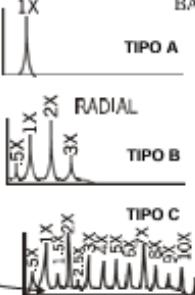
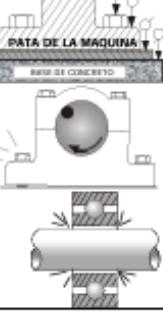
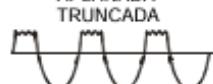
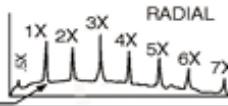
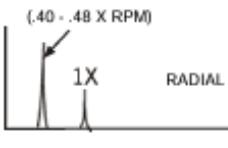
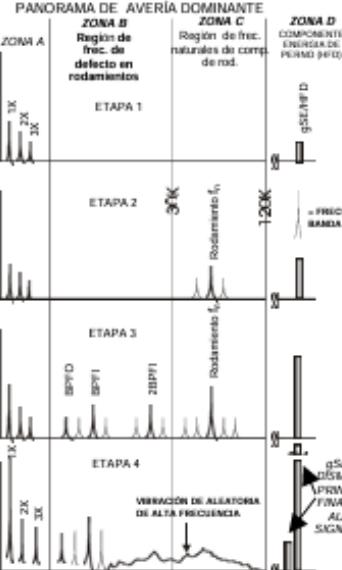


