

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAAGUAZÚ
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA**



PROYECTO FINAL DE GRADO

**Diseño de un Sistema de Monitoreo Remoto con Análisis
Vibratorio e Interfaz Gráfica para el Mantenimiento
Predictivo de los Motores del Sistema de Ventilación de la
Planta Oncológica de QUIMFA.**

AUTORA:

Jessica Carolina Jara Cuenca

TUTOR:

Prof. Ing. Federico Javier Cabrera Sanabria

CO TUTORA:

Prof. Ing. Luz Melina Vázquez Cáceres

CORONEL OVIEDO, DICIEMBRE DEL 2025



MISIÓN: Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentidos crítico, ético y responsabilidad Social.

VISIÓN: Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.



Usted es libre de:

- **Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato
- **Adaptar** — remezclar, transformar y construir a partir del material

Bajo los siguientes términos:

- **Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.
- **NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



MISIÓN: Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentidos crítico, ético y responsabilidad Social.

VISIÓN: Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

DERECHO DE AUTOR

Quien/es suscribe/n, Jessica Carolina Jara Cuenca, autor/a/autores del trabajo de investigación titulado **“Diseño de un Sistema de Monitoreo Remoto con Análisis Vibratorio e Interfaz Gráfica para el Mantenimiento Predictivo de los motores del Sistema de Ventilación de la Planta Oncológica de QUIMFA”**, declara/n que voluntariamente cede/n a título gratuito en forma pura y simple ilimitada e irrevocablemente a favor de la Facultad de Ciencias y Tecnologías – UNCA, el derecho de autor de contenido patrimonial, que le corresponde sobre el trabajo de referencia. Conforme a lo anteriormente expresado, esta sesión le otorga a la FCyT la Facultad de comunicar la obra divulgarla, publicarla y reproducirla en soportes analógicos o digitales en la oportunidad que así lo estime conveniente. La FCyT deberá indicar qué autoría o creación del trabajo corresponde a mi persona y hará referencia al autor y a las personas que hayan colaborado en la realización del presente trabajo de investigación.

En la ciudad de Coronel Oviedo a los, del mes de del 2025

.....

Jessica Carolina Jara Cuenca



MISIÓN: Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentidos crítico, ético y responsabilidad Social.

VISIÓN: Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo de fin de grado para la obtención del Título de Ingeniera en Electrónica, aprobado en representación de la Facultad Ciencias y Tecnología de la Universidad Nacional de Caaguazú, por el Tribunal Examinador constituido por los siguientes profesores y con la siguiente nota final:

CALIFICACIÓN FINAL: _____

ACTA N°: _____

FECHA: _____

Prof. Ing.

Prof. Ing.

Prof. Ing.



MISIÓN: Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentidos crítico, ético y responsabilidad Social.

VISIÓN: Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

DEDICATORIA

Dedico este Trabajo Final de Grado a mi amado Dios, fuente inagotable de amor, sabiduría y esperanza. A él, que me sostuvo cuando mis fuerzas se desvanecían, que iluminó mi mente cuando los días se nublaban, que puso calma en mi espíritu cuando todo parecía derrumbarse. A ti entrego este logro, porque cada paso fue guiado por tú gracia.

A mi madre Isabel, la mujer cuya ternura y valentía han sido mi refugio más seguro. Gracias por sostenerme en cada momento de angustia, por tu palabra oportuna, por tu abrazo que sana, por la fuerza que sembraste en mí sin siquiera notarlo.

A mi padre Carlos, quién creyó en mí desde el primer momento y me acompañó de principio a fin en la materialización de esta meta. Gracias por cimentar este sueño, por impulsarme a caminar aún cuando dudaba. Este triunfo también te pertenece papá.

A mi maravillosa hermana Karent. Tu cariño, tu apoyo y tu manera de acompañarme han hecho que este camino sea mucho más llevadero. Este logro también lleva tú nombre.

A mis padrinos, tíos y tías, por el amor multitudinario que nunca me faltó, por las palabras que me sostuvieron en la distancia, por la fé que depositaron en mí cuando más la necesitaba.

A mi estrella más brillante en el cielo, mi querido abuelo Del Pilar, tú partida dejó silencio, pero tu luz jamás se apagó en mi vida. Gracias abuelo por aquellas últimas palabras que las atesoro con todo mi ser, por creer en mí sin titubeos, por enseñarme que los sueños se abrazan con el alma. Este logro también es tuyo, porque desde donde estás seguís guiándome con tú amor paternal.

A mi mejor amiga Verónica, que caminó conmigo desde los primeros pasos de esta carrera, que me dio un amor tan grande que ni la muerte pudo arrebatarlo. Aunque ya no estés físicamente, tú fuerza sigue viva en mí, y sé que desde lo más alto celebras cada victoria. Amiga de mi vida, este título también lleva tu nombre.

A mi amigo Walter, gracias por enseñarme a confiar en mi camino, por verme con ojos de admiración cuando yo solo veía cansancio.

Pero por, sobre todo, me lo dedico a mí. A la niña que soñó con ser ingeniera en electrónica, a la joven que luchó contra el cansancio y la duda, a la que cayó, se levantó, lloró, sonrió y siguió.

Me lo dedico porque entendí que los imposibles no existen cuando el corazón insiste.

En memoria eterna de Verónica y Walter, compañeros y amigos que hoy me acompañan en espíritu y se convierten en luz en cada logro.

¡Gracias a todos por ser parte de este viaje!

Jessica Carolina Jara Cuenca



MISIÓN: Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentidos crítico, ético y responsabilidad Social.

VISIÓN: Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor Ing. Federico Cabrera, por su guía, dedicación y acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo. Gracias por su compromiso, sus orientaciones técnicas y por compartir con generosidad sus conocimientos.

A mi co-tutora y mejor amiga Ing. Luz Melina Vázquez, por estar presente en cada paso de este camino. Gracias por tu apoyo incondicional, por tu cariño, por tu amistad y por ser esa presencia luminosa que sostuvo mis días difíciles. Has sido una pieza fundamental en este logro.

Al Sr. Antonio Acuña, Gerente de Ingeniería/Mantenimiento de QUIMFA, por su confianza, su apertura y apoyo durante el desarrollo de este proyecto. Gracias por la oportunidad de aprender y crecer en un entorno profesional tan valioso.

Al Ing. Mauricio Zárate y al Ing. Matheus Goncalves, quienes con su experiencia en el Sistema SVP de la entidad de ITAIPÚ, aportaron conocimientos valiosos que enriquecieron este trabajo.

Al Ing. Pablo Salinas, Ing. Iván Stalder y al Ing. Hugo Benítez, quienes con su vocación, profesionalismo y pasión por la ingeniería fueron una fuente de inspiración constante. Sus conocimientos dejaron una huella importante en mi formación.

Al Ing. Luis Aranda y al Ing. Gustavo Mereles, gracias por su orientación sincera y por demostrarme que la excelencia técnica y la calidad humana pueden ir de la mano.

A todos mis amigos y a cada persona que me acompañó de alguna manera a lo largo de este proceso.

Este trabajo es el reflejo del esfuerzo colectivo de todas las personas que pusieron un poco de sí para que yo pudiera llegar hasta aquí. A cada uno, gracias de corazón.

Jessica Carolina Jara Cuenca



MISIÓN: Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentidos crítico, ético y responsabilidad Social.

VISIÓN: Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

RESUMEN

El sistema de ventilación de la planta oncológica de QUIMFA constituye un componente crítico para la preservación de condiciones ambientales seguras y estables dentro del área de producción farmacéutica. Debido a que los motores que conforman este sistema están expuestos a fallas asociadas al desgaste mecánico, desbalanceo, patas cojas o turbulencias en el flujo de aire. Por ende, resulta fundamental implementar herramientas que permitan anticipar estas condiciones antes de que deriven en interrupciones operativas o riesgos para la integridad del proceso productivo.

Para abordar dicha problemática, se desarrolló el diseño de un sistema de monitoreo remoto basado en análisis vibratorio e interfaz gráfica para el mantenimiento predictivo de los motores del sistema de ventilación. El proyecto se fundamenta en las directrices de mantenimiento predictivo e integra criterios de diagnóstico vibratorio establecidos por ISO 10816/20816. Se emplearon archivos reales obtenidos mediante un analizador digital de vibraciones, los cuales fueron procesados, analizados y visualizados mediante una plataforma desarrollada en Python, incluyendo gráficos espectrales, tendencias históricas y umbrales de alarma configurados según niveles de severidad.

La herramienta propuesta permite identificar comportamientos anómalos, clasificar la severidad de la vibración y emitir alertas visuales que favorecen la toma de decisiones en etapas tempranas. De esta manera, el sistema contribuye a reducir paradas no programadas, optimizar la confiabilidad de los motores y mejorar la gestión operativa dentro de un entorno industrial altamente regulado.

El trabajo se enmarca en la línea de investigación Control y Automatización Industrial, y aporta al ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura), fortaleciendo el uso de tecnologías inteligentes aplicadas al mantenimiento industrial farmacéutico.

Palabras claves: Monitoreo remoto, Análisis vibratorio, Mantenimiento predictivo, Alarmas, Python, ISO 10816/20816.



MISIÓN: Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentidos crítico, ético y responsabilidad Social.
VISIÓN: Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

ABSTRACT

The ventilation system of QUIMFA's oncology plant is a critical component for maintaining safe and stable environmental conditions within the pharmaceutical production area. The motors that drive this system are continuously exposed to mechanical wear, imbalance, soft foot conditions, and airflow turbulence. Consequently, it is essential to implement tools capable of anticipating these failure modes before they lead to operational interruptions or compromise the integrity of the production process.

To address this issue, a remote monitoring system was designed based on vibration analysis and a graphical interface for the predictive maintenance of the ventilation system motors. The project follows predictive maintenance guidelines and incorporates vibration diagnostic criteria established by ISO 10816/20816. Real data obtained from a digital vibration analyzer were processed, analyzed, and visualized through a Python-based platform, which includes spectral plots, historical trends, and alarm thresholds configured according to severity levels.

The proposed tool enables the identification of anomalous behaviors, classification of vibration severity, and generation of visual alerts that support early decision-making. In this way, the system helps reduce unplanned downtime, improve motor reliability, and enhance operational management within a highly regulated industrial environment.

This work is framed within the research line Control and Industrial Automation and contributes to SDG 9 (Industry, Innovation, and Infrastructure) by promoting the use of intelligent technologies applied to pharmaceutical industrial maintenance.

Keywords: Remote monitoring, Vibration analysis, Predictive maintenance, Alarms, Python, ISO 10816/20816.



MISIÓN: Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentidos crítico, ético y responsabilidad Social.
VISIÓN: Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1 Diseño de un Sistema de Monitoreo Remoto con Análisis Vibratorio e Interfaz Gráfica	2
2 Marco Teórico	2
2.1 Sistemas de Monitoreo de Vibraciones en Máquinas Rotativas	2
2.1.1 Vibraciones Mecánicas en Máquinas Rotativas	3
2.1.2 Transformada Rápida de Fourier (FFT).....	3
2.2 Clasificación por Zonas de Severidad Vibratoria (ISO 10816/20816).....	3
2.3 Procesamiento Digital de Señales en Python.....	4
2.3.1 Lectura y Limpieza de Datos CSV	4
2.3.2 Visualización del Espectro y Tendencias.....	4
2.3.3 Registro Histórico y Trazabilidad	4
2.4 Interfaz Gráfica Industrial basada en Streamlit.....	5
2.4.1 Interacción del Operador.....	5
2.4.2 Sistema de Alarmas.....	5
2.5 Relevancia del Análisis Vibratorio en la Industria Farmacéutica.....	5
3 Objetivos.....	6
3.1 Objetivo General	6
3.2 Objetivos Específicos.....	6
4 METODOLOGÍA.....	7
4.1 Relevamiento técnico de los equipos críticos a monitorear.....	7
4.2 Análisis del contexto operativo y de las condiciones ambientales	10
4.3 Determinación de los modos de falla más frecuentes mediante entrevistas y revisión de registros de mantenimiento	11



MISIÓN: Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentidos crítico, ético y responsabilidad Social.
VISIÓN: Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

4.4 Selección de puntos de medición	11
4.4.1 Adquisición de datos vibratorios en planta	12
4.5 Selección de los sensores adecuados según rango, precisión, robustez y compatibilidad con el entorno industrial.	13
4.6 Evaluación de los dispositivos de adquisición en función del número de canales, velocidad de muestreo y protocolos de comunicación.	15
4.7 Determinación de los elementos de procesamiento requeridos que permitan realizar análisis local o transmisión remota.	18
4.8 Definición de los protocolos de comunicación y topología de red que aseguren interoperabilidad y escalabilidad.	20
4.9 Diseño de la arquitectura funcional del sistema, estableciendo el flujo de información desde los sensores hasta la plataforma de supervisión.....	21
4.10 Uso del software ObserVIEW para el análisis de vibraciones.....	23
4.11 Implementación del módulo de procesamiento y visualización en Python/Streamlit	23
5 RESULTADOS Y ANÁLISIS	25
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	29
7 BIBLIOGRAFÍA.....	30



MISIÓN: Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentidos crítico, ético y responsabilidad Social.

