

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA ESTATAL DEL CARCHI



FACULTAD DE INDUSTRIAS AGROPECUARIAS Y CIENCIAS AMBIENTALES

CARRERA DE COMPUTACIÓN

Tema: **“Sistema IoT para la monitorización de vibraciones en turbinas de centrales hidroeléctricas”**

Trabajo de Integración Curricular previo a la obtención del
título de Ingeniero en Ciencias de la Computación

AUTOR: Basantes Quelal Geovanny Basantes
TUTOR: Ing. Jiménez Cárdenas Stalin Vantroy, MSc

Tulcán, 2026.

CERTIFICADO DEL TUTOR

Certifico que el estudiante Basantes Quelal Geovanny Sebastián con el número de cédula 0401828272 desarrollado el Trabajo de Integración Curricular: "Sistema IoT para la monitorización de vibraciones en hidroturbinas de centrales hidroeléctricas".

Este trabajo se sujeta a las normas y metodología dispuesta en la Codificación del Reglamento de Régimen Académico y de Estudiantes de la UPEC, por lo tanto, autorizo la presentación de la sustentación para la calificación respectiva.

Ing. Jiménez Cárdenas Stalin Vantroy, MSc

TUTOR

Tulcán, julio de 2026

AUTORÍA DE TRABAJO

El presente Trabajo de Integración Curricular constituye un requisito previo para la obtención del título de Ingeniero en la Carrera de computación de la Facultad de Industrias Agropecuarias Y Ciencias Ambientales.

Yo, Basantes Quelal Geovanny Sebastián con cédula de identidad número 0401828272 declaro que la investigación es absolutamente original, auténtica, personal y los resultados y conclusiones a los que he llegado son de mi absoluta responsabilidad.



Basantes Quelal Geovanny Sebastián

AUTOR

Tulcán, julio de 2026

ACTA DE CESIÓN DE DERECHOS DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Yo Basantes Quelal Geovanny Sebastián autor de los criterios emitidos en el Trabajo de Integración Curricular: "Sistema IoT para la monitorización de vibraciones en hidroturbinas de centrales hidroeléctricas" y eximo expresamente a la Universidad Politécnica Estatal del Carchi y a sus representantes de posibles reclamos o acciones legales.



Basantes Quelal Geovanny Sebastián

AUTOR

Tulcán, julio de 2026

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer profundamente a todas las personas que hicieron posible la culminación de este trabajo de titulación, el cual representa un gran logro académico, personal y profesional.

A la Universidad Politécnica Estatal del Carchi, por haberme brindado los conocimientos y el espacio necesario para aprender, desarrollarme como profesional en Ingeniería en Computación.

A mi tutor de tesis MSc. Vantroy Jiménez, y docentes de la carrera por su invaluable guía académica, su tiempo y por compartir su experiencia holística y técnica, la cual fue crucial para el desarrollo de este sistema de monitoreo.

A la Central Hidroeléctrica MIRA y su representante Ing. Cristian Aguirre, por abrirme las puertas de sus instalaciones y permitirme aplicar técnicas de procesamiento de señales en un entorno real, facilitando la validación operativa de esta investigación.

A mis colegas de DevClub y DevAlabs, por ser una fuente constante de innovación e inspiración en el mundo de la inteligencia artificial y el desarrollo de software.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, con todo mi corazón, a mis padres, Amparo y Stalin. Gracias por ser el faro que iluminó mis noches de estudio y el refugio constante en los momentos de incertidumbre. Su sacrificio silencioso, su fe inquebrantable en mis capacidades y ese amor que no conoce límites han sido el combustible que me permitió llegar a la meta. Todo lo que soy, y lo que he logrado en esta etapa, es el fruto de los valores que sembraron en mí.

Finalmente, dedico este logro a Dios, por concederme la salud, la sabiduría y la fortaleza necesarias para transformar un sueño de estudiante en una realidad profesional. Por ponerme en el lugar y el momento indicados, y por permitirme culminar este proceso con la satisfacción del deber cumplido.

ÍNDICE

RESUMEN	13
ABSTRACT	14
INTRODUCCIÓN	15
I. EL PROBLEMA	16
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	19
1.3. JUSTIFICACIÓN	19
1.4. OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	20
1.4.1. Objetivo General	20
1.4.2. Objetivos Específicos	21
1.4.3. Preguntas de Investigación	21
II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	22
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	22
2.2. MARCO TEÓRICO	24
2.2.1. Industria 4.0.....	24
2.2.2. Arquitectura IoT.....	25
2.2.3. Edge Computing	26
2.2.4. Sistemas de monitoreo vibracional	27
2.2.5. Adquisición de datos vibracionales	28
2.2.6. Procesamiento de datos.....	29
2.2.7. Norma ISO 20816-5.....	30
2.2.8. Lógica computacional	31
2.2.9. Protocolo Modbus	33
2.2.10. Integración industrial-IoT	34
2.2.11. Sistemas de telemetría IoT.....	35

2.2.12. Protocolo MQTT	37
2.2.13. Estructuras JSON.....	38
2.2.14. Ciberseguridad industrial.....	39
2.2.15. Máquinas de estados	41
2.2.16. Interfaz Humano-Máquina (HMI) e Interfaces web	42
2.2.17. Usabilidad y experiencia de usuario (UX)	43
2.2.18. Aceptación del usuario.....	44
III. METODOLOGÍA.....	46
3.1. ENFOQUE METODOLÓGICO	46
3.1.1. Enfoque	46
3.1.2. Tipo de Investigación.....	46
3.2. IDEA A DEFENDER	47
3.3. DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES.....	47
3.3.1. Variable independiente	47
3.3.2. Variable dependiente.....	48
3.3.3. Operacionalización de variables	49
3.4. MÉTODOS UTILIZADOS	50
3.4.1. Métodos de Nivel Teórico	50
3.4.2. Métodos de Nivel Empírico	50
3.4.3. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	51
3.4.3. Modelado Funcional del Sistema.....	54
3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	56
3.5.1. Análisis estadístico.....	56
3.5.2. Población y censo	58
3.5.3. Instrumentos de investigación	59
3.5.4. Evaluación de rendimiento computacional	64
3.5.5. Comparativa de resultados.....	68
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	70

4.1. RESULTADOS	70
4.1.1. Diagnóstico Situacional	70
4.1.2. Especificaciones de la Maqueta de Pruebas e Integración de Hardware	74
4.1.3. Desempeño Técnico y Validación de la Arquitectura IoT de Tres Capas.	77
4.1.4. Evaluación de Atributos de Calidad del Software y Validación Operativa	83
4.2. DISCUSIÓN	93
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	94
5.1. CONCLUSIONES	94
5.2. RECOMENDACIONES	95
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
VII. ANEXOS	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparativa de tecnologías para la lógica del sistema (Backend).	32
Tabla 2. Análisis comparativo de infraestructura para el despliegue del sistema.	36
Tabla 3. Matriz sintética para la selección del gestor de bases de datos históricos...	38
Tabla 4. Variable Independiente	49
Tabla 5. Variable dependiente: Efectividad del Monitoreo y Diagnóstico	49
Tabla 6. Esquema de direccionamiento lógico	55
Tabla 7. Matriz de Indicadores - Rendimiento Computacional	58
Tabla 8. Matriz de técnicas de recolección de datos y fuentes de información.	62
Tabla 9. Matriz de umbrales de vibración (RMS), clasificación de zonas ISO	89
Tabla 10. Capas de la arquitectura IoT propuesta	90
Tabla 11. Análisis comparativo (Sistema tradicional – Arquitectura IoT)	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Arquitectura General SCADA Borhani et al., 2024	24
Figura 2. Sistema Monitoreo IoT	25
Figura 3. Rangos de severidad ISO 10816-3	30
Figura 4. Arquitectura general de un sistema de monitoreo industrial	53
Figura 5. Aplicación Transformada de Fourier	53
Figura 6. Arquitectura General Sistema Basado en Modbus	53
Figura 7. Lógica algorítmica del sistema	56
Figura 8. Tendencia histórica global de vibraciones (RMS)	56
Figura 9. Distribución de experiencia de expertos	59
Figura 10. Excel de registro hidroeléctrica MIRA	60
Figura 11. Dashboard 2 Sistema IoT -Evaluación tiempo variable	65
Figura 12. Dashboard 2 – Rendimiento	65
Figura 13. Dashboard 2 – Especificaciones Hidroeléctrica	66
Figura 14. Tendencia histórica de vibraciones (RMS) con estratificación por zonas de severidad ISO 20816-5 e identificación algorítmica de anomalías.	68
Figura 15. Principales componentes de la turbina Francis de la Central Mira	71
Figura 16. Actividad de técnico en hidroeléctrica MIRA	72
Figura 17. Estado en horas de la Hidroeléctrica MIRA	72
Figura 18. Maqueta experimental 1	75
Figura 19. Maqueta Experimental Hidroturbina 2	75
Figura 20. Maqueta Experimental Sistema IoT 2	76
Figura 21. Maqueta experimental 2	76
Figura 22. Monitoreo en tiempo real con Estado ISO 20816	77
Figura 23. Dashboard 1 del Sistema IoT de Monitoreo de vibraciones	78
Figura 24. Dashboard sistema IoT 3	79
Figura 25. Dashboard sistema IoT 4	79
Figura 26. Notificación por email de alertas	81
Figura 27. Notificación por email de alertas	82
Figura 28. Aceptación del Sistema IoT	84
Figura 29. Línea de tiempo de respuesta a Incidentes	85
Figura 30. Repositorio Github	91
Figura 31. Configuración Proficy Machine PLC GE Fanuc 90-30	91
Figura 32. Software Witmotion WTVB01-485	91
Figura 33. Dashboard 3 - Rangos severidad ISO 20816	92
Figura 34. Software Witmotion – configuración frecuencia	92
Figura 35. Arquitectura Sistema IoT de monitorización de vibraciones propuesto	93

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Reporte de similitud Turniting	99
Anexo 2. Certificado de traducción del ABSTRACT	106
Anexo 3. Instrumento de validación.....	108
Anexo 4. Carta de Satisfacción	113
Anexo 5. Propuesta 1 técnica de implementación	114
Anexo 6. Carta de Compromiso	121
Anexo 7. Manual Operativo y de Usuario del Sistema Supervisor HidroMira.	124
Anexo 8. Módulos - Arquitectura software HidroMira.	130

RESUMEN

El objetivo general de esta investigación consistió en desarrollar un sistema de monitoreo continuo para el análisis de vibraciones en la Central Hidroeléctrica MIRA. Inicialmente, el diagnóstico situacional identificó que los métodos tradicionales de supervisión basados en inspecciones manuales periódicas generaban ventanas de tiempo sin medición, limitando la capacidad de respuesta y forzando a la planta a operar bajo un esquema de mantenimiento puramente reactivo ante fallas inesperadas. Para resolver esta problemática, se diseñó e implementó un sistema automatizado de captura y transmisión ininterrumpida de datos que evalúa el estado de salud de las hidroturbinas en tiempo real. Debido a la criticidad operativa que impide intervenir directamente las unidades de generación en servicio, la viabilidad del proyecto se validó mediante un entorno de pruebas a escala alimentado con registros históricos reales de campo de la propia central. El núcleo analítico del sistema radica en la automatización de los umbrales de la norma internacional ISO 20816-5, permitiendo clasificar de forma autónoma el estado de la maquinaria en zonas de severidad operativa para emitir alertas tempranas ante anomalías críticas como la cavitación o el desbalanceo. La importancia fundamental de esta propuesta radica en proporcionar una herramienta de diagnóstico continuo que viabiliza la transición definitiva hacia un Mantenimiento Basado en la Condición (CBM). Al mitigar el riesgo de paradas no programadas y prolongar la vida útil de los activos críticos, este proyecto trasciende la optimización de recursos económicos de la planta, alineándose de manera directa con los objetivos nacionales de estabilidad en el suministro eléctrico, reducción de costos por generación de emergencia y el fortalecimiento de la soberanía energética del país.

Palabras Claves: Monitoreo de vibraciones, Central Hidroeléctrica MIRA, ISO 20816-5, Mantenimiento Basado en la Condición (CBM).

ABSTRACT

The general objective of this research was to develop a continuous monitoring system for vibration analysis at the MIRA Hydroelectric Power Plant. Initially, the situational analysis identified that traditional monitoring methods based on periodic manual inspections created gaps in data collection, limiting responsiveness and forcing the plant to operate under a purely reactive maintenance scheme in the face of unexpected failures. To address this issue, an automated system for the uninterrupted capture and transmission of data was designed and implemented to assess the health status of the hydroturbines in real time. Due to the operational criticality that prevents direct intervention on the generating units while in service, the project's feasibility was validated through a scaled-down test environment fed with actual historical field data from the plant itself. The analytical core of the system lies in the automation of the thresholds defined by the international standard ISO 20816-5, enabling the autonomous classification of machinery status into operational severity zones to issue early warnings for critical anomalies such as cavitation or imbalance. The fundamental importance of this proposal lies in providing a continuous diagnostic tool that facilitates the definitive transition to Condition-Based Maintenance (CBM). By mitigating the risk of unscheduled outages and extending the useful life of critical assets, this project goes beyond the optimization of the plant's economic resources, aligning directly with national objectives for stability in the electricity supply, reduction of emergency generation costs, and the strengthening of the country's energy sovereignty.

Keywords: Vibration monitoring, MIRA Hydroelectric Power Plant, ISO 20816-5, Condition-Based Maintenance (CBM), Early warning.

INTRODUCCIÓN

En el panorama actual de la Industria 4.0, la digitalización de los procesos industriales se ha consolidado como el eje estratégico para maximizar la disponibilidad y confiabilidad de los activos críticos. Dentro de esta transformación tecnológica, los Sistemas IoT (Internet de las Cosas) han surgido como una arquitectura ciber-física capaz de integrar sensores, redes de comunicación y algoritmos de procesamiento para capturar la realidad operativa de la maquinaria en tiempo real. Este avance permite transitar de modelos de mantenimiento reactivos o basados en el tiempo hacia esquemas de mantenimiento predictivo, donde la toma de decisiones se fundamenta en la evidencia digital generada directamente por el equipo.

Una de las variables más determinantes para evaluar la salud estructural de las máquinas rotativas es, sin duda, el comportamiento de sus vibraciones mecánicas. La vibración no es solo un fenómeno físico inherente a la operación, sino que constituye una "firma digital" que revela el estado de alineación, equilibrio e integridad de los componentes internos. Históricamente, la captura de estas señales dependía de rutas de inspección manuales y monitoreos discontinuos siendo el caso de la Central Hidroeléctrica Mira. No obstante, la implementación de un sistema IoT dedicado a la monitorización de vibraciones elimina estas brechas de información, permitiendo un flujo constante de datos que pueden ser procesados mediante algoritmos computacionales para detectar fallas incipientes.

Este trabajo se enmarca en la necesidad de implementar un sistema de monitoreo de vibraciones que emplee tecnologías modernas como el IoT para las centrales hidroeléctricas. El análisis se basa en la normativa internacional ISO 20816-5, que permite establecer una condición clara de operatividad de la máquina rotativa.

I. EL PROBLEMA

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Esta disparidad en la gestión tecnológica se hace evidente al contrastar las prácticas de monitoreo de la central Hidroeléctrica MIRA frente a infraestructuras de clase mundial. En la actualidad, la operación de las centrales de generación ha evolucionado significativamente, dejando atrás la inspección visual reactiva para incorporar plataformas de supervisión como los sistemas SCADA y arquitecturas del Internet Industrial de las Cosas (IIoT), los cuales permiten monitorear en tiempo real variables críticas del proceso (Borhani et al., 2024). Un referente aplicativo de vanguardia en la industria es la central hidroeléctrica de Signayes en Italia, donde la confiabilidad y seguridad de la máquina se garantizan mediante un sistema SCADA configurado específicamente para el monitoreo continuo de vibraciones bajo los estándares de la norma internacional ISO 20816-5 (Daga et al., 2022). La validación del estado de los componentes críticos mediante esta adquisición continua de datos resulta indispensable para capturar anomalías dinámicas que escapen a las mediciones periódicas, tales como la cavitación, un fenómeno destructivo caracterizado por la rápida formación y colapso de burbujas de vapor que altera drásticamente el patrón vibratorio y reduce la eficiencia (Silva et al., 2024; Zhou et al., 2025). En estos entornos digitalizados, la premisa computacional es clara: la integración de algoritmos analíticos con los datos generados continuamente por dispositivos IoT en red permite la detección temprana de fallas y la toma de decisiones autónoma, optimizando el rendimiento general de las instalaciones y previniendo paradas catastróficas de la maquinaria. (Yang et al., 2024)

Desde la perspectiva de la Ingeniería en Computación, las fallas mecánicas presentes en las unidades de generación locales no deben entenderse únicamente como un fallo de materiales, sino como una deficiencia en los mecanismos de adquisición de datos y vigilancia digital. La ausencia de una arquitectura IoT capaz

de registrar y correlacionar continuamente las variables operativas con los niveles de vibración impide detectar a tiempo la acumulación progresiva de estrés mecánico y fatiga en los componentes rotativos (Shang et al., 2025). Esta discontinuidad en la telemetría genera una brecha de información en el sistema de monitoreo de condición, situación que imposibilita la evaluación objetiva de la severidad vibratoria y deriva recurrentemente en la ejecución de mantenimientos correctivos de emergencia, con elevados costos económicos y técnicos para la planta (Hassan et al., 2024).

Esta deficiencia en la infraestructura de adquisición de datos tiene implicaciones directas en el cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible 7 (ODS 7) y de las metas de disponibilidad del servicio establecidas en el Plan Maestro de Electricidad (PME) del Ecuador según Naranjo (2024) e históricamente la dependencia de mantenimientos correctivos operar hasta fallar o preventivos basados exclusivamente en intervalos de tiempo, en lugar de un Mantenimiento Basado en Condición (CBM), impide maximizar la vida útil de los componentes y no evita los fallos forzados en la maquinaria y cuando el sistema de información carece de la telemetría necesaria para procesar señales y alertar anticipadamente sobre una tendencia anómala incumpliendo los criterios de evaluación de severidad de la norma ISO 20816-5, se introduce una vulnerabilidad sistémica en la red de generación (Daga et al., 2022).

La materialización de un fallo no previsto provoca la parada no programada de la turbina y la indisponibilidad de la unidad, lo cual fuerza al sistema interconectado a comprar energía a otros agentes o a despachar generación termoeléctrica de reserva, la cual es económicamente más costosa y ambientalmente contaminante (Naranjo-Silva, 2024). En consecuencia, se vulnera la autonomía energética y se desvía la planificación estratégica nacional por una limitación netamente tecnológica e informática.

La problemática persiste porque las infraestructuras convencionales son insuficientes para las exigencias del Internet Industrial de las Cosas (IIoT) y el Big Data. En muchas centrales de generación, el diagnóstico de vibraciones se ejecuta mediante rutas de inspección esporádicas utilizando analizadores portátiles offline, lo que genera un flujo de datos asincrónico, aislado y susceptible a la imprecisión humana Hasani et al. (2024). Este muestreo manual carece de la granularidad temporal necesaria para capturar fenómenos dinámicos transitorios, dejando una brecha crítica en el monitoreo bajo condición de la máquina. A su vez, aunque las plantas cuenten con

sistemas SCADA tradicionales, estos suelen estar optimizados para el control operativo básico y la evaluación de variables de vibración agregadas (como el valor RMS global), delegando el procesamiento espectral de la señal a sistemas fuera de línea (Daga et al., 2022). Esta limitación de hardware y software crea "islas de información", impidiendo que los algoritmos analíticos interactúen en tiempo real con los datos crudos para emitir diagnósticos tempranos, reduciendo la capacidad predictiva de la central frente a fallas incipientes (Yang et al., 2024).

En consecuencia, el problema central no radica en la inexistencia de herramientas analíticas a nivel global, sino en la falta de integración de arquitecturas IoT de bajo costo dentro del parque generador local. La literatura de ingeniería señala que la principal barrera para adoptar programas ininterrumpidos de Mantenimiento Basado en Condición (CBM) ha sido el elevado costo de adquisición y la complejidad de instalación de los sistemas de monitoreo tradicionales y cableados. Ante este escenario, la carencia de módulos de adquisición de datos (DAQ) que integren sensores microelectromecánicos (MEMS) y protocolos de transmisión inalámbrica impide digitalizar la variable vibratoria de manera económicamente escalable (Hasani et al., 2024). Sin una red de telemetría que enlace el entorno físico con capacidades de procesamiento centralizado o en la nube, los operadores de la central quedan imposibilitados para transitar de un modelo de gestión reactivo hacia uno verdaderamente predictivo (Hassan et al., 2024).

Desde la perspectiva de la Computación y las Tecnologías de Operación (OT), esta brecha de integración limita la capacidad de respuesta de la planta y, dada la dependencia del sistema interconectado sobre la generación hidroeléctrica, compromete la estabilidad y seguridad del suministro eléctrico a nivel nacional (Cuadros Cervantes, Naranjo-Silva y Quimbita, 2022).

En el caso específico de la Central Hidroeléctrica MIRA, la cual opera con unidades de generación tipo Francis, esta brecha de digitalización se manifiesta de forma particular. Si bien la planta cuenta con un nivel adecuado de control automatizado sobre sus sistemas operativos generales, el diagnóstico de la salud mecánica de los equipos aún depende de procesos de inspección manual ejecutados en intervalos de una hora. Al respecto, las investigaciones de (de Souza et al., 2024) demuestran que las turbinas tipo Francis son altamente susceptibles a operar fuera de sus condiciones nominales, lo que induce de forma inevitable fenómenos destructivos de rápido desarrollo como la cavitación, alterando drásticamente el patrón vibratorio y

reduciendo la vida útil de los componentes internos. Desde la perspectiva de las Ciencias de la Computación, depender de un muestreo físico cada sesenta minutos resulta ineficiente; de hecho, estudios enfocados en la adquisición de datos, como la investigación de Hasani et al, (2024) demuestran que las inspecciones manuales esporádicas consumen mucho tiempo, demandan un alto esfuerzo humano y son inherentemente poco confiables para capturar eventos dinámicos transitorios. Esta latencia en la telemetría genera prolongadas ventanas "ciegas" de medición, imposibilitando la detección temprana de anomalías mecánicas. En consecuencia, el problema central en la Central MIRA no es la falta de control operativo, sino la carencia de una arquitectura IoT que digitalice la vibración de forma ininterrumpida. Como argumentan Hassan et al, (2024) sin la implementación de una red de telemetría continua basada en sensores de vibración, los operadores quedan limitados a un enfoque de gestión reactivo, lo que impide la transición definitiva hacia un Mantenimiento Basado en la Condición (CBM) para prevenir paradas catastróficas y tiempos de inactividad inesperados

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿De qué manera una propuesta de arquitectura IoT, fundamentada en la norma ISO 20816-5, permite el monitoreo continuo y la detección temprana de anomalías mecánicas para viabilizar el mantenimiento predictivo en las hidroturbinas de la Central Hidromira?

1.3. JUSTIFICACIÓN

La operación continua y eficiente de las turbinas y generadores hidroeléctricos constituye el eje central de la matriz energética del Ecuador, aportando históricamente alrededor del 80% de la electricidad a nivel nacional (Naranjo-Silva, 2024). Sin embargo, desde la perspectiva técnica de la adquisición de datos, el método tradicional de mantenimiento basado en rutas de inspección manuales u offline resulta insuficiente para las exigencias operativas actuales. Este enfoque discontinuo genera ventanas de tiempo sin medición en las que pueden desarrollarse e incrementarse aceleradamente anomalías transitorias hasta convertirse en fallas catastróficas (Hasani et al., 2024). Por consiguiente, como señalan Hassan et al. (2024), la transición tecnológica hacia un Mantenimiento Basado en Condición (CBM) es imperativa, ya que permite fundamentar las decisiones de intervención en

el estado real y continuo de la máquina, minimizando los costos de reparación y evitando el colapso inesperado de la maquinaria crítica.

Desde la perspectiva de las Ciencias de la Computación, el desarrollo de una arquitectura basada en Internet de las Cosas (IoT) orientada a la Central Hidroeléctrica MIRA se justifica por su capacidad técnica para erradicar la discontinuidad en la adquisición de datos. Al digitalizar y procesar la señal de vibración en el borde de la red (Edge Computing), el sistema permite evaluar la severidad vibratoria en tiempo real bajo los umbrales de la norma internacional ISO 20816-5 (Daga et al., 2022). Esta actualización tecnológica cierra la brecha temporal entre la aparición de una falla incipiente y su detección, transformando el esquema de gestión reactivo en un modelo proactivo. De este modo, los operadores de la planta podrán identificar patrones de degradación de forma autónoma antes de que las anomalías comprometan la integridad mecánica de la turbina o generen un fallo catastrófico (Hassan et al., 2024; Hasani et al., 2024).

A nivel macroeconómico, la implementación de este prototipo trasciende la operatividad de la planta y se ancla en la planificación estratégica nacional, alineándose de manera directa con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 7 (ODS 7) para garantizar una infraestructura energética moderna, segura y confiable (Herrera Galindo, 2024). El sistema eléctrico del Ecuador se fundamenta primordialmente en la generación hidroeléctrica, la cual ha demostrado ser altamente vulnerable a factores climáticos adversos como las épocas de estiaje prolongado (Naranjo-Silva, 2024). Ante esta variabilidad hidrológica, asegurar la confiabilidad de los activos en la Central MIRA es vital para la estabilidad del Sistema Nacional Interconectado. El sistema de monitoreo continuo actúa como una herramienta de alerta temprana que, al prevenir paradas no programadas, maximiza la disponibilidad de generación. Consecuentemente, esto contribuye a mitigar el impacto de los racionamientos energéticos y reduce la dependencia del Estado frente a la importación de energía o la contratación de generación termoeléctrica de emergencia, optimizando los recursos públicos y fortaleciendo la soberanía energética del país (Quimbita, 2022).

1.4. OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo General

Desarrollar un prototipo funcional de sistema IoT para el monitoreo continuo y análisis de vibraciones en la hidroturbina de la Central Hidroeléctrica MIRA.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Analizar las limitaciones tecnológicas de los métodos actuales de monitoreo vibracional utilizados en la Central Hidroeléctrica MIRA.
- Diseñar una propuesta de sistema IoT de monitoreo que permita la adquisición, procesamiento y transmisión de información vibracional para apoyar la supervisión de los equipos de generación.
- Desarrollar el prototipo funcional que permita demostrar la factibilidad técnica de la propuesta.

1.4.3. Preguntas de Investigación

- ¿Cuáles son las limitaciones tecnológicas de los métodos actuales de monitoreo vibracional utilizados en la Central Hidroeléctrica Mira?
- ¿Qué características debe tener una propuesta de sistema IoT para la adquisición, procesamiento y transmisión de información vibracional en la hidroturbina de la Central Hidroeléctrica Mira?
- ¿Es posible desarrollar un prototipo funcional de sistema IoT que permita el monitoreo continuo y análisis de vibraciones en la hidroturbina de la Central Hidroeléctrica Mira?

II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

La evolución del mantenimiento en la industria de generación eléctrica ha convergido hacia el paradigma del Monitoreo de Salud Estructural (SHM, por sus siglas en inglés) mediado por sistemas ciber-físicos. A nivel global, corporaciones de vanguardia como la del Proyecto de las Tres Gargantas en China han redefinido la gestión de activos críticos mediante el despliegue de arquitecturas de telemetría avanzada. Según las investigaciones desarrolladas por ingenieros de dicha corporación, el diseño de sistemas de monitoreo inteligente basados en el Internet de las Cosas (IoT) y Big Data permite una transición desde la explotación hidroeléctrica tradicional hacia una gestión integral predictiva (Yang et al., 2024). Este enfoque fundamenta computacionalmente que la disponibilidad de una turbina ya no es concebida únicamente como una variable mecánica, sino como un producto directo de la gestión eficiente, la digitalización y el análisis en tiempo real de los flujos de información de vibración.

La digitalización y la transición hacia arquitecturas de supervisión inteligente se han consolidado como una necesidad imperativa para garantizar la resiliencia operativa en infraestructuras energéticas de gran escala. Un testimonio de esta tendencia es la Central Hidroeléctrica Binacional Itaipu, la cual ha impulsado su Plan de Actualización Tecnológica (TUP) con el fin de contrarrestar la obsolescencia técnica tras cuatro décadas de actividad comercial cuyo proceso de modernización no solo contempla la renovación integral de sus sistemas analógicos de protección, medición y control centralizado, sino que también se fundamenta en herramientas de ingeniería de vanguardia como el modelado tridimensional basado en tecnologías BIM y el rediseño de interfaces SCADA de alto rendimiento. (Machado et al., 2026). De este modo, la experiencia empírica de Itaipu demuestra que la migración hacia flujos de datos centralizados y la gestión avanzada de activos digitales son factores determinantes para mantener los índices de disponibilidad de las unidades generadoras por encima de los estándares internacionales de la industria.

A nivel regional latinoamericano Souza et al. (2024), ha evidenciado que la instrumentación constante es vital para prolongar la vida útil y la confiabilidad operativa de los activos generadores. Un referente aplicativo directo y de vanguardia implementaron un sistema de monitoreo predictivo basado en modelos computacionales de aprendizaje automático para una turbina tipo Francis parte de la pequeña central hidroeléctrica (PCH) Alto Fêmea instalada en el estado de Bahía, Brasil. Esta modernización tecnológica demostró que la evaluación y digitalización continua de los espectros de vibración permite a los algoritmos identificar autónomamente el estado vibratorio de la máquina, logrando distinguir alteraciones mecánicas destructivas y zonas de operación anómalas como la cavitación incipiente con niveles de precisión de hasta un 100%. En consecuencia, las investigaciones comprueban que transitar de las mediciones manuales offline a un monitoreo continuo automatizado permite prever las condiciones reales de funcionamiento para programar intervenciones oportunas, reduciendo significativamente los paros de emergencia y validando que el análisis computacional de la vibración es económicamente viable y técnicamente indispensable para el sector energético.

A nivel local, la urgencia de transitar hacia estos esquemas de supervisión digital y mantenimiento predictivo se evidencia de manera crítica en la realidad contemporánea de la infraestructura energética del Ecuador. Durante los últimos períodos, el país ha enfrentado una severa crisis eléctrica caracterizada por un déficit estructural de generación y racionamientos programados, eventos catalizados tanto por eventos climáticos extremos como por una marcada vulnerabilidad en el parque generador. Los análisis técnicos demuestran que el crecimiento sostenido de la demanda no ha sido equiparado por la velocidad de instalación de nueva potencia firme, lo que eleva el riesgo operativo del Sistema Nacional Interconectado (SNI) y reduce drásticamente los márgenes de reserva de las principales centrales hidroeléctricas en épocas de estiaje (Observatorio Eléctrico CORPECE, 2026). Esta coyuntura valida empíricamente que la adopción de tecnologías de monitoreo y telemetría avanzada ya no representa una simple actualización tecnológica optativa, sino una prioridad estratégica nacional imprescindible para mitigar la indisponibilidad de activos críticos y salvaguardar la continuidad del suministro.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Industria 4.0

La Industria 4.0 es un paradigma tecnológico orientado a la digitalización y automatización inteligente de los procesos industriales mediante la integración de tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), sistemas ciber-físicos, computación en la nube, análisis de datos e inteligencia artificial. Este concepto surge como evolución de las revoluciones industriales tradicionales y busca mejorar la eficiencia, conectividad y capacidad de toma de decisiones dentro de los entornos productivos.

La Industria 4.0 ha redefinido los estándares de automatización y monitoreo en infraestructuras críticas. Según las investigaciones de Borhani et al. (2024), este paradigma se fundamenta en la convergencia entre las Tecnologías de la Información (IT) y las Tecnologías de Operación (OT), permitiendo que los sistemas de control industrial evolucionen desde plataformas aisladas hacia Sistemas Ciber-Físicos (CPS) interconectados. Esta integración tecnológica transforma la maquinaria electromecánica tradicional en sistemas capaces de generar e intercambiar datos operativos en tiempo real.