6.3 Diagrama de conexiones módulo CompactDAQ



6.4 Tabla ilustrada de diagnóstico de vibraciones

FUENTE DEL PROBLEMA	ESPECTRO TÍPICO	RELACIÓN DE FASE	OBSERVACIONES
DESEQUILIBRIO DE MASA			
A. DESEQUILIBRIO ESTÁTICO	1X RADIAL		El Desequilibrio Estático estará en fase y fijo. La amplitud debida al desequilibrio se elevará al cuadrado de la velocidad de giro debajo de la primera frecuencia crítica del rotor (un incremento de velocidad de 3X - vibración más alta en 9X). 1X RPM siempre está presente y por lo general domina al espectro. Se puede corregir al colocar únicamente un peso de corrección de equilibrio en un plano en el centro de gravedad (CG) del Rotor. Debe existir una diferencia de fase de 0° aprox. entre los horizontales OB e IB, así como entre los verticales OB e IB. Además, por lo general existe una diferencia de fase de 90° aprox. entre las lecturas horizontales y verticales en cada apoyo de rotor desequilibrado (±30°).
B. DESEQUILIBRIO TIPO PAR	1X RADIAL		El Desequilibrio Tipo Par origina un movimiento fuera de fase de 180° en el mismo eje. 1X RPM siempre se presenta y por lo general domina al espectro. La amplitud varía con el cuadrado de la velocidad en incremento debajo de la primera velocidad crítica del rotor. Puede causar una alta vibración axial así como radial. Para su corrección se requiere colocar pesos de equilibrio en por lo menos 2 planos. Observe que debe existir una diferencia de fase de 180° aprox. entre los horizontales OB e IB, así como entre los verticales OB e IB. Además, por lo general existe una diferencia de fase de 90° aprox. entre las lecturas horizontales y verticales en cada apoyo (±30°).
C. DESEQUILIBRIO DINÁMICO	1X RADIAL		El Desequilibrio Dinámico es el más común y es una combinación de desequilibrio de estatico y de par. 1X RPM domina el espectro, y realmente requiere una corrección de 2 planos. Aquí, la diferencia de fase radial entre los apoyos internos y externos puede abarcar un rango de 0° a 180°. Sin embargo, la diferencia en fase de los apoyos horizontales será similar a la diferencia entre las fases verticales (±30°). Así mismo, en caso de que predomine el desequilibrio, una diferencia de fase de 90° aprox. resultará entre las lecturas horizontal y vertical de cada apoyo (±40°).
D. DESEQUILIBRIO DE ROTORES EN CANTILIBRE	1X AXIAL & RADIAL		El Desequilibrio del Rotor En Cantilibré causa 1X RPM alto en ambas direcciones axial y radial. Las lecturas axiales tienden a estar en fase mientras que las lecturas radiales pueden ser inestables. Sin embargo, las diferencias de fase horizontal coincidirán por lo general con las diferencias de fase vertical en el rotor desequilibrado (±30°). Estos rotores presentan desequilibrios estático y par. Por lo tanto, los pesos de corrección siempre tendrán que colocarse en 2 planos para contrarrestarlos.
ROTOR EXCÉNTRICO	1X ABANICO		La excentricidad ocurre cuando el centro de rotación está fuera de la línea central geométrica de una polea, un engrane, un rodamiento, una armadura del motor, etc. La vibración mayor ocurre en 1X RPM del componente excentrónico en una dirección a través de las líneas centrales de los dos rotores. Las lecturas comparativas de fase horizontal y vertical por lo general difieren en 0° o en 180° (cada una de las cuales indica un movimiento rectilíneo). Con frecuencia, el intentar equilibrar los rotores excentrinos dará como resultado una reducción en la vibración en una dirección radial, pero incrementa la vibración en la otra dirección radial (dependiendo de la cantidad de excentricidad).
EJES FLEXIONADOS	1X AXIAL 2X		Los problemas relacionados ejes flexionados causan una vibración axial alta con diferencias de fase axial con tendencia hacia los 180° en el mismo componente de la máquina. La vibración dominante por lo general ocurre en 1X si la flexión está cerca del centro del eje, pero en 2X en caso de que la flexión esté cerca del acoplamiento. (Asegúrese de compensar las fases axiales en caso de que se haya invertido la dirección del sensor). Utilice indicadores de carátula para confirmar la flexión del eje.
DESALINEACIÓN			
A. DESALINEACIÓN ANGULAR	1X 2X 3X		La Desalineación Angular se caracteriza por una vibración axial alta, 180° fuera de fase a través del acoplamiento. Tendrá una vibración axial alta tanto en 1X como en 2X RPM. Sin embargo, no es inusual que 1X, 2X o 3X dominen. Estos síntomas también pueden indicar problemas de acoplamiento. Una desalineación angular severa puede presentar muchas armónicas de 1X RPM. A diferencia de la Holgura Mecánica del Tipo 3, estas armónicas múltiples no cuentan con un piso de ruido elevado en los espectros.
B. DESALINEACIÓN PARALELA	1X 2X 3X		La Desalineación Paralela tiene características de vibración similares a la Desalineación Angular pero presenta una vibración radial alta que se approxima a 180° fuera de fase a través del acoplamiento. Frecuentemente 2X es mayor que 1X, pero su altura relativa a 1X la impone el tipo de acoplamiento. Cuando la Desalineación Angular o Radial es severa, pueden generar picos de amplitud altos en armónicas mucho más altas (4X - 8X), o incluso toda una serie de armónicas de alta frecuencia similares en apariencia a la holgura mecánica. El tipo de acoplamiento y el material con frecuencia influyen enormemente en el espectro total cuando la desalineación es severa. Generalmente no presenta piso de ruido elevado.
C. RODAMIENTO DESALINEADO INCLINADO EN EL EJE	2X 1X 3X		El Rodamiento Inclinado generará una vibración axial considerable. Causará un Movimiento Torcido con un cambio de fase de aprox. 180° entre la parte superior e inferior, izquierda y derecha de la caja que soporta el rodamiento. El tratar de alinear el acoplamiento o equilibrar el rotor no solucionará el problema. Por lo general se debe retirar el rodamiento e instalarse correctamente.
RESONANCIA			
			La resonancia ocurre cuando una Frecuencia de Oscilación Forzada coincide con la Frecuencia Natural del Sistema, y puede causar una drástica amplificación en la amplitud que puede resultar en una daño prematuro, o incluso catastrófico. Puede excitarse la frecuencia natural del rotor pero puede originarse frecuentemente en la base, en el cimiento, en la caja de engranes o incluso en las correas (bandas) de poleas. Si un rotor se encuentra en resonancia o cerca de ella, puede ser casi imposible que se pueda lograr un equilibrado debido al cambio importante de fase que experimenta (90° en resonancia, casi 180° cuando pasa a través). Con frecuencia se requiere que la frecuencia natural cambie a una frecuencia más alta o más baja. Las frecuencias naturales generalmente no se alteran con cambios en velocidades de giro, lo cual facilita su identificación (con excepción de aquellos equipos con un cantíbres significativo).