VISIÓN: Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

ÍNDICE DE FIGURAS

Gráfico 1: Curvas de rendimiento del modelo de ventilador TSA 7/3 del fabricante OTAM SP. -8	
Gráfico 2: Placa del motor WEG W22 -----	10
Gráfico 3: Localización de Sensores-----	12
Gráfico 4: Análisis vibratorio realizado en planta -----	13
Gráfico 5: Especificaciones técnicas del IEPE Wilcoxon 787A -----	15
Gráfico 6: Especificaciones técnicas del NI-9234 -----	18
Gráfico 7: Flujo de adquisición y procesamiento de datos vibratorios -----	19
Gráfico 8: Diseño de la arquitectura funcional del sistema-----	22
Gráfico 9: Visualización del espectro en ObserVIEW -----	26
Gráfico 10: Interfaz principal del sistema de monitoreo desarrollado en Python/Streamlit.-----	27
Gráfico 11: Fragmento del código en Python para la clasificación automática según la norma ISO 10816/20816.-----	27



MISIÓN: Formar profesionales excelentes con conocimientos científicos y tecnológicos, competentes, con sentidos crítico, ético y responsabilidad Social.
VISIÓN: Ser una Facultad líder, con excelencia en la formación de profesionales que contribuya al desarrollo del País.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Especificaciones del modelo TSA 7/3	9
Tabla 2: Resultado de las mediciones realizadas en planta.....	25
Tabla 3: Presupuesto del sistema de monitoreo vibratorio	28

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de ventilación industrial son una parte esencial para mantener condiciones ambientales controladas dentro de procesos productivos farmacéuticos, principalmente en plantas oncológicas donde las Buenas Prácticas de Manufactura (GMP) requieren un control riguroso de partículas, temperatura, humedad y presión diferencial en las áreas clasificadas [1][2]. En este tipo de instalaciones, los motores eléctricos que impulsan el flujo de aire operan de manera continua y están sujetos a cargas mecánicas y dinámicas que pueden causar fallas por desgaste, desequilibrio, desalineación, patas cojas o turbulencias en el flujo de aire [3]. Diversos estudios indican que una proporción importante de fallos mecánicos en equipos rotativos puede detectarse tempranamente mediante el análisis de vibraciones, lo que convierte a esta técnica en una herramienta clave dentro de las estrategias modernas de mantenimiento predictivo [4].

Cabe señalar que, en muchas instalaciones industriales, incluidas las plantas farmacéuticas altamente sensibles, todavía faltan sistemas sistemáticos de monitoreo vibratorio y de registro histórico estructurado de las condiciones de operación [5]. En el caso del sistema de ventilación de la planta oncológica de QUIMFA, los motores que garantizan el flujo de aire hacia las zonas críticas operan sin un sistema de monitoreo remoto que permita identificar objetiva y cuantitativamente la evolución de su condición mecánica. El monitoreo se basa principalmente en rutinas de inspección convencional y acciones correctivas posteriores, sin integrar criterios formales de diagnóstico de vibraciones ni alarmas configuradas acorde a normas internacionales como ISO 10816/20816 e ISO 13373 [6]-[8]. Esta situación limita la capacidad de anticipación del departamento de mantenimiento y expone a la planta a riesgos de paradas inesperadas, desviaciones en condiciones ambientales y afectación de la continuidad operativa.

La disponibilidad de tecnologías de adquisición de datos, sensores industriales y herramientas de análisis digital permite el desarrollo de soluciones que transformen los datos de vibraciones en información útil para la toma de decisiones. El análisis de vibraciones basado en niveles globales (velocidad RMS), espectros de frecuencia (FFT) y criterios de severidad definidos por normas ISO permite la detección de fallas iniciales y clasificarlas según su criticidad [9]. A su vez, la integración de una interfaz gráfica de usuario facilita la visualización de espectros, tendencias históricas y condiciones de alarma, lo que permite un monitoreo remoto y estructurado de los motores críticos. En este contexto, como respuesta técnica concreta a la necesidad de incrementar la confiabilidad, trazabilidad y capacidad de diagnóstico temprano en una institución farmacéutica muy crítica, se propone el diseño de un sistema de monitoreo remoto con análisis de vibraciones e

interfaz gráfica para el mantenimiento predictivo de los motores del sistema de ventilación en la planta oncológica de QUIMFA.

1 Diseño de un Sistema de Monitoreo Remoto con Análisis Vibratorio e Interfaz Gráfica

Para llevar a cabo este trabajo, se realizó un análisis detallado de las mediciones de vibraciones reales obtenidas utilizando el analizador SKF Microlog Analyzer GZ, también conocida como la serie CMXA 75. Estas mediciones fueron procesadas, almacenadas y analizadas utilizando métodos de monitoreo de condición, siguiendo los lineamientos definidos en normas internacionales como ISO 10816/20816 e ISO 13373 [6]–[8]. El principal objetivo fue diseñar un sistema de monitoreo remoto capaz de generar gráficos espectrales, registrar tendencias históricas y emitir alertas tempranas cuando los valores de vibración superen umbrales definidos, brindando información esencial para la toma de decisiones dentro de un programa de mantenimiento predictivo.

El análisis de vibraciones es una técnica muy utilizada dentro del mantenimiento predictivo, orientada a la detección temprana de defectos en máquinas rotativas. Esta disciplina se basa en la medición y evaluación de parámetros dinámicos, principalmente velocidad RMS, aceleración y frecuencias características que reflejan el comportamiento mecánico de los equipos durante su operación [4][5]. El análisis de vibraciones permite identificar etapas tempranas del daño como desbalanceo, patas cojas, turbulencias en el flujo de aire, etc. Su eficacia radica en que cada tipo de falla genera una “firma vibratoria” específica en el dominio del tiempo y de la frecuencia, la cual es determinada por la transformada rápida de Fourier (FFT) y evaluada según los criterios de severidad establecidos por los estándares internacionales [6]. Por ello, el análisis de vibraciones es uno de los métodos más fiables y habituales en la ingeniería para el diagnóstico de máquinas rotativas.

2 Marco Teórico

2.1 Sistemas de Monitoreo de Vibraciones en Máquinas Rotativas

Para el diseño del sistema de monitoreo utilizado en este trabajo, fue necesario el estudio de conceptos esenciales relacionados con máquinas rotativas, métodos de análisis vibratorio y tecnologías de procesamiento digital. El objetivo fue comprender cuáles qué indicadores clave permiten la detección de defectos mecánicos en motores industriales, para crear una base sólida que justifique los criterios utilizados en el análisis y la visualización implementados en Python.

2.1.1 Vibraciones Mecánicas en Máquinas Rotativas

Las máquinas rotativas producen vibraciones debido al movimiento dinámico de sus componentes. Estas vibraciones pueden aumentar cuando se producen fallas como desbalanceo, desalineación, defectos en rodamientos o turbulencias en el flujo de aire. Según la norma ISO 10816-3/20816, los niveles de velocidad de vibración son parámetros primordiales para evaluar la gravedad del estado mecánico de la máquina. [6].

2.1.2 Transformada Rápida de Fourier (FFT)

Para interpretar el comportamiento vibratorio de un motor, la señal debe transformarse del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Esta operación se logra mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT), técnica que permite identificar componentes como:

- Frecuencia fundamental del motor
- Armónicos
- Picos asociados a desbalanceo, desalineación o fallas en rodamientos

La FFT es uno de los procedimientos más utilizados en el diagnóstico industrial, debido a su alta sensibilidad en la detección temprana de fallas [10].

En los archivos CSV analizados, la FFT ya viene calculada por el analizador SKF, por lo que en Python solamente se realiza la lectura, procesamiento y visualización del espectro.

2.2 Clasificación por Zonas de Severidad Vibratoria (ISO 10816/20816)

La norma ISO define umbrales de severidad que permiten clasificar el estado vibratorio de un motor según su velocidad RMS:

- Zona A – Condición excelente (normal)
- Zona B – Aceptable
- Zona C – Crítica (advertencia)
- Zona D – Inaceptable (alarma)

En este proyecto, dichos límites fueron aplicados mediante programación en Python para activar alertas visuales. Esta clasificación es la base del sistema de semáforo implementado en la interfaz:

- Verde → Normal
- Amarillo → Advertencia
- Rojo → Alarma

El sistema clasifica automáticamente el estado del motor de acuerdo al valor de velocidad global extraído del CSV.

2.3 Procesamiento Digital de Señales en Python

2.3.1 Lectura y Limpieza de Datos CSV

Los archivos CSV provenientes del analizador contienen los datos fundamentales para el análisis vibratorio. En Python se utiliza la librería pandas para:

- Cargar los datos
- Ordenarlos temporalmente
- Filtrar columnas
- Convertir valores numéricos
- Eliminar registros vacíos o innecesarios

Pandas es una herramienta fundamental en aplicaciones industriales donde se requiere analizar tendencias históricas [11].

2.3.2 Visualización del Espectro y Tendencias

La representación gráfica está diseñada con plotly, permitiendo:

- Gráficos espectrales interactivos
- Tendencias históricas de velocidad RMS
- Resaltado visual según zona (A, B, C y D)
- Detección rápida de anomalías

El uso de colores según la condición mecánica forma parte de las prácticas de mantenimiento predictivo recomendadas [12].

2.3.3 Registro Histórico y Trazabilidad

El sistema desarrollado guarda cada análisis en un archivo histórico:

- Velocidad RMS
- Estado de severidad
- Zona
- Nombre del archivo
- Fecha/hora del análisis

Esta trazabilidad es una característica clave en sistemas de monitoreo industrial y permite comparar patrones en el tiempo para anticipar fallas [13].

2.4 Interfaz Gráfica Industrial basada en Streamlit

2.4.1 Interacción del Operador

Streamlit es una herramienta eficaz para el desarrollo de paneles de control industriales. En esta tesis se utiliza para:

- Cargar archivos CSV reales
- Visualizar espectros y tendencias
- Mostrar el estado del motor con semáforo
- Registrar y consultar historial

Su diseño modular permite que un operador sin conocimientos avanzados pueda interpretar la condición de la máquina rápidamente.

2.4.2 Sistema de Alarmas

El sistema de alertas sigue criterios normativos:

- Umbrales fijos configurados en Python
- Cambio automático de color
- Mensajes descriptivos del estado
- Posibilidad de expandir a notificaciones remotas

En proyectos industriales reales, este tipo de alarmas se integra a SCADA o PLC, pero aquí se ejemplifica mediante Streamlit.

2.5 Relevancia del Análisis Vibratorio en la Industria Farmacéutica

En plantas farmacéuticas, especialmente en áreas críticas como producción oncológica, el control de los sistemas de ventilación es fundamental. Cualquier falla en los motores puede comprometer:

- Calidad del aire
- Presiones diferenciales
- Condiciones de sala blanca
- Seguridad del producto y del personal

Por ello, la implementación de herramientas predictivas basadas en vibraciones es una práctica recomendada por estándares internacionales de mantenimiento [14].

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de monitoreo remoto con análisis vibratorio e interfaz gráfica para el mantenimiento predictivo de los motores del sistema de ventilación de la planta oncológica de QUIMFA.

3.2 Objetivos Específicos

- Analizar los modos de falla más relevantes en los motores del sistema de ventilación de la planta oncológica de QUIMFA a partir de criterios de diagnóstico vibratorio.
- Procesar y evaluar señales de vibración reales mediante indicadores de velocidad global, espectros de frecuencia y criterios de severidad establecidos por las normas ISO 10816/20816 e ISO 13373.
- Diseñar una interfaz gráfica de usuario que permita visualizar espectros, tendencias históricas y estados de alarma asociados a los motores monitoreados.
- Proponer una arquitectura técnica para la adquisición, almacenamiento y supervisión remota de mediciones vibracionales, orientada al mantenimiento predictivo de los equipos.

4 METODOLOGÍA

Este trabajo se desarrolló como una investigación aplicada, con un enfoque cuantitativo y un diseño no experimental, bajo la modalidad de estudio de caso en la planta oncológica de QUIMFA. El objetivo central consistió en diseñar un sistema de monitoreo remoto basado en análisis vibratorio e interfaz gráfica para apoyar el mantenimiento predictivo de los motores del sistema de ventilación.

La metodología combinó principios de ingeniería de diseño, monitoreo de condición de máquinas rotativas y procesamiento digital de señales, utilizando mediciones reales de vibración obtenidas previamente mediante un analizador portátil. Estas mediciones fueron procesadas, analizadas y utilizadas como base para determinar los requisitos funcionales del sistema y una propuesta para la selección de sensores y hardware de adquisición para una futura implementación física.

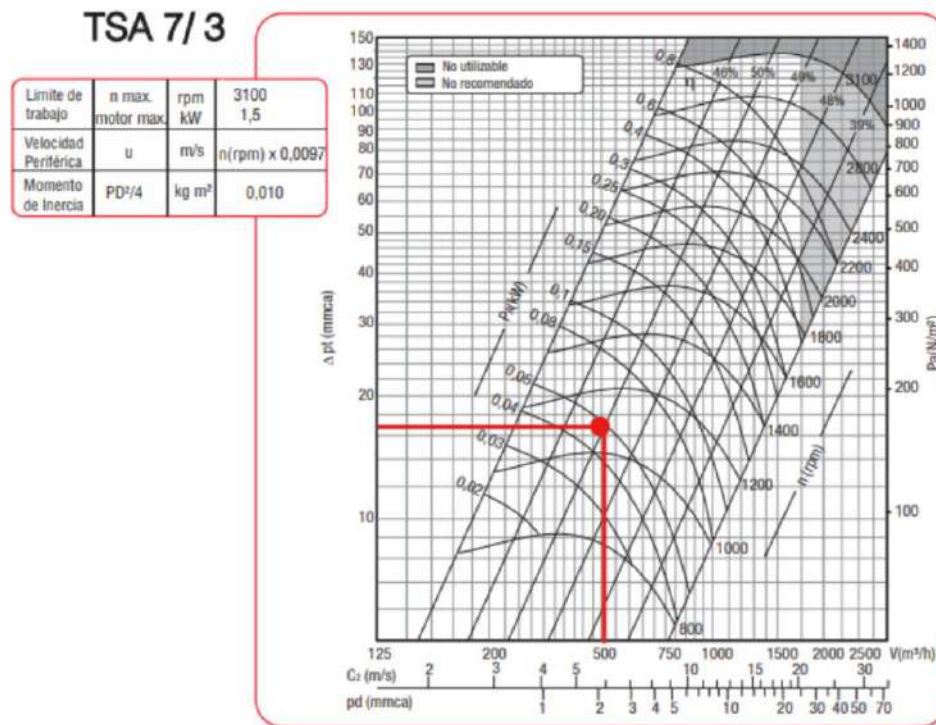
4.1 Relevamiento técnico de los equipos críticos a monitorear.