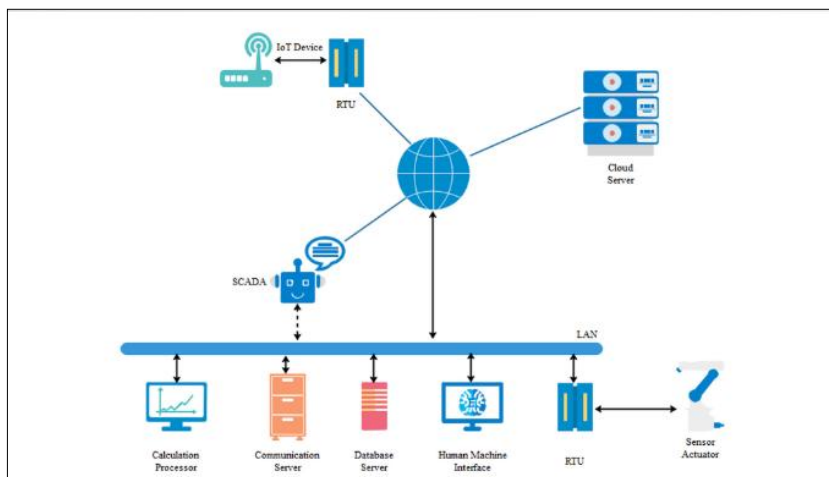


Figura 1. Arquitectura General SCADA Borhani et al., 2024

En el sector de generación eléctrica, la adopción de la Industria 4.0 permite migrar de un mantenimiento reactivo hacia esquemas preventivos y predictivos. Yang et al. (2024) señalan que los sistemas de monitoreo inteligente basados en el Internet de las Cosas y en técnicas de análisis de datos constituyen una estrategia clave para anticipar fallas en unidades hidroeléctricas. Este enfoque facilita la evaluación

continua del estado operativo y estructural de las plantas electromecánicas, optimizando la toma de decisiones y reduciendo tiempos de inactividad.

En el contexto de esta investigación, los principios de la Industria 4.0 fundamentan la modernización tecnológica propuesta para la Central Hidromira. Marcelo & Cervantes (2026) indican que la estabilidad operativa de las centrales eléctricas modernas requiere integrar herramientas informáticas directamente en los entornos OT. En este sentido, el prototipo desarrollado digitaliza la firma vibratoria de las turbinas tipo Francis mediante tecnologías de monitoreo inteligente. Esto permite reducir la dependencia de inspecciones manuales periódicas y avanzar hacia un modelo de mantenimiento predictivo basado en datos.

2.2.2. Arquitectura IoT

La Arquitectura IoT en entornos industriales requiere una estructura lógica que garantice la transmisión continua y segura de la información. De acuerdo con Herrera Galindo (2024), estas arquitecturas multicapa están conformadas por una capa de percepción encargada de adquirir datos mediante sensores, una capa de red responsable de la comunicación y transporte de información, y una capa de aplicación orientada al procesamiento y visualización de los datos para el usuario final. Esta organización facilita la interoperabilidad entre dispositivos y mejora la gestión de los procesos industriales.

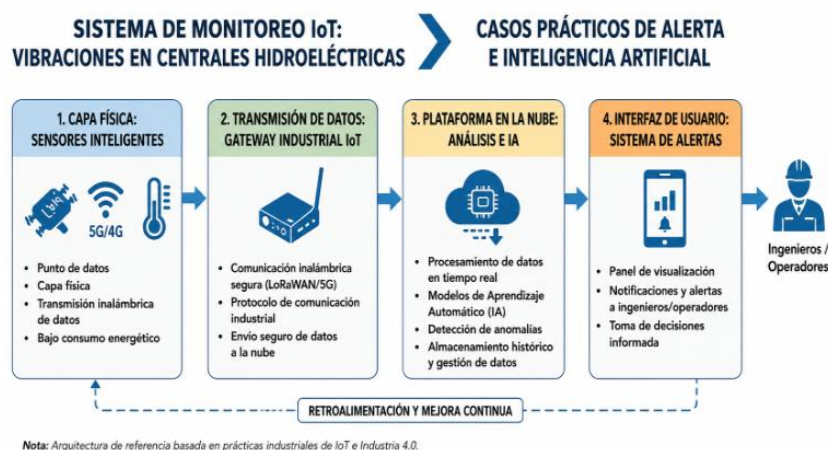


Figura 2. Sistema Monitoreo IoT

En aplicaciones de monitoreo de condición, la arquitectura IoT debe soportar la adquisición constante de variables físicas asociadas al funcionamiento de la maquinaria. Hassan et al. (2024) destacan que el uso de arquitecturas IoT en el contexto de la Industria 4.0 permite recolectar información en tiempo real mediante

sensores inteligentes, mejorando la precisión en la detección temprana de anomalías mecánicas y fortaleciendo las estrategias de mantenimiento predictivo.

Aplicando estos fundamentos a la presente investigación, la solución propuesta para la Central Hidromira adopta una arquitectura IoT de tres capas. Tomando como referencia el estudio de (Castellano y Proaño, 2022) sobre integración de variables remotas hacia sistemas SCADA, el sistema diseñado captura el desplazamiento vibratorio de las hidroturbinas mediante un acelerómetro MEMS en la capa de percepción la información es transmitida de forma inalámbrica a través de la capa de red y finalmente procesada y visualizada en la capa de aplicación. De esta manera, la arquitectura implementada proporciona un entorno integral para supervisar el estado operativo de la turbina mediante un dashboard interactivo.

2.2.3. Edge Computing

En el contexto del Internet Industrial de las Cosas (IIoT), el monitoreo de variables mecánicas de alta frecuencia genera volúmenes masivos de datos transitorios que exponen las limitaciones de las arquitecturas centralizadas, provocando ineludibles cuellos de botella en la red. Para superar este desafío, el paradigma de la computación en el borde se consolida como una solución distribuida que traslada la capacidad de procesamiento, análisis y almacenamiento desde la nube hacia los nodos ubicados directamente en la maquinaria física. Según Velásquez, (2026) esta descentralización algorítmica permite que los dispositivos locales filtren y procesen los datos crudos de los sensores *in situ*, enviando a los servidores centrales únicamente los resultados analíticos o eventos críticos de falla, lo que reduce drásticamente la latencia de red, optimiza el consumo de ancho de banda y asegura la continuidad de las operaciones industriales críticas incluso ante intermitencias de conexión.

Aplicando este enfoque informático a la arquitectura diseñada para la Central Hidroeléctrica MIRA, aplicando computación en el borde para mejorar eficiencia para el procesamiento de la señal digitalizada. En lugar de saturar la red transmitiendo de forma continua miles de muestras de aceleración en bruto por segundo, el microcontrolador del sistema embebido asume la carga ejecutando localmente el cálculo de la velocidad RMS y la Transformada Rápida de Fourier. Como corroboran las investigaciones de Kociszewski & Wojtkowski, (2025) en el desarrollo de sistemas de diagnóstico de vibraciones, computar estos parámetros estadísticos a bordo del dispositivo periférico reduce sustancialmente el tamaño de

los paquetes de datos enviados al *broker* MQTT. Esto evita sobrecargar la infraestructura de telecomunicaciones y garantiza una topología escalable que, mediante un motor de reglas, traduce señales complejas y entrega a los operadores alertas predictivas tempranas sin comprometer el rendimiento general de la planta.

2.2.4. Sistemas de monitoreo vibracional

El monitoreo vibracional ha evolucionado desde inspecciones mecánicas periódicas hacia plataformas informáticas continuas que sustentan el mantenimiento predictivo, de acuerdo con las investigaciones de (Hassan et al., 2024) un sistema de monitoreo de condición basado en vibraciones emplea instrumentación especializada para registrar oscilaciones mecánicas y transformarlas en señales eléctricas procesables, permitiendo que algoritmos de ciencia de datos identifiquen patrones de desgaste de forma automática. Desde la perspectiva de las Ciencias de la Computación, estos sistemas actúan como herramientas de diagnóstico temprano que reemplazan los enfoques reactivos tradicionales, facilitando la toma de decisiones basada en datos precisos sobre la salud de la maquinaria pesada sin necesidad de interrumpir su operación.

La integración de estas plataformas en entornos energéticos críticos ha evolucionado desde los esquemas centralizados tradicionales hacia arquitecturas distribuidas de alto rendimiento orientadas al manejo de Big Data. (Yang et al., 2024) documentan que los sistemas de monitoreo inteligente y diagnóstico de fallos aplicados a turbinas hidroeléctricas convergen actualmente con ecosistemas IoT avanzados para superar las limitaciones de las infraestructuras tradicionales. Estas arquitecturas distribuidas no solo recolectan flujos masivos de telemetría en la capa de red, sino que extraen características espectrales en tiempo real, permitiendo que el software supervise los parámetros dinámicos de forma anticipada para mejorar el rendimiento general y prevenir fallas en las instalaciones hidroeléctricas.

En el contexto de la Central Hidroeléctrica MIRA, la conceptualización de este paradigma justifica directamente la arquitectura de software y hardware propuesta en esta investigación. Siguiendo las directrices expuestas por (Daga et al., 2022) sobre la instrumentación digital en unidades de generación hidroeléctrica, el sistema IoT desarrollado automatiza el monitoreo vibracional de las turbinas Francis al integrar los datos procesados con un motor de reglas basado en los umbrales de la normativa ISO 20816-5. Al delegar al algoritmo la supervisión continua de las Zonas de severidad

(A, B, C y D), el prototipo elimina la ineficiencia de las ventanas ciegas generadas por las rutas de inspección manuales intermitentes y dota a la central de una herramienta de alerta temprana computacionalmente robusta frente a daños severos.

2.2.5. Adquisición de datos vibracionales

En el diseño de arquitecturas del Internet Industrial de las Cosas (IIoT), el proceso de adquisición de datos (DAQ) representa el puente computacional crítico entre el entorno físico de la maquinaria y el entorno digital de análisis. De acuerdo con las investigaciones de Hassan et al. (2024), la captura de la dinámica estructural exige el uso de transductores especializados, como los acelerómetros, los cuales tienen la capacidad de registrar oscilaciones mecánicas complejas y transformarlas en señales eléctricas procesables para el monitoreo de condición. Desde la perspectiva de la Ingeniería en Computación, estas magnitudes analógicas deben someterse a un riguroso proceso de conversión analógico-digital (ADC) de alta resolución, garantizando que el fenómeno vibratorio transitorio sea traducido a matrices de datos numéricos estructurados que alimenten de forma confiable a los algoritmos de diagnóstico predictivo en la capa de software.

La evolución de la instrumentación electrónica ha permitido que estas exigentes rutinas de digitalización se ejecuten de forma autónoma directamente en la periferia de la red industrial. En este contexto, (Hasani et al., 2024) demuestran que la implementación de sistemas de adquisición inalámbricos basados en sensores microelectromecánicos (MEMS) facilita la captura de series de tiempo con altos niveles de precisión y una densidad de ruido extremadamente baja. A nivel de arquitectura de hardware, acoplar directamente estos transductores digitales a microcontroladores elimina la dependencia de las infraestructuras cableadas convencionales y otorga al nodo la capacidad informática necesaria para ejecutar muestreos a altas velocidades, filtrando la señal cruda antes de ingresar a la capa de transporte de la red.

Aplicando estos fundamentos teóricos a la presente investigación, la etapa de adquisición de datos se materializa de forma directa en el prototipo a escala (maqueta) diseñado para replicar el comportamiento de la Central Hidromira. Respaldándose en los estudios de Souza et al. (2024) sobre las exigencias técnicas del monitoreo computacional continuo en turbinas hidráulicas tipo Francis, el nodo IoT construido actúa como el núcleo principal de adquisición al capturar digitalmente la

firma de vibraciones del rodete. Al almacenar temporalmente y procesar estas matrices de datos directamente en la memoria RAM del microcontrolador local, el sistema propuesto extrae características analíticas de gran valor evitando saturar el canal de telecomunicación MQTT con millones de lecturas crudas, lo que valida la viabilidad técnica de la arquitectura informática para digitalizar la variable vibratoria y anticipar la degradación de la máquina.

2.2.6. Procesamiento de datos

El procesamiento de datos vibracionales representa la fase analítica central en cualquier arquitectura de monitoreo predictivo, siendo la etapa encargada de transformar las señales físicas crudas en información semántica interpretable por el sistema. Como afirman Yu et al., (2024), la extracción de características a partir de señales de vibración no lineales y no estacionarias en unidades hidroeléctricas constituye un desafío algorítmico fundamental, dado que la efectividad de este procesamiento afecta de manera directa la precisión final en el diagnóstico de fallas. Desde la perspectiva de las Ciencias de la Computación, las series temporales adquiridas por los conversores analógico-digitales carecen de valor diagnóstico por sí solas; por ende, el software debe someter estas matrices a rutinas de limpieza y filtrado digital para aislar el ruido eléctrico y revelar los patrones dinámicos subyacentes que indican fatiga o daño estructural en la máquina.

Para ejecutar esta transformación matemática de forma eficiente, la ingeniería de software embebido emplea técnicas de compresión analítica que consolidan la información antes de que ingrese a la capa de red. Las investigaciones de Kociszewski & Wojtkowski, (2025) establecen que, en arquitecturas descentralizadas, es imperativo programar el microcontrolador local para calcular parámetros estadísticos directos a partir del dominio del tiempo tales como el Valor Cuadrático Medio (RMS) y ejecutar algoritmos complejos como la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Esta estrategia algorítmica permite que el nodo sensor asuma la carga, enviando hacia el *broker* MQTT únicamente las métricas extraídas en lugar de transmitir grandes volúmenes de datos crudos, lo cual reduce drásticamente el consumo del ancho de banda y mitiga la latencia en las redes de comunicación industrial.

Aplicando estos fundamentos algorítmicos al desarrollo tecnológico de la presente investigación, la etapa de procesamiento de datos se ejecuta íntegramente dentro de la memoria del microcontrolador asignado al prototipo a escala para la Central

Hidromira. Apoyándose en las metodologías de evaluación propuestas por de Souza et al. (2024) para el análisis predictivo en hidroturbinas tipo Francis, el código fuente (*firmware*) diseñado para la maqueta no actúa como un simple puente de transmisión pasivo, sino como un motor analítico avanzado. Al calcular localmente el nivel de severidad vibratoria (RMS global) y la distribución espectral para identificar firmas mecánicas asociadas a la cavitación o el desbalanceo, el software garantiza que el sistema IoT interprete el estado de salud de la turbina *in situ*. Esto permite entregar al operador alarmas procesadas, estructuradas y altamente precisas, demostrando la solidez computacional de la arquitectura propuesta.

2.2.7. Norma ISO 20816-5

En el desarrollo de arquitecturas de software para la supervisión industrial, es imperativo fundamentar los algoritmos de evaluación sobre estándares internacionales empíricamente validados. De acuerdo con las investigaciones de (Daga et al., 2022), la norma ISO 20816-5 constituye el marco regulatorio definitivo para el monitoreo de unidades de generación hidroeléctrica, estableciendo los límites permisibles de severidad vibratoria basados en variables como la velocidad RMS y el desplazamiento relativo. Desde la perspectiva de las Ciencias de la Computación, este estándar trasciende su origen puramente electromecánico para convertirse en un esquema lógico de clasificación estricto, dividiendo el estado de salud de la maquinaria en cuatro zonas discretas (A, B, C y D). Esta categorización determina algorítmicamente si la operación es aceptable a largo plazo, si requiere una alerta preventiva, o si demanda la detención inmediata del equipo para evitar daños catastróficos estructurales.

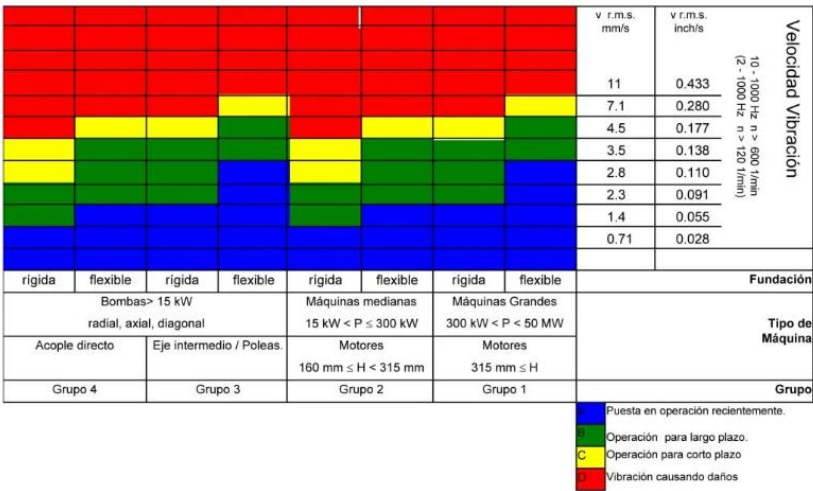


Figura 3. Rangos de severidad ISO 10816-3

La correcta traducción de estos umbrales hacia un entorno de procesamiento informático exige un hardware de adquisición de datos (DAQ) de extrema fidelidad en el borde de la red. Al respecto Alejandro et al. (2026) advierten en el diseño de módulos IoT que el ruido electrónico introducido por los conversores analógico-digitales (ADC) durante el muestreo puede corromper la señal, por lo que es crucial emplear resoluciones óptimas que garanticen que los errores de digitalización no superen los estrictos límites permisibles fijados por normas como la ISO 20816-5. Informáticamente, esto significa que la capa de percepción debe asegurar una calidad de datos irrefutable antes de someterlos a los cálculos matemáticos, previniendo la generación de falsos positivos o falsos negativos que comprometerían la confiabilidad de cualquier estrategia de mantenimiento predictivo.

Aplicando estos fundamentos teóricos a la arquitectura diseñada para la Central Hidromira, la normativa ISO 20816-5 actúa como el núcleo lógico del "motor de reglas" determinista programado en la memoria de la maqueta tecnológica. Como destacan los estudios de Boden et al. (2025) sobre la implementación de gemelos digitales y monitoreo avanzado en turbinas, la integración computacional de estas directrices permite que el software establezca niveles automáticos de alarma y disparo sin depender de la interpretación humana. En tu prototipo IoT, el microcontrolador no opera como un simple puente de transmisión; evalúa de forma autónoma la velocidad RMS calculada localmente contra las fronteras matemáticas de las zonas ISO y transmite mediante el protocolo MQTT únicamente las banderas de estado correspondientes hacia el dashboard.

Con esta estructuración de software, la central erradica la dependencia de las inspecciones manuales y adquiere una herramienta analítica ininterrumpida que salvaguarda la integridad de las turbinas Francis.

2.2.8. Lógica computacional

La lógica computacional constituye el núcleo decisional de las arquitecturas de automatización modernas, encargada de traducir los requerimientos físicos operativos en secuencias algorítmicas ejecutables. Tradicionalmente, el control de monitoreo dependía de instrucciones centralizadas y rígidas. Sin embargo, desde la perspectiva de las Ciencias de la Computación, la lógica ha evolucionado hacia esquemas de software distribuidos directamente en la periferia de la red (*Edge Computing*). De acuerdo con las investigaciones de Kociszewski & Wojtkowski, (2025)

al trasladar el procesamiento de los datos de vibración y la evaluación algorítmica al nodo local permite una toma de decisiones informáticas más rápida y eficiente. Al integrar estas capacidades, el sistema embebido no solo captura la telemetría, sino que ejecuta de forma ininterrumpida un motor de reglas lógicas tales como las alarmas por superación de umbrales documentadas por Boden et al. (2025) para unidades hidroeléctricas, dotando al dispositivo de la autonomía necesaria para gobernar el diagnóstico predictivo en tiempo real.

Tabla 1. Comparativa de tecnologías para la lógica del sistema (Backend).

Criterio Técnico	Python (Django / Streamlit)	Node.js (JavaScript)	C++ (Lenguaje Nativo)
Cálculos Matemáticos (Norma ISO)	Excelente: Librerías nativas listas para análisis estadístico rápido.	Regular: Requiere complementos externos; riesgo de inestabilidad.	Excelente: Velocidad analítica máxima, pero código manual complejo.
Conexión Industrial (PLC / Modbus)	Excelente: Soporte maduro y directo para protocolo Modbus TCP/IP.	Buena: Conectores existentes, pero poco probados en plantas reales.	Excelente: Comunicación directa a bajo nivel; desarrollo desde cero.
Crecimiento Futuro (Escalabilidad SCADA)	Muy Alta: Modular; fácil integración de nuevas variables y funciones.	Alta: Eficiente en conexiones, pero limitado en procesamiento pesado.	Baja: Estructura rígida; alto riesgo de fallas ante modificaciones.
Tiempo Desarrollo y Pruebas	Muy Rápido: Construcción ágil de pantallas y bases de datos.	Rápido: Ágil para entornos web comunes, lento para validar ingeniería.	Muy Lento: Demora excesiva incluso para interfaces básicas.
Decisión Ingeniería	SELECCIONADO	DESCARTADO	DESCARTADO

Como se condensa en la Tabla 1, la selección de Python frente a las demás alternativas responde a criterios de eficiencia operativa y viabilidad de desarrollo dentro de la Central MIRA. Mientras que C++ es descartado por su rigidez y los elevados tiempos de diseño que exige, y Node.js es descartado por su debilidad estructural en el procesamiento matemático de ingeniería, la combinación de Python con Django y Streamlit ofrece el entorno más equilibrado, seguro y preparado para escalar hacia una supervisión completa de planta.

Para que un sistema ciber-físico interprete correctamente fenómenos transitorios como las vibraciones mecánicas, la programación debe estructurar fronteras de decisión matemáticas muy precisas Yang et al. (2024) argumentan en su estudio sobre unidades hidroeléctricas que la evaluación interactiva de la condición de salud depende fuertemente de la sinergia entre los datos de campo y el modelado lógico de los algoritmos. Informáticamente, esto implica que las métricas extraídas de los sensores (como el valor RMS) se someten a un escrutinio condicional continuo; si el

dato cruza un umbral paramétrico predefinido, el software desencadena un cambio en la máquina de estados finitos del dispositivo, alertando sobre la anomalía sin requerir la intervención ni la interpretación de un operador humano.

Aplicando estos preceptos informáticos de vanguardia al desarrollo tecnológico de la presente investigación, el "motor de reglas" programado constituye el verdadero cerebro analítico de la maqueta diseñada para la Central Hidromira. Sustentándose en los enfoques propuestos por de Souza et al. (2024) para la aplicación de modelos computacionales predictivos específicos en turbinas hidráulicas tipo Francis, el *firmware* del prototipo IoT no opera como un mero puente pasivo de datos; en su lugar, ejecuta localmente una estructura de control (rutinas *IF/THEN/ELSE*) que mapea la velocidad de vibración calculada contra los límites estrictos de la norma ISO 20816-5. Al categorizar algorítmicamente el estado de la turbina en zonas discretas de severidad (A, B, C o D) y transmitir de manera inalámbrica por MQTT únicamente el resultado lógico procesado, el sistema consolida un diagnóstico de última generación, exacto y en tiempo real.

2.2.9. Protocolo Modbus

El protocolo Modbus es un estándar de comunicación abierto que se ha consolidado ampliamente en el sector industrial gracias a su facilidad de uso, simplicidad de implementación y bajo costo como lo corrobora Castellano, (2022). Su funcionamiento se rige por una arquitectura de tipo maestro-esclavo, en la cual un dispositivo maestro se encarga de iniciar y coordinar las consultas de información, mientras que los múltiples dispositivos esclavos conectados a la misma red se limitan a responder a dichas peticiones. Existen diversas variantes de este protocolo, siendo Modbus RTU que típicamente opera sobre interfaces seriales como RS-485 la más común y eficiente para el control de redes de dispositivos y sistemas de supervisión y adquisición de datos (SCADA), ya que facilita la transmisión asincrónica de bloques de información vinculados a variables analógicas y digitales.

Con el avance de las redes de comunicación industrial y la necesidad de una mayor convergencia tecnológica, este estándar evolucionó hacia la variante Modbus TCP/IP, la cual encapsula la unidad de datos del protocolo original (PDU) dentro de paquetes TCP para operar a través del puerto 502 sobre redes Ethernet. Esta adaptación ha convertido a Modbus en un protocolo de suma importancia para las arquitecturas de la Industria 4.0, ya que facilita el desarrollo de sistemas de

adquisición de datos distribuidos y permite la interconexión fluida con pasarelas (gateways) orientadas al Internet Industrial de las Cosas (IIoT). Gracias a esto Velásquez, (2026) destaca la posibilidad de extraer volúmenes importantes de datos desde instrumentos de campo hacia servidores centralizados o infraestructuras en la nube, superando las restricciones de ancho de banda del bus serial tradicional y habilitando el monitoreo remoto.

En el marco del presente proyecto, el protocolo Modbus constituye la columna vertebral de comunicación entre la capa de percepción física y el entorno lógico de control. Específicamente, las señales capturadas para evaluar el estado vibratorio de los componentes críticos de la turbina pueden canalizarse de manera altamente eficiente hacia el sistema de monitoreo de la central utilizando Modbus sobre un bus RS-485.(Yang et al., 2024) Al emplear esta arquitectura, el microcontrolador del nodo IoT actúa como un cliente que lee y escribe de forma bidireccional los registros de retención el Controlador Lógico Programable (PLC) de la hidroeléctrica, garantizando que el análisis computacional de las vibraciones en el borde (*Edge Computing*) retroalimente instantáneamente la lógica de automatización para alertar sobre fallas inminentes o desgaste mecánico

2.2.10. Integración industrial-IoT

La integración industrial a través del Internet Industrial de las Cosas (IIoT) representa un pilar fundamental de la Industria 4.0, impulsada por la convergencia estratégica entre las Tecnologías de la Información (IT) y las Tecnologías de Operación (OT)(Velásquez, 2026). Este proceso de digitalización permite que los sistemas de control tradicionales, como las arquitecturas SCADA o los controladores lógicos programables (PLC), se integren en redes de mayor alcance y faciliten la comunicación fluida de máquina a máquina, Al romper las barreras que existían entre el entorno físico de producción y los sistemas informáticos de gestión, la integración IIoT potencia la interconectividad de sensores e instrumentos de campo, posibilitando la extracción masiva y el análisis de datos en tiempo real para optimizar la automatización de los procesos(Borhani, Singh Gaba +, et al., 2024).

La adopción de estas arquitecturas interconectadas genera beneficios sustanciales en la eficiencia operativa, permitiendo la supervisión remota y continua de infraestructuras críticas que históricamente dependían de inspecciones manuales periódicas. Sin embargo Marcelo & Cervantes, (2026) nos recuerda que la integración

masiva de dispositivos industriales también exige infraestructuras robustas que resuelvan nuevos desafíos, como la sobrecarga en el tráfico de datos, la estandarización de protocolos y la exposición a riesgos de ciberseguridad. Para hacer frente a estos retos, las implementaciones modernas se apoyan en paradigmas como la Computación en el Borde (*Edge Computing*), y según Borhani et al., (2024) es lo que faculta a los nodos locales filtrar, agregar y procesar la información directamente en la planta antes de enviarla a los servidores centrales o a la nube, mitigando la latencia y la saturación de las redes de comunicación.

Al contar con este componente ya instalado en la central hidroeléctrica, el sistema aprovecha un equipo de grado industrial con protección IP65 (NEMA 4X), totalmente programable y diseñado para operar en condiciones ambientales rigurosas. El PT580 facilita tu arquitectura de integración IoT al canalizar la telemetría vibracional directamente hacia el PLC GE Fanuc 90-30 utilizando el protocolo Modbus. Además, su capacidad de gestionar alarmas duales programables a nivel de hardware garantiza una protección mecánica autónoma e inmediata para la turbina Francis frente a niveles críticos de oscilación, independientemente de la latencia en la nube(ProvibTech, 2008).

2.2.11. Sistemas de telemetría IoT

Los sistemas de telemetría basados en el Internet de las Cosas (IoT) representan la evolución de la adquisición remota de datos, permitiendo la recolección, digitalización y transmisión automatizada de información física hacia entornos informáticos centralizados. Esta tecnología se estructura típicamente en una arquitectura multicapa que abarca la percepción donde actúan los sensores, la red encargada de la comunicación y la aplicación orientada a la visualización y análisis para el usuario final (Andrés et al., 2025). Para lograr este flujo continuo y bidireccional, los dispositivos de telemetría emplean un ecosistema diverso de tecnologías inalámbricas y estándares de conectividad, tales como Wi-Fi, Bluetooth, redes celulares (4G/5G) o protocolos de largo alcance y bajo consumo como LoRaWAN, lo cual asegura la interconexión de máquina a máquina sin importar la dispersión geográfica de los equipos industriales.

Para garantizar la eficiencia y fiabilidad en la transferencia de estos flujos de datos, la telemetría IoT moderna se apoya en protocolos de mensajería ligeros como MQTT, el cual opera bajo un modelo de publicación y suscripción que resulta ideal para

redes con ancho de banda limitado, alta latencia o conexiones inestables como lo explica Kociszewski & Wojtkowski, (2025). Además, para evitar la saturación de los servidores centrales ante el enorme volumen de información que generan instrumentos de alta resolución (como acelerómetros y micrófonos), los sistemas telemétricos actuales integran el paradigma de la Computación en el Borde (*Edge Computing*). Esta estrategia permite que los nodos locales filtren, agreguen y analicen las señales directamente en la fuente, transmitiendo a la nube únicamente la información crítica, las alertas o los diagnósticos procesados, optimizando así los recursos de la red y reduciendo significativamente los tiempos de respuesta.

La telemetría IoT constituye un elemento fundamental para mejorar la adquisición y transmisión continua de datos operacionales en la Central Hidroeléctrica MIRA. En la propuesta desarrollada, las señales vibracionales capturadas por el sistema de monitoreo son gestionadas desde la capa física, integrada por la turbina y los dispositivos de adquisición, hacia la nube mediante una pasarela industrial y protocolos de comunicación como MQTT. (Andrés et al., 2025)Adicionalmente, el procesamiento en el borde permite reducir la carga de transmisión al enviar variables previamente procesadas, como valores RMS globales, en lugar de datos crudos de manera continua. Este enfoque contribuye a optimizar la latencia y la eficiencia de la red de telemetría, facilitando la visualización en tiempo real mediante dashboards de monitoreo donde Torres et al. (2026) destaca su importancia permitiendo la detección temprana de anomalías asociadas a fenómenos como cavitación o desbalanceo, fortaleciendo así estrategias de mantenimiento predictivo.

Tabla 2. Análisis comparativo de infraestructura para el despliegue del sistema.		
Criterio Técnico	Opción 1: Servidor Local (Planta Central MIRA)	Opción 2: Arquitectura en la Nube (Cloud)
Latencia de Red (Tiempo de respuesta)	Mínima: Conexión directa vía red LAN industrial con el PLC; sin retrasos.	Variable: Dependiente de la estabilidad del ancho de banda del internet externo.
Seguridad de la Información	Alta: Aislamiento físico completo; datos protegidos dentro de la red interna de la planta.	Media: Exposición constante a internet; requiere configuraciones complejas de firewalls.
Autonomía Operativa (Disponibilidad)	Total: El sistema supervisa continuamente incluso si la planta pierde conexión externa.	Crítica: Pérdida total de la supervisión si ocurre una caída en el proveedor de internet local.
Costos de Infraestructura	Bajo: Aprovechamiento de hardware propio existente en la central; sin pagos mensuales.	Recurrente: Costo mensual variable por almacenamiento de datos y uso de servidores externos.
Decisión	SELECCIONADO	DESCARTADO (Para entorno base)

En la Tabla 2, se seleccionó un servidor local para el despliegue de la plataforma debido a las exigencias de disponibilidad crítica de la Central MIRA. Mientras que la

Arquitectura en la Nube es descartada para el entorno base por los costos recurrentes y el riesgo de perder la supervisión ante fallas de internet, el servidor local garantiza una latencia mínima en la lectura Modbus, máxima seguridad perimetral y total autonomía operativa, dejando la infraestructura lista para escalar hacia un entorno SCADA completamente local y seguro.