FUENTE DEL PROBLEMA	ESPECTRO TÍPICO	RELACIÓN DE FASE	OBSERVACIONES
HOLGURA MECÁNICA	 <p>TIPO A: RADIAL PLACA BASE TIPO B: RADIAL 1X, 2X, 3X TIPO C: RADIAL 1X, 2X, 3X, 4X, 5X, 6X, 7X, 8X, 9X, 10X</p> <p>OBSERVE EL PISO DE RUIDO ELEVADO QUE INDICA LA HOLGURA</p>		<p>La Holgura Mecánica se indica a través de un espectro de vibración de Tipo A, B o C. El Tipo A se debe a una holgura/fragilidad estructural de las bases de la máquina, de la placa base o del cimiento; también se debe a un montero deteriorado, a pernos de sujeción sueltos en la base; y a la distorsión del armazón o de la base (i.e. pata suave). El análisis de fase puede revelar una diferencia de fase de aprox. 90° a 180° entre las lecturas verticales en el piso, en la base de la máquina, en la placa base y en la base en sí. El Tipo B por lo general se debe a pernos de soporte flojos, a fracturas en la estructura del armazón o en el pedestal del rodamiento. El Tipo C normalmente se genera a causa de un ajuste inadecuado entre las partes componentes originando muchas armónicas debido a la respuesta no lineal de las partes sueltas en la base; y a las fuerzas dinámicas del rotor. Causa un truncamiento de la forma de onda y un piso de ruido mayor en el espectro. Con frecuencia el Tipo C se debe a que el eje exterior del rodamiento está flojo en su tapa, a un rodamiento suelto y que da vueltas en su eje, a un cloro excesivo en cojinetes planos y rodamientos, o por un impulsor suelto en su eje, etc. Con frecuencia la Fase del Tipo C es inestable y puede variar entre lectura y lectura, sobre todo si el rotor cambia de posición en el eje de un arranque a otro. A menudo, la Holgura Mecánica es altamente direccional y puede provocar lecturas notablemente diferentes si se comparan los niveles en incrementos de 30° en dirección radial en toda la caja del rodamiento. Además, tenga en cuenta que la holgura con frecuencia provoca múltiples sub-armónicas a exactamente 1/3 RPM (5X, 1.5X, 2.5X, etc.).</p>
ROZAMIENTOS DEL ROTOR	<p>ONDA APLANADA TRUNCADA</p>  <p>TIPO A: RADIAL .5X, 1X, 1.5X, 2X, 2.5X, 3X, 3.5X, 4X, 4.5X, 5X</p>		<p>Un rozamiento del rotor produce un espectro similar al de la Holgura Mecánica cuando las partes rotativas tocan los componentes estacionarios. El contacto puede ser parcial o a lo largo de toda la revolución del eje. Normalmente se genera una serie de frecuencias, que por lo general excitan una o más resonancias. Con frecuencia excitan sub-armónicas de 1X (1/2, 1/3, 1/4 1/5, ..., 1/n), dependiendo de la ubicación de las frecuencias naturales del rotor. El rozamiento puede excitar muchas altas frecuencias (similar al ruido de banda ancha cuando un gis se pasa por el pizarrón). Puede ser muy serio y de corta duración si se debe a un eje que toca el metal babbitt del cojinete plano. En el caso de cojinetes planos el problema se puede convertir en severo cuando se presenta rozamiento en toda la periferia del cojinete y el rotor se encuentra vibrando a la frecuencia de latigüeo de aceite.</p>
COJINETES PLANOS	<p>A. PROBLEMAS DE DESGASTE/ HOLGURAS</p>  <p>OBSERVE EL PISO DE RUIDO ELEVADO QUE INDICA HOLGURAS</p> <p>TIPO B: INESTABILIDAD POR REMOLINO DE ACEITE</p>  <p>TIPO C: INESTABILIDAD DE LATIGUEO DE ACEITE</p> 		<p>Las últimas etapas de desgaste de los cojinetes planos por lo general se evidencian por la presencia de series completas de armónicas de la velocidad de giro (hasta 10 o 20). A menudo los cojinetes planos soldados permiten amplitudes verticales altas en comparación con las horizontales, pero pueden mostrar solo un pico pronunciado en 1X RPM. Los cojinetes planos con un holgura excesiva tendrán mayores niveles de vibración cuando se presenta un desequilibrio o desalineamiento. Estos niveles serán menores cuando las holguras entre eje y carcasa se encuentran dentro de las especificaciones.</p> <p>La inestabilidad del Remolino de Aceite ocurre a .40 - .48 X RPM y con frecuencia es muy severo. Se considera excesivo cuando la amplitud excede el 40% de los espacios de los cojinetes. El Remolino de Aceite es una vibración excitada de películas de aceite en donde las desviaciones en condiciones de operación normales (ángulo y proporción de excentricidad) causan que la cuna de aceite "empuje" al eje dentro del cojinete. La fuerza desestabilizadora en dirección de la rotación resulta en un remolino (o en una precesión hacia adelante). El remolino de Aceite es inestable ya que incrementa las fuerzas centígradas que aumentan las fuerzas del remolino. Pueden hacer que el aceite ya no soporte al eje y se vuelva inestable cuando la frecuencia del remolino coincide con la frecuencia natural del rotor. Los cambios en la viscosidad del aceite, la presión de la lubricación y las cargas externas pueden afectar el remolino de aceite.