Se procedió a la recopilación de toda la información técnica disponible sobre los equipos críticos presentes en la planta oncológica de QUIMFA. El objetivo de esta tarea fue la de establecer la línea base de funcionamiento de los equipos que serían posteriormente integrados al sistema de adquisición de datos.

Se realizó un relevamiento en campo para identificar los motores eléctricos, ventiladores del sistema de ventilación (HVAC) y tableros eléctricos asociados al proceso de inyección y extracción. Durante la visita técnica se registraron las placas de datos de cada equipo, incluyendo información sobre potencia nominal, tensión de alimentación, corriente de operación, velocidad de rotación, tipo de acoplamiento y fabricante.

En el gráfico 1 se presenta las curvas de rendimiento del ventilador modelo TSA 7/3 suministradas por el fabricante OTAM SP. Este diagrama muestra la relación entre el caudal de aire y la presión total desarrollada por el ventilador, así como las curvas de potencia absorbida y eficiencia para diferentes puntos de operación:

Gráfico 1: Curvas de rendimiento del modelo de ventilador TSA 7/3 del fabricante OTAM SP.



Fuente: Manual del ventilador TSA 7/3 - Fabricante OTAM SP.

Identificación del Equipo

- **Fabricante:** OTAM SP
- **Línea/Modelo:** Ventilador centrífugo TSA 7/3 (Rotor de simple aspiración)
- **Uso:** Herramienta fundamental para la selección del punto de operación en sistemas de ventilación y aire acondicionado.

Componentes del Gráfico de Curvas

El diagrama muestra la relación entre la presión generada, el caudal de aire movido, la eficiencia y la potencia consumida por el ventilador a distintas velocidades de rotación.

Ejes Principales

- **Eje Vertical Izquierdo (Diferencial de Presión Total):**
 - Representa la capacidad del ventilador para vencer la resistencia del sistema de conductos.
 - Unidades: Milímetros de Columna de Agua (mm c.a.) y Pascales (Pa)
- **Eje Horizontal (V): Caudal Volumétrico:**
 - Representa el volumen de aire movido por unidad de tiempo.

- Unidades: Metros cúbicos por hora (m^3/h) y Velocidad en el conducto.
- Eje Vertical Secundario Derecho: Presión Dinámica.
- Eje Horizontal Secundario Inferior: Presión Dinámica (mm c.a.).

Curvas Interiores

- **Curvas de Iso-velocidad:** Son las líneas arqueadas etiquetadas en rpm (Revoluciones por minuto), como 800, 1200, 1800, etc.
 - Indican la velocidad a la que debe operar el ventilador para mantener un punto de trabajo específico (Caudal vs. Presión).
- **Curvas de Iso-potencia:** Son las líneas que cruzan la curva y están etiquetadas en kW (Kilovatios), como 0.02, 0.04, 0.1, etc.
 - Indican la potencia absorbida por el rotor del ventilador en ese punto de trabajo.
- **Curvas de Iso-rendimiento:** Son las líneas arqueadas etiquetadas con porcentajes (39%, 46%, etc.).
 - Indican la eficiencia del ventilador.
- **Zonas Sombreadas:** Las áreas sombreadas definen las regiones "No utilizable" y "No recomendado".

Especificaciones de Límites del Modelo TSA 7/3

La tabla lateral establece los límites absolutos de operación del ventilador:

Tabla 1: Especificaciones del modelo TSA 7/3

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Límite de trabajo, velocidad máxima	n máx	rpm	3100
Límite de trabajo, potencia máxima del motor acopable	motor máx	kW	1.5
Velocidad periférica	u	m/s	$n(\text{rpm}) \cdot 0.0097$
Momento de Inercia	$PD^2/4$	$Kg \cdot m^2$	0.010

Fuente: Propia del autor.

Datos de la placa del motor (WEG W22)

- **Modelo/carcasa:** 180M-04, 4 polos (≈ 1500 rpm síncronos a 50 Hz).
- **Potencia:** 18.5 kW (≈ 25 HP), 50 Hz, RPM ≈ 1476 ($1 \times = 24.6$ Hz).
- **Tensión:** 380 V Δ / 660 V Y (50 Hz).
- **Corriente aprox.:** 37.1 A / 21.3 A (según conexión).

- **Eficiencia IE3 aprox.:** 92.6 % a plena carga.
- **Rodamientos:** DE 6311-ZZ-C3 / NDE 6211-ZZ-C3, grasa Mobil Polyrex EM

Gráfico 2: Placa del motor WEG W22



Fuente: Propia del autor.

Luego se revisaron las hojas de datos y catálogos de los equipos en coordinación con el personal de ingeniería de mantenimiento para determinar los puntos estratégicos de montaje de los sensores. A partir de este análisis, se optó por la utilización de acelerómetros industriales tipo IEPE (ICP) para la medición de vibraciones en los motores y ventiladores, lo cual es lo adecuado para maquinaria rotativa industrial: alta relación señal/ruido, amplio ancho de banda y cableado coaxial robusto.

Además, se determinó la necesidad de incluir puntos de monitoreo eléctrico en los tableros de control para registrar parámetros de corriente y tensión, con el fin de correlacionar eventos eléctricos con vibraciones mecánicas.

4.2 Análisis del contexto operativo y de las condiciones ambientales

Una vez identificados los equipos a monitorear, se analizó el entorno operativo y de las condiciones ambientales predominantes en el área donde se encuentran los equipos. Este estudio fue fundamental para seleccionar los sensores y dispositivos de adquisición más adecuados para las condiciones reales de operación en la planta de QUIMFA.

Cabe destacar que, se verificó la presencia de fuentes de interferencia electromagnética (EMI) principalmente asociadas a los variadores de frecuencia de los ventiladores y a los tableros

eléctricos de potencia. Por ello se estableció como criterio técnico el uso de cableado apantallado y conectores M12 blindados, garantizando la correcta puesta a tierra y minimizando el acoplamiento de ruido en las señales analógicas.

En cuanto al entorno mecánico, se observó un nivel moderado de vibración ambiental debido al funcionamiento simultáneo de varias máquinas sobre una misma estructura de soporte. Esto motivó la elección de acelerómetros con rango dinámico amplio (± 50 g) y respuesta lineal hasta 10 kHz, asegurando la detección de frecuencias críticas según las normas ISO 10816 e ISO 13373. Finalmente, considerando las condiciones de humedad y exposición, se determinó que todos los sensores a utilizar deberán contar con grado de protección IP65 o superior, carcasa en acero inoxidable y conectores industriales sellados.

4.3 Determinación de los modos de falla más frecuentes mediante entrevistas y revisión de registros de mantenimiento

Para completar la primera fase del proyecto, se identificaron los modos de falla más comunes que afectan a los motores, ventiladores y tableros eléctricos de la planta. Esta actividad se desarrolló mediante entrevistas al personal técnico y analizando los registros históricos de mantenimiento.

Se revisaron los informes de mantenimiento correctivo y preventivo de los últimos tres meses, proporcionados por el área de mantenimiento de QUIMFA, y a partir de esta información se elaboró una matriz de modos y efectos de falla (FMECA), donde se clasificaron los eventos según su tipo (mecánico o eléctrico), causa raíz, efecto sobre la operación y criticidad.

Con base en los resultados obtenidos, se definieron las variables prioritarias de monitoreo para el sistema:

- Aceleración RMS y espectro FFT para detección de desbalanceo, desalineación y defectos de rodamientos.

4.4 Selección de puntos de medición

Para cada motor se establecieron dos puntos sobre la caja de rodamientos: LF (lado fijo/frontal) y LL (lado libre/trasero). La orientación prioritaria del sensor será radial-horizontal en ambos extremos, por su mayor sensibilidad a desbalance/holguras; en campañas puntuales podrá rotarse a axial.

Los puntos establecidos fueron:

LF (lado fijo / frontal): sobre la caja de rodamiento del extremo del motor hacia el ventilador (lado de acople).

LL (lado libre / trasero): sobre la caja de rodamiento del extremo opuesto (tapa del motor).

Gráfico 3: Localización de Sensores



Fuente: Propia del autor.

4.4.1 Adquisición de datos vibratorios en planta

Una vez definidos los puntos de medición sobre las cajas de rodamientos de los motores del sistema de ventilación (puntos LF y LL), se tomaron lecturas de vibraciones en la planta oncológica de QUIMFA utilizando un analizador portátil de vibraciones tipo SKF Microlog, empleado habitualmente por el departamento de mantenimiento.

Las mediciones se tomaron en condiciones normales de operación, con los motores en régimen estable y el sistema de ventilación funcionando en su punto de trabajo habitual. Para cada motor y para cada punto de medición (LF y LL) se registraron los espectros de vibración y los valores globales de velocidad, siguiendo el procedimiento de medición establecido por la empresa.

Los resultados obtenidos con el analizador fueron exportados a archivos en formato CSV, los cuales se utilizaron posteriormente como entrada en el software ObserVIEW para el análisis detallado de los espectros y, más adelante, en el sistema desarrollado en Python/Streamlit para la gestión de alarmas, clasificación según zonas de gravedad y registro histórico de las mediciones.

Gráfico 4: Análisis vibratorio realizado en planta



Fuente: Propia del autor.

4.5 Selección de los sensores adecuados según rango, precisión, robustez y compatibilidad con el entorno industrial.

Si bien las mediciones utilizadas en este trabajo se realizaron con el analizador portátil en planta, en esta sección se plantea la selección de un acelerómetro industrial y de un módulo de adquisición adecuados para una futura implementación física del sistema de monitoreo.

Se seleccionó el acelerómetro industrial IEPE Wilcoxon 787A fue seleccionado luego de analizar diversas alternativas tecnológicas según criterios de precisión, rango dinámico, robustez y compatibilidad con ambientes industriales controlados.

El modelo Wilcoxon 787A cumplió con los parámetros técnicos requeridos para la adquisición de datos de vibración en equipos rotativos, ofreciendo una sensibilidad nominal de 100 mV/g, un rango dinámico de 80 g pico y una respuesta lineal entre 0,7 Hz y 10 kHz (± 3 dB), valores que garantizan una medición confiable de los niveles globales de vibración y de las componentes espectrales de fallas mecánicas según los lineamientos de las normas ISO 10816 e ISO 13373.

El sensor presentó un diseño piezoeléctrico con electrónica integrada (IEPE) que permitió mantener una excelente relación señal–ruido en un amplio rango de frecuencias, característica esencial para el análisis de espectros vibratorios y detección de defectos incipientes en rodamientos.

Asimismo, su carcasa metálica sellada, su grado de protección IP67 y su rango térmico de $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$ garantizaron resistencia frente a humedad, agentes químicos y variaciones ambientales típicas de áreas farmacéuticas, donde se requiere evitar cualquier contaminación o degradación del sensor.

Las certificaciones ATEX e IECEx respaldaron su idoneidad para operar en zonas clasificadas, lo cual resultó coherente con los requisitos de seguridad de una planta oncológica que trabaja bajo condiciones GMP (Good Manufacturing Practices).

Su línea 787A fue desarrollada específicamente para aplicaciones industriales críticas que requieren seguridad intrínseca, alta confiabilidad y resistencia a ambientes controlados.

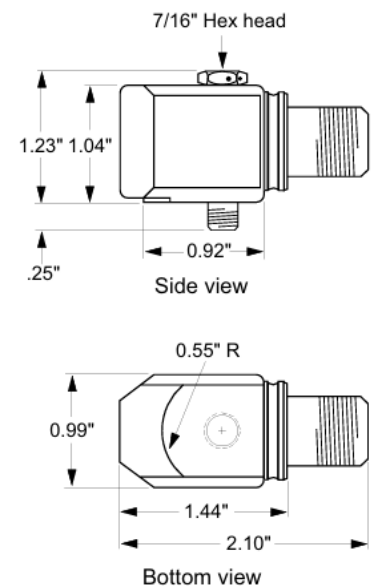
Por estas razones el Wilcoxon 787A fue considerado el modelo más adecuado dentro del diseño ejecutivo del sistema de monitoreo, al equilibrar precisión metrológica, robustez estructural y compatibilidad normativa sin exceder innecesariamente los rangos de diseño establecidos.