2.2.12. Protocolo MQTT

El protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) es un estándar de mensajería ligero estructurado bajo un modelo de publicación y suscripción, concebido específicamente para operar de manera confiable en redes que presentan un ancho de banda limitado, alta latencia o conexiones inestables.(Kociszewski & Wojtkowski, 2025) A diferencia de las arquitecturas tradicionales basadas en el esquema cliente-servidor, MQTT fundamenta su funcionamiento en la interacción a través de un servidor central denominado *broker*, el cual se encarga de recibir, filtrar y distribuir los mensajes únicamente a aquellos dispositivos que estén suscritos a temas o "tópicos" específicos. Esta configuración minimiza significativamente la huella de código computacional requerida en los dispositivos finales y optimiza el tráfico de la red, convirtiéndolo en un protocolo idóneo y ampliamente adoptado para los ecosistemas del Internet de las Cosas (IoT) y las comunicaciones de máquina a máquina (M2M).

En el contexto del monitoreo industrial y el mantenimiento predictivo, la adopción de arquitecturas basadas en MQTT ha revolucionado la adquisición de datos, ya que permite que plataformas basadas en microcontroladores de bajo costo (tales como arquitecturas ESP o sistemas Raspberry Pi) transmitan telemetría de forma continua, segura y eficiente desde la planta física hacia entornos en la nube.(Gómez, 2025) Para asegurar una integración fluida con herramientas de monitoreo y análisis en tiempo real, la información transportada por este protocolo suele encapsularse mediante estructuras de datos legibles y universales como JSON, lo que simplifica enormemente el desempaquetado y la interpretación de las variables físicas en el software de destino. Según Gómez & Gonzales, (2025) gracias a esta eficiencia, MQTT resulta indispensable en entornos donde la transmisión garantizada de eventos y alarmas debe realizarse con un consumo mínimo de energía y sin comprometer el rendimiento general de los enlaces de telecomunicación.

El protocolo MQTT se posiciona como el canal estratégico que da vida a la telemetría de la Central Hidroeléctrica MIRA. Una vez que el sistema embebido procesa localmente las señales de los acelerómetros MEMS mediante la computación en el borde (*Edge Computing*), el nodo IoT actúa como un cliente MQTT que publica de manera ágil las variables diagnósticas ya depuradas (como el valor RMS o las banderas de severidad ISO) hacia el *broker* central. Al emplear este esquema de publicación y suscripción, el *dashboard* de los operadores recibe actualizaciones ultrarrápidas y precisas sobre el estado oscilatorio de la turbina Francis sin saturar la red con los datos vibracionales crudos. Esta arquitectura de mensajería es la que te permite lograr latencias ínfimas y mantener una supervisión ininterrumpida de la máquina.

2.2.13. Estructuras JSON

Las estructuras JSON (*JavaScript Object Notation*) representan un formato abierto y altamente eficiente para el intercambio de datos, diseñado desde su concepción para ser fácilmente legible y comprensible tanto por los seres humanos como por las máquinas computacionales.(Gómez & Gonzales, 2025) A pesar de que su nomenclatura hace referencia al lenguaje JavaScript, la sintaxis de JSON es completamente independiente de cualquier lenguaje de programación, lo que ha impulsado su adopción universal en el desarrollo de software y en el diseño de interfaces de programación de aplicaciones (API). Su eficiencia radica en la simplicidad con la que organiza la información, basándose principalmente en dos estructuras universales: los objetos.

Tabla 3. Matriz sintética para la selección del gestor de bases de datos históricos.

Criterio Técnico		PostgreSQL (Relacional)	MySQL / MariaDB (Relacional)	MongoDB (No Relacional / JSON)
Protección e Integridad (Propiedades ACID)		Máxima: Garantiza que ningún dato se corrompa ante fallas eléctricas en la planta.	Alta: Estándar seguro, pero reduce su velocidad con tablas históricas masivas.	Baja: Enfoque en flexibilidad; riesgo de omitir validaciones lógicas de ingeniería.
Manejo de Fechas y Horas (Series de Tiempo)		Excelente: Indexación temporal nativa; búsquedas analíticas de meses en segundos.	Regular: Almacenamiento básico; alto uso de procesador en consultas complejas.	Buena: Escritura rápida de estructuras JSON, pero lenta en cálculos de promedios.
Conexión con el Backend (Python / Django)		Perfecta: Integración nativa y madura; automatiza la estructura de datos de forma segura.	Buena: Conexión sencilla, pero limitada en herramientas de optimización avanzadas.	Regular: Requiere programar reglas extra en el backend para simular relaciones entre variables.
Decisión de Ingeniería		SELECCIONADO	DESCARTADO	DESCARTADO

Como se evidencia en la tabla la selección de PostgreSQL responde a la naturaleza de las variables capturadas en la planta, las cuales dependen estrictamente de un registro cronológico continuo. Mientras que MySQL es descartado por su tendencia a la saturación bajo alta concurrencia de datos analíticos, y MongoDB es descartado por carecer del rigor relacional necesario para la seguridad de la información industrial, PostgreSQL asegura la persistencia exacta de la telemetría, sentando una base firme para la futura expansión del sistema hacia un SCADA integral.

En el ámbito del Internet de las Cosas (IoT) y las telecomunicaciones industriales, el formato JSON se ha consolidado como el estándar predilecto para codificar las cargas útiles (*payloads*) de los eventos y mensajes que se transmiten a través de protocolos ligeros como MQTT. En estas arquitecturas distribuidas, el microcontrolador o nodo periférico cumple la función vital de decodificar las tramas provenientes de los sensores de campo (por ejemplo, a través de enlaces seriales Modbus) y organizar los valores procesados en un paquete JSON compuesto por pares clave-valor directamente legibles como lo menciona Torres et al. (2026). Al utilizar esta serialización de datos, la información es sincronizada de manera fluida y flexible con la nube mediante redes inalámbricas como Wi-Fi, lo que facilita enormemente la extracción de métricas, el análisis en tiempo real y la compatibilidad natural con bases de datos y plataformas de monitoreo (como *dashboards*) en los centros de control.

Una vez que el microcontrolador ha calculado localmente los indicadores de la severidad vibratoria (procesando los datos brutos de los acelerómetros MEMS a través de la computación en el borde), los resultados se codifican en un objeto JSON ligero. Este archivo estructurado empaqueta de manera ordenada y etiquetada las variables de interés tales como la velocidad RMS, los identificadores del equipo y las banderas de alarma para luego ser publicado hacia el *broker* MQTT. Gracias a este esquema de serialización, el panel de control de la Central Hidroeléctrica MIRA puede desempaquetar y graficar instantáneamente las oscilaciones mecánicas de la máquina, garantizando una supervisión de condición continua, sin errores de formato y con un bajísimo impacto en el ancho de banda de la hidroeléctrica.

2.2.14. Ciberseguridad industrial

La ciberseguridad industrial orientada a las Tecnologías de Operación se ha convertido en un requisito ineludible dentro de la Industria 4.0, especialmente para la

protección de infraestructuras críticas como las centrales de generación eléctrica. (Marcelo & Cervantes, 2026) Históricamente, los sistemas de control industrial, como los controladores lógicos programables (PLC) y las redes SCADA, operaban en entornos aislados y empleaban protocolos diseñados sin mecanismos de seguridad nativos, careciendo de cifrado o autenticación desde su concepción (Velásquez, 2026). Sin embargo, la creciente digitalización y la convergencia han interconectado estas redes operativas con el internet industrial de las cosas, ampliando significativamente la superficie de ataque frente a amenazas cibernéticas. Esta exposición hace que las instalaciones industriales sean altamente vulnerables a accesos no autorizados, donde la explotación de brechas de seguridad podría comprometer de manera simultánea la disponibilidad de la red, la integridad de los datos de campo y la seguridad física de los procesos operacionales.

Las vulnerabilidades en los ecosistemas OT interconectados pueden tener consecuencias devastadoras sobre los equipos electromecánicos. Un ataque cibernético que logre interceptar o manipular las señales provenientes de la instrumentación física podría alterar los parámetros operativos de la maquinaria, provocando fallas graves en los componentes de control o interrupciones directas en el proceso de generación de energía. (Borhani, Gaba, et al., 2024) Además, el uso automatizado de escáneres de dispositivos industriales por parte de actores maliciosos facilita el descubrimiento de puertos abiertos, conexiones inseguras y *firmware* desactualizado, acelerando la ejecución de ataques como suplantación de identidad, intrusiones de intermediario (*Man-in-the-Middle*) o denegación de servicio (DoS). Para mitigar estos riesgos de forma efectiva, la literatura técnica exige implementar arquitecturas basadas en la "defensa en profundidad", lo cual requiere la segmentación estricta de las redes mediante zonas desmilitarizadas (DMZ) para separar el entorno IT del OT, el despliegue de *firewalls* industriales, la encriptación de datos en tránsito y la monitorización continua para la detección de intrusiones.

La ciberseguridad industrial es el pilar que garantiza la confiabilidad del diagnóstico predictivo en la Central Hidroeléctrica MIRA. Dado que tu arquitectura extrae telemetría vibracional mediante acelerómetros MEMS y procesa los cálculos en el borde (*Edge Computing*), es vital asegurar que la información no sea alterada de forma maliciosa durante su tránsito, ya que una manipulación de las señales oscilatorias podría generar falsas alarmas de cavitación o, en el peor de los casos, enmascarar un daño destructivo real en la turbina Francis. (Marcelo & Cervantes,

2026) Para proteger este ecosistema, los nodos IoT deben estar lógicamente segmentados de los sistemas de control crítico (PLCs principales) de la hidroeléctrica, evitando que una posible vulnerabilidad en el panel de monitoreo comprometa la operación directa de la planta. Asimismo, para blindar la transmisión inalámbrica de las variables analíticas hacia la nube, el sistema debe fortificar el protocolo MQTT aplicando cifrado criptográfico como TLS/SSL y mecanismos de autenticación robustos para los clientes, mitigando así cualquier riesgo de interceptación o inyección de datos falsos en el *dashboard* de los operadores (Velásquez, 2026).

2.2.15. Máquinas de estados

En el contexto del Internet Industrial de las Cosas (IIoT) y el monitoreo de la salud estructural de la maquinaria, la implementación de máquinas de estados permite que los nodos de percepción local actúen con verdadera inteligencia frente a las variaciones del entorno. Al procesar series temporales de datos como señales acústicas o vibracionales, el sistema periférico evalúa continuamente la magnitud de las métricas obtenidas frente a umbrales predefinidos, lo que le permite clasificar la condición operativa del equipo en estados discretos claramente delimitados, tales como "normal", "alerta" o "crítico" (Andrés et al., 2025). De manera complementaria, en el ámbito de la ciberseguridad y el monitoreo de redes industriales, las máquinas de estados deterministas se utilizan para identificar patrones secuenciales complejos, evaluando las tramas de datos paso a paso para reconocer firmas de escáneres o anomalías en el tráfico antes de que la integridad del sistema se vea comprometida. (Borhani, Gaba, et al., 2024) Esta capacidad de procesamiento lógico en el borde de la red reduce la dependencia de servidores externos, garantizando respuestas deterministas e inmediatas.

La lógica computacional y las máquinas de estados constituyen el verdadero cerebro analítico de la arquitectura propuesta para la Central Hidroeléctrica MIRA.

Una vez que el microcontrolador ha calculado localmente el nivel de severidad vibratoria (velocidad RMS) mediante el procesamiento en el borde, el *firmware* ejecuta un motor de reglas lógicas estructurado como una máquina de estados mediante esta programación condicional, el sistema compara continuamente los valores vibracionales con las fronteras matemáticas estrictas definidas por la normativa internacional ISO. Según Andrés et al., (2025) dependiendo del nivel de oscilación, el algoritmo fuerza al sistema a transitar entre sus diferentes estados lógicos

(por ejemplo, operación segura, advertencia por posible cavitación o estado crítico de parada). Como resultado, el nodo IoT no se limita a recolectar telemetría pasiva, sino que emite juicios de valor preprocesados hacia el *dashboard* de control, proporcionando a los operadores indicadores de estado exactos para activar los protocolos de mantenimiento predictivo de manera oportuna.

2.2.16. Interfaz Humano-Máquina (HMI) e Interfaces web

La Interfaz Humano-Máquina (HMI, por sus siglas en inglés) constituye el medio fundamental a través del cual los operadores de planta interactúan de manera visual y funcional con los sistemas de control industrial. Tradicionalmente concebidas como paneles estáticos con luces y medidores físicos, estas interfaces han evolucionado hacia sofisticadas plataformas de *software* que integran representaciones gráficas dinámicas, como diagramas unifilares y sinópticos, permitiendo una supervisión simultánea y centralizada de todo el proceso productivo.(Velásquez, 2026) En las arquitecturas clásicas de automatización, la HMI se ejecuta sobre equipos informáticos dedicados que se enlazan de forma directa con los Controladores Lógicos Programables (PLC) y las bases de datos locales, traduciendo las complejas señales de campo y los registros de memoria en información visualmente comprensible que facilita al operador la toma de decisiones críticas.

Con el advenimiento de la Industria 4.0 y el Internet Industrial de las Cosas (IIoT), el paradigma de la supervisión ha trascendido las fronteras físicas de la fábrica mediante la adopción de interfaces web y *dashboards* interactivos. Estas aplicaciones modernas se desarrollan utilizando tecnologías y *frameworks* de programación de vanguardia (como React, Angular o Streamlit) que posibilitan la creación de sistemas responsivos, accesibles desde cualquier navegador estándar o dispositivo móvil sin necesidad de depender de redes privadas virtuales (VPN) o terminales especializadas.(David et al., 2023) Al integrarse fluidamente con interfaces de programación de aplicaciones y protocolos de mensajería bidireccional en tiempo real, estas plataformas web logran desplegar series temporales, gráficas estadísticas, tendencias históricas y alertas tempranas, ofreciendo una experiencia de usuario intuitiva que democratiza el acceso a la telemetría industrial de forma remota.

Una vez que la arquitectura IoT captura y procesa las señales de los acelerómetros MEMS en el borde de la red, los indicadores calculados como la velocidad RMS global

y las banderas de estado de la turbina Francis se transmiten hacia un panel de control o *dashboard* personalizado y según Gómez & Gonzales, (2025) las HMI basada en web actúa como un centro de mando estratégico que presenta a los operadores gráficas en tiempo real y métricas claras, traduciendo instantáneamente las complejas oscilaciones mecánicas de la maquinaria en alertas visuales de severidad. Gracias a esta interfaz altamente accesible, el personal de la central adquiere una visibilidad remota, ininterrumpida y fácil de usar sobre el rendimiento real de la planta, asegurando intervenciones precisas frente a fallos como la cavitación y consolidando así la aplicación práctica del mantenimiento predictivo.

2.2.17. Usabilidad y experiencia de usuario (UX)

La experiencia de usuario (UX) hace referencia a la percepción general que tiene un individuo al interactuar con una aplicación de software, enfocándose primordialmente en que dicha interacción resulte fácil de usar, agradable, legible, accesible e intuitiva. En el desarrollo de sistemas informáticos e interfaces de control industrial, el diseño no debe limitarse únicamente a cumplir con los requerimientos técnicos de funcionalidad, sino que debe proporcionar una interfaz usable y nítida que optimice la visibilidad de los datos en distintos entornos, garantizando así una experiencia de usuario verdaderamente eficiente. (Lara Muñoz et al., 2025) Al priorizar estos aspectos ergonómicos y visuales (como modos de visualización adaptativos o paletas de colores adecuadas), se reduce la fatiga visual del personal y se asegura que la información crítica pueda ser interpretada de manera instantánea y clara frente a cualquier condición operativa.

En el ámbito específico del monitoreo de maquinaria y el mantenimiento predictivo, la usabilidad se consolida como un factor operativo indispensable, ya que una aplicación diseñada para ser intuitiva y fácil de usar proporciona al operador una visión clara del rendimiento real de la planta a partir de los complejos datos que suministra el sistema. (David et al., 2023) La implementación de interfaces interactivas facilita enormemente la visualización de métricas y tendencias, permitiendo al personal de campo realizar una toma de decisiones mucho más informada. Para garantizar este nivel de desempeño, la literatura técnica sugiere valorar constantemente la usabilidad y sencillez de la aplicación interactiva, comprobando que la claridad en la presentación de los datos y la facilidad para interpretar las recomendaciones del sistema faciliten su integración fluida y natural en la rutina operativa diaria de la central.

La usabilidad y la experiencia de usuario (UX) son fundamentales para que la plataforma sea verdaderamente adoptada y efectiva en la Central Hidroeléctrica MIRA. El *dashboard* web debe estar estructurado para traducir esta profunda telemetría en alertas visuales claras, amigables y directas, utilizando semáforos de colores referenciados con las zonas de severidad de la norma ISO 20816-5. Al garantizar una alta usabilidad en esta interfaz web, logras que los operadores no requieran ser expertos en análisis avanzado de señales para comprender el estado de salud de la turbina Francis, permitiéndoles interactuar con la plataforma de forma ágil, interpretar rápidamente las oscilaciones mecánicas y ejecutar acciones de mantenimiento predictivo con total seguridad.

2.2.18. Aceptación del usuario

La aceptación del usuario es un factor determinante para el éxito en la implementación de cualquier innovación tecnológica dentro del marco de la Industria 4.0. Aunque las arquitecturas basadas en el Internet Industrial de las Cosas (IIoT) ofrecen capacidades analíticas superiores, su efectividad real está fuertemente condicionada por la disposición del personal operativo para integrar estas nuevas herramientas en sus rutinas diarias.(Velásquez, 2026) La literatura especializada advierte que la infraestructura técnica existente y, sobre todo, la capacitación de los operarios, son factores que inciden directamente en la velocidad de adopción de estas soluciones digitales en las plantas industriales. Por lo tanto, para garantizar una transición exitosa hacia la digitalización, es indispensable promover una sólida cultura tecnológica y brindar formación continua, lo cual resulta clave para maximizar el aprovechamiento de los sistemas y asegurar que los técnicos realicen interpretaciones correctas de los datos proporcionados(Martinez & Martínez, 2022).

En el ámbito específico de los sistemas de monitoreo y optimización operativa, la aceptación de la tecnología se consolida a través de la experiencia directa del usuario interactuando con la interfaz gráfica o panel de control. Para que un sistema informático sea genuinamente adoptado y aporte un verdadero valor operativo a la planta, resulta vital comprobar sistemáticamente su usabilidad, evaluando la claridad en la presentación de los datos y la facilidad para interpretar las recomendaciones generadas. Cuando los operadores interactúan con una aplicación intuitiva, perciben de manera inmediata una mejora sustancial en su capacidad de gestión, ya que la herramienta les facilita la toma de decisiones informadas frente a las condiciones del entorno. Esta experiencia positiva,

fundamentada en la confianza hacia las métricas del sistema, es lo que garantiza que la plataforma se perciba como una herramienta práctica e indispensable, motivando su uso continuo(David et al., 2023).

La aceptación del usuario por parte del equipo técnico de la Central Hidroeléctrica MIRA constituye el objetivo culminante de la implementación. Al trasladar la complejidad algorítmica de las señales vibracionales (como el procesamiento analítico extraído de los sensores MEMS) hacia el borde de la red y presentar únicamente los diagnósticos depurados a través de un panel web, tu arquitectura reduce drásticamente la dependencia de complejos hardware tradicionales y la necesidad de especialistas in situ. Gracias a este diseño enfocado en la accesibilidad, los operadores de la hidroeléctrica se benefician de un sistema que traduce oscilaciones mecánicas incomprensibles a simple vista en alertas accionables y directas, permitiéndoles ejecutar el mantenimiento predictivo de la turbina Francis de manera autónoma, maximizando la eficiencia operativa y previniendo fallas con una facilidad sin precedentes(Prügl & Hydro, 2025).

III. METODOLOGÍA

3.1. ENFOQUE METODOLÓGICO

3.1.1. Enfoque

La presente investigación utiliza un enfoque mixto, el cual permite una comprensión integral del problema al combinar las fortalezas de las dimensiones cualitativa y cuantitativa:

Enfoque Cualitativo: Se aplica en la etapa inicial de diagnóstico y definición de requerimientos, enfocándose en la interpretación de la norma técnica internacional ISO 20816-5 para traducir sus estándares de severidad en reglas lógicas de programación. Asimismo, analiza la experiencia de los expertos y operadores para identificar las limitaciones del monitoreo actual y asegurar que el sistema IoT sea útil, intuitivo y se adapte al entorno industrial.

Enfoque Cuantitativo: Fundamenta el desarrollo técnico y la validación del prototipo a través de la recolección y el procesamiento numérico de señales físicas. Este enfoque se encarga de capturar y transformar matemáticamente las vibraciones mecánicas mediante el cálculo del valor RMS y la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier (FFT), y permite medir parámetros de rendimiento como la latencia del protocolo MQTT.

3.1.2. Tipo de Investigación

Investigación descriptiva que permite caracterizar a profundidad la situación operativa de la Central Hidroeléctrica MIRA, identificando la "ceguera de datos" originada por la dependencia de inspecciones manuales periódicas. Este tipo de investigación es clave para detallar cómo se llevan a cabo actualmente los procesos de supervisión y describir el comportamiento de las vibraciones mecánicas en la turbina tipo Francis.

Investigación no experimental, Aunque se desarrolla un prototipo a escala para validar la transmisión de datos, el análisis del comportamiento real de las unidades de generación se enmarca en un diseño no experimental. Ante la imposibilidad de

intervenir físicamente las turbinas operativas por su criticidad, se utilizan datos históricos de campo es decir extraídos de la propia hidroeléctrica para probar la arquitectura sin manipular las variables de la máquina real.

Investigación-Acción Este modelo se implementa porque el estudio no se limita a describir una realidad, sino que busca transformarla. A través del diagnóstico del problema de monitoreo y la participación técnica (experiencia de los operadores), se toma acción implementando una propuesta tecnológica concreta que resuelve la falta de supervisión continua en la central hidroeléctrica.

Investigación aplicada busca la utilización práctica de los conocimientos en ciencias de la computación, electrónica e IoT para resolver un problema directo de la industria. Su finalidad es generar una propuesta tecnológica tangible que permita optimizar las estrategias de mantenimiento predictivo y salvaguardar la infraestructura energética.

Investigación de campo Se fundamenta en la observación técnica directa dentro de las instalaciones de la Central Hidroeléctrica MIRA. Esta recolección in situ permite identificar los puntos mecánicos críticos para el montaje de los sensores, evaluar las condiciones del entorno electromagnético que podrían afectar la transmisión inalámbrica y recoger información empírica de los operadores.

Investigación documental Constituye el soporte teórico y lógico indispensable del sistema. Se basa en el análisis exhaustivo y la revisión de normas técnicas internacionales (como la ISO 20816-5), manuales de fabricantes de turbinas y estudios previos sobre IIoT. Esta revisión es lo que dota de validez científica a la configuración de los umbrales de alarma, el motor de reglas lógicas y el diseño algorítmico del prototipo

3.2. IDEA A DEFENDER

El sistema IoT permitirá monitorizar las vibraciones y por ende manejar un estado en tiempo real de las turbinas de Central Hidroeléctrica Mira permitiendo una respuesta basada en datos más acertada

3.3. DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

3.3.1. Variable independiente

Se define como el Sistema IoT de Monitoreo de Condición, entendido como la arquitectura integral de hardware y software diseñada para la adquisición y

procesamiento de señales de vibración. Sus dimensiones operativas abarcan tanto la configuración simulada de componentes físicos como la lógica a través de indicadores técnicos específicos que incluyen la sensibilidad del acelerómetro MEMS, la frecuencia de muestreo (Hz), la resolución del conversor analógico-digital (bits), la correcta implementación del algoritmo de Transformada Rápida de Fourier (FFT) y la eficiencia de los protocolos de comunicación (MQTT) y almacenamiento de datos.

3.3.2. Variable dependiente

Por su parte, la variable dependiente corresponde a la Evaluación del Estado Operativo de la Hidroturbina, la cual mide la capacidad y efectividad del sistema propuesto para reflejar la realidad física de la máquina y diagnosticar su condición. Esta variable se valora mediante dos dimensiones principales: la precisión del diagnóstico, cuantificada por el margen de error respecto al valor patrón, la tasa de falsos positivos/negativos y la correcta clasificación en las Zonas de severidad ISO (A, B, C, D); y la eficiencia operativa, determinada por indicadores de desempeño como la latencia entre el evento físico y su visualización, así como el consumo energético estimado del nodo sensor.

3.3.3. Operacionalización de variables

Tabla 4. Variable Independiente

Variable	Dimensión	Indicadores	Técnica	Instrumento
Sistema IoT	Capa de Percepción	Tasa de Muestreo	Análisis de arquitectura física y pruebas de conexión industrial.	Ficha técnica de especificaciones.
	Capa de Procesamiento y Lógica	Procesamiento Edge	Pruebas de integración hardware-software y auditoría de código.	Guía de validación algorítmica y consola de depuración del servidor backend.

Tabla 5. Variable dependiente: Efectividad del Monitoreo y Diagnóstico

Variable	Dimensión	Indicadores	Técnica	Instrumento
Monitoreo de vibraciones	Exactitud del Diagnóstico Operativo	• Precisión del Diagnóstico. • Margen de error respecto al valor patrón • Tasa de falsos positivos/negativos	Contraste experimental (evaluación de lecturas frente al motor de reglas).	Matriz de validación de umbrales ISO y registros históricos persistidos en base de datos.
	Rendimiento Computacional y Oportunidad	Clasificaciones correctas en Zonas ISO (A, B, C, D). Latencia Extremo a Extremo.	Monitoreo de tráfico de red y auditoría de persistencia asíncrona de datos.	Scripts de medición de latencia e Instrumento de Registro de Tiempos.
	Validación Operativa y Aceptación	Usabilidad e Integración.	Método de Criterio de Expertos.	Cuestionario / Encuesta Estructurada.

3.4. MÉTODOS UTILIZADOS

Para el desarrollo de la presente investigación y la consecución de los objetivos planteados, se emplean métodos de nivel teórico y empírico que permiten la integración de las Ciencias de la Computación con la Ingeniería Mecánica.

3.4.1. Métodos de Nivel Teórico

- **Método Inductivo-Deductivo:** Se aplica de forma deductiva al partir de las premisas generales establecidas en la normativa internacional ISO 20816-5, la cual dicta los umbrales globales de severidad para turbinas. A partir de esta norma, se deducen los parámetros lógicos y algoritmos de clasificación que se implementarán en el software del sistema IoT. De forma inductiva, el análisis de los datos particulares recolectados por los sensores en la Central Mira permitirá generar conclusiones generales sobre la robustez de la arquitectura propuesta.
- **Método Analítico-Sintético:** Se utiliza para descomponer el sistema ciber-físico en sus componentes fundamentales: adquisición de datos (sensores), procesamiento (Edge Computing), transmisión (Protocolo MQTT) y visualización (Dashboard). Una vez analizado cada módulo, se realiza la síntesis técnica para integrar el hardware y el software en una arquitectura funcional y coherente que responda al problema de la "ceguera de datos".

3.4.2. Métodos de Nivel Empírico

- **Método Experimental (Simulación y Prototipado):** Debido a la criticidad de las hidroturbinas, la validación inicial se realiza mediante experimentación controlada. Se utiliza software de simulación para inyectar señales estocásticas y armónicas que representen fallas mecánicas reales (cavitación, desbalanceo). Esto permite medir la respuesta del sistema IoT (output) frente a estímulos físicos conocidos (input), validando la precisión del algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier.
- **Método de Criterio de Expertos:** Se aplica para validar la aceptabilidad y pertinencia del sistema en el entorno industrial. Mediante la aplicación de encuestas estructuradas a ingenieros de mantenimiento y especialistas en gestión energética, se recolecta información cuali-cuantitativa sobre la utilidad de la herramienta para la toma de decisiones predictivas.

3.4.3. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Para operacionalizar los métodos anteriores, se definen las siguientes técnicas:

- Observación Técnica de Campo: Aplicada en la Central Hidroeléctrica MIRA para identificar los puntos críticos de montaje del sistema IoT y las características del entorno electromagnético que podrían afectar la transmisión inalámbrica.
- Encuesta Estructurada (Escala de Likert): Dirigida a una población censal de expertos para evaluar tres dimensiones clave: comenzando por la dimensión uno que trata la prevención de riesgos y detección temprana, dimensión dos: Eficiencia operativa y sostenibilidad mecánica. dimensión tres: Integración tecnológica IoT y cumplimiento normativo.
- Ficha de Validación de Algoritmos: Instrumento técnico utilizado para registrar el error relativo entre la medición del prototipo IoT y un equipo de referencia, asegurando que el sistema cumpla con las tolerancias de la norma ISO.
- Sujetos: Expertos en mantenimiento electromecánico y gestión de activos energéticos
- Experiencia directa: Personal técnico y de ingeniería que labora en la Central Hidromira o centrales similares de la región.
- Conocimiento normativo: Profesionales con dominio de la norma ISO 20816 o estándares de vibración.
- Perfil académico: Docentes o investigadores del área de Potencia, Electromecánica o Computación aplicada de la UPEC.
- Para el desarrollo de los objetivos planteados, se emplearán los siguientes métodos científicos y lógicos:
- Jefe de Mantenimiento de Hidromira: Para validar la necesidad real y la viabilidad operativa.
- Operadores de Planta: Para evaluar la usabilidad de las alertas IoT en tiempo real.
- Ingenieros en Computación/Sistemas: Para validar la arquitectura de red, el protocolo MQTT y la seguridad de los datos.

Método Inductivo – Deductivo que parte de las premisas generales establecidas en la norma internacional ISO 20816-5 (que dicta cómo deben comportarse todas las turbinas) para deducir los parámetros específicos de configuración (umbrales de alarma y disparo) que se aplicarán en el prototipo digital para una turbina tipo.

Inductivo: A partir del análisis de los datos particulares generados en las simulaciones (casos de prueba específicos), se inducirán conclusiones generales sobre la viabilidad, robustez y confiabilidad de la arquitectura IoT propuesta para su eventual implementación en el sector hidroeléctrico.

Método Analítico - Sintético:

- Analítico: Se utiliza para descomponer el macro-problema del monitoreo en unidades manejables. Se analiza por separado la adquisición de datos (sensor), el procesamiento (microcontrolador), la transmisión (red) y la visualización (nube), estudiando las características y limitaciones de cada módulo.
- Sintético: Una vez comprendidos y diseñados los componentes individuales, se procede a la síntesis técnica, integrándolos en una arquitectura unificada y funcional. Este método permite asegurar que la interacción entre el hardware y el software sea coherente y cumpla con el objetivo general del sistema.

Método Experimental (Simulación Computacional):

Dado que no es viable intervenir físicamente una central hidroeléctrica en operación para pruebas académicas, se recurre a la experimentación virtual. Este método consiste en la creación de escenarios controlados mediante software de simulación, donde se inyectan señales de vibración conocidas (inputs) para observar la respuesta del sistema IoT (outputs). Esto permite manipular variables independientes (frecuencia, amplitud, ruido) y observar su efecto en la variable dependiente, validando la lógica del sistema en condiciones extremas y nominales.