</p> <p>El Latigüeo de Aceite puede ocurrir si la máquina opera en o por arriba de la frecuencia crítica de rotor 2X. Cuando al rotor se eleva a una velocidad del doble de la crítica, el remolino estará muy cerca del punto crítico del rotor y puede ocasionar una vibración excesiva por lo que la película de aceite ya no será capaz de soportar. De hecho, la velocidad del remolino "se cerrará" en el punto crítico del rotor y este pico no pasará a través aunque la máquina se lleve a velocidades más y más altas.</p>
RODAMIENTOS (4 Etapas de daño)	<p>F_n = Frecuencias Naturales de Los Componentes y de la Estructura de Soporte del Rodamiento Instalado.</p> <p>FRECUENCIAS DE DEFECTO DEL COJINETE:</p> $BPFI = \frac{N_b}{2} \left(1 + \frac{B_0 \cos \theta}{P_0} \right) X \text{ RPM}$ $BPFO = \frac{N_b}{2} \left(1 - \frac{B_0 \cos \theta}{P_0} \right) X \text{ RPM}$ $BSF = \frac{P_0}{2B_0} \left(1 - \left(\frac{B_0}{P_0} \right)^2 \cos^2 \theta \right) X \text{ RPM}$ $FTF = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{B_0 \cos \theta}{P_0} \right) X \text{ RPM}$ <p>Donde: BPFI = Frecuencia de la Pista Interna BPFO = Frecuencia de la Pista Externa BSF = Frecuencia de Giro de Bola / Rodillo FTF = Frec. Fundamental de la Jaula. N_b = Número de Bolas o Rodillos B₀ = Diámetro de Bola / Rodillo (pulg. o mm) θ = Ángulo de Contacto (grados)</p>	<p>PANORAMA DE AVERÍA DOMINANTE</p> 	<p>4 ETAPAS DE DANO DEL RODAMIENTO</p> <p>ETAPA 1: Las primeras indicaciones de problemas en los rodamientos aparecen en las frecuencias ultrasonoras que oscilan entre 250,000 - 350,000 Hz; luego, a medida que se incrementa el desgaste, cae a aproximadamente 20,000 - 60,000 Hz (1,000,000 - 3,600,000 CPM). Estas son frecuencias evaluadas por el Nitro Spike Energy (gSE), por HFD(g) y por el Pulso de Choque (dB). Por ejemplo, la energía de Spike Energy puede aparecer por primera vez a aproximadamente .25 gSE en la Etapa 1 (el valor real depende de la ubicación de la lectura y de la velocidad de giro de la máquina). La adquisición de espectros envolventes de alta frecuencia confirma si el cojinete se encuentra o no en la Etapa 1 de Daño.</p> <p>ETAPA 2: Los defectos ligeros del rodamiento comienzan a "excitar" las frecuencias naturales (%) de sus componentes, que generalmente ocurren en un rango de 30K - 120K CPM. Dichas frecuencias naturales también pueden ser resonancias de las estructuras de apoyo del rodamiento. Las frecuencias de bandas laterales aparecen arriba y abajo del pico de frecuencia natural al final de la Etapa 2. La energía Spike Energy crece (por ejemplo, de .5 a más de 1 gSE).</p> <p>ETAPA 3: Aparecen armónicas y frecuencias de defectos del rodamiento. A medida que el desgaste progresó, aparecen más armónicas de frecuencias de defecto y el número de bandas laterales crecen, tanto alrededor de éstas y de las frecuencias naturales del componente del cojinete. La energía Spike Energy continúa incrementándose (por ejemplo, de .5 a más de 1 gSE). En esta etapa por lo general el desgaste es visible y se puede extender a toda la periferia del cojinete, sobre todo cuando varias bandas laterales bien formadas acompañan a las armónicas de frecuencias de defecto del rodamiento. Los espectros demodulados de alta frecuencia y envolventes ayudan a confirmar la Etapa III. (Reemplace los rodamientos ahorral (independientemente de las amplitudes de frecuencia defectuosas del rodamiento en los espectros de vibración).</p> <p>ETAPA 4: Hacia el final, incluso se afecta la amplitud 1X RPM. Crece, y normalmente causa el crecimiento de muchas armónicas de 1X. Las frecuencias naturales discretas de rodamientos y de componentes comienzan a "desaparecer" y se reemplazan con "piso de ruido" de alta frecuencia, de banda ancha y aleatoria. Además, las amplitudes tanto del piso de ruido de alta frecuencia y de Spike Energy pueden en efecto disminuir; sin embargo, justo previo al punto catastrófico, la energía Spike Energy y HFD por lo general crecen a amplitudes excesivas.</p>