En el Gráfico 5 se presentan las principales especificaciones técnicas del acelerómetro IEPE Wilcoxon 787A, utilizado como referencia para el monitoreo de vibraciones en máquinas rotativas:

Especificaciones técnicas del acelerómetro IEPE Wilcoxon 787A

Gráfico 5: Especificaciones técnicas del IEPE Wilcoxon 787A

Parámetro	Valor especificado
Sensibilidad nominal	100 mV/g \pm 5 % (25 °C)
Rango de aceleración	80 g pico
No linealidad de amplitud	\leq 1 %
Respuesta en frecuencia (\pm 10 %)	1 – 5 000 Hz
Respuesta en frecuencia (\pm 3 dB)	0,5 – 10 000 Hz
Frecuencia de resonancia	22 kHz
Sensibilidad transversal (máx.)	5 % del eje axial
Rango de temperatura operativa	-55 °C a +120 °C
Alimentación (IEPE)	18 – 28 V DC, 2 – 10 mA
Ruido eléctrico (equiv.)	700 μ g rms (2,5 Hz–25 kHz); 10 μ g/VHz @ 10 Hz; 5 μ g/VHz @ 100 Hz; 5 μ g/VHz @ 1 000 Hz
Impedancia de salida (máx.)	100 Ω
Material del cuerpo	Acero inoxidable 316L
Diseño del elemento sensor	PZT cerámico / configuración shear
Masa	145 g
Montaje	Tornillo cautivo ¼-28 UNF (hexagonal)
Conector	2 pines MIL-C-5015 (modelo R6 tipo)
Hermeticidad / Sellado	Hermético
Límite de vibración	500 g pico
Límite de choque	5 000 g pico
Sensibilidad a campo magnético	70 μ g/gauss máx.
Certificaciones / Seguridad	Class I Div 1 Groups A-D; Class II Div 1 E-G; Class III; Class I Zone 0 AEx/Ex ia IIC T4; II 1 G Ex ia IIC T4 Ga (Ta = -50 °C a 120 °C)



Fuente: Propia del autor.

4.6 Evaluación de los dispositivos de adquisición en función del número de canales, velocidad de muestreo y protocolos de comunicación.

En esta etapa se evaluaron diversas alternativas de dispositivos de adquisición con el fin de seleccionar una unidad capaz de registrar señales vibratorias provenientes de los acelerómetros IEPE Wilcoxon 787A, instalados en los motores de la planta oncológica de QUIMFA. Debido a que se trabajó con dos motores eléctricos; uno de 25 HP, 4 polos y 1500 rpm, y otro de 30 Kw se definió la necesidad de emplear dos acelerómetros por motor (lado fijo y lado libre), totalizando cuatro canales dinámicos.

La selección del dispositivo de adquisición se desarrolló con un enfoque orientado a asegurar replicabilidad, compatibilidad industrial y suficiencia técnica para el análisis vibratorio de alta frecuencia. Para ello, se evaluaron tres criterios fundamentales:

1. Número de canales requeridos

2. Velocidad de muestreo por canal
3. Protocolos de comunicación y nivel de integración industrial

Requisitos derivados del acelerómetro Wilcoxon 787A-IS

Del datasheet del 787A-IS se consideraron como requisitos mínimos:

- Tipo de sensor: Acelerómetro IEPE (alimentación por corriente constante).
- Excitación requerida: 2 a 10 mA, 18–28 VDC.
- Respuesta en frecuencia:
 - 1 Hz a 5.000 Hz ($\pm 10\%$)
 - 0,5 Hz a 10.000 Hz (± 3 dB)
- Sensibilidad nominal: 100 mV/g.
- Rango dinámico: hasta 80 g pico.

A partir de esto se estableció que el módulo de adquisición debía:

- Disponer de entradas IEPE con corriente de excitación dentro de 2–10 mA.
- Soportar una frecuencia de muestreo ≥ 20 kS/s por canal, recomendándose 25,6–51,2 kS/s para cubrir hasta 10 kHz con margen.
- Ofrecer al menos 4 canales simultáneos, para conectar los 4 sensores (DE y NDE de cada motor).
- Utilizar un protocolo físico compatible con IEPE entre sensor y módulo (es decir, entrada AC con excitación de corriente constante) y una interfaz estándar hacia el PC que permita exportar datos en formato procesable (CSV).

Dispositivo de adquisición seleccionado: NI-9234

Con estos criterios se seleccionó el módulo NI-9234, integrado en un chasis CompactDAQ, porque cumple de forma directa con los requisitos anteriores:

- Número de canales:
 - 4 canales de entrada analógica, todos muestreados simultáneamente, suficientes para los dos motores (2 sensores por motor).
- Compatibilidad eléctrica / protocolo de sensado (IEPE):
 - Entradas diferenciales AC/DC seleccionables por software.
 - Excitación IEPE integrada: corriente típica de 2,1 mA por canal (mínimo 2,0 mA), dentro del rango requerido por el 787A-IS.
 - Cumple con el rango de tensión y la forma de alimentación necesaria para este tipo de acelerómetro.
- Velocidad de muestreo / banda útil:

- Frecuencia de muestreo con reloj interno entre 1,652 kS/s y 51,2 kS/s por canal, suficiente para cubrir el rango de frecuencia del acelerómetro (hasta 10 kHz) con un factor de muestreo ≥ 5 veces la frecuencia máxima si se configura en 51,2 kS/s.
- ADC delta-sigma de 24 bits con filtrado anti-aliasing integrado, adecuado para análisis espectral de vibraciones.
- Interfaz con el sistema superior (PC / software):
 - El NI-9234 se monta en un chasis CompactDAQ que proporciona la interfaz de comunicación (por ejemplo, Ethernet) hacia el PC industrial.
 - Desde el PC, los datos se almacenan en archivos CSV, que actúan como “protocolo de intercambio” con los módulos de software:
 - ObserVIEW para análisis espectral.
 - Interfaz Gráfica en Python

Criterios de selección del módulo DAQ

El módulo NI-9234 se seleccionó porque:

- Proporciona 4 canales simultáneos, exactamente los necesarios para dos motores con dos acelerómetros por motor.
- Implementa el protocolo físico IEPE (corriente constante 2–10 mA) requerido por el acelerómetro Wilcoxon 787A-IS.
- Ofrece una frecuencia de muestreo máxima de 51,2 kS/s por canal, suficiente para analizar vibraciones hasta 10 kHz con buena resolución.
- Se integra con un chasis CompactDAQ que permite la comunicación con el PC y la exportación de datos en formato CSV, compatible con los módulos de análisis definidos en el proyecto.

En el Gráfico 6 se presentan las principales especificaciones técnicas del módulo de adquisición NI-9234, orientado a la medición de señales dinámicas como las provenientes de sensores de vibración IEPE. La tabla resume sus cuatro canales analógicos de entrada con muestreo simultáneo, convertidor ADC delta-sigma de 24 bits y un rango de muestreo que puede alcanzar hasta 51,2 kS/s por canal, así como el rango de entrada de ± 5 V y la posibilidad de acoplamiento AC/DC seleccionable por software:

Gráfico 6: Especificaciones técnicas del NI-9234

Categoría	Especificación técnica
Número de canales	4 canales analógicos de entrada, muestreo simultáneo
Tipo de ADC	Delta-Sigma, 24 bits
Rango de muestreo	1,652 kS/s a 51,2 kS/s por canal (reloj)
Rango de entrada	±5 V (mín: ±5 Vpk; típico: ±5,1 Vpk; máx: ±5,2 Vpk)
Acoplamiento de entrada	AC / DC seleccionable por software
Frecuencia de corte AC (-3 dB)	0,5 Hz
Ancho de banda libre de alias (alias-free)	0,45 × fs
Excitación IEPE	2,0 mA (mín) / 2,1 mA (típico)
Voltaje de cumplimiento IEPE	Máximo 19 V
Impedancia de entrada (diferencial)	305 kΩ
Entrada común (common-mode)	±2 V
Protección contra sobretensión	±30 V respecto a tierra
Ruido de canal (idle channel noise)	50 μVrms (51,2 kS/s) / 40 μVrms (25,6 kS/s)
Ruido espectral (noise density)	310 nV/√Hz (51,2 kS/s)
THD (1 kHz)	-95 dB (-1 dBFS)
Crosstalk	-110 dB (1 kHz)
CMRR	40 dB (mín), 47 dB (típico)
Consumo eléctrico	900 mW máx (activo)
Peso	173 g
Temperatura de operación	-40 °C a 70 °C
Humedad de operación	10 % a 90 %, sin condensación
Vibración operativa	5 g RMS (10 Hz-500 Hz)
Shock operativo	30 g (11 ms), 50 g (3 ms)
Categoría de medición	CAT I
Compatibilidad TEDS	IEEE 1451.4 Clase I
Aislamiento	Sin aislamiento canal-canal / canal-tierra
Recomendación de calibración	Cada 1 año



Fuente: Propia del autor.

4.7 Determinación de los elementos de procesamiento requeridos que permitan realizar análisis local o transmisión remota.

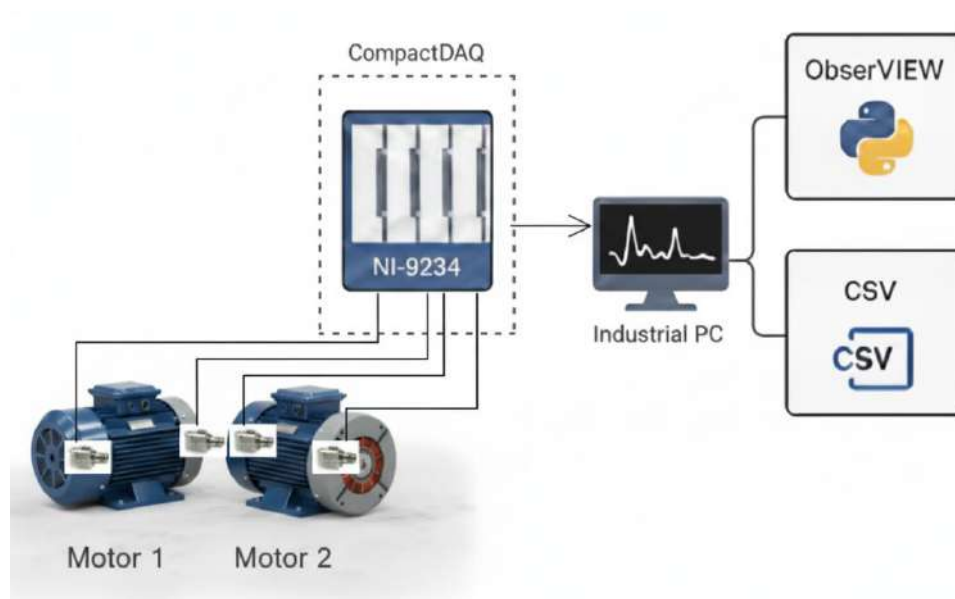
Se determinaron los elementos de procesamiento necesarios para manejar las señales vibratorias generadas por los acelerómetros IEPE y adquiridas mediante el módulo de adquisición seleccionado. El objetivo fue asegurar que el sistema fuese capaz de procesar localmente los espectros vibratorios y al mismo tiempo transmitir los valores relevantes hacia el sistema SCADA de la planta oncológica de QUIMFA para su visualización y registro.

Primeramente, se estableció el flujo completo de los datos desde el punto de medición hasta el operador. Para ello se definió la arquitectura que permitió que las señales capturadas por los sensores fueran enviadas al módulo NI-9234 y posteriormente a la estación de procesamiento. El flujo quedó estructurado de la siguiente manera:

- **Captura:** los acelerómetros IEPE instalados en los motores generaron las señales vibratorias.
- **Adquisición:** las señales fueron enviadas al módulo NI-9234, donde se realizó la conversión analógico–digital.
- **Transferencia:** el chasis transmitió los datos hacia la estación de procesamiento mediante enlace Ethernet.
- **Procesamiento local:** los datos fueron analizados en ObserVIEW, donde se obtuvieron espectros FFT, métricas globales y estados de alarma.
- **Exportación:** ObserVIEW permitió generar archivos en formatos compatibles (como CSV o imágenes), utilizados para diagnósticos y documentación técnica.

Esta definición permitió determinar qué capacidades debía poseer el equipo encargado del análisis para evitar pérdidas de datos o latencias en la transmisión.

Gráfico 7: Flujo de adquisición y procesamiento de datos vibratorios



Fuente: Propia del autor.

Finalmente, se seleccionó una estación de trabajo con:

- puerto Ethernet dedicado para recibir los datos del sistema de adquisición,
- compatibilidad con los controladores del módulo,
- capacidad de procesamiento suficiente para FFT y trending,

- y estabilidad operativa para un entorno industrial farmacéutico.

Esta estación quedó designada como nodo central del sistema de mantenimiento predictivo.

4.8 Definición de los protocolos de comunicación y topología de red que aseguren interoperabilidad y escalabilidad.

Se definieron los protocolos de comunicación y la topología de red que permitieron garantizar la interoperabilidad entre el módulo de adquisición NI-9234 y la estación de procesamiento donde se ejecutó ObserVIEW, asegurando además la posibilidad de expandir el sistema hacia futuros puntos de monitoreo sin necesidad de rediseñar la arquitectura.

Para establecer la estrategia de comunicación se partió de los requerimientos técnicos del sistema de monitoreo vibratorio:

- Transmisión de datos digitales provenientes del módulo NI-9234
- Sincronización estable entre la adquisición y ObserVIEW
- Latencia mínima para análisis locales
- Robustez frente a interferencias electromagnéticas presentes en entornos industriales
- Compatibilidad con infraestructuras estándar de planta.

Se evaluaron diferentes protocolos de comunicación industrial. El análisis consideró: ancho de banda disponible, tolerancia a ruido, compatibilidad con los equipos, facilidad de integración y sostenibilidad a largo plazo.