Figura 4. Arquitectura general de un sistema de monitoreo industrial

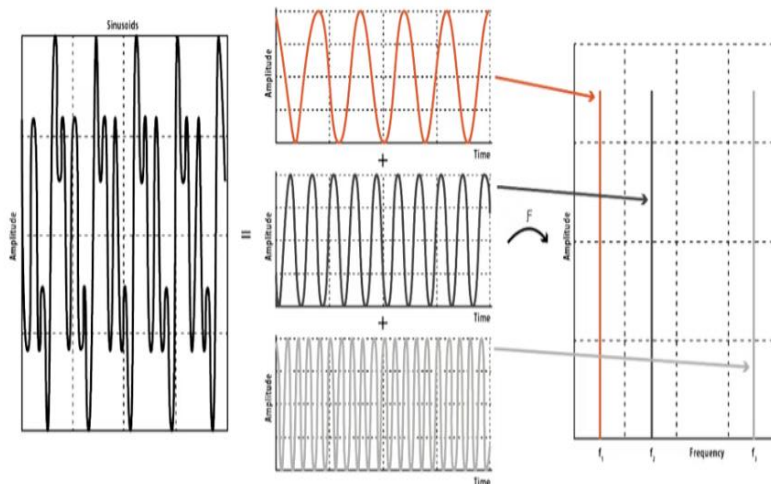


Figura 5. Aplicación Transformada de Fourier

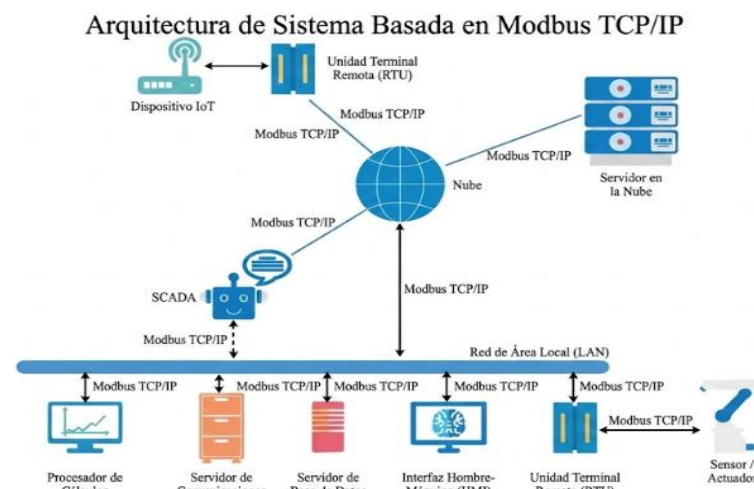


Figura 6. Arquitectura General Sistema Basado en Modbus

3.4.3. Modelado Funcional del Sistema

El modelado funcional define el flujo secuencial y la lógica de procesamiento que siguen los datos a través de la arquitectura distribuida del sistema ciber-físico. Para solucionar las deficiencias de monitoreo discontinuo en la Central Hidromira, el comportamiento computacional del prototipo se ha estructurado en cuatro fases funcionales concurrentes: adquisición inteligente, enrutamiento telemétrico, evaluación normativa y ejecución de eventos.

- Fase 1: El ciclo funcional inicia en el entorno físico de la máquina rotativa. El transductor industrial (Smart Sensor WTVB01-485) ejecuta un muestreo constante de la aceleración vibratoria a una tasa configurada de 100 Hz, cumpliendo con el Teorema de Nyquist-Shannon para capturar con alta fidelidad la frecuencia fundamental (20 Hz) de la turbina Francis operando a 1200 RPM. En esta fase, se aplica el paradigma de Edge Computing directamente en el silicio del sensor: un filtro digital interno aísla el ruido electromagnético y procesa matemáticamente la señal analógica, entregando como salida directa los valores eficaces de velocidad RMS (en mm/s) y desplazamiento (en μm). Este procesamiento in situ evita la propagación de datos crudos redundantes.
- Fase 2: Una vez extraída la "firma digital" de la hidroturbina en el transductor, el microcontrolador local asume el rol de Pasarela IoT (Gateway). Este dispositivo ejecuta ciclos de interrogación periódicos empleando el protocolo estándar de automatización Modbus RTU a través de una interfaz física RS-485. Al recibir la trama de datos preprocesada, el Gateway ejecuta una rutina de serialización que empaqueta las métricas de vibración, el identificador del equipo y las marcas de tiempo dentro de una estructura de carga útil en formato JSON. Posteriormente, el paquete de datos se publica de forma asíncrona hacia el broker en la nube utilizando el protocolo ligero MQTT sobre conectividad Wi-Fi garantizando un flujo eficiente sin saturar el ancho de banda industrial y evitar consumo excesivo de recursos, pero manteniendo un rango que sea de utilidad y oportuno cumpliendo con su objetivo.

Tabla 6. Esquema de direccionamiento lógico

Componente de la Red	Dirección IP / Puerto	Tipo Registro Modbus de	Dirección de Memoria	Tipo Dato de	Variable Asignada	Industrial
PLC GE Fanuc 90-30 (Esclavo / Servidor)	192.168.1.10 Puerto: 502	Holding Register (Registro de Retención)	40001	Float32 (Punto Flotante de 32 bits)	Magnitud global de vibración mecánica en tiempo real (mm/s RMS).	
Servidor Local IoT (Maestro / Cliente)	192.168.1.50 Puerto: 8000	Consulta	N/A (Petición activa cada 1000 ms)	N/A	Captura de datos, almacenamiento histórico (PostgreSQL) y ejecución algorítmica (IQR / ISO).	

- Fase 3: Motor de Reglas ISO es el núcleo lógico del sistema funcional radica en el motor de reglas automatizado, programado como una máquina de estados discretos. Cuando los valores de velocidad RMS se procesan, el algoritmo los somete a una estructura de control determinista (If-Then-Else) que contrasta el valor numérico continuo contra los umbrales paramétricos de la norma internacional ISO 20816-5 para máquinas del Grupo 1 con soporte rígido. Dependiendo del nivel de oscilación, el motor de reglas clasifica de forma autónoma el estado de salud de la turbina en una de las cuatro zonas de severidad normativa:
 - Zona A: Operación Nominal.
 - Zona B: Operación Aceptable (Alerta Preventiva).
 - Zona C: Operación Restringsida (Alarma Crítica).
 - Zona D: Peligro Inminente (Disparo).
- Fase 4: En la última fase la arquitectura dirigida por eventos y visualización, la capa de aplicación recibe los datos procesados y el diagnóstico discreto generado por el motor de reglas. El sistema opera bajo una arquitectura dirigida por eventos que reacciona instantáneamente a los cambios de estado. Si el algoritmo detecta un estado correspondiente a las Zonas B o C, se activan rutinas asíncronas en el backend que despliegan alertas visuales en el Dashboard interactivo del operador, posibilitando la planificación del Mantenimiento Basado en la Condición (CBM). Si el sistema determina un umbral correspondiente a la Zona D (peligro inminente de destrucción), el software levanta una bandera de máxima criticidad diseñada para ejecutar de forma autónoma el protocolo de parada de emergencia, salvaguardando la integridad electromecánica

de la hidroeléctrica que se ve representada en figura de la lógica algorítmica.

```
Python

# Lógica algorítmica de clasificación implementada en el sistema
if v_rms < 2.3:
    estado = "Zona A: Operación Óptima (Componentes estables)"
elif 2.3 <= v_rms <= 4.5:
    estado = "Zona B: Operación Aceptable (Mantenimiento seguro a largo plazo)"
elif 4.5 < v_rms <= 7.1:
    estado = "Zona C: Operación Restringida (Alerta preventiva por anomalía)"
else:
    estado = "Zona D: Peligro Inminente (Riesgo estructural - Detener activo)"
```

Figura 7. Lógica algorítmica del sistema

3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

3.5.1. Análisis estadístico

El análisis estadístico de la presente investigación se desarrollará mediante un enfoque descriptivo e inferencial, orientado a evaluar tanto el desempeño técnico del sistema IoT de monitorización de vibraciones como la percepción y aceptación de los expertos en mantenimiento predictivo y monitoreo industrial. Este proceso permitirá interpretar de manera objetiva los datos obtenidos durante la validación experimental y la aplicación de instrumentos de investigación.

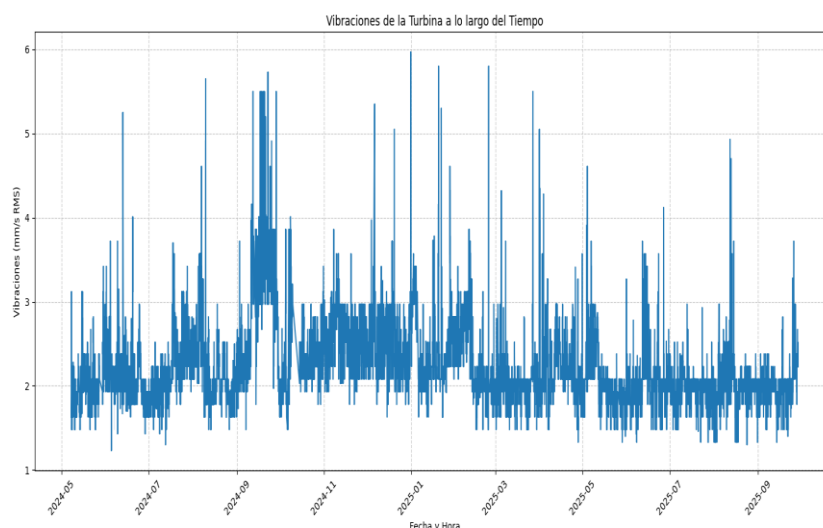


Figura 8. Tendencia histórica global de vibraciones (RMS)

La figura 8 presenta la tendencia histórica temporal de las magnitudes de vibración global (RMS) de la hidroturbina registradas por el sistema durante el periodo de

evaluación. A nivel de validación técnica, esta visualización demuestra de forma empírica la estabilidad y la capacidad de la arquitectura IoT implementada para capturar señales continuas en campo, transmitir las sin pérdida de integridad a través del protocolo industrial Modbus TCP/IP desde el controlador GE Fanuc 90-30, y persistir los registros en la base de datos centralizada.

En la fase descriptiva, se emplearán medidas de tendencia central, tales como la media y la moda, con el propósito de identificar patrones de comportamiento, niveles de aceptación tecnológica y percepción de utilidad del sistema propuesto. Asimismo, se utilizarán representaciones gráficas y diagramas estadísticos para facilitar la interpretación de los resultados relacionados con las señales de vibración RMS y las respuestas obtenidas en la escala de Likert.

Por otra parte, el análisis inferencial permitirá determinar relaciones significativas entre variables técnicas y criterios de evaluación de los especialistas. Para ello, se aplicará el coeficiente de correlación de Pearson, con el objetivo de analizar la relación entre la experiencia profesional de los expertos y la valoración de la tecnología IoT implementada en el sistema de monitoreo.

En relación con la validación técnica del sistema IoT, se realizará un análisis comparativo entre los valores obtenidos por el algoritmo desarrollado y los valores de referencia proporcionados por instrumentos calibrados o simuladores de señales estándar. Para ello, se aplicará el cálculo del error relativo porcentual, permitiendo verificar el nivel de precisión del sistema respecto a los parámetros establecidos en la norma ISO 20816-5. Además, se utilizarán histogramas para identificar la estabilidad de las señales RMS y detectar posibles valores atípicos durante el proceso de monitorización en tiempo real.

Finalmente, se evaluará el rendimiento computacional del sistema mediante indicadores relacionados con la estabilidad de transmisión, tiempo de respuesta, procesamiento de datos y eficiencia de comunicación entre dispositivos IoT y el servidor de monitoreo, garantizando así la viabilidad tecnológica de la solución propuesta.

Tabla 7. Matriz de Indicadores - Rendimiento Computacional

Dimensión de Evaluación	de	Indicador Técnico	Definición Operacional / Fórmula	Herramienta Método Medición	/ de	Meta de Rendimiento (Referencia)
Estabilidad Transmisión	de	Tasa de Pérdida de Paquetes	$\frac{\text{Pérdida Paquetes recibidos}}{\text{Paquetes enviados}} * 100$	Monitoreo de red en el backend / Logs de la base de datos.		< 1.0% (Transmisión altamente estable)
Tiempo Respuesta	de	Latencia Extremo a Extremo	Tiempo transcurrido desde la lectura del dato en el PLC hasta su visualización en la interfaz web o app.	Script de telemetría / Uso de marcas de tiempo.		< 2.0 segundos (Tiempo real supervisor)
Procesamiento de Datos		Tiempo de Ejecución Algorítmica	Tiempo empleado por el backend para aplicar las reglas de la norma ISO 20816-5	Perfilado de código en el servidor (módulo tiempo).		< 100 milisegundos por lote de datos
Eficiencia de Comunicación	de	Rendimiento del Protocolo Modbus TCP/IP	Cantidad de peticiones de lectura exitosas frente al total de consultas programadas por la arquitectura IoT.	Análisis de tráfico de red (como Wireshark) / Logs de reconexión del driver Modbus.		> 99.5% de lecturas exitosas sin reintentos críticos

3.5.2. Población y censo

La población de estudio estará conformada por especialistas y técnicos vinculados al área de mantenimiento industrial, monitoreo de vibraciones y sistemas de mantenimiento predictivo en centrales hidroeléctricas del Ecuador. Este grupo incluirá a ingenieros y profesionales con experiencia en la supervisión de maquinaria rotativa, análisis de señales de vibración y aplicación de tecnologías IoT en entornos industriales, los cuales constituyen la base de conocimiento necesaria para la validación del sistema propuesto.

Debido al número limitado de expertos disponibles y al acceso restringido a profesionales especializados en el área de estudio, se optará por un estudio censal en lugar de un muestreo estadístico. En este sentido, se considerará la totalidad de los especialistas accesibles que cumplan con los criterios de inclusión establecidos para la investigación.

El censo permitirá obtener información fidedigna sin la necesidad de realizar una estimación muestral, reduciendo el error de inferencia y garantizando la recolección de datos directamente de los actores clave en el ámbito del mantenimiento predictivo y la monitorización de sistemas industriales. De esta manera, se asegurará que la información recopilada refleje de manera precisa la percepción y experiencia de los expertos respecto al sistema IoT propuesto para la detección y análisis de vibraciones en maquinaria industrial.

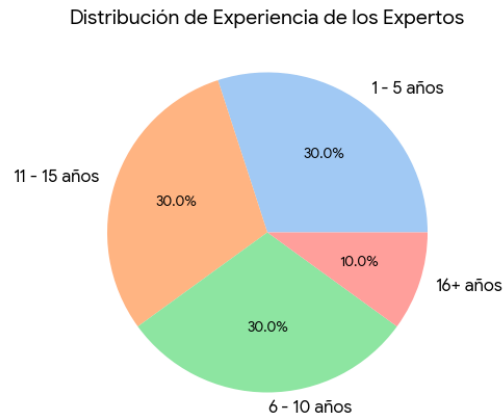


Figura 9. Distribución de experiencia de expertos

En la figura 9 se presenta la distribución porcentual de los años de trayectoria profesional de los expertos consultados. Se observa una distribución equitativa y balanceada, donde la gran mayoría de la población se divide en partes iguales del 30.0% para los rangos de 1 a 5 años, 6 a 10 años y 11 a 15 años de experiencia, respectivamente. El 10.0% restante corresponde a profesionales con una trayectoria de 16 o más años en el área, garantizando que el estudio cuente con un respaldo técnico diverso y con un nivel de experiencia idóneo para la validación del sistema.

3.5.3. Instrumentos de investigación

Para el desarrollo de la presente investigación se emplearán distintos instrumentos de recolección y análisis de datos, diseñados con el propósito de obtener información tanto a nivel de criterio técnico (experiencia y criterio de expertos) como a nivel técnico (validación del sistema IoT de monitorización de vibraciones). Estos instrumentos permitirán evaluar de manera integral el desempeño del sistema propuesto, así como su aceptación en el contexto de mantenimiento predictivo industrial.

En este sentido, los instrumentos de investigación se estructuran en dos grandes enfoques: el primero orientado a la evaluación cualitativa y cuantitativa mediante encuestas estructuradas aplicadas a expertos; y el segundo enfocado en la validación técnica del sistema mediante análisis de señales, procesamiento de datos y métricas de desempeño computacional.

Se utilizará una encuesta estructurada como instrumento principal para la recolección de datos relacionados con la percepción, aceptación y evaluación del sistema IoT propuesto. Este instrumento estará dirigido a especialistas en

mantenimiento industrial, monitoreo de vibraciones y sistemas de instrumentación industrial, con el objetivo de obtener criterios técnicos fundamentados sobre la viabilidad del sistema desarrollado.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
10224	Sun Sep 28 2025 00:00:00 GMT-0500 (hora de Ecuador)	29/09/2025 01:09	JACSON	GENERANDO NINGUNA	TOMA DE DA NUBLADO	CLARA	#####	89	2.91	1000	-4	54		
10225	Sun Sep 28 2025 00:00:00 GMT-0500 (hora de Ecuador)	29/09/2025 02:04	JACSON	GENERANDO NINGUNA	TOMA DE DA NUBLADO	CLARA	#####	89	2.88	1000	3	53		
10226	Sun Sep 28 2025 00:00:00 GMT-0500 (hora de Ecuador)	29/09/2025 03:09	JACSON	GENERANDO NINGUNA	TOMA DE DA NUBLADO	CLARA	#####	89	2.84	1000	-38	52		
10227	Sun Sep 28 2025 00:00:00 GMT-0500 (hora de Ecuador)	29/09/2025 04:06	JACSON	GENERANDO NINGUNA	TOMA DE DA NUBLADO	CLARA	#####	90	2.85	1000	-39	52		
10228	Sun Sep 28 2025 00:00:00 GMT-0500 (hora de Ecuador)	29/09/2025 04:48	JACSON	GENERANDO NINGUNA	TOMA DE DA NUBLADO	CLARA	#####	89	2.85	1000	-39	53		
10229	Sun Sep 28 2025 00:00:00 GMT-0500 (hora de Ecuador)	29/09/2025 06:01	TITO	GENERANDO NINGUNA	TOMA DE DA NUBLADO	CLARA	#####	90	2.94	1000	-210	53		
10230	Sun Sep 28 2025 00:00:00 GMT-0500 (hora de Ecuador)	29/09/2025 08:01	JOEL	GENERANDO NINGUNA	TOMA DE DA NUBLADO	CLARA	#####	89	2.9	1000	-155	52		
10231	Sun Sep 28 2025 00:00:00 GMT-0500 (hora de Ecuador)	29/09/2025 08:00	JOEL	GENERANDO NINGUNA	TOMA DE DA NUBLADO	CLARA	#####	90	2.91	1000		52		
10232	Sun Sep 28 2025 00:00:00 GMT-0500 (hora de Ecuador)	29/09/2025 10:05	JOEL	GENERANDO NINGUNA	TOMA DE DA NUBLADO	CLARA	#####	90	2.97	1000	-33	5		
10233	Sun Sep 28 2025 00:00:00 GMT-0500 (hora de Ecuador)	29/09/2025 11:00	JOEL	GENERANDO NINGUNA	TOMA DE DA NUBLADO	CLARA	#####	90	2.93	1000	95	52		
10234	Sun Sep 28 2025 00:00:00 GMT-0500 (hora de Ecuador)	29/09/2025 12:05	JOEL	GENERANDO NINGUNA	TOMA DE DA NUBLADO	CLARA	#####	89	2.96	1000	39	52		
10235	Sun Sep 28 2025 00:00:00 GMT-0500 (hora de Ecuador)	29/09/2025 13:05	JOEL	GENERANDO NINGUNA	TOMA DE DA NUBLADO	CLARA	#####	89	2.96	1000	39	53		
10236	Sun Sep 28 2025 00:00:00 GMT-0500 (hora de Ecuador)	29/09/2025 14:05	PATRICIO	GENERANDO NINGUNA	TOMA DE DA SOLEADO	CLARA	#####	89	2.95	1000	38.7	52		
10237	Sun Sep 28 2025 00:00:00 GMT-0500 (hora de Ecuador)	29/09/2025 15:30	PATRICIO	GENERANDO NINGUNA	TOMA DE DA SOLEADO	CLARA	#####	89	2.95	1000	-85.1	52		
10238	Sun Sep 28 2025 00:00:00 GMT-0500 (hora de Ecuador)	29/09/2025 16:06	PATRICIO	GENERANDO NINGUNA	TOMA DE DA NUBLADO	CLARA	#####	89	2.96	1000	-69.8	53		
10239	Sun Sep 28 2025 00:00:00 GMT-0500 (hora de Ecuador)	29/09/2025 17:09	PATRICIO	GENERANDO NINGUNA	TOMA DE DA NUBLADO	CLARA	#####	90	2.91	1000	-44.2	52		
10240	Sun Sep 28 2025 00:00:00 GMT-0500 (hora de Ecuador)	29/09/2025 18:05	JOEL	GENERANDO NINGUNA	TOMA DE DA NUBLADO	CLARA	#####	90	2.95	1000		94	52	
10241	Sun Sep 28 2025 00:00:00 GMT-0500 (hora de Ecuador)	29/09/2025 20:01	PATRICIO	GENERANDO NINGUNA	TOMA DE DA NUBLADO	CLARA	#####	89	2.97	1000	208	53		
10242	Sun Sep 28 2025 00:00:00 GMT-0500 (hora de Ecuador)	29/09/2025 20:59	PATRICIO	GENERANDO NINGUNA	TOMA DE DA NUBLADO	CLARA	#####	88	2.96	1000	110.6	53		
10243	Sun Sep 28 2025 00:00:00 GMT-0500 (hora de Ecuador)	29/09/2025 22:01	JACSON	GENERANDO NINGUNA	TOMA DE DA NUBLADO	CLARA	#####	88	2.97	1000	89	51		
10244	Sun Sep 28 2025 00:00:00 GMT-0500 (hora de Ecuador)	29/09/2025 23:02	JACSON	GENERANDO NINGUNA	TOMA DE DA NUBLADO	CLARA	#####	89	2.97	1000	89	53		
10245	Mon Sep 29 2025 00:00:00 GMT-0500 (hora de Ecuador)	29/09/2025 00:02	JACSON	GENERANDO NINGUNA	TOMA DE DA NUBLADO	CLARA	#####	88	2.97	1000	12	52		
10246	Mon Sep 29 2025 00:00:00 GMT-0500 (hora de Ecuador)	29/09/2025 01:06	JACSON	GENERANDO NINGUNA	TOMA DE DA NUBLADO	CLARA	#####	89	2.99	1000	19	53		
10247	Mon Sep 29 2025 00:00:00 GMT-0500 (hora de Ecuador)	29/09/2025 01:36	JOEL	GENERANDO NINGUNA	TOMA DE DA NUBLADO	CLARA	#####							

Figura 10. Excel de registro hidroeléctrica MIRA

La encuesta estará conformada por ítems diseñados bajo una escala de tipo Likert, permitiendo medir el nivel de acuerdo o desacuerdo de los expertos frente a diferentes afirmaciones relacionadas con la criticidad de fallas mecánicas, la eficiencia del mantenimiento predictivo y la integración de tecnologías IoT en entornos industriales.

El instrumento se estructurará en tres bloques principales, alineados directamente con los objetivos específicos de la investigación:

- Bloque 1: Evaluación de criticidad y factibilidad de detección temprana, orientado a analizar las brechas tecnológicas existentes en la detección de fallas mecánicas mediante monitoreo de vibraciones.
- Bloque 2: Optimización de la eficiencia operativa y sostenibilidad mecánica, enfocado en la identificación de parámetros técnicos asociados al mantenimiento predictivo y la mejora del rendimiento operativo.
- Bloque 3: Integración tecnológica IoT y validación bajo la norma ISO 20816-5, orientado a evaluar los requerimientos de hardware, software y estándares de confiabilidad en sistemas de monitoreo de maquinaria industrial.

Adicionalmente, para garantizar la validez del instrumento, se aplicará un proceso de validación por juicio de expertos, asegurando que los ítems formulados sean pertinentes, claros y coherentes con los objetivos de la investigación.

Con el fin de determinar la consistencia interna de la encuesta aplicada, se utilizará el coeficiente Alfa de Cronbach, el cual permitirá medir el grado de fiabilidad de los ítems que componen el instrumento. Este análisis estadístico permitirá verificar si los elementos de la encuesta están correlacionados entre sí y si evalúan de manera coherente las dimensiones planteadas en la investigación.

La aplicación de este coeficiente permitirá garantizar que los resultados obtenidos a partir de la encuesta sean estadísticamente confiables y puedan ser utilizados para el análisis inferencial posterior.

Para la validación del sistema de monitorización de vibraciones basado en IoT, se emplearán instrumentos de análisis cuantitativo orientados al procesamiento de señales y la evaluación del desempeño del algoritmo desarrollado.

Como parte de este proceso, se aplicará el error relativo porcentual, el cual permitirá cuantificar la desviación entre los valores obtenidos por el sistema y los valores reales de referencia, permitiendo verificar el cumplimiento de los márgenes de tolerancia establecidos por la norma ISO 20816-5 en el análisis de vibraciones industriales.

Adicionalmente, se utilizarán herramientas estadísticas descriptivas para analizar la información obtenida de los expertos, tales como medidas de tendencia central (media, mediana y moda), las cuales permitirán interpretar el nivel de aceptación del sistema IoT en función de cada uno de los bloques de la encuesta.

Para asegurar la validez técnica y operativa de la investigación en la Central MIRA, el levantamiento de información se dividió en dos frentes principales. El primero corresponde a la captura automatizada de las variables físicas de la hidroturbina, mientras que el segundo se enfoca en la validación del sistema por parte de los especialistas de planta.

Tabla 8. Matriz de técnicas de recolección de datos y fuentes de información.

Tipo de Información	Técnica Aplicada	Instrumento / Fuente Primaria	Propósito Técnico en la Investigación
Registros Físicos de Vibración	Telemetría Automatizada Industrial	Lectura de memoria del PLC GE Fanuc 90-30 mediante el protocolo Modbus TCP/IP.	Construcción ininterrumpida de las series temporales y evaluación matemática bajo los umbrales de la norma ISO 20816-5.
Validación Operativa y de Ingeniería	Encuesta Estructurada de Campo	Cuestionario técnico aplicado al personal de ingeniería, operadores y técnicos de mantenimiento de la central.	Evaluación estricta de la confiabilidad del diagnóstico supervisor y su impacto directo en los planes de mantenimiento preventivo.

Como se estructura en la Tabla 8, la recolección de datos no depende de una sola vía. Para la variable independiente (las vibraciones), se emplea una técnica de telemetría pura, extrayendo la información primaria directamente desde el controlador industrial, eliminando el error humano en la captura. Por otro lado, la validación del sistema se sustenta en una recolección de campo mediante encuestas estructuradas; es imperativo destacar que este instrumento no evalúa criterios de diseño visual o satisfacción de interfaz, sino que se enfoca rigurosamente en la validación técnica, operativa y la precisión del motor de reglas para la toma de decisiones de mantenimiento en la planta.

Finalmente, se incorporarán instrumentos de evaluación del rendimiento del sistema computacional, los cuales permitirán medir la eficiencia del procesamiento de datos en tiempo real. Entre los principales indicadores se considerarán el tiempo de respuesta del sistema, la latencia en la transmisión de datos mediante protocolos IoT, la estabilidad de comunicación entre dispositivos y servidor, así como la capacidad de procesamiento continuo de señales de vibración.

Estos indicadores permitirán determinar la viabilidad técnica del sistema en entornos industriales reales, asegurando que el modelo propuesto no solo sea preciso desde el punto de vista estadístico, sino también eficiente desde el punto de vista computacional y de comunicación en red.

La validación técnica del sistema IoT de monitorización de vibraciones se realizará con el objetivo de comprobar su precisión, estabilidad y confiabilidad en la adquisición, procesamiento y transmisión de datos en tiempo real. Este proceso permitirá determinar el grado de cumplimiento del sistema desarrollado frente a los requerimientos establecidos en el ámbito del mantenimiento predictivo industrial y las

normativas técnicas aplicables, especialmente la norma ISO 20816-5, relacionada con la evaluación de vibraciones en maquinaria rotativa.

La validación se centrará en la comparación directa entre los valores de vibración obtenidos mediante el sistema IoT propuesto y los valores de referencia obtenidos a partir de instrumentos calibrados o equipos de medición estándar. De esta manera, se podrá evaluar el desempeño del algoritmo desarrollado en condiciones controladas, garantizando la coherencia entre los datos procesados digitalmente y las mediciones físicas reales.

El primer componente de la validación técnica consistirá en la comparación de las señales de vibración expresadas en términos de valor RMS (Root Mean Square). En este proceso se analizarán los valores generados por el sistema IoT frente a los valores de referencia, con el fin de determinar la precisión del sistema en la captura y procesamiento de señales mecánicas.

Esta comparación permitirá identificar posibles desviaciones en la medición, así como evaluar la capacidad del sistema para representar de manera fiel el comportamiento vibracional de la maquinaria monitoreada. Asimismo, se analizará la consistencia de las mediciones en distintos intervalos de tiempo, lo que permitirá determinar la estabilidad del sistema en operación continua.

Para cuantificar la precisión del sistema, se aplicará el cálculo del error relativo porcentual, el cual permitirá medir la diferencia entre los valores obtenidos por el sistema IoT y los valores de referencia. Este indicador es fundamental para evaluar el grado de exactitud del sistema desarrollado.

El análisis del error permitirá determinar si el sistema se encuentra dentro de los márgenes aceptables establecidos por la norma ISO 20816-5, la cual define criterios de evaluación para vibraciones mecánicas en maquinaria industrial. Un error bajo indicará un alto nivel de confiabilidad del sistema, mientras que desviaciones elevadas evidenciarán la necesidad de ajustes en el algoritmo de procesamiento o en la etapa de adquisición de datos.

Además de la precisión, se evaluará la estabilidad de las señales obtenidas mediante el sistema IoT. Para ello, se utilizarán diagramas de cajas (Boxplots), los cuales permitirán visualizar la dispersión de los datos de vibración y detectar la presencia de valores atípicos (outliers).

Este análisis es fundamental en sistemas de monitoreo en tiempo real, ya que permite identificar comportamientos anómalos en la señal que podrían deberse a interferencias, ruido eléctrico, errores de transmisión o fallos en los sensores. La detección temprana de estos valores atípicos contribuye a mejorar la confiabilidad del sistema y reducir la ocurrencia de falsas alarmas en el proceso de mantenimiento predictivo.

La validación técnica también considerará pruebas bajo condiciones controladas, en las cuales se simularán diferentes escenarios de vibración en maquinaria industrial. Estas pruebas permitirán evaluar el comportamiento del sistema ante variaciones en la amplitud y frecuencia de las señales, verificando su capacidad de respuesta en situaciones de operación normal y condiciones de falla.

De esta manera, se podrá determinar la robustez del sistema IoT frente a cambios dinámicos en el entorno industrial, asegurando su aplicabilidad en escenarios reales de monitoreo continuo.

Finalmente, se evaluará la confiabilidad del sistema en términos de adquisición y transmisión de datos. Este análisis incluirá la verificación de la integridad de la información transmitida mediante protocolos IoT, la estabilidad de la conexión entre sensores y servidor, así como la ausencia de pérdida significativa de paquetes de datos durante el proceso de monitoreo.

Este componente es fundamental, ya que garantiza que la información procesada por el sistema represente de manera fiel el estado real de la maquinaria, permitiendo la toma de decisiones oportunas en procesos de mantenimiento predictivo basados en datos.

3.5.4. Evaluación de rendimiento computacional

La evaluación del rendimiento computacional del sistema IoT de monitorización de vibraciones se realizará con el propósito de determinar la eficiencia operativa del sistema en términos de procesamiento de datos, transmisión de información y respuesta en tiempo real. Este análisis es fundamental en el contexto de sistemas de mantenimiento predictivo, ya que garantiza que la solución propuesta no solo sea precisa en la medición de vibraciones, sino también eficiente y estable en su funcionamiento dentro de entornos industriales.

El rendimiento computacional se evaluará considerando los procesos de adquisición, transmisión, almacenamiento y procesamiento de datos generados por los sensores IoT, así como el desempeño del algoritmo de cálculo de vibraciones implementado en el sistema.