6.5 Normas ISO 10816

Norma ISO 10816

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

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

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

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

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

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

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

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

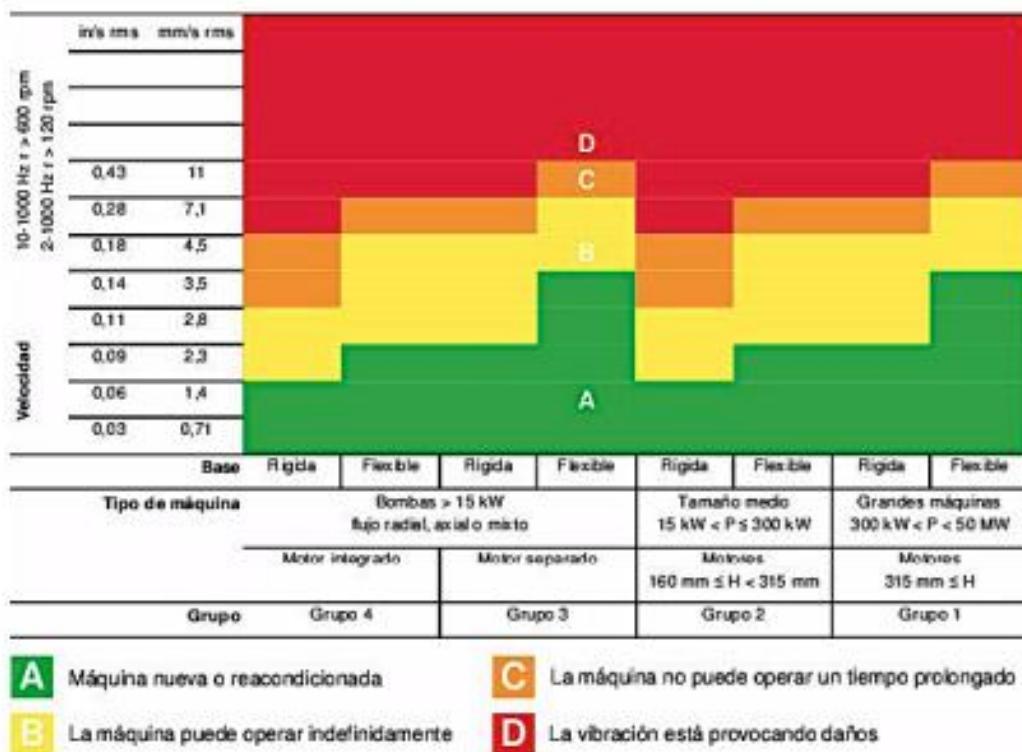
- Tipo de máquina.
- Potencia o altura de eje.
- Flexibilidad del soporte.