Tras este estudio se seleccionó Ethernet industrial como protocolo principal, debido a que:

1. El chasis del NI-9234 opera nativamente mediante Ethernet, evitando la necesidad de conversores o hardware adicional.
2. Proporciona alto ancho de banda, necesario para trasladar muestras digitales de vibración sin pérdidas.
3. Es determinístico a nivel de aplicación cuando se configura en una red dedicada.
4. Posee alta inmunidad al ruido electromagnético cuando se emplea cableado blindado (STP/FTP).
5. Es una tecnología universal en entornos industriales, lo que garantiza soporte, repuestos y escalabilidad.

Una vez elegido el protocolo, se definió la topología de red más adecuada para un sistema de monitoreo vibratorio dedicado.

Se seleccionó una topología en “estrella”, centrada en un único punto de conexión, por las siguientes razones:

➤ **Interoperabilidad:**

La estrella permitió que cada dispositivo se conectara a un único nodo común (switch o puerto dedicado), lo cual:

- aisló fallas por segmento,
- simplificó la gestión de tráfico,
- y facilitó la conexión directa entre el NI-9234 y la estación de procesamiento.

➤ **Escalabilidad:**

La topología seleccionada permitió agregar fácilmente:

- nuevos módulos de adquisición,
- nuevos motores monitoreados,
- nuevas estaciones de análisis si en el futuro se requirieran.

Simplemente se añadió un nuevo enlace hacia el switch central sin alterar la arquitectura existente.

➤ **Robustez eléctrica:**

La estrella reduce trayectos largos de cableado en paralelo, minimizando el acoplamiento inductivo y capacitivo generado por motores, ventiladores y tableros eléctricos cercanos.

➤ **Trazabilidad y mantenimiento:**

El diseño permitió identificar rápidamente cualquier falla de comunicación debido a que cada enlace era independiente.

Para la comunicación se optó por un cableado Ethernet categoría 6 blindado (Cat6-STP) por su:

- Excelente inmunidad al ruido en áreas electromagnéticamente agresivas
- Capacidad para transmitir datos a 1 Gbps sin pérdida
- Compatibilidad con los conectores estándar ya presentes en el chasis NI y la estación de procesamiento.

El uso de cable blindado permitió reducir la susceptibilidad a interferencias provenientes de:

- Variadores de velocidad
- Arrancadores
- Ventiladores industriales
- Tableros con líneas de potencia.

4.9 Diseño de la arquitectura funcional del sistema, estableciendo el flujo de información desde los sensores hasta la plataforma de supervisión.

La arquitectura funcional del sistema fue diseñada con el objetivo de representar de forma clara el flujo de información necesario para el monitoreo vibratorio de los motores. Para ello se estructuró

el sistema en cuatro bloques principales, permitiendo visualizar la relación entre las etapas de sensado, adquisición, comunicación y análisis.

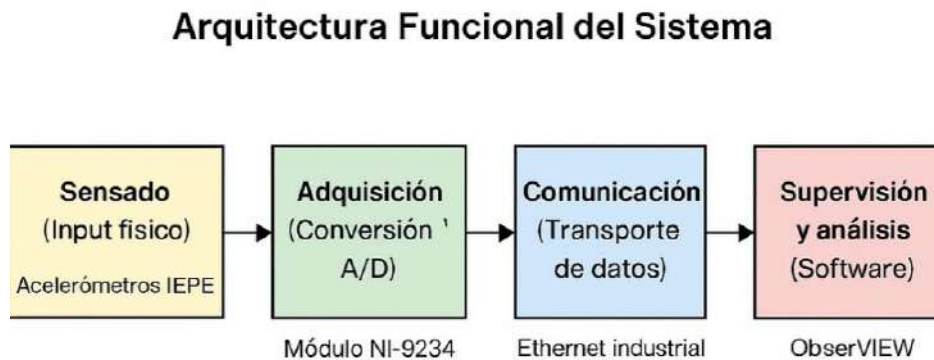
El primer bloque correspondió al sensado, donde se definió el uso de acelerómetros IEPE para la captación de las señales mecánicas generadas por los motores. Estos sensores fueron seleccionados por su linealidad, respuesta en frecuencia y capacidad de operar en entornos industriales.

El segundo bloque fue el de adquisición, en el cual se especificó que el módulo NI-9234 sería el encargado de recibir las señales analógicas provenientes de los acelerómetros y realizar la conversión analógico–digital.

El tercer bloque se centró en la comunicación, donde se estableció el uso de Ethernet industrial como medio de transporte de los datos digitalizados hacia la estación de procesamiento.

Finalmente, el cuarto bloque correspondió a supervisión y análisis, etapa en la cual se determinó que los datos serían procesados mediante el software ObserVIEW. En esta plataforma se definieron las operaciones analíticas previstas, como transformadas FFT, análisis espectral, trending y generación de indicadores de vibración. Asimismo, se establecieron los métodos de exportación de resultados para su documentación y evaluación técnica.

Gráfico 8: Diseño de la arquitectura funcional del sistema



Fuente: Propia del autor.

El diseño de la arquitectura funcional permitió visualizar de manera ordenada la interacción entre las distintas capas del sistema y facilitó la descripción del flujo de información necesario para su implementación futura.

4.10 Uso del software ObserVIEW para el análisis de vibraciones

Los datos de vibración utilizados en este trabajo corresponden a mediciones reales realizadas en la planta oncológica de QUIMFA mediante un analizador portátil de vibraciones, el cual exporta directamente las lecturas en formato CSV. Estos archivos CSV se importaron en el software ObserVIEW que se empleó como herramienta especializada para el análisis espectral y la validación de la información que posteriormente alimenta al sistema desarrollado en Python.

Los archivos CSV generados por el analizador fueron abiertos en ObserVIEW y se verificó la correcta configuración de los parámetros de análisis tales como la frecuencia de muestreo, el número de líneas de FFT, el tipo de ventana y el rango de frecuencia de interés. A partir de esta configuración el software permitió visualizar el espectro de vibración y confirmar la presencia de componentes asociadas a los modos de falla relevantes para el sistema de ventilación (desbalanceo, patas cojas, turbulencias, entre otros).

ObserVIEW se utilizó principalmente para analizar y validar los espectros obtenidos a partir de las mediciones en planta, así como para confirmar los valores globales de vibración entregados por el analizador. De este modo actuó como un módulo de análisis vibratorio especializado mientras que los mismos archivos CSV generados por el analizador se reutilizaron como entrada en el sistema desarrollado en Python/Streamlit para la clasificación automática, la gestión de alarmas y el registro histórico de las mediciones.

4.11 Implementación del módulo de procesamiento y visualización en Python/Streamlit

Sobre la base de los archivos CSV generados por el analizador portátil y validados mediante el uso de ObserVIEW se desarrolló un módulo de procesamiento y visualización en Python, con una interfaz gráfica implementada en Streamlit orientado a la clasificación automática de la condición vibratoria y a la presentación de la información al operador.

En una primera etapa se programaron funciones para la lectura y validación de los archivos CSV ubicados en la carpeta de datos. Utilizando la librería pandas se realizaron tareas de carga de datos, conversión de tipos numéricos, filtrado de columnas relevantes y eliminación de registros vacíos o inconsistentes asegurando que cada archivo cumpliera con la estructura mínima requerida para el análisis (por ejemplo, frecuencia en Hz y valor de velocidad global en mm/s).

Posteriormente se implementó la extracción de la velocidad global de vibración y su comparación con los umbrales definidos según las zonas de severidad establecidas por la normativa ISO 10816/20816. En función del valor obtenido el módulo asigna al motor una condición de estado (NORMAL, ADVERTENCIA o ALARMA) y la representa mediante un semáforo de colores en

la interfaz gráfica. Esta lógica se complementa con mensajes descriptivos que facilitan la interpretación del resultado por parte del operador sin necesidad de conocimientos avanzados en análisis vibratorio.

El sistema registra cada análisis en un archivo histórico adicional donde se almacenan la fecha y hora del análisis, la velocidad global, la zona de severidad, el estado asignado y el nombre del archivo procesado. Este historial se utiliza para generar gráficos de tendencia de la condición vibratoria de los motores permitiendo así observar la evolución en el tiempo y reforzando el enfoque de mantenimiento predictivo. Cabe destacar que los gráficos espectrales y de tendencia se construyen con la librería plotly y se integran en el panel de Streamlit como elementos interactivos.

El código fuente completo del sistema de monitoreo y visualización desarrollado en Python/Streamlit se incluye en los Anexos, de manera que pueda ser revisado y adaptado en una futura implementación dentro de la infraestructura informática de QUIMFA.

5 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se procesaron los archivos CSV exportados por el analizador digital de vibraciones utilizado en la planta oncológica de QUIMFA, correspondientes a mediciones realizadas sobre los motores del sistema de ventilación. Cada archivo representó una medición puntual en un motor y en un punto de montaje específico con el espectro de velocidad en función de la frecuencia y el valor de velocidad global integrado en mm/s.

A partir de estas mediciones se obtuvo para cada motor y punto de medición el valor de velocidad global de vibración y la zona de severidad asignada según los límites establecidos en la norma ISO 10816/20816.

En la Tabla 2 se resume el resultado de las mediciones realizadas sobre los motores del sistema de ventilación.

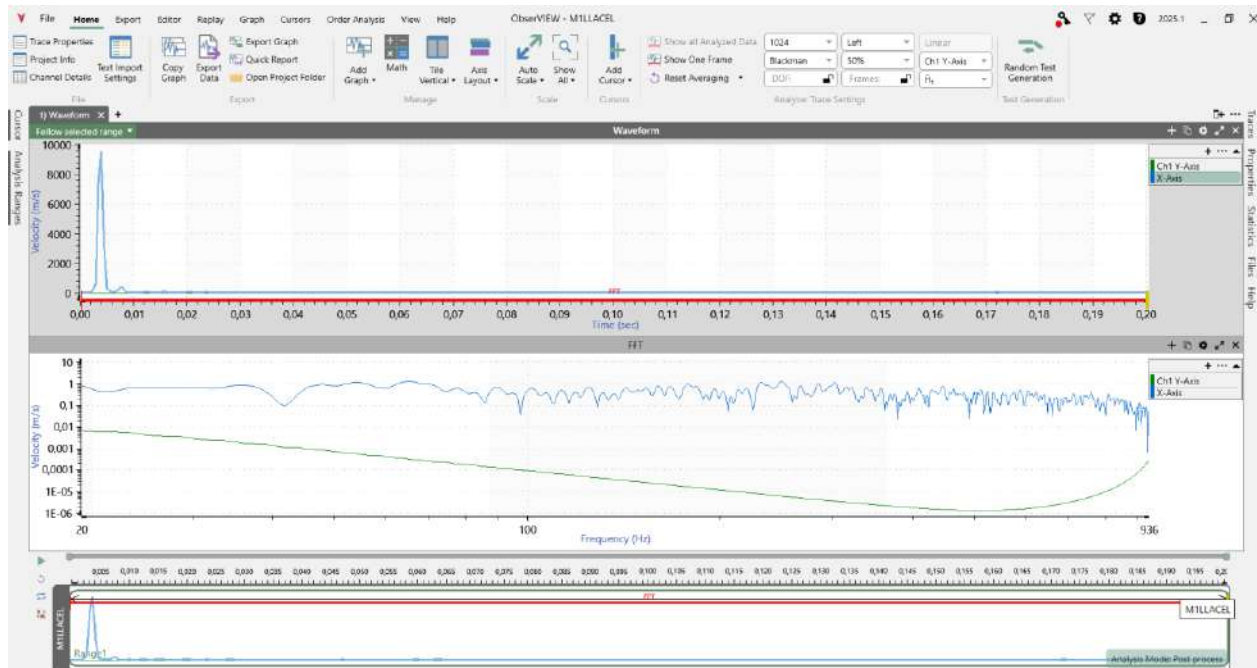
Tabla 2: Resultado de las mediciones realizadas en planta

Motor	Punto	Fecha/Hora de medición	Velocidad global mm/s	Zona ISO 10816/20816	Estado
Motor 1	LF	04 Nov 2025 11:09:14	11.239	D	ALARMA
Motor 1	LL	04 Nov 2025 11:10:53	10.155	D	ALARMA
Motor 2	LF	04 Nov 2025 11:24:49	0.158	A	NORMAL
Motor 2	LL	04 Nov 2025 11:34:07	0.178	A	NORMAL

Fuente: Propia del autor.

Los archivos CSV se importaron en el software ObserVIEW utilizando la configuración de adquisición empleada en planta. Para cada medición se visualizaron el espectro de vibración y el valor global asociado, lo que permitió verificar la presencia de componentes en frecuencias relacionadas con la velocidad de giro del motor y posibles defectos mecánicos. Un ejemplo de estos resultados se muestra en el Gráfico 9:

Gráfico 9: Visualización del espectro en ObserVIEW



Fuente: Propia del autor.

El sistema de monitoreo dispone de una interfaz que permite cargar los mismos archivos CSV utilizados en ObserVIEW, procesarlos automáticamente y presentar al operador el estado del motor. Al seleccionar un archivo, la aplicación lee los datos, obtiene la velocidad global de vibración, clasifica la severidad según la norma ISO 10816/20816 y muestra el resultado mediante un semáforo de colores.

En la pantalla principal se visualizan la velocidad global, la zona de severidad, el estado del motor (NORMAL, ADVERTENCIA o ALARMA) y los datos básicos del archivo analizado (Gráfico 10). Esta presentación resume la información relevante sin necesidad de revisar cada espectro individual:

Gráfico 10: Interfaz principal del sistema de monitoreo desarrollado en Python/Streamlit.



Fuente: Propia del autor.