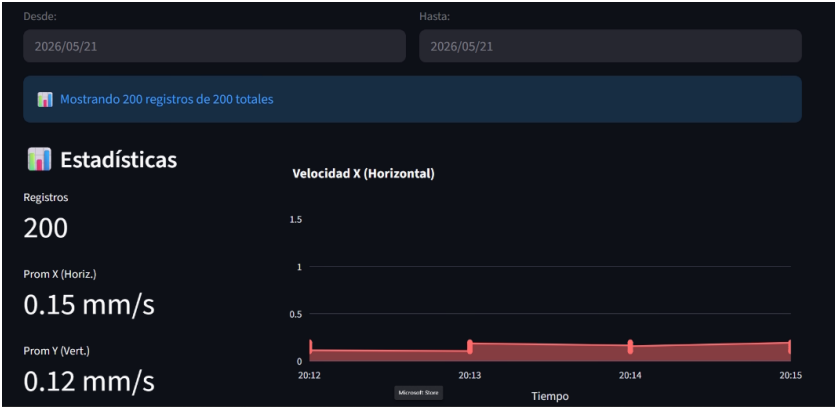


Figura 11. Dashboard 2 Sistema IoT -Evaluación tiempo variable

La figura 11 ilustra la interfaz de usuario desarrollada para el seguimiento temporal dinámico de las variables mecánicas. Este componente del sistema permite al operador parametrizar y filtrar ventanas de tiempo específicas para el análisis de datos, garantizando una navegación fluida e intuitiva por el historial de telemetría almacenado.



Figura 12. Dashboard 2 – Rendimiento

En la figura 12 se despliega el módulo enfocado en la auditoría computacional de la plataforma. La interfaz expone de manera gráfica los indicadores clave de rendimiento, tales como la tasa de transferencia de datos y los tiempos de ejecución de las consultas, permitiendo validar la optimización y estabilidad del backend.



Figura 13. Dashboard 2 – Especificaciones Hidroeléctrica

La figura 13 muestra la sección del entorno web dedicada a la contextualización de los activos de la planta. En este espacio se centralizan las fichas técnicas y especificaciones operativas de la maquinaria monitorizada, vinculando la identidad física de cada unidad con su respectivo flujo de datos IoT.

Uno de los principales indicadores a evaluar será el tiempo de respuesta del sistema, el cual representa el intervalo entre la adquisición de una señal de vibración y su procesamiento en la plataforma de monitoreo. Este indicador permitirá determinar la capacidad del sistema para operar en tiempo real o cuasi tiempo real, aspecto crítico en aplicaciones de mantenimiento predictivo.

Un tiempo de respuesta bajo indicará una alta eficiencia computacional, mientras que valores elevados podrían evidenciar cuellos de botella en el procesamiento o en la comunicación entre dispositivos IoT y el servidor central.

Se analizará la latencia generada en la transmisión de datos mediante el protocolo de comunicación IoT utilizado en el sistema, lo cual permitirá evaluar la velocidad con la que la información viaja desde el sensor hasta la plataforma de análisis.

Este parámetro es clave para garantizar la continuidad del monitoreo en tiempo real, especialmente en aplicaciones donde la detección temprana de fallas mecánicas depende de la inmediatez en la recepción de datos. La latencia será considerada como un indicador directo de la eficiencia de la arquitectura de comunicación implementada.

La estabilidad del procesamiento de datos se evaluará mediante el análisis del comportamiento del sistema ante cargas continuas de información. Se observará la

capacidad del sistema para mantener un rendimiento constante sin degradación significativa en la velocidad de procesamiento o en la precisión de los cálculos realizados.

Este análisis permitirá identificar posibles fallos relacionados con la saturación del sistema, consumo de recursos computacionales o limitaciones en la arquitectura de software implementada.

Otro aspecto importante será el análisis del consumo de recursos computacionales, incluyendo el uso de memoria, procesamiento de CPU y capacidad de almacenamiento durante la ejecución del sistema.

Este indicador permitirá determinar la escalabilidad del sistema IoT, es decir, su capacidad para operar con múltiples sensores o mayores volúmenes de datos sin comprometer su rendimiento. Un bajo consumo de recursos garantizará mayor eficiencia y viabilidad de implementación en entornos industriales reales.

Finalmente, se evaluará la disponibilidad del sistema, entendida como el porcentaje de tiempo en el que el sistema permanece operativo y accesible para el monitoreo continuo. Asimismo, se analizará la confiabilidad del sistema en términos de estabilidad de conexión, integridad de los datos transmitidos y ausencia de interrupciones durante su funcionamiento.

Estos indicadores permitirán determinar la robustez del sistema IoT en escenarios de operación prolongada, asegurando su aplicabilidad en entornos industriales donde la continuidad del monitoreo es un factor crítico para la toma de decisiones en mantenimiento predictivo.

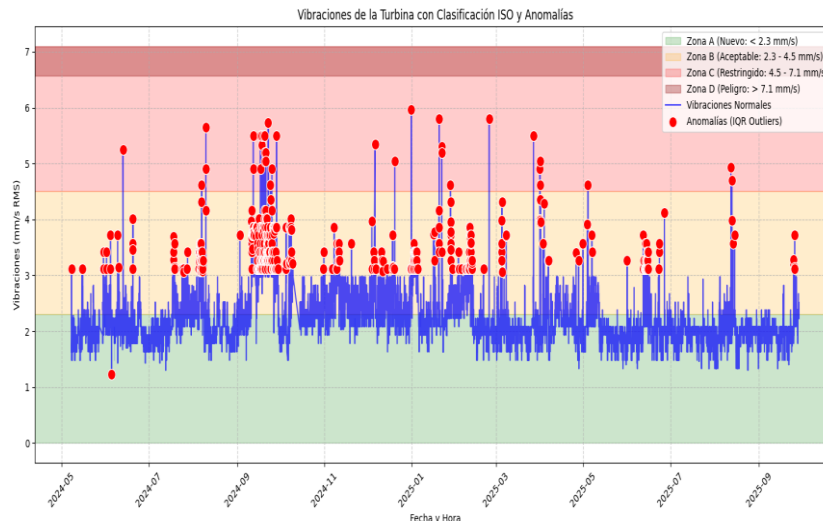


Figura 14. Tendencia histórica de vibraciones (RMS) con estratificación por zonas de severidad ISO 20816-5 e identificación algorítmica de anomalías.

En la figura 14 se detalla la validación operativa del motor analítico del sistema mediante la integración de los umbrales normativos de la escala ISO 20816-5 y el marcado matemático de datos atípicos. Como se observa en la distribución, el software clasifica automáticamente el estado de la hidroturbina, evidenciando que la mayor parte del tiempo el activo opera de forma segura dentro de la Zona A y Zona B. Asimismo, el algoritmo basado en el Rango Intercuartílico (IQR) identifica con precisión los picos de vibración (puntos rojos), aislando las anomalías estadísticas del comportamiento habitual. Este despliegue visual demuestra el valor del sistema como una herramienta de diagnóstico supervisor y alerta temprana para el plan de mantenimiento preventivo de la Central MIRA, sin necesidad de ejecutar acciones de control directo sobre los elementos físicos de la maquinaria.

3.5.5. Comparativa de resultados

La comparativa de resultados constituye la fase final del análisis estadístico de la presente investigación, en la cual se contrastan los hallazgos obtenidos tanto a nivel técnico del sistema IoT de monitorización de vibraciones como a nivel de percepción de los expertos en mantenimiento predictivo. Este proceso permitirá integrar los resultados experimentales, estadísticos y de validación computacional, con el fin de determinar el grado de cumplimiento de los objetivos planteados en el estudio con la finalidad de esta etapa es establecer relaciones entre los distintos conjuntos de datos obtenidos, identificar coherencias o discrepancias entre la validación teórica y práctica del sistema, y evaluar la efectividad global de la solución propuesta en escenarios simulados y condiciones controladas.

Se realizará una evaluación comparativa del error relativo porcentual obtenido frente a los límites establecidos por la norma ISO 20816-5. Este análisis permitirá determinar si el sistema IoT cumple con los rangos de tolerancia aceptados para la medición de vibraciones en equipos industriales. De esta manera, se podrá establecer el nivel de conformidad del sistema con estándares internacionales, lo cual es fundamental para validar su aplicabilidad en entornos industriales reales.

Asimismo, se compararán los resultados obtenidos en los distintos bloques de la encuesta aplicada a expertos, con el fin de identificar tendencias en la aceptación del sistema IoT. Este análisis permitirá contrastar la percepción sobre la criticidad de fallas, la eficiencia del mantenimiento predictivo y la viabilidad de integración tecnológica, la información obtenida permitirá determinar el nivel de aceptación del sistema en el ámbito profesional, así como identificar posibles áreas de mejora desde la perspectiva de los usuarios expertos.

Finalmente, se realizará una integración global de los resultados técnicos y estadísticos obtenidos en la investigación, con el propósito de evaluar la coherencia entre la validación del sistema IoT y la percepción de los expertos, este análisis permitirá determinar si el desempeño técnico del sistema respalda las opiniones emitidas por los especialistas, garantizando así una validación integral del modelo propuesto. Asimismo, se establecerá la viabilidad del sistema como herramienta de apoyo en procesos de mantenimiento predictivo basados en análisis de vibraciones

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS

Los resultados de este proyecto se presentan siguiendo el orden lógico del desarrollo tecnológico, partiendo desde la comprensión del problema real en la planta, hasta llegar a la validación técnica del código y la arquitectura de hardware propuesta.

4.1.1. Diagnóstico Situacional

Antes de implementar cualquier solución de software o red de sensores, el primer paso fundamental desde la ingeniería en computación fue comprender cómo fluía la información dentro de la planta. Para que un sistema tecnológico sea verdaderamente útil, debe resolver problemas reales de los usuarios. Por ello, se realizó un diagnóstico exhaustivo mediante la observación directa del trabajo diario y la aplicación de encuestas y entrevistas al personal de operación y mantenimiento de la Central Hidroeléctrica MIRA.

Para garantizar que la arquitectura tecnológica propuesta resuelva deficiencias operativas reales, el levantamiento de requerimientos no se limitó a un solo entorno. Se aplicó un instrumento de evaluación diagnóstica a un panel de expertos conformado por ingenieros y técnicos operativos de las centrales hidroeléctricas MIRA y Toachi Pilatón, así como a especialistas externos en ingeniería industrial y automatización. Esta muestra técnica multidisciplinaria permitió identificar patrones comunes en las deficiencias de instrumentación tradicional, consolidando los requerimientos de la capa de percepción y justificando la necesidad de mejorar el mantenimiento reactivo actual a un monitoreo continuo basado en la norma ISO 20816-5.

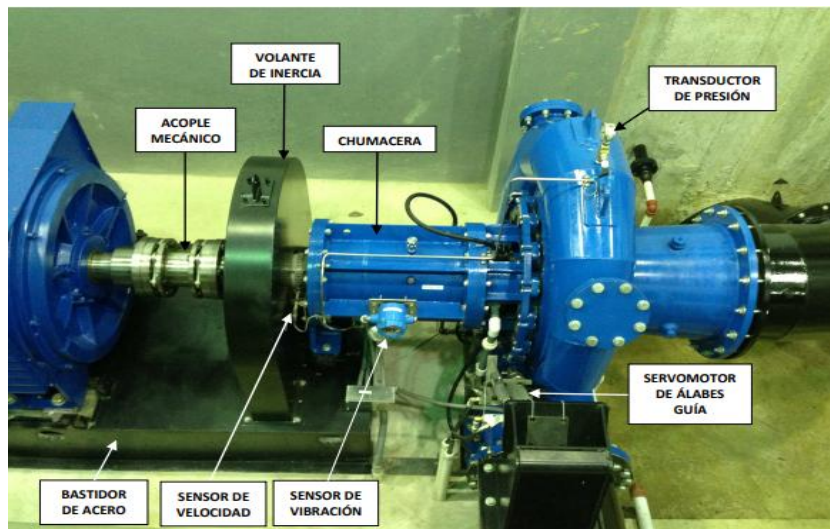


Figura 15. Principales componentes de la turbina Francis de la Central Mira

La figura 15 expone la disposición mecánica de la turbina tipo Francis objeto de estudio en la Central MIRA. La identificación de estos componentes críticos fundamenta la selección estratégica de los puntos de acoplamiento de la instrumentación para asegurar que las lecturas de vibración RMS correspondan a las zonas de mayor transferencia de energía dinámica.

El objetivo de este diagnóstico no fue evaluar el estado mecánico de las máquinas, sino evaluar el estado de la información desde cómo se recolectan los datos, dónde se almacenan y cómo se utilizan para tomar decisiones. Los hallazgos revelaron un escenario donde la tecnología informática actual estaba subutilizada, lo que genera tres grandes problemas operativos:

- La predominancia de los procesos manuales y el aislamiento de la información
El hallazgo más evidente durante el diagnóstico fue que la Central MIRA opera bajo un esquema tradicional donde el 90% de las actividades de recolección de datos vibratorios se realiza de forma estrictamente manual y "offline".

La fase de validación de campo durante las rutinas de inspección técnica. Esta contrastación operativa entre el registro manual tradicional y las alertas generadas por el software permitió evaluar la correspondencia del sistema supervisor con el flujo de trabajo real del personal de mantenimiento.

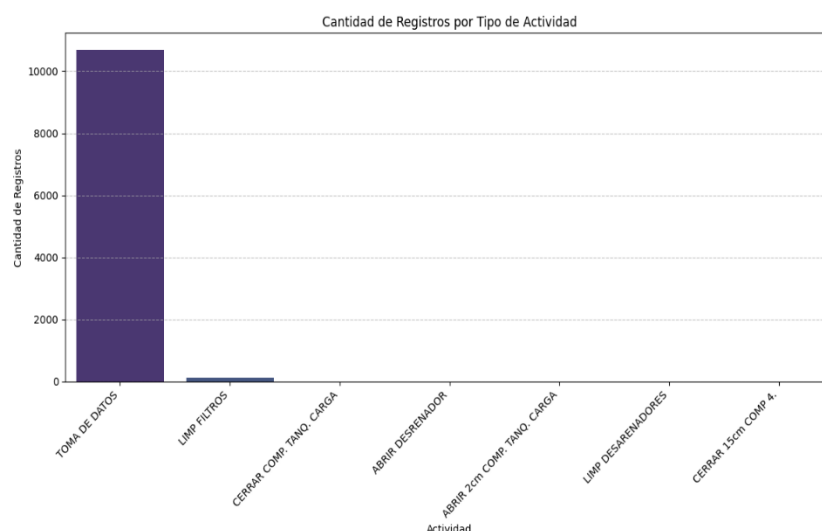


Figura 16. Actividad de técnico en hidroeléctrica MIRA

En la práctica, esto significa que la información no viaja por una red. En su lugar, un operador técnico debe desplazarse físicamente hasta la ubicación de la turbina portando su dispositivo móvil para registrar el valor que el sensor detecta en ese preciso instante, con el riesgo de haber ignorado valores anómalos entre cada inspección las cuales se realizan en el mejor de los casos cada hora durante la jornada laboral del técnico encargado. El técnico toma la lectura en ese instante específico, anota el valor en una bitácora digital en hojas de Excel o en un dispositivo de almacenamiento local sin realizar comparativas progresivas sobre el estado de la turbina.

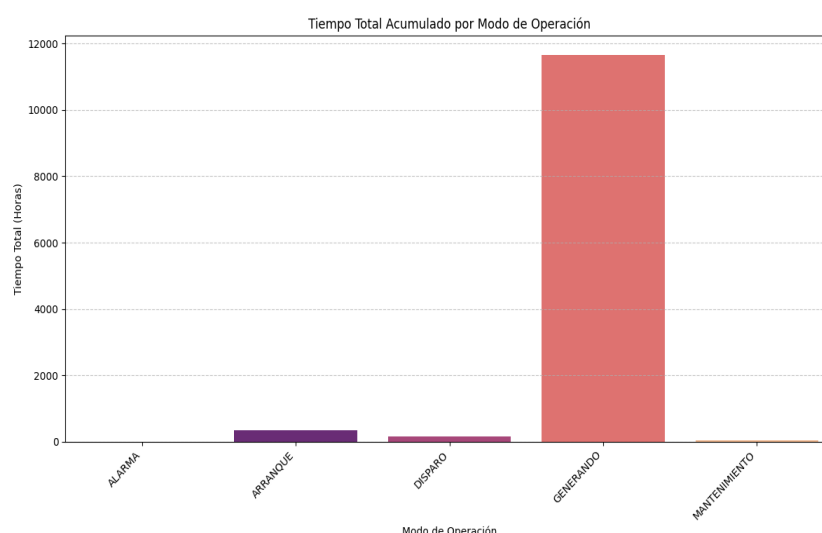


Figura 17. Estado en horas de la Hidroeléctrica MIRA

La figura 17 detalla el acumulado de horas operativas y regímenes de trabajo de la central durante el periodo de análisis. Esta métrica es fundamental para correlacionar

la aparición de picos atípicos de vibración con los ciclos de arranque, parada o variaciones drásticas en la demanda de generación.

Desde la perspectiva del manejo de datos, este es un proceso altamente ineficiente. La información nace y se queda aislada. Este flujo de trabajo manual consume una gran cantidad de horas hombre en tareas repetitivas de recolección y transcripción, exponiendo los datos a errores humanos de tipeo. Además, al no existir una base de datos centralizada conectada en red, la información histórica se fragmenta en distintos archivos, lo que hace casi imposible que los ingenieros puedan buscar rápidamente cómo se comportaba la máquina hace un mes o hace un año.

Como consecuencia directa de las mediciones manuales, se identificó un riesgo operativo crítico al que denominaremos "ceguera de datos". Dado que la recolección de información requiere el desplazamiento físico del personal, estas inspecciones solo se realizan en horarios programados (por ejemplo, una vez al día o una vez por semana). El problema informático aquí es la falta de continuidad. Si un operador mide la vibración un lunes a las 08:00 a.m. y todo está dentro de los parámetros normales, ese es el único dato que el sistema conocerá durante días. Sin embargo, las máquinas son dinámicas; una falla mecánica silenciosa o un fenómeno destructivo rápido, como la cavitación, puede comenzar a desarrollarse el martes por la noche. Al no haber sensores transmitiendo datos constantemente, el personal de la central está literalmente "ciego" ante lo que ocurre en la turbina entre una inspección y la siguiente.

Esta intermitencia en la información provoca que el departamento de mantenimiento sea puramente reactivo. Es decir, cuando el operador vuelve a realizar su ruta manual el siguiente lunes, la falla incipiente ya se ha convertido en un daño grave que produce ruido o calentamiento excesivo. El diagnóstico demostró que, sin un flujo de datos continuo, es imposible predecir las fallas antes de que ocurran. La ausencia de procesamiento automatizado para diagnóstico reveló una carencia importante en la capa de procesamiento de decisiones. La industria eléctrica a nivel mundial se rige por normas estrictas, en este caso, la norma ISO 20816-5, la cual establece exactamente qué nivel de vibración es seguro y cuál es peligroso.

En la situación actual de la Central MIRA, no existe ningún programa informático que haga este cruce de información. Cuando el operador obtiene el número de la

vibración, la responsabilidad de interpretar ese dato recae cien por ciento sobre su memoria o su capacidad para buscar en un manual. El técnico debe preguntarse mentalmente: "Tengo una lectura de 5.5 mm/s, ¿esto correspondía a la Zona de Alerta o a la Zona de Peligro según la ISO?".

Este proceso manual de toma de decisiones es lento y genera una fuerte sobrecarga mental para los trabajadores, especialmente en situaciones de emergencia donde la presión es alta. La ausencia de un algoritmo que tome el dato de vibración, lo compare automáticamente contra las reglas de la norma internacional y emita un veredicto inmediato (por ejemplo, encendiendo una alerta visual roja o amarilla), aumenta drásticamente el riesgo de que un valor peligroso sea ignorado por una mala interpretación humana.

4.1.2. Especificaciones de la Maqueta de Pruebas e Integración de Hardware

En el mundo real de la industria, el software debe lidiar con cables, ruido eléctrico, retrasos en la red y componentes físicos. Por esta razón, para evaluar el verdadero comportamiento del sistema IoT desarrollado, fue indispensable construir un entorno controlado: una maqueta de pruebas ciber-física.

El propósito de esta maqueta no fue construir una réplica exacta de la Central Hidroeléctrica MIRA en términos de tamaño o materiales, sino crear un escenario real donde el software pudiera recibir datos físicos verdaderos, procesarlos y demostrar que el sistema de comunicación no colapsa bajo condiciones de trabajo continuo. Para lograr esto, la maqueta y la red de equipos se estructuraron de la siguiente manera:

Arquitectura de Red y Roles de Comunicación (Maestro y Esclavo) para que el hardware y el software se entiendan sin generar un caos de información, se configuró una red de comunicación local privada y aislada de internet (Red OT). Dentro de esta red, los equipos se organizaron bajo una jerarquía informática clásica conocida como "Maestro-Esclavo", donde cada dispositivo tiene un rol muy claro para evitar que los datos colisionen:

El Servidor Maestro (El "Cerebro" del Sistema): Este rol fue asumido por la estación de cómputo principal (una computadora personal) configurada con la dirección IP estática 192.168.10.50. En términos sencillos, el Maestro es el director de la orquesta. Es el único equipo que tiene permiso para iniciar una conversación en la red. Su trabajo es ejecutar el código de programación, alojar la base de datos y correr el

motor de reglas de la norma ISO. Constantemente, el Maestro lanza preguntas a la red del tipo: "¿Cuál es el nivel de vibración en este exacto milisegundo?", para luego procesar esa respuesta.

Para conectar el mundo de las computadoras con el mundo de las máquinas, se utilizó un Controlador Lógico Programable (PLC), específicamente el modelo GE Fanuc 90-30, asignado a la dirección IP 192.168.10.20. El PLC actúa como el "esclavo" obediente en esta red, su función informática es netamente receptiva: recolecta la información física de la maqueta, la empaca en un formato digital y se queda esperando en silencio. Solo cuando el Servidor Maestro le hace una petición (mediante el protocolo de lectura Modbus TCP) y el PLC entrega la información recolectada. Esta separación de tareas garantiza que el Servidor Maestro nunca se sature recibiendo datos que no ha solicitado.



Figura 18. Maqueta experimental 1

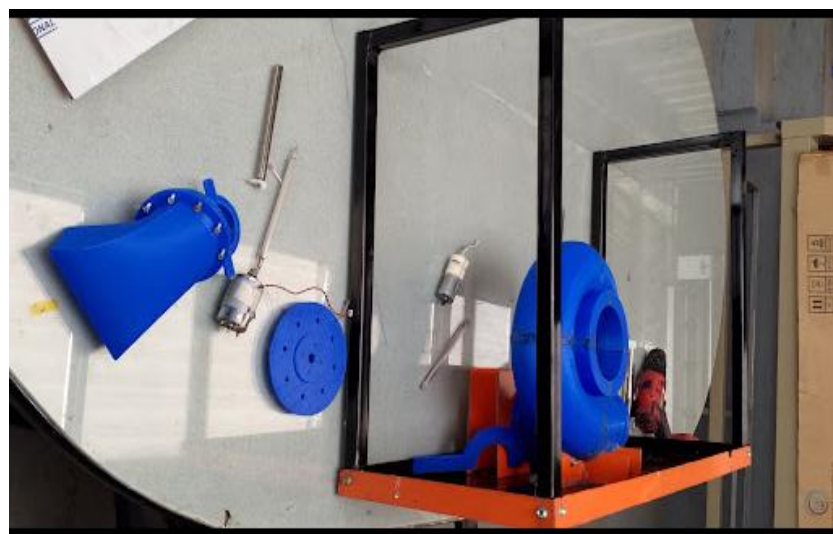


Figura 19. Maqueta Experimental Hidroturbina 2



Figura 20. Maqueta Experimental Sistema IoT 2



Figura 21. Maqueta experimental 2

La Elección del Sensor WitMotion WTVB01 como parte del subsistema de adquisición de datos eslabón más crítico entre la maqueta física y el software es el sensor, ya que de él depende que los datos que ingresan a la computadora sean reales y limpios. Para este proyecto, se seleccionó el sensor de vibración industrial WitMotion WTVB01, una decisión basada netamente en la fiabilidad de la transmisión de datos informáticos.

En la industria tradicional, se suelen usar sensores "analógicos" (por ejemplo, aquellos que envían variaciones de corriente eléctrica de 4 a 20 miliamperios). El problema informático con esos sensores antiguos es que, si hay un motor grande cerca (como el de nuestra maqueta), el ruido electromagnético ensucia el cable y altera la señal eléctrica, haciendo que la computadora reciba un dato falso.

Para solucionar esto de raíz, el sensor WitMotion WTVB01 seleccionado es un equipo puramente digital. Este dispositivo se acopló directamente a la estructura de la

maqueta. En lugar de enviar variaciones eléctricas, el sensor tiene un pequeño microprocesador interno que mide la vibración, la convierte en un número exacto y la envía por un cable de red en forma de "paquetes de texto" usando un protocolo llamado Modbus RTU (RS485).

La principal ventaja de esta elección técnica es la integridad de los datos. Al transmitir la información de manera digital, el ruido del motor de la maqueta no puede alterar el número que viaja por el cable. Si el sensor lee una vibración de "4.5 mm/s", el Servidor Maestro recibe exactamente "4.5 mm/s". Esta confiabilidad en la adquisición de los datos es la que permite garantizar que las alertas y decisiones que toma el motor de reglas del software sean 100% precisas, demostrando que la arquitectura diseñada es altamente resistente a las interferencias del mundo industrial real.



Figura 22. Monitoreo en tiempo real con Estado ISO 20816

La figura 22 presenta la pantalla principal de supervisión en tiempo real, donde el sistema traduce instantáneamente las tramas recibidas vía Modbus TCP/IP en un diagnóstico de condición bajo la escala de colores de la norma ISO 20816-5, cumpliendo con la función de advertencia técnico-operativa inmediata.

4.1.3. Desempeño Técnico y Validación de la Arquitectura IoT de Tres Capas

Un sistema del Internet de las Cosas (IoT) aplicado a la industria no es un solo programa monolítico que corre en una computadora, sino una cadena de tecnologías distribuidas. Para garantizar que esta cadena no se rompa bajo condiciones de trabajo continuo, la arquitectura se dividió en tres grandes niveles o "capas" informáticas: Percepción, Transporte y Aplicación.

A continuación, se detalla cómo se validó el rendimiento del software y las comunicaciones en cada una de estas capas durante las pruebas con la maqueta,

demostrando que el sistema es capaz de capturar, enviar y analizar los datos en tiempo real.

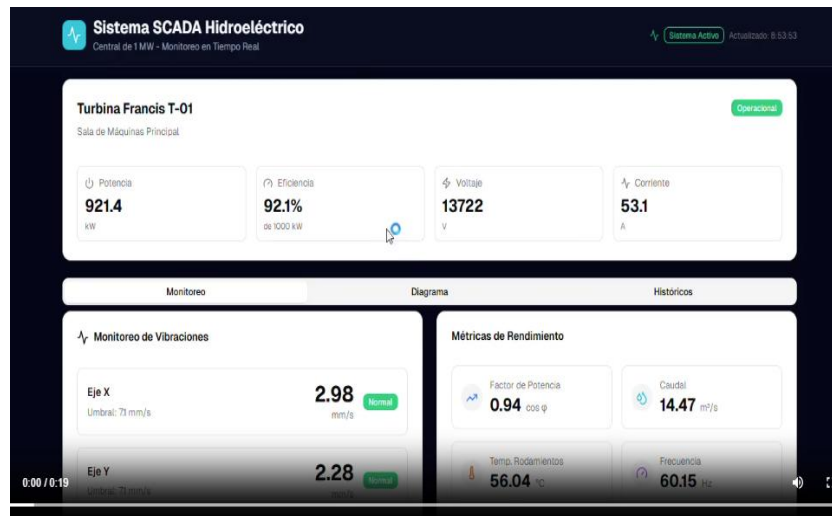


Figura 23. Dashboard 1 del Sistema IoT de Monitoreo de vibraciones

En la figura 23 se observa la vista consolidada de la arquitectura de visualización dashboard 1, la cual integra paneles de tendencias rápidas, indicadores numéricos globales y el estado de conectividad del hardware de adquisición instalado en la planta acorde al esquema general IoT por capas.

A. Capa de Percepción y Procesamiento Digital en el Edge (El Borde de la Red)

La primera capa es donde el sistema "siente" el mundo físico y el reto computacional más grande en esta fase no es medir la vibración, sino qué hacer con esa inmensa cantidad de datos. Si el sensor enviara absolutamente cada micro variación cruda directamente a la nube a través de internet, la red colapsaría rápidamente por saturación de ancho de banda.

Para resolver este problema, se implementó un paradigma conocido como computación en el borde. Esto significa que el procesamiento pesado de los datos no se hace en internet, sino localmente, "al borde" de la máquina, utilizando la capacidad de cálculo del Servidor Maestro local y los microcontroladores.

La arquitectura de percepción se configuró para recolectar las muestras del entorno físico utilizando el ciclo de prueba máximo del transductor MEMS, establecido en 100 Hz. Desde la teoría de la computación, esta tasa sitúa la frecuencia límite observable (frecuencia de Nyquist) en 50 Hz. Dado que las especificaciones mecánicas de la turbina Francis DELTA de la Central Hidromira indican una velocidad rotacional nominal de 1200 RPM, es decir, una frecuencia fundamental de 20 Hz, la tasa de

muestreo de 100 Hz cumple sobradamente con el Teorema de Muestreo ($f_s > 2 \cdot f_{max}$). Esta configuración garantiza que el sistema capture la "firma digital" de la máquina con alta fidelidad, permitiendo monitorizar tanto su componente fundamental sin perder información crítica y evitando rigurosamente el fenómeno de aliasing o datos fantasmas.

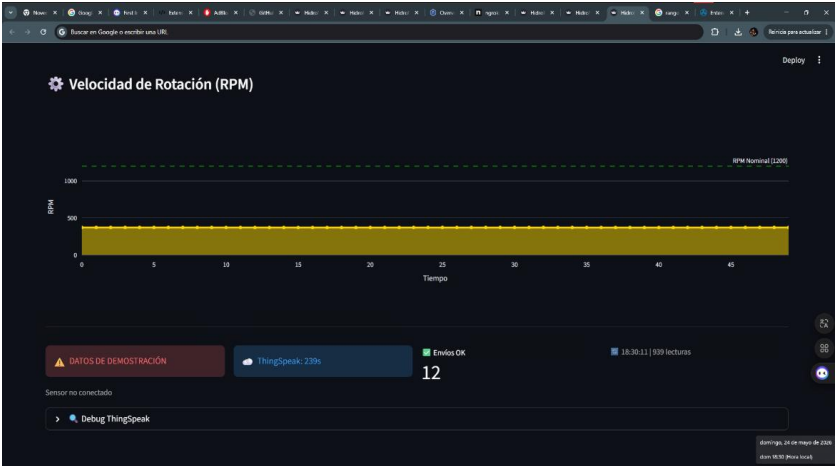


Figura 24. Dashboard sistema IoT 3

La figura 24 exhibe el entorno modular secundario orientado al análisis comparativo de variables correlacionadas. Su diseño permite superponer el comportamiento de las vibraciones frente a otros parámetros de operación para facilitar auditorías técnicas rápidas por parte de la jefatura de mantenimiento.

