

POTENCIANDO LA CONFIABILIDAD CON INTELIGENCIA ARTIFICIAL: OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS AL IMPLEMENTAR MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN LÍNEA

Marcos Manzano, MAPER Tecnología, mmanzano@mapertech.com

Sinopsis

Introducción

El mantenimiento predictivo ha evolucionado significativamente con la incorporación de tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) e Inteligencia Artificial (IA). Sin embargo, la implementación exitosa de estas tecnologías en entornos industriales presenta desafíos únicos que van más allá de la simple instalación de sensores, algoritmos y plataformas de monitoreo.

En el contexto del mantenimiento predictivo (PdM), el análisis de vibraciones se ha consolidado como la técnica más utilizada y establecida. Esta tecnología ha demostrado su efectividad durante décadas y, en la actualidad, está experimentando un crecimiento exponencial en su adopción, impulsada por los avances en sensorización remota, análisis de datos automatizado y la integración con plataformas digitales.

El panorama actual del monitoreo predictivo revela una realidad compleja donde una proporción significativa de activos críticos en una planta (entre 50% y 70%) presenta dificultades para ser monitoreados mediante técnicas estándar. Cargas de trabajo variables, bajas RPM, entornos hostiles, zonas sin conectividad, activos móviles, activos con accionamiento intermitente, son algunos ejemplos de lo encontrado en cualquier ambiente industrial.

Esta situación se agrava cuando se suman también la diversidad de tecnologías disponibles para su monitoreo, sus distintas formas de comercialización, las normativas que nos regulan y distintos interlocutores más allá de confiabilidad y mantenimiento. La multiplicidad de stakeholders involucrados en la toma de decisiones técnicas incluye desde gerencias de mantenimiento hasta departamentos de IT, compras, seguridad industrial y operaciones, cada uno con criterios y prioridades diferentes.

La combinación de un sinnúmero de aplicaciones tecnológicas disponibles con activos complejos de monitorear crean un escenario que suelen derivar en parálisis a la hora de decidir o tomar decisiones equivocadas que generan no solo pérdida de dinero y tiempo sino también la confianza en las tecnologías. Lo que se vuelve una barrera adicional para futuras implementaciones, creando un ciclo negativo que puede comprometer la adopción de tecnologías a largo plazo.

Por tanto, resulta fundamental establecer un marco metodológico que permita navegar esta complejidad de manera estructurada, minimizando riesgos y maximizando las probabilidades de éxito en la implementación de sistemas de mantenimiento predictivo. Este enfoque debe considerar no sólo

los aspectos técnicos del monitoreo de vibraciones y otras tecnologías PdM, sino también los factores organizacionales, económicos y operativos específicos del entorno industrial.