La clasificación se implementó comparando la velocidad global de vibración con los umbrales de la norma ISO 10816/20816. A partir de este valor, el sistema determina la zona de severidad (A, B, C o D) y asigna el estado del motor, considerando NORMAL las zonas A–B, ADVERTENCIA la zona C y ALARMA la zona D.

Gráfico 11: Fragmento del código en Python para la clasificación automática según la norma ISO 10816/20816.

```
53 # Umbrales según ISO 10816/20816-3 para máquinas medianas, base rígida (mm/s RMS)
54 UMBRAL_VERDE = 2.8 # límite superior para zonas A+B (operación normal)
55 UMBRAL_AMARILLO = 4.5 # límite superior para zona C (operación restringida)
56 # por encima de 4.5 mm/s → zona D (condición crítica)
57
58
59 # =====
60 # FUNCIONES AUXILIARES
61 # =====
62 def get_data_dir() -> str:
63     return DATA_DIR
64
65
66 def listar_archivos_csv():
67     """Lista todos los archivos .csv disponibles en la carpeta data/."""
68     if not os.path.isdir(DATA_DIR):
69         return []
70     archivos = [
71         f for f in os.listdir(DATA_DIR)
72         if f.lower().endswith(".csv")
73     ]
74     archivos.sort()
75     return archivos
76
77
78 def obtener_csv_mas_reciente():
79     """Devuelve el nombre del archivo .csv más reciente dentro de data/."""
80     if not os.path.isdir(DATA_DIR):
81         return None
82     archivos = [
83         os.path.join(DATA_DIR, f)
84         for f in os.listdir(DATA_DIR)
85         if f.lower().endswith(".csv")
86     ]
87     if not archivos:
88         return None
89     archivo_mas_reciente = max(archivos, key=os.path.getmtime)
90     return os.path.basename(archivo_mas_reciente)
```

En la Tabla 3 se presenta el presupuesto detallado del sistema de monitoreo vibratorio propuesto, incluyendo el hardware de adquisición (módulo NI-9234, chasis cDAQ-9171, acelerómetros intrínsecamente seguros, gabinete, cableado, switch industrial y PC de monitoreo) y la licencia avanzada del software ObserVIEW. El costo total estimado asciende a 14.576,81 USD, calculado a partir de precios reales obtenidos de catálogos online de proveedores internacionales como Newark, Digi-Key, distribuidores de gabinetes y cableado, y TestMart para la licencia avanzada de ObserVIEW. Estos valores se consideran referenciales, sin incluir impuestos, aranceles de importación ni costos de mano de obra o instalación.

Tabla 3: Presupuesto del sistema de monitoreo vibratorio

Ítem	Cantidad	Precio unitario [USD]	Subtotal [USD]	Fuente (sitio web)
Módulo NI-9234 sonido y vibración	1	3,791.34	3,791.34	Newark – NI 9234 (779680-01) (Newark Electronics)
Chasis cDAQ-9171 USB, 1 slot	1	558.96	558.96	Newark – cDAQ-9171 (781425-01) (Newark Electronics)
Acelerómetro 787A-IS (100 mV/g, intrínsecamente seguro)	4	473.88	1,895.52	Catálogos online Amphenol Wilcoxon/Digi-Key (787A-IS) (DigiKey)
Envolvente NEMA 4 acero 24"×24"×8"	1	151.99	151.99	Enclosure NEMA 24×24×8 – tienda online (Walmart/industrial) (Walmart.com)
Cable de instrumentación blindado (ej. Belden 8723, 100 ft)	100 ft = 30,48m	1.60	160.00	Belden 8723 – eBay (100 ft roll) (eBay)
Switch Ethernet industrial 5 puertos no gestionado	1	120.00	120.00	Fiberopticlink – 5-Port Unmanaged Industrial Switch (Fiber Optic Link)
PC de monitoreo HP i5, 16 GB RAM, SSD 512 GB	1	599.00	599.00	HP/desktop similar en Walmart (Walmart.com)
Licencia avanzada ObserVIEW (single user standalone)	1	7,300.00	7,300.00	TestMart – ADVANCED LICENSE - SOFTWARE ObserVIEW VR1653 (TestMart)
TOTAL PROYECTO (hardware + software)			14,576.81\$= 101.801.261,92 Gs	

Fuente: Propia del autor.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al finalizar este trabajo de tesis de grado se evidencia la importancia crítica que tiene el sistema de ventilación de la planta oncológica de QUIMFA, para garantizar condiciones ambientales seguras y estables en el área de producción farmacéutica. El análisis realizado confirma que los motores que componen dicho sistema están expuestos a fallas asociadas al desgaste mecánico, desbalanceo, patas cojas y turbulencias en el flujo de aire, por lo que contar con una herramienta de monitoreo remoto y diagnóstico temprano no solo es deseable sino necesario para preservar la continuidad operativa y la integridad del proceso productivo. Para el diseño se utilizaron archivos reales de vibración obtenidos mediante un analizador digital, aplicando criterios de diagnóstico basados en las normas ISO 10816/20816 y estableciendo niveles de severidad acordes a la realidad de la planta.

Las pruebas realizadas confirmaron que la interfaz clasifica correctamente el estado de los motores según umbrales definidos, detectando variaciones relevantes en la velocidad global y en el contenido espectral asociadas a fallas incipientes. El trabajo sienta las bases de una estrategia de mantenimiento predictivo en los motores del sistema de ventilación de QUIMFA, mediante un diseño replicable y escalable, apoyado en mediciones vibratorias reales, límites de alarma bien definidos e interfaces gráficas orientadas a la toma de decisiones basada en datos.

Recomendaciones

1. **Implementación piloto:** Aplicar el sistema primero en pocos motores críticos para validar umbrales, configuración de sensores y funcionamiento de la interfaz con datos reales.
2. **Ajuste de umbrales:** Revisar periódicamente los límites de advertencia y alarma basados en ISO 10816/20816, usando el historial de mediciones de la planta para afinarlos.
3. **Historial de datos:** Mantener una base de datos organizada de vibraciones (espectros, velocidad global y estados de alarma) para analizar tendencias y priorizar intervenciones.
4. **Integración con mantenimiento:** Vincular el sistema de monitoreo con el software de gestión de mantenimiento, de modo que las alarmas generen automáticamente órdenes de trabajo y registros.
5. **Capacitación del personal:** Capacitar al personal de mantenimiento en análisis vibratorio básico y uso de la interfaz en Python, para que puedan interpretar correctamente los estados de alarma.
6. **Escalabilidad futura:** Evaluar la ampliación del sistema a otros motores y la incorporación de variables eléctricas y de proceso, mejorando la precisión del diagnóstico de fallas.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] World Health Organization, «WHO Expert Committee on Specifications for Pharmaceutical Preparations: Good Manufacturing Practices (GMP),» 2019. [En línea]. Available: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241210195>.
- [2] International Society for Pharmaceutical Engineering (ISPE), «ISPE Good Practice Guide: HVAC for Pharmaceutical Facilities,» 2016. [En línea]. Available: <https://ispe.org/publications/guidance-documents/hvac-pharmaceutical-facilities>.
- [3] A. Muszynska, «Rotordynamics,» 2005. [En línea]. Available: <https://www.routledge.com/Rotordynamics/Muszynska/p/book/9780824713997>.
- [4] R. K. Mobley, «An Introduction to Predictive Maintenance,» 2002. [En línea]. Available: <https://www.elsevier.com/books/an-introduction-to-predictive-maintenance/mobley/978-0-7506-7531-4>.
- [5] A. K. Jardine, D. Lin y D. Banjevic, «Mechanical Systems and Signal Processing,» 2006. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.04.005>.
- [6] International Organization for Standardization, «ISO 10816-3: Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts — Part 3,» 2009. [En línea]. Available: <https://www.iso.org/standard/47504.html>.
- [7] International Organization for Standardization, «ISO 13373-1: Condition monitoring and diagnostics of machines — Vibration condition monitoring — Part 1: General procedures,» [En línea]. Available: <https://www.iso.org/standard/53871.html>.
- [8] International Organization for Standardization, «ISO 20816-1: Mechanical vibration — Measurement and evaluation of machine vibration — Part 1: General guidelines,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.iso.org/standard/68041.html>.
- [9] C. W. d. Silva, «Vibration Monitoring, Testing, and Instrumentation,» [En línea]. Available: <https://www.routledge.com/Vibration-Monitoring-Testing-and-Instrumentation/Silva/p/book/9780849390168>.
- [10] A. V. O. a. R. Schafer, «Discrete-Time Signal Processing,» 2009. [En línea]. Available: <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/discrete-time-signal-processing/P200000001016/9780131988422>.
- [11] Pandas Development Team, «pandas.DataFrame – Official Documentation,» 2024. [En línea]. Available: <https://pandas.pydata.org/docs/>.
- [12] SKF Group – Reliability Engineering Department, 2022. [En línea]. Available: <https://www.skf.com/group/services/training/vibration-analysis>.
- [13] Mobius Institute – Technical Training Division, «Condition Monitoring & Vibration Analysis,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.mobiusinstitute.com>.
- [14] ISPE, «Good Engineering Practices for HVAC in Pharmaceutical Facilities,» 2021. [En línea]. Available: <https://ispe.org/publications/guidance-documents>.

ANEXOS

Anexo A. Indicaciones para el uso de la Interfaz Gráfica del Sistema de Monitoreo Remoto y Alarmas de Vibración

Manual de uso de la Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) para el Sistema de Monitoreo de Vibraciones en los motores del sistema de ventilación de la planta oncológica de QUIMFA.

1. Selección de archivos de medición

En la barra lateral de la interfaz se encuentra la sección destinada a la selección de archivos CSV provenientes del analizador digital de vibraciones.

El usuario puede:

- Seleccionar el archivo más reciente detectado en la carpeta de datos, o
- Elegir manualmente un archivo específico de la lista desplegable de mediciones disponibles.

Es importante verificar que el archivo corresponda al motor y al punto de medición correctos antes de proceder al análisis, a fin de asegurar la trazabilidad de los resultados.



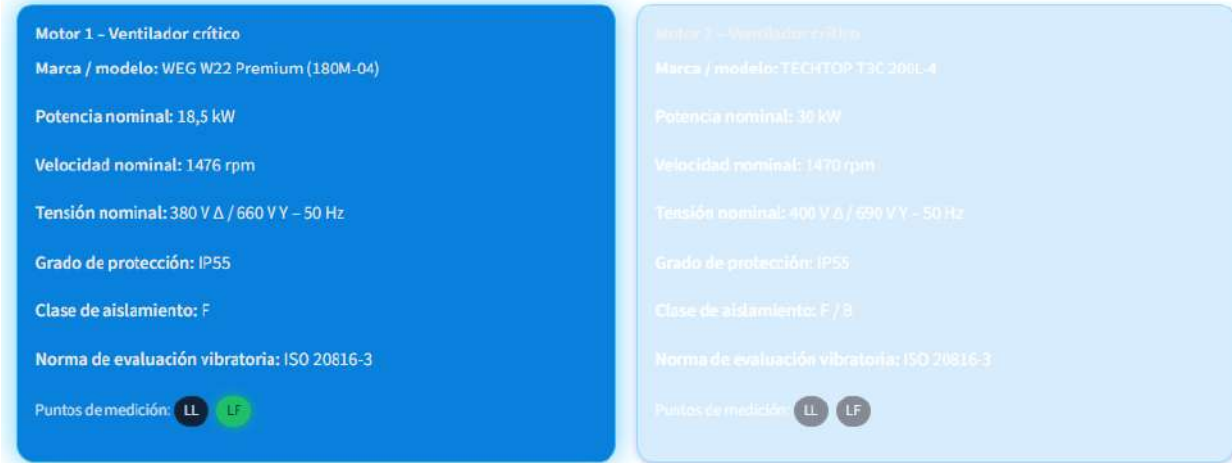
2. Datos de la máquina motorizada

En la misma barra lateral se presenta el bloque “Datos de la máquina motorizada”, donde se visualizan los principales datos técnicos configurados para el motor analizado, tales como:

- Identificación del motor (Motor 1, Motor 2, etc.).
- Ubicación en planta o servicio que presta dentro del sistema de ventilación.
- Velocidad nominal de giro.
- Tipo de soporte y potencia nominal (si corresponde).

Estos datos no son editados por el operador durante el análisis, pero sirven como referencia para interpretar correctamente los resultados de vibración según la normativa aplicable.

Datos de los motores monitorizados



En este caso, en el panel izquierdo fue seleccionado el archivo csv del motor 1, por ende, se visualiza un color azul más brillante.

3. Ejecución del análisis de vibración

Una vez seleccionado el archivo CSV de interés, el usuario debe presionar el botón “Analizar archivo” (o el botón equivalente configurado en la interfaz).

Al hacerlo, la aplicación:

1. Carga el archivo CSV seleccionado.
2. Procesa la señal de vibración en ObserVIEW (etapa externa de análisis) o mediante los módulos internos definidos en el sistema.
3. Calcula la velocidad global de vibración (mm/s) y otros parámetros requeridos.
4. Clasifica automáticamente el estado del motor según los umbrales definidos con base en las normas ISO 10816/20816.