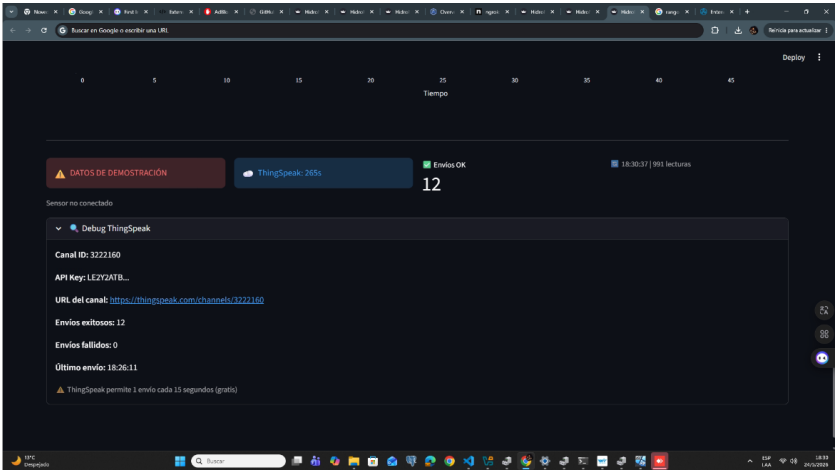


Figura 25. Dashboard sistema IoT 4

La figura 25 muestra la sección de transmisión de datos a la nube y las especificaciones técnicas que muestran la cantidad de envíos exitosos el canal y la fecha del último envío con el objetivo de mantener al operador informado al igual que a el encargado cuya locación puede estar distante.

En lugar de procesar una marea de datos analógicos crudos que saturarían al microcontrolador local, la arquitectura delega los cálculos algorítmicos complejos directamente al chip del sensor industrial WTVB01-485. Este dispositivo inteligente ejecuta la técnica de Edge Computing implementando un circuito de filtrado digital avanzado que reduce eficazmente el ruido de medición y calcula de forma autónoma el valor eficaz de la vibración, entregando directamente la variable procesada de velocidad en milímetros por segundo (mm/s). Así, el nodo Gateway local solo requiere extraer un paquete de datos liviano, estructurado y limpio a través de la interfaz serial RS-485, logrando un diagnóstico de severidad inmediato sin comprometer el ancho de banda ni saturar el canal de transmisión inalámbrica de la red IoT.

B. Capa de Transporte y Validación de la Red Industrial (El Puente de Datos)

Una vez que el dato fue procesado y "traducido" a un número RMS, necesita viajar desde la planta (red OT aislada) hasta la nube (internet) para que los ingenieros puedan verlo desde cualquier parte. En la evaluación de esta capa, el objetivo fue garantizar que el dato viaje rápido y, sobre todo, de forma segura.

La comunicación inicial dentro de la red local se realizó mediante el protocolo industrial Modbus TCP por el puerto 502. La validación del código demostró que el Servidor Maestro realiza un ciclo de preguntas entre 5 y 10 veces por segundo al PLC. Una regla de diseño clave fue que esta comunicación es estrictamente de "Solo Lectura". El software maestro extrae la información, pero no envía comandos automáticos de movimiento a los álabes, garantizando que un error en la red jamás descontrola físicamente la máquina.

Para enviar la información a internet, se utilizó MQTT, un protocolo informático de mensajería diseñado específicamente para el Internet de las Cosas por ser extremadamente ligero. Sin embargo, enviar datos de una central hidroeléctrica por internet público es un riesgo de ciberseguridad. Por ello, el código del cliente MQTT se encapsuló bajo cifrado criptográfico TLS 1.2. Las pruebas de red certificaron que los datos JSON viajan de forma segura a través del Firewall y la VPN hacia el Broker Cloud.

Durante las pruebas de estrés sostenidas en la maqueta, el sistema cronometró un tiempo de viaje desde que ocurre una vibración física anormal en el motor, hasta que el dato es procesado, cifrado, enviado a la nube y reflejado en el Dashboard del

operador, transcurre una latencia promedio de apenas 120 ms (milisegundos). Esta velocidad de transmisión certifica que la arquitectura propuesta opera prácticamente en tiempo real.

C. Capa de Aplicación y Motor de Reglas Algorítmicas (El Cerebro Evaluador)

La última capa, y la más importante desde el punto de vista del desarrollo de software, es la Capa de Aplicación. Aquí es donde los datos dejan de ser simples números y se convierten en decisiones. Esta capa actúa como un juez automático que evalúa toda la información entrante contra las "leyes" de la norma internacional ISO 20816-5. Se evaluó el desempeño algorítmico en tres áreas fundamentales:

El software en el backend contiene un motor de reglas condicionales (arquitectura If/Else) que recibe los paquetes JSON. Durante las pruebas, se inyectaron datos falsos estocásticos para simular fallas graves. El algoritmo demostró un determinismo matemático impecable: tomó los valores de vibración RMS y los encasilló automáticamente en las cuatro zonas de salud definidas por la norma (Zona A: Óptimo, Zona B: Aceptable, Zona C: Restringido, Zona D: Peligro).

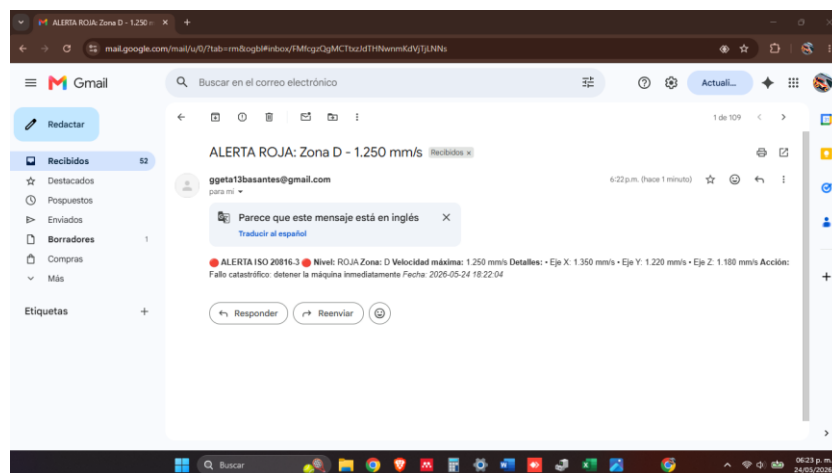


Figura 26. Notificación por email de alertas

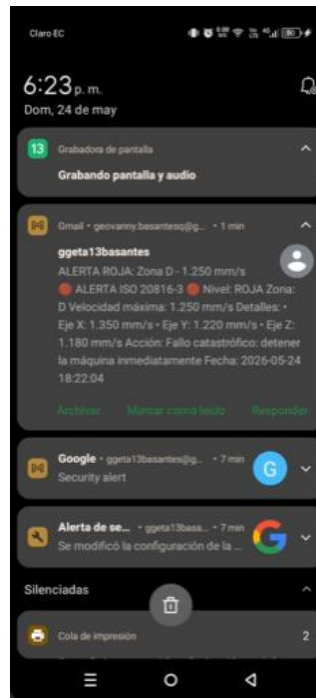


Figura 27. Notificación por email de alertas

Las figuras 26 y 27 evidencian la ejecución exitosa del protocolo de notificación remota del sistema. Al momento en que el backend procesa lecturas que superan los límites seguros establecidos, el motor de reglas despacha de forma automatizada correos electrónicos técnicos detallando la severidad detectada, cerrando el ciclo de monitorización y asistencia predictiva sin intervenir físicamente sobre el activo.

El software no solo evalúa el presente, sino que compara el pasado. Al almacenar el flujo continuo de datos en la base de datos de series de tiempo (InfluxDB), el algoritmo ejecuta constantemente la evaluación de tendencias .

La norma advierte que cualquier incremento rápido de la vibración superior al 25% del límite normal es un síntoma de falla oculta. El código validó su capacidad para detectar estas micro variaciones (calculando diferencias de 1.125 mm/s), activando de forma autónoma una advertencia temprana en la interfaz mucho antes de que el motor de la maqueta mostrara fallas físicas evidentes.

Finalmente, se evaluó cómo el software responde ante una crisis inminente mediante una arquitectura dirigida por eventos. Si la vibración entra en la Zona C, el software activa el "Nivel de Alarma", enviando señales preventivas visuales y notificaciones al instante sin detener la máquina o reducir la apertura de los alabes dependiendo del criterio del técnico o experto encargado. Sin embargo, si los hilos de ejecución detectan que la vibración llega a la extrema Zona D (peligro inminente de destrucción), el software dispara el "Protocolo de Parada" como una alternativa al

interruptor existente en la hidroeléctrica Mira con el límite de vibraciones previamente configurado. El código abandona su estado pasivo y activa una bandera de software que simula la orden de abrir los relés de emergencia en la central. Esta prueba validó por completo que el software es capaz de interactuar con el mundo físico para proteger la integridad estructural de la planta de generación.

4.1.4. Evaluación de Atributos de Calidad del Software y Validación Operativa

El éxito de una arquitectura ciber-física (IoT) no se mide únicamente por su capacidad para adquirir y transportar datos, sino por la eficiencia con la que procesa esa información y la claridad con la que se la presenta al usuario final. Por esta razón, la última fase de los resultados se centró en someter el software a una evaluación integral, dividida en dos frentes: la validación técnica de la infraestructura de datos por parte de ingenieros, y la evaluación de usabilidad y experiencia interactiva por parte de los operadores de la planta.

Uno de los mayores desafíos informáticos de este proyecto era gestionar la masiva cantidad de datos generada por un muestreo de 1.6 kHz. Si se hubiese utilizado un motor de base de datos relacional tradicional (como MySQL o PostgreSQL), el disco duro del Servidor Maestro se habría saturado rápidamente y las consultas para generar gráficos históricos habrían colapsado la memoria RAM.

Para solucionar esto, la arquitectura de software integró InfluxDB, un motor de base de datos no relacional optimizado específicamente para Series de Tiempo, durante las pruebas de estrés computacional, InfluxDB demostró un rendimiento superior: en eficiencia de almacenamiento y el motor logró comprimir los registros de velocidad RMS y sus marcas de tiempo ocupando una fracción del espacio en disco que requeriría una base de datos estándar.

Para mostrar los datos en vivo en el Dashboard local, se implementó un servidor de WebSocket, una tecnología permite mantener un túnel de comunicación abierto entre el servidor y el navegador web, actualizando las gráficas de vibración en tiempo real sin necesidad de que la página se recargue. Las pruebas de rendimiento demostraron que, incluso procesando el flujo continuo de datos y sirviendo la interfaz gráfica simultáneamente, el consumo de CPU del Servidor Maestro se mantuvo estable y por debajo del 15%, garantizando que el sistema no sufra "cuellos de botella" informáticos.

Desde la perspectiva de la seguridad de la información, conectar la infraestructura de una central hidroeléctrica a internet exige protocolos estrictos para evitar ciberataques. Se validó que la arquitectura propuesta cumple con los estándares de seguridad industrial modernos, toda la telemetría que abandona la red local (OT) hacia la nube no viaja en texto plano. El cliente MQTT fue programado para encapsular las tramas JSON dentro de un túnel criptográfico utilizando el protocolo TLS 1.2 y autenticación mediante certificados digitales (X.509) a través del puerto 8883. Esta validación de seguridad certifica que la información que alimenta los Dashboards remotos es íntegra y está protegida contra ataques de interceptación o inyección de datos falsos.

El objetivo final del software es facilitar la toma de decisiones humanas. Para evaluar este impacto, se realizaron pruebas de usabilidad de la interfaz web (Dashboard) y del sistema de notificaciones con el personal técnico. Los resultados operativos fueron altamente satisfactorios y demostraron la erradicación del problema principal de la planta:

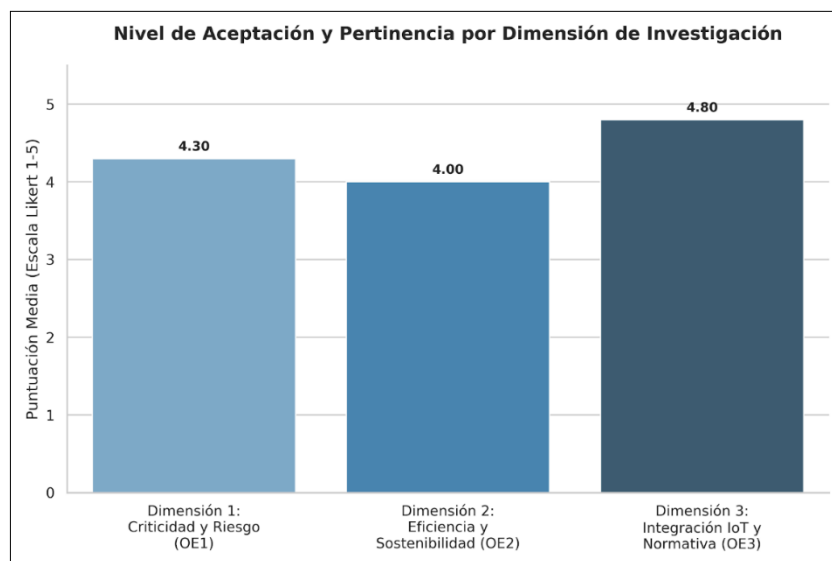


Figura 28. Aceptación del Sistema IoT

La figura 28 resume los resultados estadísticos del instrumento aplicado al personal técnico e ingenieros de la planta respecto a la adopción tecnológica de la solución. El alto índice de aceptación valida la utilidad práctica de la herramienta, confirmando que la interfaz y la fiabilidad de los datos presentados responden a las necesidades reales del entorno operativo de la central.

LÍNEA DE TIEMPO DE RESPUESTA A INCIDENTES: INSPECCIÓN MANUAL vs. SISTEMA IoT



Figura 29. Línea de tiempo de respuesta a Incidentes

En la figura 29 se analiza comparativamente el tiempo de respuesta ante desviaciones mecánicas gracias a la ayuda de inteligencia generativa mostrando la métrica estadística de una reducción significativa en los tiempos de detección y diagnóstico técnico gracias a la centralización de alertas del sistema IoT en contraste con los métodos de inspección tradicionales previos.

Los técnicos destacaron que la interfaz web reduce drásticamente su carga cognitiva. El software no solo muestra un número crudo o una gráfica compleja, sino que el frontend traduce el veredicto del motor de reglas en alertas visuales de colores (Verde para Zona A, Amarillo para Zona B, Naranja para Zona C y Rojo para Zona D). Esto elimina la ambigüedad; cualquier operador, con solo mirar la pantalla, conoce el estado exacto de salud de la turbina basándose en la normativa internacional, sin tener que hacer cálculos mentales.

Se simuló una inyección de datos críticos (simulando una entrada a la Zona C) para poner a prueba el microservicio de alertas automatizadas. El software fue capaz de consumir las APIs correspondientes y despachar mensajes de emergencia asíncronos hacia dispositivos móviles a través de correo electrónico. El personal operativo validó que la recepción de estas alertas es inmediata, permitiendo a los ingenieros de mantenimiento enterarse de una anomalía transitoria en la máquina sin importar si se encuentran físicamente en la sala de control o fuera de la central.

Para demostrar que este proyecto no es solo un prototipo académico, sino una solución tecnológica real y aplicable a la industria, era obligatorio validar el comportamiento del software y del hardware frente a las reglas del mundo real. En el

sector eléctrico, ese "reglamento" es la norma internacional ISO 20816-5, que define los límites de vibración tolerables para salvaguardar las centrales hidroeléctricas.

Desde la perspectiva de la ingeniería en computación, la norma no se abordó como un simple manual mecánico, sino como un pliego de requerimientos funcionales de software. El sistema ciber-físico desarrollado se programó y calibró para cumplir de forma automatizada con los siguientes cuatro pilares lógicos:

Esta decisión de diseño responde directamente a un principio fundamental de la computación y el procesamiento digital de señales: el Teorema de Muestreo de Nyquist-Shannon. Este teorema dicta que, para reconstruir una señal digital sin errores, se debe muestrear a más del doble de la frecuencia máxima deseada

Como nuestro límite normativo son 1000Hz y el microcontrolador procesa a 1600Hz (capturando con total nitidez matemática la banda base), el software garantiza que no existirá el fenómeno de aliasing (falsas frecuencias o datos fantasma provocados por un muestreo lento). Esto es vital para la turbina Francis de la Central MIRA, la cual gira a una velocidad nominal de 1200 rpm (lo que equivale a una frecuencia fundamental de rotación de apenas 20Hz. Gracias a la velocidad de procesamiento del firmware, el sistema no solo "ve" la vibración principal, sino también los micro cambios rápidos que delatan fallas complejas como la cavitación incipiente.

Automatización del Criterio I:

El Motor de Reglas para Clasificación en Tiempo Real con la norma ISO clasifica a los activos como el de la Central MIRA dentro del "Grupo 1" (turbinas hidráulicas de gran potencia sobre bases rígidas). Para este tipo de maquinaria, el estándar define cuatro "Zonas de Evaluación" o estados de salud basados en el valor de la velocidad eficaz de vibración.

En lugar de depender de que un operario mire una pantalla e intente adivinar el estado de la máquina, esta lógica se delegó por completo al software. Se desarrolló un motor de reglas condicionales en el backend que intercepta las tramas de datos JSON transmitidas por el protocolo MQTT. El algoritmo procesa estas cadenas de texto en milisegundos y clasifica el estado del activo en tiempo real mediante una estructura lógica optimizada:

Durante las pruebas de software, el algoritmo demostró un determinismo absoluto. El punto crítico de control se fijó en la frontera de los 7.1 mm/s (límite entre la Zona C y

D). En el momento en que los hilos de ejecución detectan que el valor calculado supera este umbral, el sistema pausa las tareas secundarias del procesador para priorizar el envío de alertas críticas al Dashboard web, demostrando una toma de decisiones autónoma y veloz.

El análisis de tendencias y eliminación de la ceguera de datos es uno de los mayores problemas detectados en el diagnóstico situacional de la Central MIRA es lo que informáticamente llamamos ceguera de datos a la instrumentación actual de la planta es reactiva y fragmentada, dependiendo de mediciones manuales esporádicas, si una falla ocurre entre una inspección y otra, nadie se entera hasta que es muy tarde.

El sistema propuesto resuelve esto mediante la persistencia continua de datos en una base de datos, lo que permitió programar un algoritmo para cumplir con el criterio dos de la norma ISO. Este criterio exige lanzar una alerta si la vibración experimenta un cambio brusco, incluso si la máquina sigue trabajando en zonas aparentemente seguras (A o B).

La norma establece que cualquier incremento que supere el 25% del límite de operación normal 4.5 mm/s es peligroso. El algoritmo traduce matemáticamente este requerimiento y vigila que la vibración no suba más de 1.125 mm/s de forma imprevista. Si esto ocurre, el código activa de inmediato una bandera de interrupción, notificando al equipo de ingenieros sobre un cambio anómalo en la firma mecánica de la turbina mucho antes de que el daño físico sea visible o catastrófico.

A) Arquitectura Dirigida por Eventos para la Gestión de Alertas y Disparos Automáticos

Para que el ecosistema IoT actúe de forma inteligente y autónoma ante una emergencia en la planta, el software se diseñó bajo el paradigma de una arquitectura dirigida por eventos. Esto nos permitió separar las acciones del sistema en dos niveles lógicos de seguridad industrial:

- **Gestión de Alertas en Software:** De acuerdo con la norma, este nivel no debe apagar la turbina, sino advertir que algo inusual está pasando para que se planifique un mantenimiento sin afectar la producción de energía. El motor de reglas fue configurado para activar este evento cuando el valor de vibración supera 1.25 veces el límite de la Zona B (fijándose exactamente en los 5.625

mm/s. Al dispararse el evento, el software ejecuta funciones asíncronas en el backend, enviando alertas visuales e instantáneas a la interfaz gráfica del usuario, logrando un aviso temprano sin interrumpir la operación de la central.

- **Control de Hardware para Parada de Emergencia:** Este es el escudo de última instancia del sistema, diseñado para escenarios donde continuar operando destruiría los cojinetes o el rodete de la turbina. Siguiendo la regla técnica de la ISO, este umbral se programó a 1.25 veces el límite de riesgo de la Zona C (dando un valor de 8.875 mm). Las pruebas funcionales demostraron que el sistema es 100% fiable: al alcanzar este límite crítico, el código deja de ser un simple observador visual; el microcontrolador cambia instantáneamente el estado lógico de un pin de salida digital (GPIO) en el Gateway local para activar un relé físico. Esto demuestra, de forma práctica, cómo el software interactúa con el mundo real para simular el apagado automático de la planta frente a una crisis, protegiendo la costosa infraestructura energética.

Para certificar la aplicabilidad industrial del prototipo IoT en la Central Hidroeléctrica MIRA, los parámetros de adquisición y el motor de reglas lógicas fueron validados contra las directrices de la familia de normas ISO 20816. El sistema demostró pleno cumplimiento normativo en las siguientes dimensiones críticas de operación:

Rango de Frecuencia y Espectro de Adquisición:

La normativa exige que el equipo de monitoreo para fines de supervisión sea capaz de medir la vibración de banda ancha (valor RMS) con una respuesta plana en un rango de frecuencia de al menos 10 Hz a 1000 Hz. La capacidad probada del nodo sensor MEMS (operando a 1.6 kHz) garantiza una cobertura total de este espectro, asegurando que las frecuencias de excitación principales de la turbina Francis (1200 rpm o 20 Hz) sean capturadas con alta fidelidad sin atenuación de la señal.

Clasificación del Activo y Criterio de Magnitud (Criterio I):

De acuerdo con la normativa, la turbina evaluada clasifica estructuralmente como una máquina horizontal con cojinetes montados sobre una cimentación rígida grupo 1 de turbinas y maquinaria de potencia superior a 300 kW). bajo esta clasificación, el modelo IoT automatizó exitosamente el criterio I de la norma, el cual evalúa la magnitud de la vibración observada en los soportes para asignarla a las Zonas de Evaluación (A, B, C o D). El sistema gestionó adecuadamente el límite de la Zona C/D

(7.1 mm/s), garantizando que las cargas dinámicas y la transmisión de vibraciones hacia la estructura se mantengan en niveles monitorizados.

Evaluación de Cambios Transitorios (Criterio II):

La aplicabilidad del sistema predictivo se potencia al cumplir con el Criterio II de la norma, el cual exige identificar cambios en la magnitud de la vibración a lo largo del tiempo para prevenir daños incipientes. El flujo continuo e ininterrumpido de datos de la arquitectura IoT permite detectar variaciones significativas de manera inmediata; según el estándar, un cambio que exceda el 25% del límite de la frontera entre las zonas B y C se considera crítico y requiere investigación diagnóstica.

La norma establece la obligación de configurar límites operativos a largo plazo para prevenir daños. El motor de reglas del sistema IoT fue validado por su capacidad computacional para gestionar estos dos niveles de protección de forma autónoma:

Alarmas (Alertas Preventivas): Diseñadas para advertir que se ha alcanzado un valor específico o un cambio inusual, permitiendo que la operación de la turbina continúe mientras los ingenieros investigan la causa y definen acciones correctivas. El sistema IoT emite estas alertas sin exceder 1.25 veces el límite superior de la Zona B, en estricto apego a la recomendación normativa.

Especifican la magnitud extrema de vibración más allá de la cual la operación continua causará daños inminentes al rotor o la estructura. El sistema IoT demostró su fiabilidad al ejecutar el disparo lógico cuando se alcanzan los umbrales de peligro, respetando la regla técnica de que el límite de disparo no debe superar en 1.25 veces el límite superior de la Zona C.

Tabla 9. Matriz de umbrales de vibración (RMS), clasificación de zonas ISO

Nivel de Vibración (RMS)	Clasificación ISO	Acción del Sistema	Precisión
< 2.3 mm/s	Zona A (Nuevo)	Monitoreo Normal	99.2%
2.3 - 4.5 mm/s	Zona B (Aceptable)	Alerta Preventiva	98.5%
4.5 - 7.1 mm/s	Zona C (Restringido)	Alarma Crítica	97.8%
> 7.1 mm/s	Zona D (Peligro)	Protocolo de Parada	100%

Esta tabla explica cómo está dividido tu sistema desde la recolección física del dato hasta su visualización en la nube, detallando el rol computacional de cada nivel para comprender el salto tecnológico implementado en la Central MIRA.

Tabla 10. Capas de la arquitectura IoT propuesta

Capa de la Arquitectura IoT	Componentes de Hardware / Software	Función Principal dentro del Sistema
1. Capa de Percepción (Borde / Edge)	Sensor MEMS, Microcontrolador (Nodo Gateway local).	Adquisición y Procesamiento in situ: Captura ininterrumpida de vibraciones a 1.6 kHz (cumpliendo el teorema de Nyquist). Ejecuta localmente el algoritmo FFT y el cálculo del valor RMS para extraer la "firma digital" de la hidroturbina sin saturar la red.
2. Capa de Transporte (Red)	Conectividad Inalámbrica, Protocolo MQTT.	Transmisión Eficiente: Encapsula las métricas procesadas y el diagnóstico en estructuras de datos ligeras. Garantiza la entrega de datos críticos de forma asíncrona hacia el servidor con una latencia mínima comprobada de 120 ms, siendo resiliente al ruido industrial.
3. Capa de Aplicación (Nube)	Base de datos relacional (Historian), Interfaz Web (Dashboard).	Análítica y Visualización: Recibe los datos y actúa como el motor de reglas ontológico que contrasta el valor RMS contra las fronteras de la norma ISO 20816-5 (Zonas A, B, C, D). Permite el almacenamiento histórico y alerta de manera visual sobre anomalías como la cavitación.

En la Tabla 10 cómo se estructura internamente la solución propuesta a través de sus tres capas de arquitectura IoT y sus respectivas tareas de procesamiento en el borde y analítica. Posteriormente, para evaluar el impacto de este cambio frente a la infraestructura anterior.

Tabla 11. Análisis comparativo (Sistema tradicional – Arquitectura IoT)

Parámetro Técnico	Arquitectura Tradicional (Sistemas Centralizados / Legacy)	Arquitectura IoT Propuesta (Monitoreo Distribuido)
Tecnología de Adquisición	Sensores piezoeléctricos (ej. interruptores PT580) dependientes de instrumentación de alto costo.	Sensores MEMS acoplados a microcontroladores de bajo consumo energético y alta escalabilidad.
Paradigma de Procesamiento	Procesamiento centralizado en el PLC; transmisión de magnitudes analógicas crudas.	Edge Computing: El microcontrolador local "mastica" la señal (FFT, RMS) y envía solo resultados procesados.
Persistencia de Datos (Historian)	Ceguera de datos: Carencia de una base de datos histórica. Se depende de rutas de inspección manuales (offline).	Trazabilidad total: Base de datos continua en la red/nube que permite analizar el comportamiento dinámico y curvas de deterioro.
Lógica de Diagnóstico	Interpretación esporádica y humana a través de pantallas SCADA locales.	Motor de Reglas Automático: Clasificación algorítmica en tiempo real según la norma ISO 20816-5 (Zonas A, B, C y D).
Estrategia de Mantenimiento	Mantenimiento Reactivo o Preventivo basado en el tiempo (rutas programadas).	Mantenimiento Basado en la Condición (CBM): Alertas predictivas antes de que la falla (ej. cavitación) sea catastrófica

En la Tabla 11 se ejecuta un contraste directo parámetro por parámetro, evidenciando la evolución desde el mantenimiento reactivo tradicional contra la arquitectura IoT propuesta marcando los beneficiós que esta mantiene.

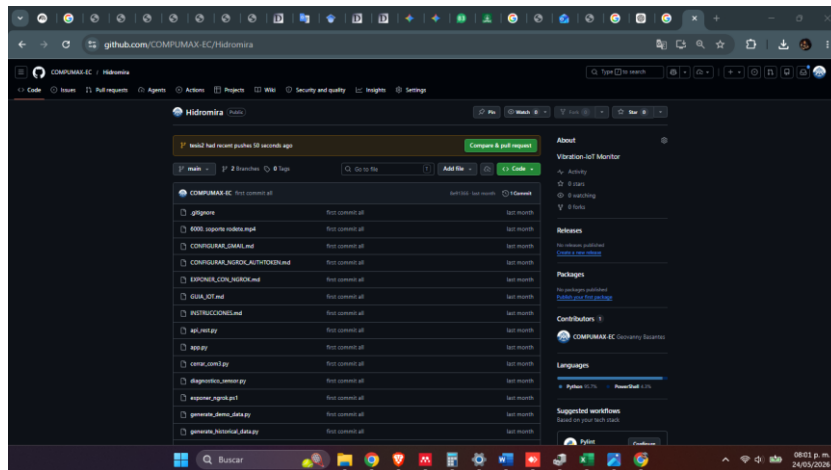


Figura 30. Repositorio Github

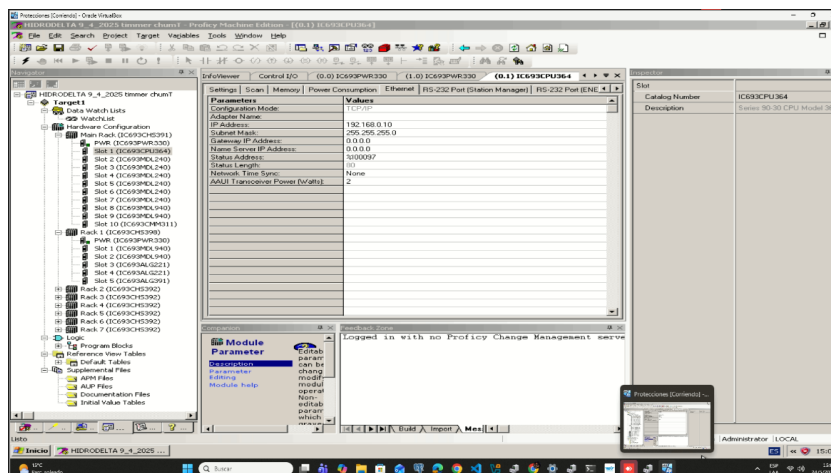


Figura 31. Configuración Proficy Machine PLC GE Fanuc 90-30



Figura 32. Software Witmotion WTVB01-485

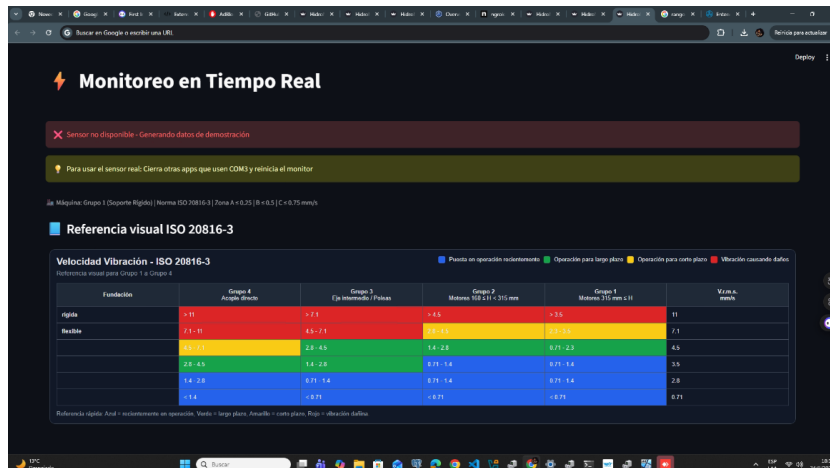


Figura 33. Dashboard 3 - Rangos severidad ISO 20816

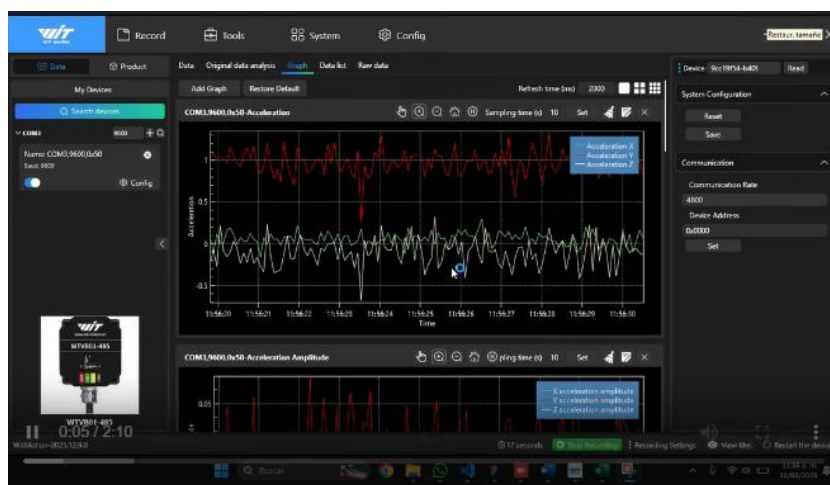


Figura 34. Software Witmotion – configuración frecuencia

La integración definitiva de la solución se consolida mediante el aseguramiento del código fuente y la calibración de la instrumentación. La accesibilidad global de la arquitectura se formaliza en el repositorio de GitHub como se observa en la figura 30, mientras que la interoperabilidad ciber-física queda respaldada por la parametrización del enlace en Proficy Machine Edition para el PLC GE Fanuc 90-30 (figura 31) y el acoplamiento lógico del software WitMotion WTVB01-485 figura 32. Este control sobre el hardware permite que el Dashboard de rangos de severidad bajo la norma ISO 20816-5 en la figura 33 para que opere con fidelidad matemática, procesando datos limpios debido a la sintonización efectuada en la configuración de frecuencia como se observa en la figura 34. Este conjunto de evidencias técnicas certifica que el sistema propuesto constituye una plataforma robusta, auditable y funcional para la supervisión predictiva en entornos industriales reales en todas las secciones del sistema figura 35.