Desarrollo

Los Cinco Factores Críticos del Éxito

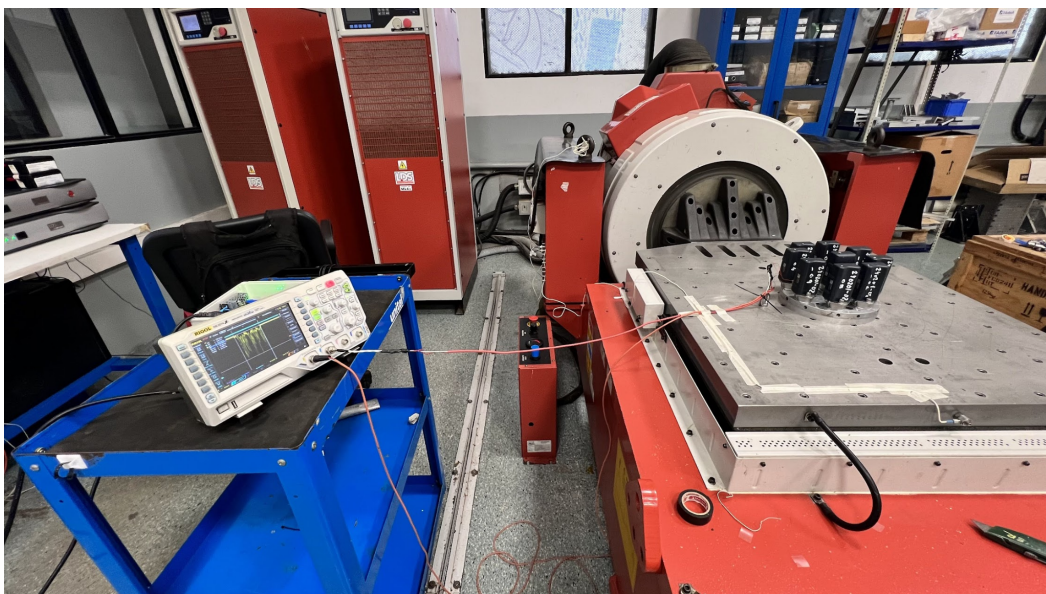
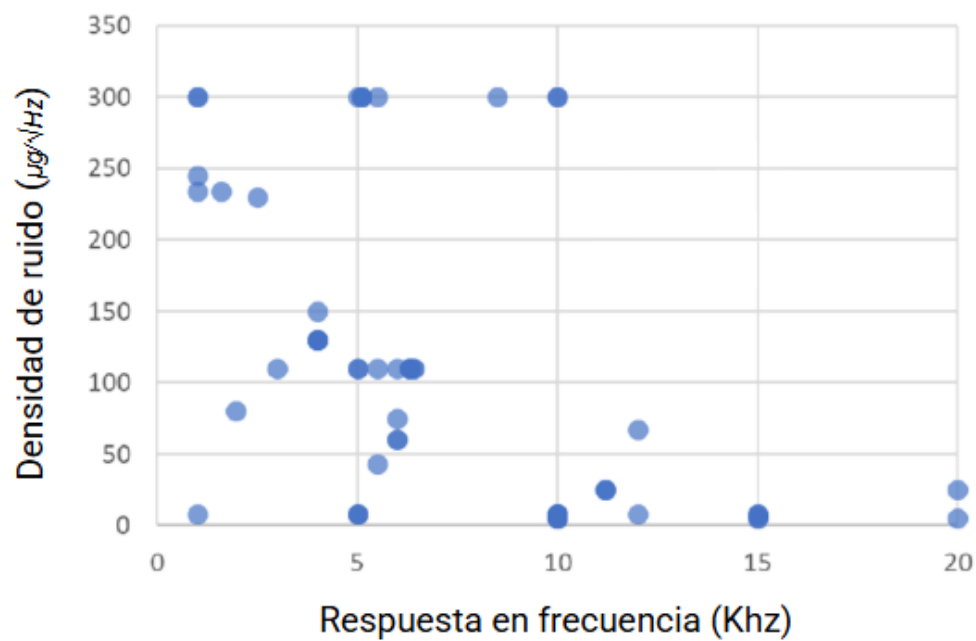
1. Calidad de los Datos recopilados

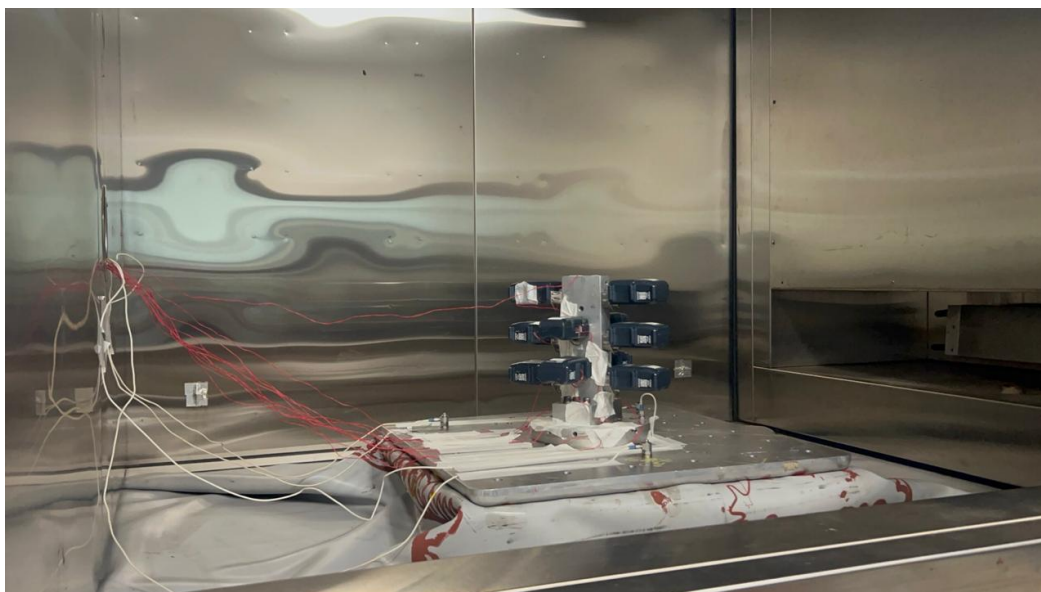
La calidad de los datos constituye el fundamento de cualquier sistema de mantenimiento predictivo efectivo. Sin datos precisos y confiables, incluso los algoritmos más sofisticados fallarán en su propósito de detectar anomalías y predecir fallas. Los parámetros críticos que determinan esta calidad incluyen:

- Respuesta en frecuencia: Medida en kilohertz (kHz), debe ser adecuada para capturar las características dinámicas del equipo monitoreado. Se recomienda un valor ideal superior a 10 kHz, siendo aceptable cualquier valor superior a 6 kHz para la mayoría de aplicaciones industriales estándar.
- Densidad de ruido: Expresada en microgramos por raíz cuadrada de hertz ($\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$), debe mantenerse en niveles que permitan la detección confiable de anomalías. Mientras menor sea la densidad de ruido, mejor será la capacidad del sistema para identificar señales débiles que indiquen el desarrollo de fallas incipientes. El valor óptimo debe ser inferior a 100 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$.
- Rango de medición: Expresado en gravedades (g), es un parámetro sumamente importante, aunque la mayoría de sensores comerciales lo cubren adecuadamente. Como mínimo, debería ser aceptable un rango superior a 16G, incrementándose a 32G o más para aplicaciones con elevados niveles de ruido mecánico, tales como compresores de tornillo, sopladores centrífugos y equipos similares que generan vibraciones de alta amplitud durante su operación normal.
- Exigencias del entorno operativo: Se debe considerar cuidadosamente las condiciones ambientales donde operará el sensor, incluyendo:

- Resistencia a agentes químicos presentes en el proceso industrial
- Temperatura de operación adecuada para las condiciones específicas del equipo
- Grado de estanqueidad (clasificación IP) para evitar el ingreso de agua y polvo que puedan comprometer la integridad del sensor
- Certificaciones apropiadas para zonas con atmósferas explosivas (ATEX, IECEx) cuando sea requerido por las condiciones de seguridad del área

La selección inadecuada de cualquiera de estos parámetros puede resultar en mediciones erróneas o la no detección de fallas reales que podrían derivar en paradas no programadas o accidentes.





2. Robustez de la infraestructura

Un error típico y recurrente en la implementación de sistemas de monitoreo predictivo es avanzar con un piloto utilizando pocos sensores, validar exitosamente una tecnología en pequeña escala, pero luego experimentar fallas cuando se intenta escalar el proyecto. Este fenómeno sucede frecuentemente porque la infraestructura inicial no fue diseñada con la robustez necesaria para soportar una implementación masiva y las demandas operativas reales del entorno industrial.

La confiabilidad del sistema de sensores impacta directamente la efectividad del programa de mantenimiento predictivo. Una infraestructura deficiente no solo compromete la calidad de los datos, sino que puede generar falsas alarmas, pérdida de información crítica y, en última instancia, la pérdida de confianza en el sistema por parte de los usuarios finales.

Los aspectos clave para garantizar una infraestructura robusta incluyen:

Tipo de montaje y punto de medición: La selección del método de montaje debe considerar tanto las características del activo como la criticidad de la medición. Las opciones disponibles incluyen montaje roscado, adhesivo, adhesivo con base magnética e imantado directo.