4. Visualización del espectro de vibración

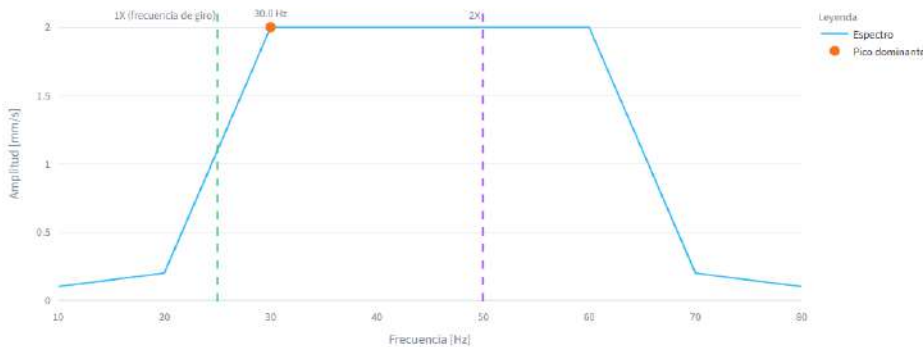
En el panel principal se muestra el espectro de vibración correspondiente al archivo analizado, típicamente con:

- Eje X: frecuencia (Hz o CPM),
- Eje Y: amplitud de velocidad (mm/s).

El gráfico permite identificar componentes espectrales relevantes, asociadas a posibles fallas como desbalanceo, desalineación, holguras o defectos mecánicos.

El operador puede utilizar esta visualización como apoyo para el diagnóstico, complementando la información resumida por el indicador de estado global.

Espectro de vibración (dominio frecuencia)



Resumen de indicadores

- Frecuencia del pico dominante: 30.0 Hz
- Amplitud del pico dominante: 2.000 mm/s
- Velocidad global aproximada: 4.012 mm/s
- Clasificación ISO: Zona C
- Estado global: ADVERTENCIA

Recomendación operativa

Condición insatisfactoria pero tolerable por un período limitado. Programar mantenimiento (balanceo, alineación, inspección de rodamientos).

5. Interpretación del indicador de estado (semaforización)

Debajo del espectro o en una sección destacada de la interfaz se presenta el indicador de estado global, que resume la condición del motor en función de la velocidad global de vibración calculada:

- Estado NORMAL (zona A/B): Representado en color verde, indica que el nivel de vibración se encuentra dentro de los límites aceptables definidos por la normativa para el tipo de máquina y condición de operación.
- Estado ADVERTENCIA (zona C): Representado en color amarillo, señala que el nivel de vibración se aproxima a valores que requieren seguimiento más frecuente y posible planificación de intervención.
- Estado ALARMA (zona D): Representado en color rojo, sugiere que el nivel de vibración puede ser crítico y que se requiere una evaluación inmediata y la posible parada programada del equipo para inspección.

Junto al color, la interfaz muestra la magnitud de la velocidad global (mm/s) y la zona normativa (A, B, C o D), facilitando la lectura por parte del personal de mantenimiento.



6. Registro y consulta del historial de mediciones

La interfaz dispone de una sección denominada “Historial de análisis”, donde se registran las mediciones procesadas por el sistema.

En esta sección el usuario puede:

- Visualizar una tabla con la fecha y hora del análisis, el motor correspondiente, la velocidad global obtenida y el estado asignado (NORMAL, ADVERTENCIA, ALARMA).
- Consultar la tendencia de la velocidad global a lo largo del tiempo mediante un gráfico de líneas, lo que permite identificar incrementos progresivos de vibración y comportamientos anómalos.

Este historial constituye una herramienta fundamental para el mantenimiento predictivo, ya que permite observar la evolución de la condición del motor en el tiempo.

Historial de análisis

	timestamp	archivo	v_global	estado	motor	punto
145	2025-11-29T19:24:21	M2LLACEL.csv	0.2185	NORMAL	M2	LL
144	2025-11-29T19:23:17	M1LFACEL.csv	13.7648	ALARMA	M1	LF
143	2025-11-29T19:23:14	M2LLACEL.csv	0.2185	NORMAL	M2	LL
142	2025-11-29T19:23:12	M2LFACEL.csv	0.1933	NORMAL	M2	LF
141	2025-11-29T19:22:17	motor_amarillo.csv	4.0125	ADVERTENCIA	DESCONOCIDO	DESCONOCIDO
140	2025-11-29T19:22:09	M1LFACEL.csv	13.7648	ALARMA	M1	LF
139	2025-11-29T18:41:20	M2LFACEL.csv	0.1933	NORMAL	M2	LF
138	2025-11-29T18:41:17	M1LLACEL.csv	12.4377	ALARMA	M1	LL
137	2025-11-29T18:41:13	M1LFACEL.csv	13.7648	ALARMA	M1	LF
136	2025-11-28T18:30:35	motor_verde.csv	2.0248	NORMAL	DESCONOCIDO	DESCONOCIDO

7. Filtrado y búsqueda en el historial

Dentro del historial, la interfaz puede incluir opciones de filtrado, tales como:

- Selección por motor (Motor 1, Motor 2, etc.).
- Rango de fechas de análisis.
- Filtrado por estado (solo alarmas, solo advertencias, etc.).

El usuario debe cargar los criterios de filtrado y presionar el botón “Filtrar” para actualizar la tabla y los gráficos, facilitando la revisión de eventos relevantes solo para el período o el equipo de interés.

Anexo B. Pruebas de validación de la interfaz de usuario para el sistema de monitoreo de vibraciones

En este anexo se documentan las pruebas de validación realizadas sobre la interfaz gráfica del sistema de monitoreo remoto y alarmas de vibración, utilizando mediciones reales exportadas en formato CSV desde el analizador digital de vibraciones.

1. Primera prueba de validación – Medición en condición normal

En esta prueba se cargó un archivo CSV correspondiente a un motor del sistema de ventilación operando en condiciones estables y sin indicios de falla.

La interfaz mostró:

- Espectro de vibración con amplitudes moderadas en el rango de frecuencias evaluado.
- Velocidad global de vibración dentro del rango permitido por la norma, clasificada como zona A/B.
- Indicador de estado en color verde con leyenda de “Estado: NORMAL”.

La respuesta de la interfaz coincide con la condición real del equipo, validando el comportamiento del sistema en situaciones normales de operación.



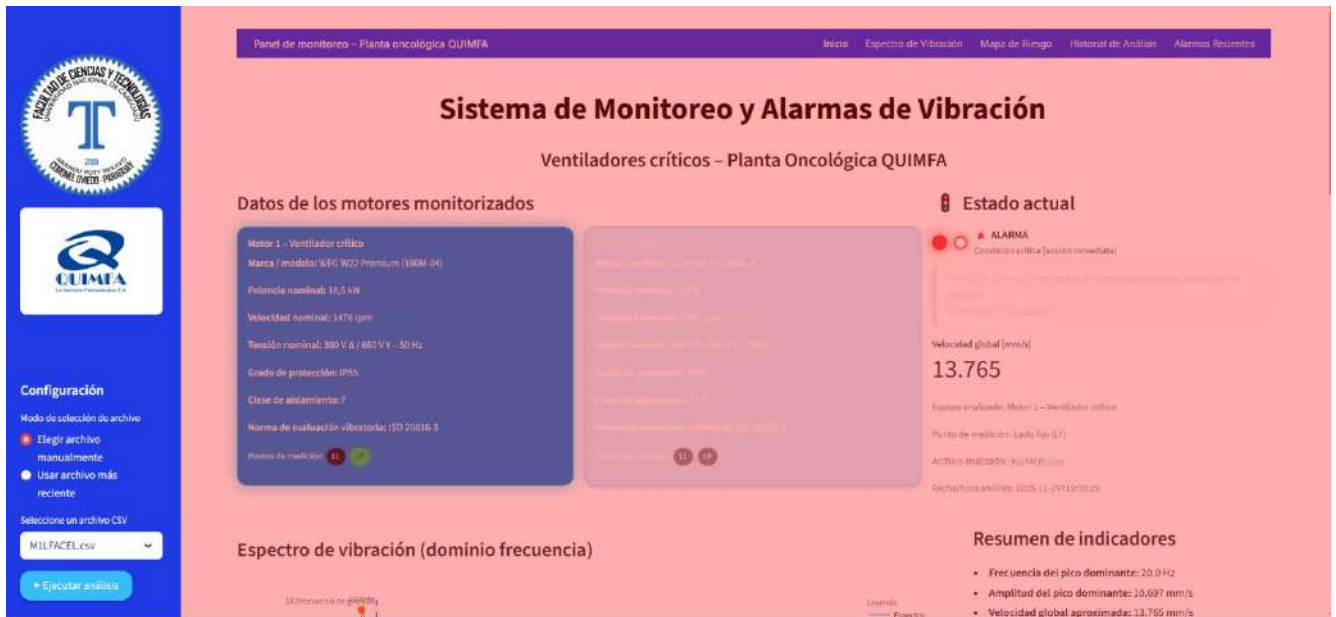
2. Segunda prueba de validación – Medición en condición de alarma

En la segunda prueba se cargó una medición con niveles de vibración superiores a los límites recomendados por la norma, representativa de una posible condición de falla severa o avanzada.

La interfaz mostró:

- Espectro con amplitudes elevadas en frecuencias características de la falla.
- Velocidad global de vibración claramente por encima del umbral de alarma, clasificada en zona D.
- Indicador de estado en color rojo con leyenda de “Estado: ALARMA”.

El sistema respondió coherentemente con la condición crítica del equipo, lo que valida su utilidad como herramienta de soporte para la toma de decisiones en mantenimiento predictivo.



Anexo C. Código fuente del sistema de monitoreo y alarmas de vibración

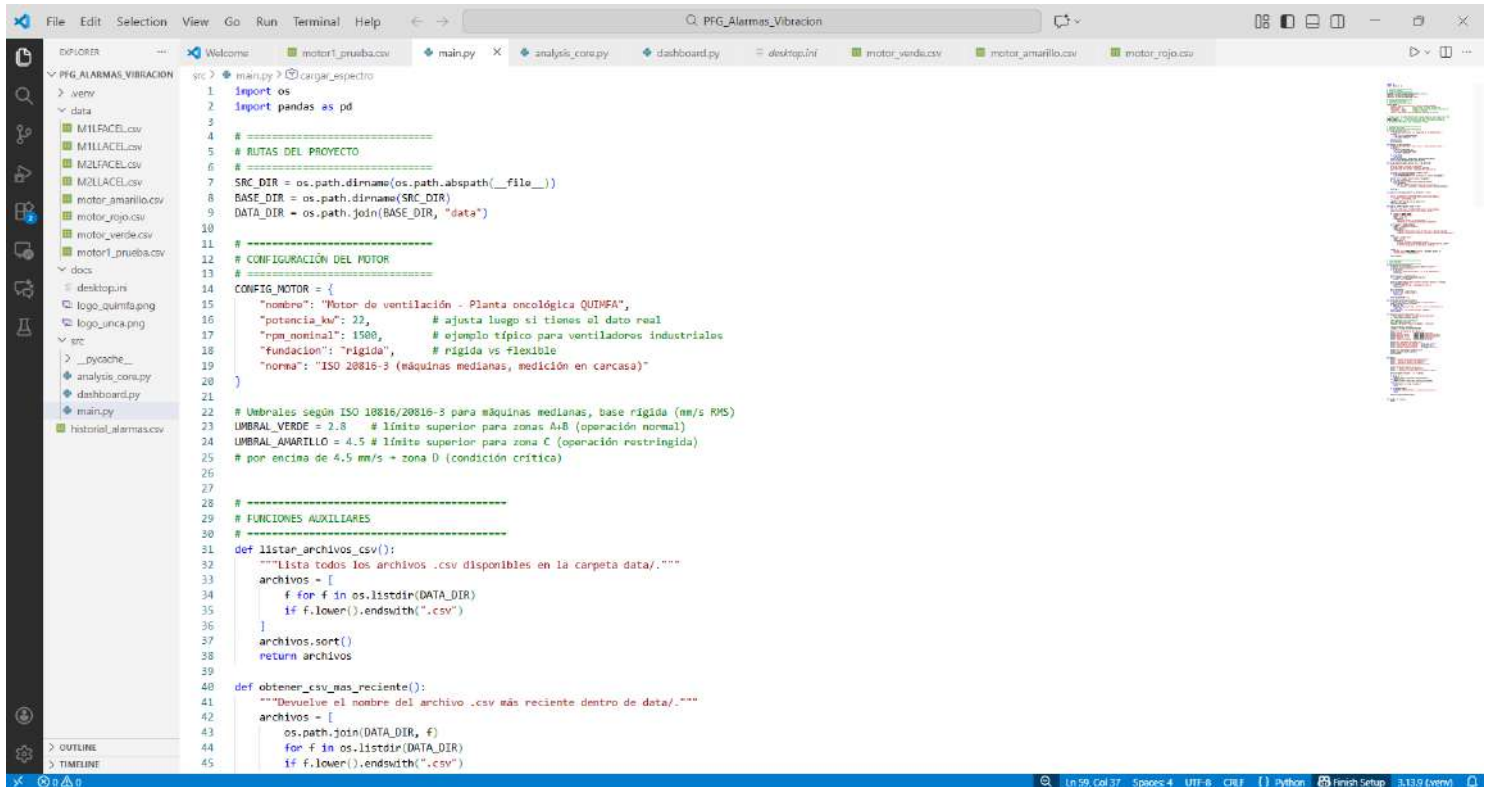
En este anexo se incluyen los fragmentos más relevantes del código fuente desarrollado en Python para el sistema de monitoreo remoto y alarmas de vibración de los motores del sistema de ventilación de la planta oncológica de QUIMFA.