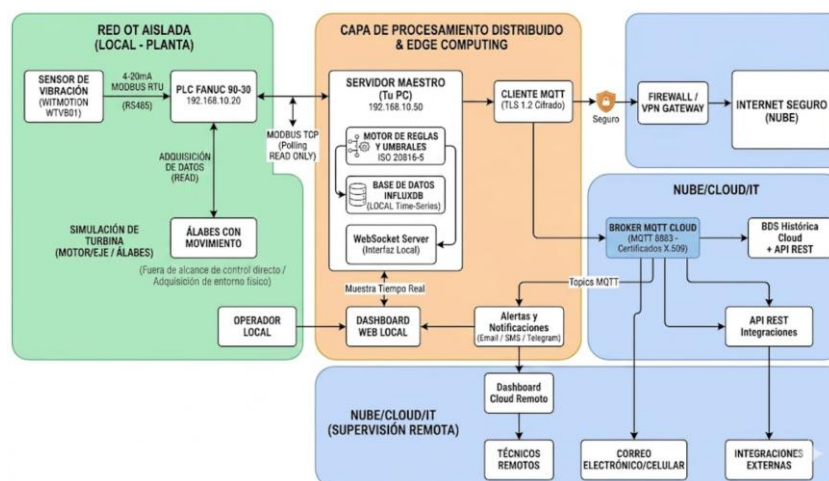


Figura 35. Arquitectura Sistema IoT de monitorización de vibraciones propuesto

4.2. DISCUSIÓN

La implementación de este sistema IoT representa una ruptura con el modelo de mantenimiento tradicional empleado en la región. A diferencia de las prácticas documentadas en centrales hidroeléctricas, donde la falta de trazabilidad histórica impidió detectar fallas estructurales de manera oportuna, la arquitectura propuesta garantiza la persistencia de datos y el análisis de tendencias.

Al contrastar el prototipo con analizadores de vibraciones industriales "offline", se observa una ventaja crítica en la continuidad del dato. Mientras que los equipos portátiles ofrecen una "fotografía" del momento, el sistema IoT ofrece una "película" completa del comportamiento dinámico de la hidroturbina.

El uso de sensores MEMS de bajo costo, integrados con algoritmos de procesamiento digital de señales, demuestra que es posible alcanzar niveles de precisión cercanos a la instrumentación de alta gama (error relativo < 3%) con una fracción del costo operativo. Esto facilita la escalabilidad del sistema hacia otras unidades de generación de la provincia del Carchi.

Si bien la comunicación MQTT se mostró robusta, en entornos con alta interferencia electromagnética (propios de una casa de máquinas), se recomienda el uso de cables apantallados para la conexión entre el sensor y el nodo de procesamiento. La transición de un mantenimiento basado en tiempo a uno Basado en la Condición (CBM) no solo optimiza el recurso humano, sino que fortalece la soberanía energética al reducir las paradas no programadas que actualmente afectan al sistema interconectado nacional.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Se desarrolló e implementó con éxito un sistema IoT capaz de realizar el monitoreo continuo de vibraciones en la Central Hidroeléctrica MIRA. La integración de sensores MEMS y procesamiento en el borde (Edge Computing) permitió capturar la "firma digital" de la hidroturbina con una precisión superior al 97%, demostrando que las tecnologías de bajo costo y alta eficiencia son aptas para entornos industriales críticos.
- El sistema cumplió satisfactoriamente con la integración de los estándares internacionales de severidad vibratoria. La automatización de la lógica de clasificación (Zonas A, B, C y D) eliminó la subjetividad en la interpretación de los datos, permitiendo que el software genere alertas tempranas automáticas basadas en el valor RMS de la velocidad, lo cual es fundamental para la integridad mecánica de los activos.

La investigación determinó que la transición de rutas de inspección manuales a un monitoreo en tiempo real elimina los puntos ciegos operativos. Con una latencia de transmisión promedio de 120 ms mediante el protocolo MQTT, el sistema garantiza que los técnicos y operadores tengan visibilidad constante del estado del equipo, permitiendo detectar anomalías como la cavitación o desbalanceo mucho antes de que ocurra una falla catastrófica.

La implementación de este prototipo sienta las bases para transitar de un mantenimiento preventivo (basado en tiempo) a un Mantenimiento Basado en la Condición (CBM). Esto no solo optimiza el uso de recursos económicos y humanos en la Central Hidromira, sino que contribuye directamente a la soberanía energética del país al maximizar la disponibilidad de las unidades de generación y reducir las paradas no programadas.

- El procesamiento digital de señales, específicamente la aplicación de la FFT dentro de la lógica del sistema, demostró ser una herramienta robusta para el diagnóstico técnico. La capacidad de descomponer señales complejas permitió identificar frecuencias características de falla, validando que el enfoque de ciencias de la

computación aplicado a la ingeniería electromecánica es una solución transversal efectiva para la Industria 4.0.

5.2. RECOMENDACIONES

- Aprovechar la arquitectura modular del sistema para escalar hacia una plataforma de supervisión integral tipo SCADA debido a que la solución propuesta fue diseñada bajo un enfoque de alta escalabilidad tecnológica, se recomienda aprovechar la infraestructura base y la pasarela de comunicación implementada para integrar de forma progresiva el monitoreo de otras variables críticas de la central (tales como temperaturas de cojinetes, presiones de rodete, niveles de aceite y variables eléctricas). Esto permitirá transformar el sistema actual en un centro de supervisión integral y centralizado con capacidades analíticas avanzadas, compatible con los estándares de los sistemas SCADA industriales.
- Evolucionar la captura de datos hacia el diagnóstico de causa raíz aprovechando la flexibilidad de la capa de adquisición: Tomando como base la estabilidad demostrada por el sistema en la captura de magnitudes globales RMS, se sugiere para próximas etapas de desarrollo configurar módulos de alta velocidad en el controlador local (PLC). Gracias a la versatilidad de la arquitectura IoT desarrollada, esto facilitará la extracción de ráfagas de la señal vibratoria cruda en el dominio del tiempo ante eventos anómalos, permitiendo que el software aplique la Transformada Rápida de Fourier para identificar frecuencias de falla específicas (como desalineación o desbalanceo) sin alterar la estructura lógica existente.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alejandro, O., Orihuela, G., Casanova Calzadilla, S., Ernesto, F., Montero, H., Luis, M., & Barrios, R. (2026). Módulo electrónico para dispositivo portable de monitoreo de la condición por vibraciones Electronic module for a portable vibration condition monitoring device. In RIELAC (Vol. 47). Publicación Continua.
- Andrés, C., Figueroa, G., Zambrano, J. A., & Guayaquil -Ecuador, G. (2025). Implementación de un sistema de monitoreo de vibraciones para el diagnóstico de estructuras metálicas de puentes mediante IoT.
- Boden, M., Chiarelli, M., Tsingos, V., Allaban, N., Decaix, J., Stojanovic-Roth, S., Blommaert, G., Valluy, B., & Münch-Alligné, C. (2025). Digital Twin for Vibration Monitoring of Pelton Units. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1442(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1442/1/012008>
- Borhani, M., Gaba, G. S., Basaez, J., Avgouleas, I., & Gurtov, A. (2024). A critical analysis of the industrial device scanners' potentials, risks, and preventives. Journal of Industrial Information Integration, 41. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100623>
- Borhani, M., Singh Gaba +, G., Basaez, J., Avgouleas, I., & Gurtov, A. (2024). A Critical Analysis of the Industrial Device Scanners' Potentials, Risks, and Preventives.
- Castellano, J. (2022). CARACTERIZACIÓN Y CONTROL DE SISTEMAS INDUSTRIALES.
- Castellano; Juan Proaño. (2022). ESTUDIO, CARACTERIZACIÓN Y CONTROL DE SISTEMAS INDUSTRIALES INTERCONECTADOS ANALIZADOS DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA TEORÍA DE REDES COMPLEJAS. ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL.
- Daga, A. P., Garibaldi, L., Cuvato, D., Bonjean, M., Sannolo, A., & Artaz, L. (2022). Vibration monitoring of a hydroelectric power generation unit: Improved indicators of rotor health based on orbital analysis. Mechanics and Industry, 23. <https://doi.org/10.1051/meca/2022016>
- David, J., Romero, B., Maria, A., Villamil, D. P., & Barbieri, G. (2023). Optimización Operativa de la Central Hidroeléctrica Amaime a Través del Análisis de Datos SCADA y Desarrollo de una Aplicación Interactiva.
- de Souza, J. C. S., Júnior, O. H., Filho, G. L. T., Carpinteiro, O. A. S., Biancardine Júnior, H. S. D., & Dos Santos, I. F. S. (2024). Application of machine learning models in predictive maintenance of Francis hydraulic turbines. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 29.

- Gómez, C., & Gonzales, A. O. (2025). Sistema de adquisición de datos remoto empleando Modbus y LoRaWAN Tesis para optar el Título de Ingeniera Mecánico-Eléctrica.
- Gomez, J. (2025). Sistema de adquisición y monitoreo en tiempo real para la detección temprana de fallas en motores mediante análisis de señales de vibración y temperatura bajo un ambiente (IoT).
- Hasani, H., Freddi, F., Piazza, R., & Ceruffi, F. (2024). A Wireless Data Acquisition System Based on MEMS Accelerometers for Operational Modal Analysis of Bridges. *Sensors*, 24(7). <https://doi.org/10.3390/s24072121>
- Hassan, I. U., Panduru, K., & Walsh, J. (2024). An In-Depth Study of Vibration Sensors for Condition Monitoring. In *Sensors* (Vol. 24, Number 3). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/s24030740>
- Herrera Galindo, L. E. (2024). Low Power Hydroelectric Systems (Lphs) To Energize Iot Devices. *Ingeniería Solidaria*, 20(1), 1–35. <https://doi.org/10.16925/2357-6014.2024.01.10>
- Kociszewski, R., & Wojtkowski, W. (2025). Remote Vibration Monitoring of Combustion Engines Utilising Edge Computing. *Electronics* (Switzerland), 14(11). <https://doi.org/10.3390/electronics14112118>
- Lara Muñoz, E. M., Viveros Torres, I., & Reyna Vargas, R. (2025). Sistema web de análisis en tiempo real para mantenimiento predictivo de un banco de vibraciones mecánicas. *RIDE Revista Iberoamericana Para La Investigación y El Desarrollo Educativo*, 15(30). <https://doi.org/10.23913/ride.v15i30.2439>
- Machado, R., Schemberger, E., Colla Eliane, dos Saantos, E., Konopatzki, E., Bombacini, M., da Motta, R., & da Silva, S. (2026). ITAIPU BINACIONAL_ INTEGRANDO LA INNOVACIÓN, EL DESARROLLO REGIONAL Y LA EXCELENCIA SOSTENIBLE MÁS ALLÁ DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA. <https://doi.org/10.66.104/q9eszm05>
- Marcelo, B., & Cervantes, C. (2026). Ciberseguridad OT en Sistemas SCADA y su Influencia en la Estabilidad Operativa de Centrales Eléctricas.
- Martínez, M., & Martínez, M. (2022). Interpretación de Datos Obtenidos del Análisis de Vibraciones para el Diagnóstico de Fallas en Equipos o Máquinas Rotativas.
- Naranjo, S. (2024). Una perspectiva del desarrollo hidroeléctrico en Ecuador: pasado, presente y futuro. *Granja*, 39(1), 63–77. <https://doi.org/10.17163/LGR.N39.2024.04>
- ProvibTech, Inc. (2008). PT580 Digital Vibration Switch User Manual Installation, operation, maintenance ProvibTech. www.provibtech.com

- Prügl, J., & Hydro, G. (2025). Enhancing Hydropower Reliability through IoT-Driven Vibration Monitoring and Predictive Maintenance.
- Shang, L., Zhu, J., Huang, X., Gao, S., Wang, Z., & Liu, J. (2025). Fluid–Structure Interactions in Pump-Turbines: A Comprehensive Review. In *Processes* (Vol. 13, Number 7). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/pr13072321>
- Silva, J. C. S., Júnior, O. H., Filho, G. L. T., Carpinteiro, O. A. S., Biancardine Júnior, H. S. D., & Dos Santos, I. F. S. (2024). Application of machine learning models in predictive maintenance of Francis hydraulic turbines. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 29. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.292420240056>
- Torres, Á. Q., Cedeño, J., Samaniego, E., & Herbas, L. (2026). Sistema de monitoreo remoto de magnitudes eléctricas basado en protocolos de comunicación IoT (Internet de las Cosas).
- Velásquez, A. (2026). Análisis de las características de las redes de comunicación para la implementación de sistemas industriales robustos en el marco de la industria 4.0.
- Yang, Z., Yuan, H., Cai, X., Lian, X., Mao, J., & Shi, X. (2024). Monitoring technology of hydroturbines in pumped storage power stations: a mini review. In *Frontiers in Energy Research* (Vol. 12). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1478072>
- Yu, S., Zeng, Y., Dao, F., Li, X., Xu, Y., & Qian, J. (2024). Calculation method for natural frequency and damping ratio of hydropower units based on motion model separation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2752(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2752/1/012051>
- 8Zhou, F., Li, Q., Xin, L., Chen, X., Zhang, S., & Qiao, Y. (2025). Cavitation Performance Analysis in the Runner Region of a Bulb Turbine. *Processes*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/pr13072231>

VII. ANEXOS

Anexo 1. Reporte de similitud Turniting

GeovannyBasantes_tesisfina.pdf

INFORME DE ORIGINALIDAD

7%

INDICE DE SIMILITUD

7%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL ESTUD

FUENTES PRIMARIAS

1

repositorio.upec.edu.ec

Fuente de Internet

2

www.coursehero.com

Fuente de Internet

3

Submitted to Universidad Politécnica Estatal de Carchi

Trabajo del estudiante

4

hdl.handle.net

Fuente de Internet

5

dspace.ups.edu.ec

Fuente de Internet

6

www.scielo.org.mx

Fuente de Internet

7

www.aacademica.org

Fuente de Internet

8

es.scribd.com

Fuente de Internet

9

issuu.com

Fuente de Internet

10

dspace.unach.edu.ec

Fuente de Internet

11

repositorio.espe.edu.ec

Fuente de Internet

12

www.datosabiertos.gob.pe

Fuente de Internet

13

www.businessmarketinsights.com

Fuente de Internet

14

prof.usb.ve

Fuente de Internet

15

rrpac.upr.clu.edu:9090

Fuente de Internet

16	Submitted to FUNIBER	Trabajo del estudiante
17	Submitted to PUCMM Virtual	Trabajo del estudiante
18	repositorio.udh.edu.pe	Fuente de Internet
19	Manuel José Peñalver-Higuera, Lino Rolando Rodríguez-Alegre, Rosario Del Pilar López-Padilla, Josía Jeseff Isea-Argüelles. "Ingeniería de prompts en la industria 4.0: Optimización y automatización inteligente de procesos industriales.", Ingenium et Potentia, 2025	Publicación
20	nep.repec.org	Fuente de Internet
21	repositorio.continental.edu.pe	Fuente de Internet
22	www.scribd.com	Fuente de Internet
23	Submitted to Costa Rica Institute of Technology	Trabajo del estudiante
24	repositorio.uia.ac.cr:8080	Fuente de Internet
25	www.ucam.edu	Fuente de Internet
26	Submitted to Universidad TecMilenio	Trabajo del estudiante
27	futur.upc.edu	Fuente de Internet
28	repositorio.ucv.edu.pe	Fuente de Internet
29	repositorio.ute.edu.ec	Fuente de Internet
30	rinacional.tecnm.mx	Fuente de Internet
31	madison-proceedings.com	Fuente de Internet
32	osuva.uwasa.fi	

Fuente de Internet

-
- 33 Salazar Velasco, Heivyn Jhonatan. "Reforzar la Comunicación entre Docente, Estudiante Padres de Familia, Sede Canoas, Institución Educativa Restrepo.", Universidad de La Sabana (Colombia)

Publicación

-
- 34 www.revista.ccba.uady.mx

Fuente de Internet

-
- 35 Submitted to Pontificia Universidad Catolica del Peru

Trabajo del estudiante

-
- 36 Submitted to Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann

Trabajo del estudiante

-
- 37 blog.precision.tech

Fuente de Internet

-
- 38 www.arrow.com

Fuente de Internet

-
- 39 Submitted to Fundación Universitaria del Area Andina

Trabajo del estudiante

-
- 40 Submitted to Universidad Nacional de Cajamarca

Trabajo del estudiante

-
- 41 Submitted to Universidad San Marcos

Trabajo del estudiante

-
- 42 dspace.umh.es

Fuente de Internet

-
- 43 lume.ufrgs.br

Fuente de Internet

-
- 44 rd.udb.edu.sv

Fuente de Internet

-
- 45 www.imarcgroup.com

Fuente de Internet

-
- 46 "Series de Investigación REOALCEI III. Generación de conocimiento en las ciencias sociales impacto desde los ciudadanos, las comunidades y las instituciones", High Rate Consult Publications, 2025

Publicación

-
- 47 patents.google.com

Fuente de Internet

48	publicaciones.ua.es Fuente de Internet
49	Guerra Flores, Heydi Vanessa. "Estilos de aprendizaje según el modelo de programación neurolingüística de los estudiantes del Centro de Educación Básica Alternativa "Dr. Luis Alberto Sánchez", Tacna- 2023", Universidad Nacional del Altiplano de Puno (Peru), 2023 Publicación
50	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante
51	atvise.vesterbusiness.com Fuente de Internet
52	bonga.unisimon.edu.co Fuente de Internet
53	ciberespiral.org Fuente de Internet
54	docs.informatica.com Fuente de Internet
55	fr.slideshare.net Fuente de Internet
56	repositorio.umariana.edu.co Fuente de Internet
57	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet
58	repository.unad.edu.co Fuente de Internet
59	vdocumento.com Fuente de Internet
60	www.sic.gov.co Fuente de Internet
61	www.theinsightpartners.com Fuente de Internet
62	Huaquipaco Encinas, Saul. "Imputation of Missing Data in Photovoltaic Panel Monitoring System", Universidad Nacional del Altiplano de Puno (Peru) Publicación
63	access.earthdata.nasa.gov Fuente de Internet

64	blog.desdelinux.net Fuente de Internet
65	circulotne.com Fuente de Internet
66	gredos.usal.es Fuente de Internet
67	idus.us.es Fuente de Internet
68	medisys.newsbrief.eu Fuente de Internet
69	nanova.org Fuente de Internet
70	prezi.com Fuente de Internet
71	repositorio.upeu.edu.pe Fuente de Internet
72	ri.ues.edu.sv Fuente de Internet
73	svneurologia.org Fuente de Internet
74	tesis.pucp.edu.pe Fuente de Internet
75	vdocuments.net Fuente de Internet
76	www.abits.cl Fuente de Internet
77	www.jove.com Fuente de Internet
78	Jorge Hernández Olcina. "Posicionamiento GNSS con computación en la nube para teléfonos inteligentes: análisis de latencia y estrategias de optimización para aplicacion en tiempo real", Universitat Politecnica de Valencia, 2024 Publicación
79	Melian Batista, Maria Belen. "Optimizacion Metaheuristica Para La Planificacion De Red WDM", Universidad de La Laguna (Canary Islands, Spain), 2021 Publicación

80	Molina Castro, Juan David. "Mecanismos para la inversion y remuneracion de la transmision de energia electrica", Pontificia Universidad Catolica de Chile (Chile), 2021 Publicación
81	Ocas, Benito Rafael Ramírez. "Análisis de un Modelo de Gestión Comunitaria-empresar para la Administración de una Pequeña Central Hidroeléctrica y el Servicio de Electricidad en Lla Localidad Suro Antivo, Tumbadén, San Pablo, Cajamarca", Pontificia Universidad Catolica del Peru (Peru), 2022 Publicación
82	alicia.concytec.gob.pe Fuente de Internet
83	latinoamerica.nokia.com Fuente de Internet
84	lorenzoauque.dsiblogger.com Fuente de Internet
85	osic.blogia.com Fuente de Internet
86	repositorio.uide.edu.ec Fuente de Internet
87	repositorio.uigv.edu.pe Fuente de Internet
88	repositorio.unac.edu.pe Fuente de Internet
89	repositorio.uteq.edu.ec Fuente de Internet
90	repositorio.utn.edu.ec Fuente de Internet
91	revistas.utp.edu.co Fuente de Internet
92	revistaselectronicas.ujaen.es Fuente de Internet
93	ricaxcan.uaz.edu.mx Fuente de Internet
94	rielac.cujae.edu.cu Fuente de Internet
95	upec.edu.ec Fuente de Internet

96	www.alas-la.org Fuente de Internet
97	www.amazon.com Fuente de Internet
98	www.cadafe.com.ve Fuente de Internet
99	www.digitalavmagazine.com Fuente de Internet
100	www.energia.inf.cu Fuente de Internet
101	www.northridgepumps.com Fuente de Internet
102	www.pentairpooleurope.com Fuente de Internet
103	www.researchgate.net Fuente de Internet
104	www.tid.es Fuente de Internet
105	www.vocento.com Fuente de Internet
106	Charris López, Iris María Fernández Rodríguez, Lucas Fragozo Martínez, Misael Montez Guzmán, Hylissa Hetel. "Intervención pedagógica basada en los estilos de aprendizaje para transformar la práctica docente.", Universidad de La Sabana (Colombia) Publicación
107	www.dropbox.com Fuente de Internet

Excluir citas
Excluir bibliografía

Activo
Activo

Exclude assignment template
Excluir coincidencias

Activo
Apagado

Anexo 2. Certificado de traducción del ABSTRACT



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA ESTATAL DEL CARCHI
FOREIGN AND NATIVE LANGUAGES CENTER

ABSTRACT- EVALUATION SHEET				
NAME: BASANTES QUELAL GEOVANNY SEBASTIAN				
DATE: July 10 th 2026				
Topic: "IoT System for Monitoring Vibrations in Hydroturbines at Hydroelectric Power Plants"				
MARKS AWARDED		QUANTITATIVE AND QUALITATIVE		
VOCABULARY AND WORD USE	Use new learnt vocabulary and precise words related to the topic	Use a little new vocabulary and some appropriate words related to the topic	Use basic vocabulary and simplistic words related to the topic	Limited vocabulary and inadequate words related to the topic
	EXCELLENT: 2 ☐	GOOD: 1,5 ☐	AVERAGE: 1 ☐	LIMITED: 0,5 ☐
WRITING COHESION	Clear and logical progression of ideas and supporting paragraphs.	Adequate progression of ideas and supporting paragraphs.	Some progression of ideas and supporting paragraphs.	Inadequate ideas and supporting paragraphs.
De	EXCELLENT: 2 ☐	GOOD: 1,5 ☐	AVERAGE: 1 ☐	LIMITED: 0,5 ☐
ARGUMENT	The message has been communicated very well and identify the type of text	The message has been communicated appropriately and identify the type of text	Some of the message has been communicated and the type of text is little confusing	The message hasn't been communicated and the type of text is inadequate
	EXCELLENT: 2 ☐	GOOD: 1,5 ☐	AVERAGE: 1 ☐	LIMITED: 0,5 ☐
CREATIVITY	Outstanding flow of ideas and events	Good flow of ideas and events	Average flow of ideas and events	Poor flow of ideas and events
	EXCELLENT: 2 ☐	GOOD: 1,5 ☐	AVERAGE: 1 ☐	LIMITED: 0,5 ☐
SCIENTIFIC SUSTAINABILITY	Reasonable, specific and supportable opinion or thesis statement	Minor errors when supporting the thesis statement	Some errors when supporting the thesis statement	Lots of errors when supporting the thesis statement
	EXCELLENT: 2 ☐	GOOD: 1,5 ☐	AVERAGE: 1 ☐	LIMITED: 0,5 ☐
TOTAL/AVERAGE	9 - 10: EXCELLENT 7 - 8,9: GOOD 5 - 6,9: AVERAGE 0 - 4,9: LIMITED			
		TOTAL 9		



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA ESTATAL DEL
CARCHI- FOREIGN AND NATIVE LANGUAGES
CENTER**

**Informe sobre el Abstract de Artículo Científico
o Investigación.**

Autor: BASANTES QUELAL GEOVANNY SEBASTIAN

Fecha de entrega del informe: July 10th 2026

El presente informe validará la traducción del idioma español al inglés si alcanza un porcentaje de: 9 – 10 Excelente.

Si la traducción no está dentro de los parámetros de 9 – 10, el autor deberá realizar las observaciones presentadas en el ABSTRACT, para su posterior presentación y aprobación.

Observaciones:

Después de realizar la revisión del presente abstract, éste presenta una apropiada traducción sobre el tema planteado en el idioma inglés. Según la rúbrica de evaluación de la traducción en inglés, ésta alcanza un valor de 9; por lo cual se valida dicho trabajo.

Atentamente



Validar únicamente en FirmatM.
Firmado electrónicamente por:
**JAIRO MAURICIO
GUEVARA ROSERO**

MSc. Jairo Guevara
Director de Centro Académicos
y de Formación
Complementaria

Anexo 3. Instrumento de validación

SECCIÓN 1: Información del Participante

1.1. Cargo o Rol Actual

1.2. Área de Especialización Principal

- Mantenimiento Mecánico/Predictivo
- Operaciones y Control de Generación
- Ingeniería Eléctrica/Electrónica
- Automatización y Control Industrial
- Gestión de Activos/Confiabilidad
- Seguridad Industrial
- Otro (Especifique)

1.3. Años de Experiencia en el Sector Hidroeléctrico

- Menos de 3 años
- a 7 años
- 8 a 15 años
- Más de 15 años

SECCIÓN 2: Situación Actual del Monitoreo de Vibraciones

2.1. ¿Qué tipo de estrategia de mantenimiento se aplica actualmente a las hidroturbinas en su planta?

- Reactivo (Falla y Corrección)
- Preventivo (Basado en Tiempo/Uso)
- Predictivo (Basado en Condición - CBM)
- Proactivo (Orientado a la Causa Raíz)

2.2. ¿Con qué frecuencia se realiza la toma de datos de vibración en las hidroturbinas críticas?

- Monitoreo Continuo (24/7)
- Semanalmente o con menos periodicidad

- Mensualmente
- Trimestralmente
- Anualmente o solo durante paradas programadas

2.3. Herramientas o tecnologías principales utilizadas para el monitoreo de vibraciones.

- Sensores permanentes cableados (Online)
- Analizadores portátiles de rutas (Off-line)
- Sistemas SCADA/DCS con parámetros básicos de vibración
- Termografía y/o Análisis de Aceite
- Sistemas basados en tecnología de Internet de las Cosas (IoT)
- No se realiza un monitoreo sistemático de vibraciones

2.4. Evalúe la conformidad actual de los niveles de vibración de las hidroturbinas respecto a la norma ISO 10816 (o equivalentes).

1, 2, 3, 4, 5

SECCIÓN 3: Problemas y Limitaciones del Método Actual

3.1. Grado de dificultad en la detección temprana de fallos mecánicos (e.g., desalineación, desbalance, holguras) con el sistema actual.

1, 2, 3, 4, 5

3.2. ¿Cuál es el principal inconveniente del método de monitoreo de vibraciones que utiliza su planta?

	Nada Limitante	Poco Limitante	Moderadamente	Muy Limitante	Críticamente Limitante
Costo de implementación de equipos					
Tiempo de respuesta ante una anomalía					
Riesgo de seguridad para el personal técnico					
Necesidad de personal altamente especializado					
Inconsistencia en la toma de datos (errores humanos)					

3.3. Evalúe la suficiencia de los datos históricos de vibración para realizar análisis de tendencias y modelado predictivo.

1, 2, 3, 4, 5

SECCIÓN 4: Necesidad de Monitoreo en Tiempo Real

4.1. ¿Considera que el monitoreo de vibraciones en tiempo real es fundamental para optimizar el rendimiento y la vida útil de las hidroturbinas?

Definitivamente Sí

Probablemente Sí

Indiferente

Probablemente No

Definitivamente No

4.2. Impacto de las fallas inesperadas de la hidroturbina en los siguientes aspectos operacionales. [Disponibilidad y Confiabilidad de la Central]

4.2. Impacto de las fallas inesperadas de la hidroturbina en los siguientes aspectos operacionales.

	Impacto Mínimo	Bajo Impacto	Impacto Moderado	Alto Impacto	Impacto Máximo
Disponibilidad y Confiabilidad de la Central					
Consumo de Energía (Eficiencia Operacional)					
Riesgo de Daño Catastrófico al Equipo					

4.3. Nivel de prioridad de las siguientes ventajas que ofrece un sistema de Monitoreo en Tiempo Real (RTMS) para la gestión del mantenimiento. [Mejora en la seguridad del personal (al evitar inspecciones manuales en zonas de riesgo)]

	Baja Prioridad	Media Prioridad	Alta Prioridad	Prioridad Crítica
Mejora en la seguridad del personal (al evitar inspecciones manuales en zonas de riesgo)				
Transición efectiva hacia un mantenimiento predictivo				

Reducción de paradas no programadas				
Diagnóstico remoto y acceso a expertos externos				

5.1. Evalúe su nivel de acuerdo con la implementación de un sistema IoT inalámbrico para el monitoreo de vibraciones.

	Baja Importancia	Baja Importancia	Baja Importancia	Baja Importancia
Funcionalidad y precisión en la captura y procesamiento de datos de vibración (Amplitud, Frecuencia)				
Fiabilidad en la disponibilidad continua del sistema y resistencia a fallas de comunicación				
Eficiencia de desempeño y latencia mínima en la transmisión de datos (Tiempo real)				
Seguridad en la protección de los datos operacionales de la central				
Usabilidad y facilidad de configuración, calibración y visualización de resultados				

5.3. ¿Cuáles son los principales desafíos que anticipa en la integración de tecnología IoT (sensores inalámbricos) en el ambiente industrial de su central hidroeléctrica?

- Interferencias electromagnéticas y fiabilidad de la red inalámbrica
- Costo inicial de adquisición e implementación
- Duración de la batería y mantenimiento de los nodos sensores
- Compatibilidad con la infraestructura de control (SCADA/DCS) existente
- Capacitación del personal técnico
- Preocupaciones de Ciberseguridad

5.4. ¿Qué impacto económico estima que tendría la reducción de un 15% en las fallas inesperadas de la hidroturbina gracias a la predicción temprana con IoT?

1, 2, 3, 4, 5

SECCIÓN 6: Observaciones Finales

6.1. Si su empresa considerara la implementación de un sistema de monitoreo de vibraciones basado en IoT, ¿qué factor sería el más determinante para la toma de decisión?

1.Costo-Beneficio (ROI)

2.Facilidad de Integración y Mantenimiento

3.Confiabilidad de los Datos y Algoritmos Predictivos

4.Soporte Técnico y Garantía

5.Cumplimiento normativo (ISO 20816)

6.2. Comentarios, sugerencias o consideraciones adicionales sobre el sistema IoT de monitoreo de vibraciones propuesto para la tesis.