Para activos estáticos, se recomienda el montaje adhesivo con base, ya que al ser un punto fijo evita desplazamientos que afecten la repetibilidad de las mediciones, sin ser invasivo para la máquina (como sí lo es el montaje roscado). La presencia de una base permite orientar correctamente el sensor y desmontarlo fácilmente para tareas de mantenimiento, incluso facilita tener activos de respaldo con las bases ya preparadas. Para activos móviles, el montaje roscado es preferible para evitar que el sensor se desmonte durante la operación.

Independientemente del método seleccionado, es fundamental que el sensor esté colocado en el punto correcto de medición. De nada sirve un sensor con excelentes prestaciones técnicas y capacidades de procesamiento si está montado en una ubicación incorrecta que no represente adecuadamente la condición del equipo.

Sistema de notificaciones de infraestructura: El sistema debe implementar un esquema robusto de notificaciones que proporcione acciones concretas cuando ocurran eventos críticos de infraestructura. Esto incluye notificaciones cuando un sensor está offline, se desmonta (por caída accidental o remoción intencional), o cuando su batería está próxima a agotarse. Es crucial que el sistema no se limite a enviar una única notificación, sino que implemente recordatorios posteriores hasta que se resuelva la situación, evitando que los problemas de infraestructura pasen desapercibidos.

Almacenamiento local de datos: En caso de pérdida temporal de conectividad, tanto los sensores como los gateways deben contar con capacidad de almacenamiento local que evite la pérdida de mediciones críticas. Esta funcionalidad es esencial porque, en la práctica, las conexiones son más intermitentes de lo que inicialmente se considera, no necesariamente por mal funcionamiento, sino por la naturaleza inherente de las tecnologías de comunicación inalámbrica en entornos industriales complejos.

Robustez en la transmisión de datos: Uno de los mayores desafíos en la implementación de sistemas de monitoreo predictivo es garantizar la transmisión confiable de datos desde los sensores hasta la plataforma de análisis en la nube.

La mayoría de los sistemas utiliza un repetidor o Gateway como elemento intermedio. Para la comunicación con internet, las opciones incluyen:

- Redes celulares (3G/4G/5G): Si existe buena cobertura de señal, es la opción predilecta por su facilidad de implementación. Sin embargo, si la señal es intermitente, se debe considerar otra alternativa, ya que la estabilidad de conexión es demasiado crítica para el éxito del proyecto.
- Comunicación satelital: Ofrece cobertura universal pero representa un costo significativamente mayor.
- WiFi corporativo: Requiere coordinación e involucramiento del departamento de TI para su implementación.
- Ethernet: También requiere la participación activa del departamento de TI para establecer la conectividad.

Para la comunicación entre sensores y gateways, las tecnologías disponibles incluyen:

- Bluetooth: Permite transmitir grandes volúmenes de datos pero con alcance limitado.
- Radiofrecuencia 915 MHz: Ofrece un buen equilibrio entre volumen de datos y alcance de transmisión.
- Tecnologías de largo alcance (LoRaWAN o Sigfox): Proporcionan excelente alcance pero están limitadas a bajos volúmenes de datos, siendo ideales para aplicaciones que requieren transmisión esporádica de información crítica.

La selección de la arquitectura de comunicación debe basarse en un análisis detallado de las condiciones específicas del sitio, considerando factores como la distribución física de los activos, las interferencias electromagnéticas presentes, las políticas de seguridad informática de la organización y los recursos disponibles para la implementación y mantenimiento del sistema.

3. Procesamiento de los datos

El procesamiento inteligente de los datos de vibración constituye el elemento diferenciador entre un sistema de monitoreo básico y una solución verdaderamente predictiva. La capacidad de transformar grandes volúmenes de información en insights accionables determina en gran medida el éxito o fracaso de la implementación del sistema de mantenimiento predictivo.

Optimización del momento de medición: Es fundamental que el sensor capture datos en el momento indicado para optimizar tanto el consumo de batería como la calidad y repetibilidad de la información recopilada. Un sistema estándar mal configurado desperdicia recursos energéticos enviando espectros de frecuencia de motores apagados o en condiciones operativas no representativas, reduciendo significativamente la vida útil de la batería y generando datos de escaso valor analítico.