El proyecto se organiza en la carpeta src/ con tres archivos principales:

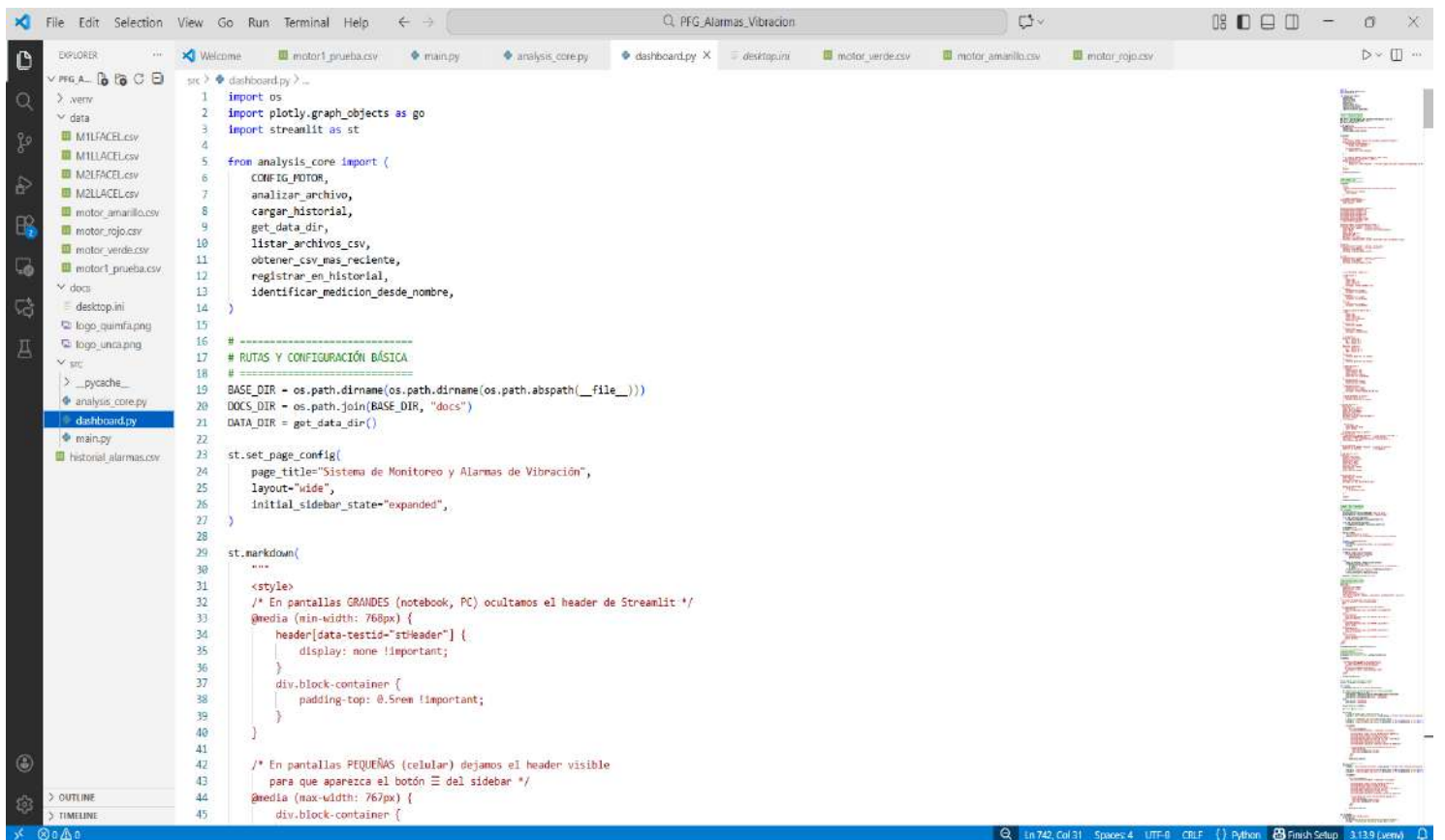
- main.py: punto de entrada de la aplicación.
- dashboard.py: construcción de la interfaz gráfica en Streamlit.
- analysis_core.py: funciones de análisis de vibración y gestión del historial.

Diseño de un Sistema de Monitoreo Remoto con Análisis Vibratorio e Interfaz Gráfica para el Mantenimiento Predictivo de los Motores del Sistema de Ventilación de la Planta Oncológica de QUIMFA.

Jessica Carolina Jara Cuenca - 2025



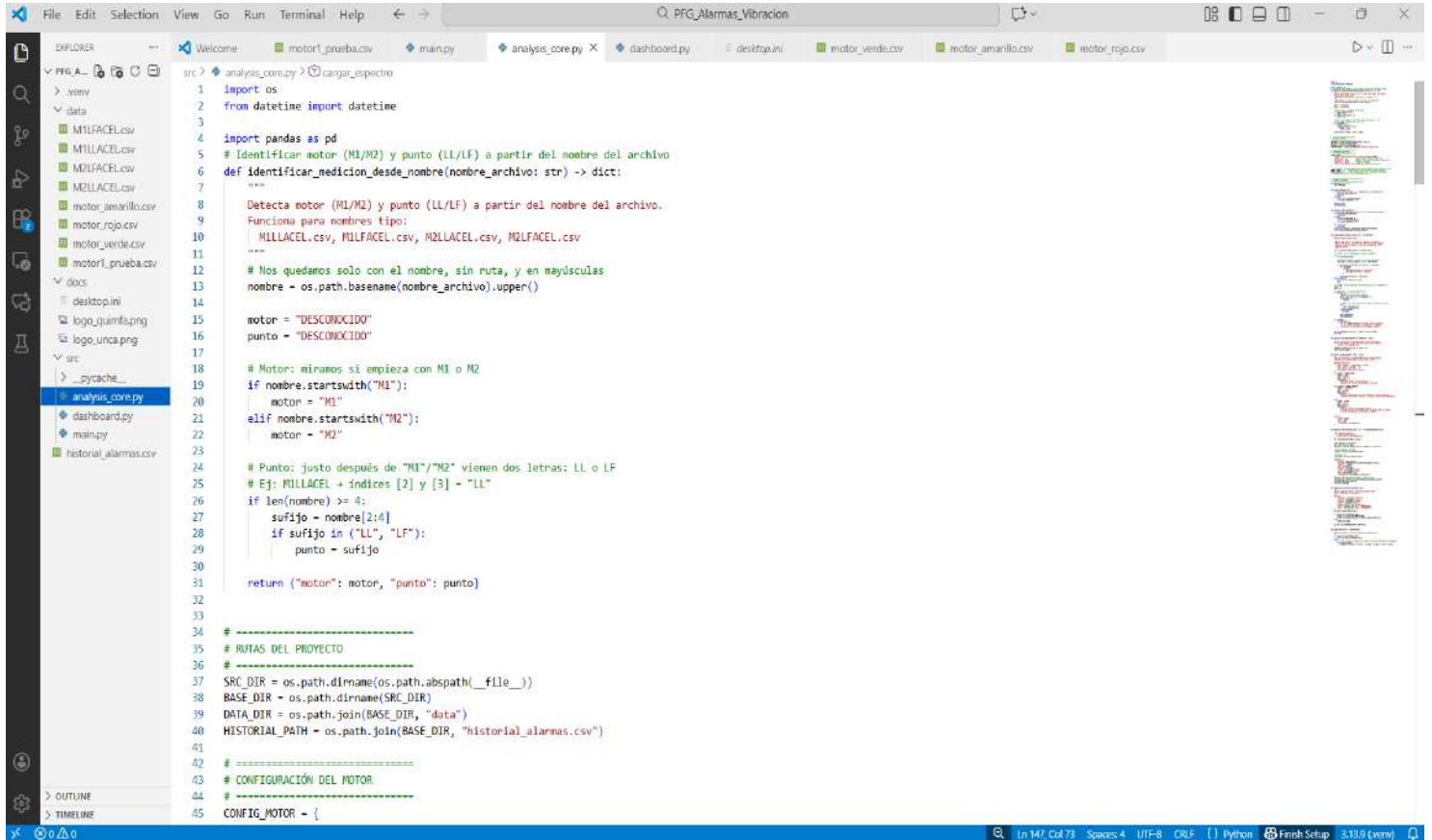
```
1 import os
2 import pandas as pd
3
4 # =====
5 # RUTAS DEL PROYECTO
6 # =====
7 SRC_DIR = os.path.dirname(os.path.abspath(__file__))
8 BASE_DIR = os.path.dirname(SRC_DIR)
9 DATA_DIR = os.path.join(BASE_DIR, "data")
10
11 # =====
12 # CONFIGURACIÓN DEL MOTOR
13 # =====
14 CONFIG_MOTOR = {
15     "nombre": "Motor de ventilación - Planta oncológica QUIMFA",
16     "potencia_kw": 22, # ajusta luego si tienes el dato real
17     "rpm_nominal": 1500, # ejemplo típico para ventiladores industriales
18     "fundacion": "rígida", # rígida vs flexible
19     "norma": "ISO 28816-3 (máquinas medianas, medición en carcasa)"
20 }
21
22 # Umbrales según ISO 18816/28816-3 para máquinas medianas, base rígida (mm/s RMS)
23 LMBRAL_VERDE = 2.8 # límite superior para zonas A+B (operación normal)
24 LMBRAL_AMARILLO = 4.5 # límite superior para zona C (operación restringida)
25 # por encima de 4.5 mm/s = zona D (condición crítica)
26
27
28 # =====
29 # FUNCIONES AUXILIARES
30 # =====
31 def listar_archivos_csv():
32     """Lista todos los archivos .csv disponibles en la carpeta data/."""
33     archivos = []
34     for f in os.listdir(DATA_DIR):
35         if f.lower().endswith(".csv"):
36             archivos.append(f)
37     archivos.sort()
38     return archivos
39
40 def obtener_csv_mas_reciente():
41     """Devuelve el nombre del archivo .csv más reciente dentro de data/."""
42     archivos = []
43     for f in os.listdir(DATA_DIR):
44         if f.lower().endswith(".csv"):
```



```
1 import os
2 import plotly.graph_objects as go
3 import streamlit as st
4
5 from analysis_core import (
6     CONFIG_MOTOR,
7     analizar_archivo,
8     cargar_historial,
9     get_data_dir,
10     listar_archivos_csv,
11     obtener_csv_mas_reciente,
12     registrar_en_historial,
13     identificar_medicion_desde_nombre,
14 )
15
16 # =====
17 # RUTAS Y CONFIGURACIÓN BÁSICA
18 # =====
19 BASE_DIR = os.path.dirname(os.path.dirname(os.path.abspath(__file__)))
20 DOCS_DIR = os.path.join(BASE_DIR, "docs")
21 DATA_DIR = get_data_dir()
22
23 st.set_page_config(
24     page_title="Sistema de Monitoreo y Alarmas de Vibración",
25     layout="wide",
26     initial_sidebar_state="expanded",
27 )
28
29 st.markdown(
30     """
31     <style>
32     /* En pantallas GRANDES (notebook, PC) ocultamos el header de Streamlit */
33     @media (min-width: 768px) {
34         header[data-testid="stHeader"] {
35             display: none !important;
36         }
37         div.block-container {
38             padding-top: 0.5rem !important;
39         }
40     }
41
42     /* En pantallas PEQUEÑAS (celular) dejamos el header visible
43     para que aparezca el botón ☰ del sidebar */
44     @media (max-width: 767px) {
45         div.block-container {
```

Diseño de un Sistema de Monitoreo Remoto con Análisis Vibratorio e Interfaz Gráfica para el Mantenimiento Predictivo de los Motores del Sistema de Ventilación de la Planta Oncológica de QUIMFA.

Jessica Carolina Jara Cuenca - 2025



```
File Edit Selection View Go Run Terminal Help PFG_Alarmas_Vibracion
src > analysis_core.py > cargar_espectro
1 import os
2 from datetime import datetime
3
4 import pandas as pd
5 # Identificar motor (M1/M2) y punto (LL/LF) a partir del nombre del archivo
6 def identificar_medicion_desde_nombre(nombre_archivo: str) -> dict:
7     """
8     Detecta motor (M1/M2) y punto (LL/LF) a partir del nombre del archivo.
9     Funciona para nombres tipo:
10     | MILLACEL.csv, M1LFACEL.csv, M2LLACEL.csv, M2LFACEL.csv
11     """
12     # Nos quedamos solo con el nombre, sin ruta, y en mayúsculas
13     nombre = os.path.basename(nombre_archivo).upper()
14
15     motor = "DESCONOCIDO"
16     punto = "DESCONOCIDO"
17
18     # Motor: miramos si empieza con M1 o M2
19     if nombre.startswith("M1"):
20         motor = "M1"
21     elif nombre.startswith("M2"):
22         motor = "M2"
23
24     # Punto: justo después de "M1"/"M2" vienen dos letras: LL o LF
25     # Ej: MILLACEL + índices [2] y [3] = "LL"
26     if len(nombre) >= 4:
27         sufixo = nombre[2:4]
28         if sufixo in ("LL", "LF"):
29             punto = sufixo
30
31     return {"motor": motor, "punto": punto}
32
33
34 # =====
35 # RUTAS DEL PROYECTO
36 # =====
37 SRC_DIR = os.path.dirname(os.path.abspath(__file__))
38 BASE_DIR = os.path.dirname(SRC_DIR)
39 DATA_DIR = os.path.join(BASE_DIR, "data")
40 HISTORIAL_PATH = os.path.join(BASE_DIR, "historial_alarmas.csv")
41
42 # =====
43 # CONFIGURACIÓN DEL MOTOR
44 # =====
45 CONFIG_MOTOR = {
```