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

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

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

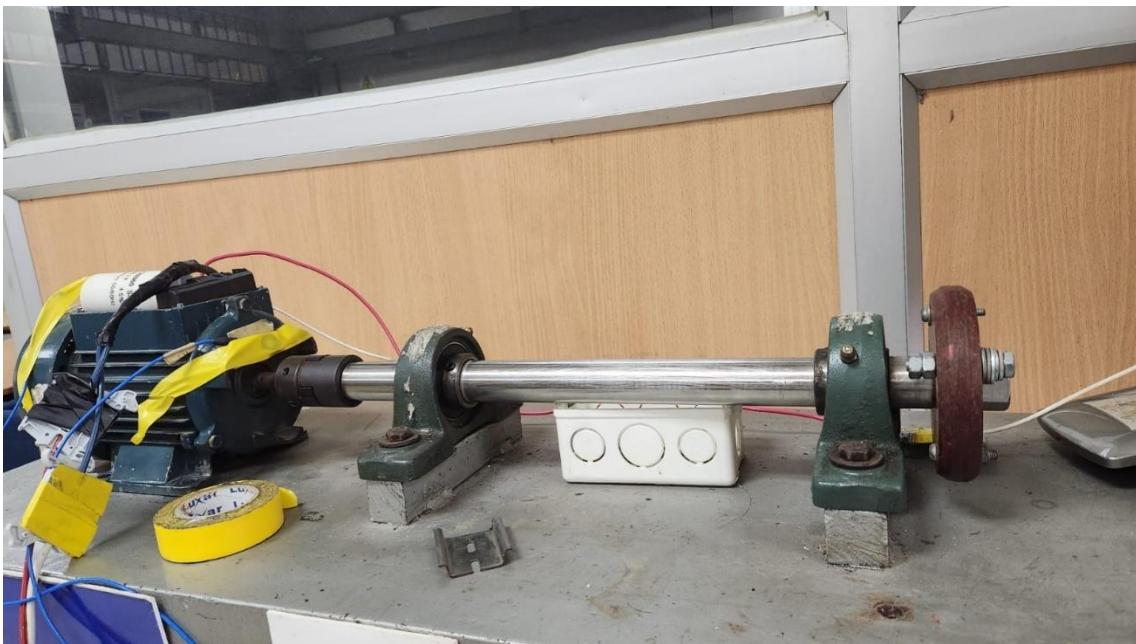
NOTA: La altura del eje H de una máquina está definida como la distancia medida entre la línea de centro del eje y el plano basal de la máquina misma. La altura del eje H de una máquina sin patas o de una máquina con pies levantados o cualquier máquina vertical, se debe tomar como la altura de eje H de una máquina horizontal en el mismo marco básico. Cuando el soporte es desconocido, la mitad del diámetro de máquina puede ser utilizada.



Clasificación según la flexibilidad del soporte

Si la primera frecuencia natural del sistema máquina-soporte en la dirección de la medición es mayor que su frecuencia principal de excitación (en la mayoría de los casos es la frecuencia de rotación) en al menos un 25%, entonces el sistema soporte puede ser considerado rígido en esa dirección. Todos los otros sistemas soportes pueden ser considerados flexibles. En algunos casos el sistema máquina-soporte puede ser considerado rígido en una dirección de medición y flexible en la otra dirección. Por ejemplo, la primera frecuencia natural en la dirección vertical puede estar sobre la frecuencia principal de excitación mientras que la frecuencia natural horizontal puede ser considerablemente menor. Tales sistemas serían rígidos en el plano vertical y flexibles en el plano horizontal. En estos casos, la vibración debe ser evaluada de acuerdo a la clasificación del soporte que corresponda en la dirección de la medición.

6.6 Estructura recibida antes de la tesis





6.7 Estructura entrega luego de la tesis