Para maximizar la eficiencia, es esencial que el sensor pueda detectar automáticamente cuando los equipos están en funcionamiento y diferenciar entre distintas condiciones operativas como variaciones de carga, RPM, y modos de operación. Esta capacidad de reconocimiento inteligente no solo preserva la energía del sistema, sino que garantiza que las mediciones se tomen bajo condiciones consistentes y comparables, elemento crucial para la detección temprana de anomalías y el seguimiento de tendencias a largo plazo.

Procesamiento inteligente de datos: Con los volúmenes masivos de información que genera un sistema de monitoreo online, resulta imprescindible contar con el soporte de algoritmos avanzados de detección, machine learning, estadística avanzada e inteligencia artificial. Estas herramientas computacionales deben ser capaces de identificar patrones sutiles, detectar cambios incipientes en las condiciones de los equipos y orientar el foco de atención hacia las áreas que requieren intervención prioritaria.

Un sistema de procesamiento robusto debe ir más allá de la simple detección de anomalías. Idealmente, debe proporcionar recomendaciones específicas sobre acciones a tomar, estimaciones de vida útil remanente y priorizaciones basadas en criticidad y riesgo. Sin embargo, es fundamental establecer un proceso de retroalimentación continua donde los especialistas revisen y validen las salidas del sistema hasta alcanzar un nivel de certeza aceptable en sus predicciones y recomendaciones.

Acceso a datos crudos para supervisión: A pesar de los avances en inteligencia artificial, la supervisión humana sigue siendo un componente irremplazable del proceso de análisis. Cuando se requiere retroalimentar el sistema y tomar acciones correctivas o preventivas, es altamente recomendable que los analistas tengan acceso a los datos crudos para aplicar inteligencia humana complementaria a la artificial.

Esta combinación sinérgica permite validar los hallazgos automáticos, identificar falsos positivos, detectar patrones que podrían escapar a los algoritmos, y realizar ajustes finos en los modelos predictivos. La capacidad de revisar formas de onda temporales, espectros de frecuencia y tendencias históricas proporciona al especialista las herramientas necesarias para tomar decisiones informadas y mejorar continuamente la precisión del sistema.

El acceso a datos crudos también facilita la investigación de causas raíz cuando ocurren fallas, permitiendo un aprendizaje organizacional que retroalimenta tanto los algoritmos como los procedimientos operativos. Esta transparencia en los datos fortalece la confianza del usuario en el sistema y acelera el proceso de maduración de la tecnología dentro de la organización.

La implementación exitosa de estos tres elementos—momento óptimo de medición, procesamiento inteligente y acceso supervisado a datos crudos—crea un ecosistema de análisis robusto que maximiza el valor de la inversión en tecnología predictiva mientras minimiza los riesgos de decisiones basadas en información incompleta o errónea.

4. Adopción Organizacional

La adopción organizacional representa uno de los desafíos más significativos y frecuentemente subestimados en la implementación exitosa de sistemas de mantenimiento predictivo. A diferencia de los aspectos puramente técnicos, este factor involucra la dimensión humana del cambio, que requiere tiempo, paciencia y una estrategia bien estructurada para lograr resultados sostenibles a largo plazo. Los factores clave incluyen:

Proceso de mejora continua: Las detecciones generadas por el sistema no siempre se resuelven inmediatamente, requiriendo un proceso iterativo de refinamiento con múltiples ciclos de inspección e intervención. El personal debe comprender que cada detección, verdadera o falsa, contribuye al aprendizaje organizacional. Es fundamental establecer procedimientos claros para documentar y analizar cada caso, creando una base de conocimiento que mejore progresivamente la precisión del sistema.

Capacitación integral del personal: La formación técnica genera empoderamiento y facilita la adopción de nuevas tecnologías. La capacitación no debe limitarse solo al uso de la plataforma y técnicas predictivas, sino incluir fundamentos básicos del mantenimiento: buenas prácticas de alineación, balanceo, lubricación, montaje correcto de rodamientos y medición de huelgos. Un técnico que comprende tanto la tecnología como los fundamentos interpreta mejor las señales y ejecuta intervenciones más efectivas.