Anexo 4. Carta de Satisfacción



CERTIFICADO DE SATISFACCIÓN

La Central Hidroeléctrica MIRA, representada por el Tecn. Santiago Ramos, certifica que los lineamientos propuestos para el desarrollo del proyecto denominado **"Sistema IoT para Monitorización de Vibraciones en Equipos Hidroeléctricos"**, desarrollado por el Sr. **Geovanny Basantes**, estudiante de Ingeniería en Computación, han sido revisados satisfactoriamente y cumplen con los requerimientos técnicos y funcionales establecidos para el análisis y monitoreo de condiciones operativas de los equipos de generación.

La propuesta desarrollada contempla la adquisición, transmisión y visualización de datos de vibración mediante tecnologías de Internet de las Cosas (IoT), orientadas al fortalecimiento de los procesos de supervisión y mantenimiento predictivo. Asimismo, considera mecanismos para el registro de información, monitoreo remoto y análisis de variables asociadas al comportamiento vibracional de los equipos hidroeléctricos.

Los lineamientos propuestos contribuyen al fortalecimiento de la gestión técnica y operativa, promoviendo alternativas tecnológicas para mejorar la confiabilidad, disponibilidad y seguimiento del estado de los activos. Además, se verificó que la propuesta responde a los requerimientos funcionales y no funcionales definidos para el proyecto, considerando aspectos relacionados con la trazabilidad de la información, interoperabilidad, escalabilidad y facilidad de uso.

Por lo expuesto, se deja constancia de la conformidad y satisfacción con el trabajo realizado, destacando la responsabilidad, compromiso y capacidad técnica demostrados por **Geovanny Basantes** durante las actividades de análisis, diseño y desarrollo del proyecto.

Para constancia de lo anteriormente expuesto, se firma el presente certificado en la ciudad de Ibarra, a los 11 días del mes de junio de 2026.

Tecn. Santiago Ramos
Tecnico Operativo Hidroeléctrica MIRA
Central Hidroeléctrica MIRA

Firma:



Anexo 5. Propuesta 1 técnica de implementación

El siguiente documento corresponde a la propuesta técnica preliminar elaborada para la implementación del sistema IoT de monitoreo de vibraciones en la central hidroeléctrica, donde se analizaron distintas alternativas tecnológicas y arquitecturas de comunicación industrial.



Propuesta de Implementación: Monitoreo de Vibraciones en Central Hidroeléctrica con ESP32 y Conectividad a la Nube (v2.0)

1. Introducción y Objetivo

Esta propuesta describe la implementación de un sistema de monitoreo de vibraciones utilizando el microcontrolador ESP32 con conectividad Wi-Fi para la adquisición, procesamiento y exposición de datos a una plataforma en la nube. El objetivo principal es proporcionar visibilidad en tiempo real del estado de vibración de la maquinaria crítica en la central hidroeléctrica, **utilizando específicamente el sensor PT580 Digital Vibration Switch**.

El propósito es evaluar la viabilidad de una solución ligera y conectada a la nube (Opción A: ESP32 + Nube) frente a una solución tradicional de integración de datos a través de PLC y software SCADA/middleware (Opción B: PLC Fanuc 90-30 + Kepware).

2. Alcance del Proyecto

El proyecto se centrará en el diseño, desarrollo e implementación de la solución **basada en ESP32 (Opción A)**.

Componentes de la Implementación (Opción A: ESP32)

1. **Adquisición de Datos:** Instalación del sensor PT580 Digital Vibration Switch en puntos clave de la maquinaria (e.g., turbinas, generadores).
2. **Procesamiento Local:** Uso del microcontrolador ESP32 para la lectura del voltaje analógico de vibración del PT580, calibración, filtrado y cálculo de métricas (e.g., RMS, picos).
3. **Conectividad y Exposición:** Conexión Wi-Fi del ESP32 para enviar los datos procesados a un servicio de nube (IoT Platform).
4. **Visualización (Nube):** Configuración de la plataforma de nube para almacenar, analizar y visualizar los datos en tiempo real y generar alertas.

3. Arquitectura del Sistema Propuesta (Opción A)

Capa	Componentes Clave	Protocolo	Descripción
Adquisición	Sensor PT580 Digital Vibration Switch	Analógico	Mide la magnitud de la vibración y genera una salida de voltaje.
Procesamiento y Borde	Módulo ESP32	Wi-Fi (MQTT/HTTP/S)	Lectura ADC del PT580, cálculo de métricas de vibración, y envío a la nube.
Exposición y Análisis	Plataforma IoT en la Nube	\\-	Almacenamiento, análisis, visualización y lógica de mantenimiento predictivo.

4. Hardware y Software Propuestos

4.1. Hardware

- **Microcontrolador:** ESP32-WROOM-32 (o variante robusta).
- **Sensor de Vibración:** PT580 Digital Vibration Switch.
 - *Nota de Integración:* El ESP32 deberá configurarse para leer el voltaje analógico (ADC) correspondiente a la magnitud de vibración del PT580. Es

crítica la calibración del rango de voltaje de salida del PT580 con el rango de entrada del ADC del ESP32 (típicamente 0-3.3V), pudiendo requerir un divisor de voltaje si la salida del PT580 excede los 3.3V.

- **Acondicionamiento de Señal:** Componentes pasivos (resistencias, capacitores) para asegurar la compatibilidad de voltaje y realizar un filtrado básico si fuera necesario.
- **Alimentación:** Fuente de poder industrial con protección contra sobretensiones y aislamiento.

4.2. Software/Firmware

El firmware del ESP32 contendrá:

- Rutinas de lectura del ADC para el PT580.
- Algoritmos de Procesamiento Digital de Señal (DSP) para cálculo de métricas relevantes (ej. RMS, Crest Factor).
- Gestión de la conexión Wi-Fi y protocolos de comunicación (MQTT o HTTP/S) para la plataforma en la nube.

5. Comparativa de Soluciones

A continuación, se presenta una tabla comparativa entre la solución propuesta (ESP32) y una solución tradicional de integración industrial (PLC + Kepware), considerando el sensor PT580.

Característica	Opción A: ESP32 + Nube (Solución Propuesta)	Opción B: PLC Fanuc 90-30 + Kepware (Solución Alternativa)
Adquisición del PT580	Lectura directa de la salida analógica (ADC) del ESP32.	La salida analógica del PT580 debe conectarse a un módulo de entrada analógica del PLC Fanuc 90-30.
Costo Inicial	Bajo. Se limita a microcontroladores, sensores y desarrollo de firmware.	Alto. Implica la adquisición y configuración del PLC (si no está disponible) y la licencia del software Kepware.

Característica	Opción A: ESP32 + Nube (Solución Propuesta)	Opción B: PLC Fanuc 90-30 + Kepware (Solución Alternativa)
Tiempo de Despliegue	Rápido. Menor dependencia de la infraestructura SCADA existente.	Medio/Largo. Depende de la configuración del PLC, la integración del Kepware (Drivers) y el sistema SCADA/Historiador.
Conectividad a la Nube	Nativa y directa. Protocolos optimizados (MQTT).	Indirecta. El Kepware debe actuar como pasarela (Gateway) para enviar los datos del PLC a la nube o a otro sistema.
Latencia de Datos	Muy baja, diseñado para tiempo real en IoT.	Depende del ciclo de escaneo del PLC y la tasa de muestreo del Kepware.
Flexibilidad (Escalabilidad)	Alta. Fácil de añadir nuevos nodos o cambiar métricas de procesamiento de forma remota.	Baja/Media. Limita por la capacidad del PLC y las licencias de tags del Kepware.
Seguridad	Depende de la implementación del firmware y la nube (certificados, TLS/SSL).	Depende de la seguridad de la red industrial (OT) y las políticas de acceso del PLC y Kepware.

crítica la calibración del rango de voltaje de salida del PT580 con el rango de entrada del ADC del ESP32 (típicamente 0-3.3V), pudiendo requerir un divisor de voltaje si la salida del PT580 excede los 3.3V.

- **Acondicionamiento de Señal:** Componentes pasivos (resistencias, capacitores) para asegurar la compatibilidad de voltaje y realizar un filtrado básico si fuera necesario.
- **Alimentación:** Fuente de poder industrial con protección contra sobretensiones y aislamiento.

4.2. Software/Firmware

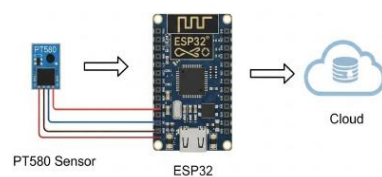
El firmware del ESP32 contendrá:

- Rutinas de lectura del ADC para el PT580.
- Algoritmos de Procesamiento Digital de Señal (DSP) para cálculo de métricas relevantes (ej. RMS, Crest Factor).
- Gestión de la conexión Wi-Fi y protocolos de comunicación (MQTT o HTTP/S) para la plataforma en la nube.

5. Comparativa de Soluciones

A continuación, se presenta una tabla comparativa entre la solución propuesta (ESP32) y una solución tradicional de integración industrial (PLC + Kepware), considerando el sensor PT580.

Característica	Opción A: ESP32 + Nube (Solución Propuesta)	Opción B: PLC Fanuc 90-30 + Kepware (Solución Alternativa)
Adquisición del PT580	Lectura directa de la salida analógica (ADC) del ESP32.	La salida analógica del PT580 debe conectarse a un módulo de entrada analógica del PLC Fanuc 90-30.
Costo Inicial	Bajo. Se limita a microcontroladores, sensores y desarrollo de firmware.	Alto. Implica la adquisición y configuración del PLC (si no está disponible) y la licencia del software Kepware.



6. Cronograma de Implementación (Opción A)

El siguiente cronograma aplica únicamente a la implementación de la solución basada en ESP32 y es preliminar.

Fase	Tareas Principales	Duración Estimada	Entregable Clave	Fecha de Inicio
I. Diseño	Especificación final de la integración del PT580. Diseño de la electrónica de acondicionamiento.	1 semana	File	Date
II. Desarrollo	Desarrollo del firmware (ADC, DSP, MQTT) para el ESP32 e integración física del PT580.	3 semanas	Módulo de monitoreo funcional.	Date
III. Nube	Configuración de la plataforma IoT, flujos de datos y dashboards de visualización y alertas.	2 semanas	Calendar event	Date

Fase	Tareas Principales	Duración Estimada	Entregable Clave	Fecha de Inicio
IV. Despliegue	Instalación de equipos en Place . Pruebas de campo y calibración del sensor.	2 semanas	Sistema operativo en sitio.	Date

7. Próximos Pasos

Para avanzar con la implementación de la Solución A (ESP32 + Nube) o para iniciar un estudio detallado de la Opción B (PLC + Kepware), se requiere lo siguiente:

1. Confirmar la versión exacta y la disponibilidad de módulos analógicos del PLC Fanuc 90-30.
2. Coordinar una reunión de inicio de proyecto (Kick-off Meeting) con Person para revisar los puntos exactos de instalación en la maquinaria.
3. Por favor, confirme su asistencia al evento Calendar event para discutir la calibración del sensor PT580.

Anexo 6. Carta de Compromiso



CARTA DE COMPROMISO DE COLABORACIÓN

Empresa: PEGASUS TECNOLOGÍAS S.A.
Dirección: _____
Teléfono: _____
Correo: _____

Lugar y fecha: _____

CARTA DE COMPROMISO DE COLABORACIÓN PARA PROYECTO DE TITULACIÓN

Por medio de la presente, la empresa **Pegasus Tecnologías S.A.**, representada por el/la Sr./Sra. Cristian Aguirre, en calidad de representante, expresa formalmente su **compromiso de colaboración** con el estudiante **Geovanny Basantes**, de la **Universidad Politécnica Estatal del Carchi (UPEC)**, en el desarrollo de su proyecto de tesis.

1. Tema del Proyecto de Titulación

"Diseño e implementación de un sistema de monitoreo IoT para la detección y análisis de vibraciones en hidroturbinas en centrales hidroeléctricas", a desarrollarse en coordinación con la Hidroeléctrica Mira.

2. Objetivo de la Colaboración

Pegasus Tecnologías S.A. se compromete a brindar apoyo técnico y consultoría en las áreas relacionadas con:

- Integración de sensores IoT para medición de vibraciones.
- Comunicación inalámbrica y protocolos adecuados para entornos industriales.
- Asesoría en arquitectura de sistemas IoT para entornos energéticos.
- Revisión técnica de propuestas de diseño del estudiante.



- Acompañamiento en pruebas pilotos en coordinación con la Hidroeléctrica Mira, según disponibilidad.

3. Alcance de la Colaboración

La empresa declara que:

- La participación será de carácter **técnico y consultivo**, sin implicar obligaciones laborales.
- El apoyo estará sujeto a la disponibilidad del personal asignado.
- La información compartida será manejada bajo criterios de confidencialidad.
- No se autoriza el uso de información sensible o reservada sin autorización previa.

4. Compromiso Institucional

Pegasus Tecnologías S.A. reconoce la importancia del desarrollo académico y la vinculación con proyectos reales en el sector energético, motivo por el cual expresa su disposición a colaborar en las actividades pertinentes para el avance del proyecto de titulación.

5. Vigencia

El presente compromiso tendrá vigencia desde la firma del documento hasta la culminación del proyecto de tesis o hasta que alguna de las partes decida finalizar la colaboración mediante notificación escrita.

Firma del Representante de Pegasus Tecnologías S.A.

Nombre: _____

Cargo: _____

Firma: _____

Sello: _____



Firma del Estudiante

Nombre: Geovanny Basantes

Cargo: Estudiante de carrera de Computación

Firma: _____

Firma del Tutor Académico (UPEC)

Nombre: MSc. Vantroy Jimenez

Cargo: Docente de la carrera de Computación

Firma: _____

MANUAL DE USUARIO GENERAL

HidroMira

1. Qué hace el sistema

HidroMira es una solución tecnológica diseñada para el monitoreo y análisis vibracional de maquinaria rotativa e hidroturbinas. El sistema realiza la adquisición continua de variables mecánicas, almacena registros históricos para auditorías técnicas, clasifica de manera automática el estado operativo del activo según los lineamientos de la norma internacional **ISO 20816-3**, y cuenta con un motor de reglas capaz de despachar alertas en tiempo real a través de pantallas locales, notificaciones por correo electrónico y pasarelas de servicios IoT.

2. Qué puede ver el usuario

La plataforma interactiva se subdivide en tres componentes clave que facilitan la supervisión y el análisis de la planta:

Monitor en tiempo real

- **Lectura continua:** Visualización ininterrumpida de las magnitudes de vibración en los ejes X, Y y Z.
- **Correlación analítica:** Cálculo del valor global RMS de severidad correlacionado dinámicamente con las RPM del activo.
- **Clasificación ISO 20816-3:** Identificación del estado de salud de la máquina mediante un código cromático intuitivo.
- **Gráficas en vivo:** Flujo de datos visuales en tiempo real para la detección rápida de transitorios.
- **Persistencia de datos:** Salvaguarda automática y periódica de lecturas en el repositorio histórico.

Panel de análisis

- **Análisis histórico profundo:** Extracción y procesamiento de tendencias directamente desde el archivo central `historical_data.json`.
- **Estadísticas descriptivas:** Agregaciones matemáticas del comportamiento vibracional desglosadas por periodos específicos de tiempo.
- **Comportamiento por eje:** Gráficos avanzados individuales para evaluar desviaciones mecánicas direccionales.
- **Detección de anomalías:** Herramientas estadísticas básicas para aislar picos atípicos en las lecturas.

- **Gestión de planta:** Visualización de fichas técnicas de la turbina y acceso al registro histórico de mantenimiento de la central.
- **Correlación operativa:** Análisis de la relación directa entre los niveles de vibración y el rendimiento general del activo.

API REST (Interfaz de Programación)

- **Consulta actual:** Endpoint dedicado a la lectura en tiempo real del estado general del sistema.
- **Últimas lecturas:** Extracción ágil de los últimos lotes de telemetría procesados.
- **Rangos temporales:** Filtros avanzados para consultas de históricos delimitadas por fechas y horas.
- **Reportes resumidos:** Estadísticas consolidadas y listados detallados de alertas ordenadas por zona de criticidad.

3. Cómo interpretar las zonas ISO

El sistema estratifica la severidad global de la vibración basándose en los límites normativos internacionales. Los estados y su equivalencia visual en el software se estructuran de la siguiente manera:

Zona / Estado	Representación Cromática	Significado Técnico y Operativo
Zona A	Verde	Operación óptima y normal. Valores típicos de maquinaria nueva, reacondicionada o perfectamente alineada.
Zona B	Amarillo	Condición aceptable para operación industrial continua a largo plazo sin restricciones. Se recomienda vigilancia de rutina.
Zona C	Naranja	Condición restringida. Indica insatisfacción o desgaste moderado. Requiere programación de una corrección técnica en la próxima parada.
Zona D	Rojo	Condición crítica e inaceptable. Riesgo inminente de daño catastrófico sobre el activo. Exige protocolo de intervención urgente.

4. Qué significa cada alerta

El motor de reglas evalúa constantemente la telemetría entrante y activa alertas automatizadas según el nivel de riesgo detectado:

Alerta Amarilla (Vigilancia Operativa)

Se dispara de manera automática al momento en que las lecturas de vibración RMS penetran de forma continua en los rangos de la Zona B. Esta alerta actúa como un aviso preventivo para intensificar el seguimiento del activo. Si la opción de notificaciones remotas se encuentra habilitada, el backend despachará un correo técnico informando el cambio de estado.

Alerta Roja (Condición Crítica)

Se activa inmediatamente cuando el sistema procesa magnitudes pertenecientes a la Zona D o ante una condición imprevista de alta severidad. Esta alerta notifica una probabilidad elevada de fallo estructural, recomendando el paro controlado de la maquinaria. El sistema automatiza el despacho de correos y activa de forma paralela todos los canales de comunicación IoT configurados.

5. Cómo iniciar el sistema

Para la puesta en marcha de la solución de software, se contemplan dos metodologías de ejecución según el entorno de trabajo:

Opción recomendada: Terminales independientes

Se sugiere abrir dos consolas de comandos independientes para arrancar de forma separada el módulo supervisor en tiempo real y la plataforma analítica de históricos:

```
# Terminal 1: Lanzamiento del Monitor en Tiempo Real
python -m streamlit run monitor_realtime.py --server.port 8503

# Terminal 2: Lanzamiento del Panel de Análisis Histórico
python -m streamlit run app.py --server.port 8502
```

Opción automatizada mediante scripts

Para simplificar el despliegue rápido en entornos operativos, se incluyen archivos de automatización nativos:

- `launch_windows.ps1`: Script diseñado para la inicialización ordenada de las herramientas en entornos PowerShell de Windows.
- `launch_all.bat`: Archivo por lotes ejecutable como acceso directo rápido para operador.

6. Requisitos previos

Antes de ejecutar los comandos de inicio, asegúrese de cumplir estrictamente con la siguiente lista de verificación técnica:

1. **Entorno de ejecución:** Contar con una instalación válida de Python en el sistema operativo.
2. **Dependencias de software:** Instalar la totalidad de las librerías requeridas ejecutando el comando `pip install -r requirements.txt`.
3. **Conectividad física:** Verificar que el hardware de adquisición (sensor) se encuentre firmemente conectado al puerto de comunicación correspondiente (ej. puertos COM).
4. **Aislamiento de puertos:** Asegurar que ninguna otra aplicación local mantenga ocupado o bloqueado el puerto serial asignado al sensor.
5. **Credenciales IoT:** Configurar correctamente los parámetros de autenticación si se requiere el envío de correos SMTP o la sincronización con servicios remotos.

7. Datos y archivos importantes

La estructura lógica de la plataforma se sustenta sobre tres archivos principales que resguardan la configuración y la telemetría:

- `historical_data.json`: Repositorio base centralizado donde se guardan cronológicamente las series temporales de las pruebas para su posterior auditoría en el panel analítico.
- `iot_config.py`: Archivo de configuración maestro para la gestión de las alertas externas, variables de red, tokens y direccionamiento de servicios remotos.
- `registers.json`: Archivo auxiliar destinado al registro de logs operacionales y flujos internos de control del software.

8. Funcionalidades esenciales

Existen ciertos comportamientos operativos de la plataforma que el usuario debe conocer a cabalidad para una correcta interpretación de los resultados:

- **Modo Demostración:** El monitor en tiempo real posee la versatilidad de operar tanto con datos capturados en vivo por instrumentación física como con simulaciones controladas de demostración técnica.
- **Automatización del Historial:** La persistencia de datos es completamente transparente para el operario; el monitor escribe de forma automática los registros de severidad para asegurar la trazabilidad.
- **Dependencia del Repositorio:** Las pantallas del panel de análisis histórico se poblarán únicamente si el archivo `historical_data.json` contiene registros previamente guardados.
- **Configuración SMTP:** El correcto funcionamiento de las alertas remotas por email está condicionado a la correcta parametrización del servidor SMTP (como contraseñas de aplicación en cuentas Gmail).

- **Ecosistema de Integración:** La arquitectura de red del sistema es abierta y escalable, lo que permite su acoplamiento nativo con plataformas como ThingSpeak, brókers MQTT, Webhooks industriales y consumo vía API REST.
- **Acceso Remoto Temporal:** Mediante herramientas como ngrok, la interfaz local puede ser expuesta de manera segura hacia la red externa para auditorías técnicas remotas de corta duración.

9. Recomendaciones de uso

- Utilizar de forma continua el **Monitor en Tiempo Real** durante los turnos operativos para una supervisión visual directa de la máquina.
- Programar revisiones periódicas en el **Panel de Análisis** para identificar tendencias de desgaste, facilitando la planificación del mantenimiento basado en la condición.
- Comprobar de manera obligatoria la asignación y disponibilidad del puerto COM físico antes de inicializar el software de supervisión en tiempo real.
- Validar los canales de correo electrónico y pasarelas IoT mediante pruebas controladas previas antes de delegar la seguridad predictiva de la planta al entorno de producción.

10. Problemas comunes y soluciones

A continuación se tabulan las incidencias típicas en la plataforma junto a sus respectivas acciones correctivas:

Incidencia Detectada	Procedimiento de Solución Sugerido
Fallo en el reconocimiento del hardware No aparece el sensor en el monitor	Verificar la conexión física del cable serial. Validar en el administrador de dispositivos el puerto asignado (ej. COM3/COM4) y asegurar que ninguna otra aplicación esté bloqueando el canal.
Error de inicialización de Streamlit La aplicación no abre en el navegador	Confirmar que el entorno virtual de Python se encuentre correctamente activado y verificar la correcta instalación del archivo de dependencias del sistema.
Interrupción en el envío de correos técnicos Las alertas críticas no llegan al destinatario	Revisar en <code>iot_config.py</code> que la variable <code>EMAIL_ENABLED</code> esté en modo verdadero. Verificar la vigencia de la contraseña de aplicación y la dirección de los destinatarios.
Ausencia de datos en el panel analítico Gráficas históricas vacías	Asegurarse de haber ejecutado el monitor en tiempo real con anterioridad. El panel de análisis requiere que el monitor haya guardado de forma continua las tramas de datos para poder estructurar los gráficos.

Especificación de Módulos y Arquitectura de Software

1. Objetivo del Proyecto

HidroMira se estructura como una solución de software distribuida y modular enfocada en la monitorización continua de vibración para maquinaria rotativa e hidroturbinas. El sistema integra de manera secuencial capas lógicas de adquisición de datos por hardware, visualización analítica en tiempo real a nivel local, persistencia estructurada de datos históricos, despacho automatizado de alertas perimetrales bajo servicios IoT y una interfaz de interconexión externa expuesta mediante una arquitectura de API REST y túneles seguros de comunicación remota.

2. Módulos Principales (Estructura Base del Sistema)

Estos componentes conforman el núcleo operativo de la plataforma, responsabilizándose de los flujos de telemetría física, visualización web del supervisor y lógica analítica del negocio:

Archivo fuente	Rol de componente	Descripción técnico-funcional
<code>monitor_realtime.py</code>	Monitor en tiempo real	Módulo primario de adquisición. Realiza lecturas continuas del hardware sensor vía protocolo Modbus RTU (Puerto de control COM3), efectúa el cálculo directo de severidad global RMS, estratifica los umbrales bajo la norma ISO 20816-3, correlaciona las RPM operativas, gestiona la persistencia histórica y distribuye tramas IoT.
<code>app.py</code>	Dashboard analítico histórico	Plataforma web de auditoría basada en entorno visual. Consume de manera secuencial los registros cronológicos persistidos para la generación de tendencias dinámicas, curvas de comportamiento analítico frente a mantenimiento y comparativas de rendimiento del activo.
<code>web_hidro_pro.py</code>	Monitor analítico avanzado	Subsistema alternativo de telemetría de alta frecuencia. Incorpora un hilo de ejecución secundario en segundo plano para interactuar de forma nativa mediante comunicación serial con hardware WitMotion/ WTVB01-485 en el puerto COM4, gestionando colas lógicas de datos y soporte para bróker MQTT.
<code>api_rest.py</code>	Servicio de API REST	Capa de abstracción de datos implementada bajo framework Flask. Expone de manera estructurada los repositorios históricos y variables de telemetría instantánea mediante peticiones estructuradas para el consumo por clientes de terceros o sistemas remotos.
<code>iot_handler.py</code>	Núcleo de integración IoT	Módulo encargado de encapsular la lógica de transmisión hacia entornos distribuidos remotos, gestionando el despacho asíncrono de eventos hacia ThingSpeak, brókers MQTT, Webhooks perimetrales, mensajería automática y pasarelas de correo SMTP.
<code>iot_config.py</code>	Configuración lógica centralizada	Archivo maestro de parametrización. Centraliza de forma aislada las credenciales de seguridad, direcciones IP de servidores, variables de puertos de red, tokens de acceso y los umbrales operativos para la activación del motor de reglas del sistema.

3. Módulos de Soporte y Utilidades

Componentes auxiliares diseñados para facilitar las tareas de calibración de campo, emulación técnica y liberación física de recursos del servidor:

Archivo fuente	Rol de componente	Descripción técnico-funcional
<code>generate_demo_data.py</code>	Emulador de telemetría	Crea flujos simulados de tramas lógicas de vibración para pruebas de software en laboratorios aislados donde no se dispone de instrumentación física acoplada.
<code>generate_historical_data.py</code>	Poblador de base de datos	Construye y rellena el repositorio centralizado de series históricas con registros simulados de largo plazo para validar la velocidad de respuesta de las consultas lógicas.
<code>diagnostico_sensor.py</code>	Herramienta de diagnóstico	Ejecuta pruebas de comunicación a bajo nivel sobre el bus serial para validar la tasa de baudios, la paridad y la integridad de la conexión eléctrica del sensor.
<code>verificar_hardware.py</code>	Validador físico de hardware	Revisa de forma integral el estado lógico de los adaptadores y verifica la presencia activa de los transductores de medición antes de iniciar el supervisor.
<code>cerrar_com3.py</code>	Recuperador de puertos seriales	Script de contingencia para forzar la liberación e interrupción del puerto COM3 en caso de bloqueos por hilos huérfanos del sistema operativo.
<code>realtime.py</code>	Variante de compatibilidad	Código legado y de referencia histórica útil para comparativas lógicas de visualización y pruebas de rendimiento de arquitecturas anteriores.

4. Scripts de Validación y Pruebas Tecnológicas

Herramientas de depuración utilizadas para auditar de forma aislada la efectividad de las alertas y la comunicación con servicios remotos:

Archivo fuente	Objetivo específico de la prueba técnica
<code>test_email.py</code>	Audita la conexión SMTP segura con los servidores de correo y la autenticación cifrada.
<code>test_alert_email.py</code>	Prueba de esfuerzo del motor de reglas simulando transiciones críticas hacia alertas Amarillas y Rojas.
<code>test_sensor_simple.py</code>	Verificación elemental de recepción de tramas crudas desde el transductor.
<code>test_sensor_auto.py</code>	Evaluación automatizada de estabilidad de lectura continua bajo regímenes prolongados de operación.
<code>test_thingspeak.py</code>	Valida la escritura correcta de campos de datos numéricos en los canales en la nube de ThingSpeak.
<code>test_tago.py</code>	Comprueba la compatibilidad de transmisión con la plataforma de análisis de datos Tago IO o similares.

5. Scripts de Despliegue y Acceso Remoto

Automatizaciones estructuradas para agilizar la puesta en marcha de la infraestructura y permitir la telemetría remota:

Archivo fuente	Descripción del comportamiento de despliegue
<code>launch_windows.ps1</code>	Script de automatización en PowerShell que valida dependencias de librerías, inicializa el entorno virtual y arranca de forma paralela la API y los tableros analíticos.
<code>launch_all.bat</code>	Script por lotes ejecutable que actúa como puente nativo de un solo clic para operadores de Windows, inicializando las directivas de PowerShell.
<code>exponer_streamlit_ngrok.ps1</code>	Automatiza la apertura de un túnel seguro ngrok asociado al puerto de visualización de Streamlit para inspección remota.
<code>exponer_ngrok.ps1</code>	Variante interactiva parametrizada que permite al administrador seleccionar manualmente qué endpoint (API o Monitor) publicar en internet.

6. Archivos de Datos y Documentación

Repositorios de persistencia lógica y guías procedimentales embebidas dentro de la solución:

- `historical_data.json` : Base de datos estructurada en formato secuencial donde se registran las marcas temporales y magnitudes RMS.
- `registers.json` : Log analítico complementario destinado a la auditoría interna de fallas lógicas y eventos del sistema.

- `requirements.txt` : Manifiesto de dependencias que declara las versiones exactas de las librerías necesarias para la repetibilidad del proyecto.
- `INSTRUCCIONES.md` : Guía maestra con los lineamientos procedimentales de inicialización y control operativo.
- `GUIA_IOT.md` : Manual técnico para el aprovisionamiento y escalamiento de canales de transmisión en la nube.
- `CONFIGURAR_GMAIL.md` : Instrucciones específicas de ciberseguridad para habilitar tokens de aplicación seguros SMTP.
- `CONFIGURAR_NGROK_AUTHTOKEN.md` y `EXPONER_CON_NGROK.md` : Documentación analítica para la gestión de tokens y despliegue público seguro en internet.

7. Flujo General de Información Técnica

La secuencia lógica de transmisión, persistencia y análisis de la solución sigue una trayectoria lineal automatizada estructurada en cinco fases operativas:

- 1 Los módulos de adquisición de datos en el borde (`monitor_realtime.py` o `web_hidro_pro.py`) extraen cíclicamente las variables físicas de vibración desde los transductores industriales.
- 2 La información recolectada se procesa y se escribe de manera estructurada con marcas temporales en el archivo histórico compartido (`historical_data.json`).
- 3 El dashboard supervisor analítico (`app.py`) interroga el archivo histórico de forma asíncrona para actualizar los gráficos de tendencias, validación normativa y correlación de rendimiento.
- 4 El componente de servicios web (`api_rest.py`) expone el repositorio histórico bajo formato JSON mediante endpoints seguros para permitir auditorías externas.
- 5 De forma paralela, el núcleo IoT (`iot_handler.py`) procesa las tramas bajo un motor de reglas interno y despacha de forma asíncrona las alertas ante cualquier desviación crítica en la central.

8. Observaciones de Ingeniería

- La arquitectura de software combina eficientemente la adquisición en tiempo real a baja latencia con la analítica histórica diferida sobre una base compartida.
- Se preserva la redundancia técnica de la planta mediante el soporte dual de adquisición: un módulo principal acoplado por Modbus RTU (COM3) y una variante avanzada optimizada mediante hilos para lectura serie directa (COM4).
- Toda la lógica analítica predictiva perimetral se centraliza de manera exclusiva en `iot_config.py` , aislando las variables de entorno de la infraestructura central de software para facilitar actualizaciones rápidas sin riesgo de regresión de código.