Gestión estratégica del cambio: La transición desde mantenimiento reactivo o preventivo tradicional hacia predictivo requiere un cambio cultural organizacional profundo. Este proceso involucra modificar mentalidades arraigadas, redefinir roles, establecer nuevos indicadores de desempeño y crear una cultura de decisiones basada en datos. La resistencia al cambio debe gestionarse proactivamente mediante comunicación clara de beneficios, involucramiento del personal y reconocimiento de logros tempranos para generar momentum positivo organizacional.

5. Estrategia de Implementación

La estrategia de implementación debe considerar múltiples factores críticos que determinen el éxito a largo plazo del proyecto. Una planificación deficiente en esta etapa puede comprometer incluso las mejores tecnologías y generar resultados subóptimos que afecten la percepción organizacional del mantenimiento predictivo.

Dimensionamiento consciente: Realizar un análisis detallado de los requerimientos específicos y dividir el proyecto en etapas manejables que permitan aprendizaje progresivo. La secuencia recomendada incluye cuatro fases: validación inicial con equipos críticos seleccionados, adopción gradual expandiendo a activos similares, crecimiento controlado incorporando diferentes tipos de equipos y mejora continua optimizando algoritmos basados en experiencia acumulada.

Visibilidad de costos: Mantener transparencia completa sobre costos reales y dedicación de recursos cuando el proyecto se escale. Incluye costos directos de hardware/software, recursos humanos,

capacitación, infraestructura de comunicaciones y mantenimiento del sistema. Una estimación precisa evita sorpresas presupuestarias que comprometen la continuidad del proyecto y genera confianza mediante expectativas realistas desde el inicio.

Modalidad de contratación: Definir estratégicamente entre pagos recurrentes tipo SaaS o compra directa, alineándose con la estrategia corporativa. Los pagos recurrentes ofrecen menor inversión inicial y actualizaciones continuas, mientras la compra directa proporciona control total y menores costos a largo plazo. La decisión debe considerar flujo de caja, políticas corporativas y estrategia tecnológica organizacional.

Demostración del ROI: Establecer métricas claras y cuantificables para demostrar el retorno de inversión de manera continua ante la gerencia. Incluye reducciones en costos de mantenimiento, disminución de paradas no programadas, extensión de vida útil de equipos y mejoras en disponibilidad operativa. La documentación sistemática fortalece la posición del proyecto y facilita expansión a otras áreas organizacionales.

Conclusiones

Bibliografía

1. Manzano, M. (2025). "Cómo potenciar el IoT y la IA en mi programa de PdM". Presentación en 7° Congreso Latinoamericano y del Caribe de Refinación, IAPG.
2. International Organization for Standardization. (2016). ISO 13374-1:2003 - Condition monitoring and diagnostics of machines - Data processing, communication and presentation.
3. Jardine, A. K., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483-1510.
4. Lee, J., Wu, F., Zhao, W., Ghaffari, M., Liao, L., & Siegel, D. (2014). Prognostics and health management design for rotary machinery systems—Reviews, methodology and applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 42(1-2), 314-334.
5. Shin, J. H., & Jun, H. B. (2015). On condition based maintenance policy. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2(2), 119-127.

Breve CV

Marcos Manzano, originario de Río Negro, Argentina, es Ingeniero Mecánico graduado del Instituto Tecnológico Buenos Aires. Su trayectoria profesional comenzó en empresas multinacionales donde se desempeñó como ingeniero de confiabilidad, experiencia que le permitió identificar las problemáticas recurrentes en el área de mantenimiento industrial, incluso en grandes corporaciones.

Esta visión lo motivó a fundar Maper, empresa especializada en el desarrollo e implementación de tecnología de vanguardia para mantenimiento predictivo en línea. Como Analista de Vibraciones Categoría III, Marcos aporta un alto nivel de especialización técnica a los proyectos que lidera.

Bajo su dirección, Maper ha logrado una significativa expansión por toda Latinoamérica, implementando proyectos de monitoreo predictivo caracterizados por su escalabilidad y sostenibilidad. Su metodología de trabajo se distingue por tres pilares fundamentales: la obtención de resultados económicos demostrables, la capacitación continua y el acompañamiento cercano a los departamentos de mantenimiento de sus clientes.