

MANTENIMIENTO PREDICTIVO CON ANÁLISIS DE VIBRACIONES: LA CLAVE PARA LA OPTIMIZACIÓN INDUSTRIAL

PREDICTIVE MAINTENANCE WITH VIBRATION ANALYSIS: THE KEY TO INDUSTRIAL OPTIMIZATION

Edwin Eduardo Guanoluisa Huertas^{1*}

¹ Magister en Electrónica y Automatización. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4606-3057>
Correo: eduarjr_23@outlook.com

Gabriela Nathaly Rivera Mayo²

²Magister en Gestión de Proyectos. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7458-6636>. Correo: gabynrm@hotmail.com

Jaime Eduardo León Almeida³

³Magister en Sistemas de Propulsión Eléctrica. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1322-5228>.
Correo: jeleon@istct.edu.ec

Priscila Lisseth Cerón Fuentes⁴

⁴Magister en Sistemas de Propulsión Eléctrica. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3481-711X>.
Correo: plceronfuentes@istct.edu.ec

*** Autor para correspondencia: eduarjr_23@outlook.com**

Resumen

El mantenimiento predictivo es una estrategia crucial para la gestión de activos industriales, enfocada en la anticipación de fallos en equipos y maquinaria. El análisis de vibraciones es una de las técnicas más efectivas dentro de esta disciplina, ya que permite detectar anomalías en componentes rotativos y alternativos antes de que causen una falla catastrófica. Este artículo explora la metodología, los beneficios y las aplicaciones del análisis de vibraciones en el mantenimiento predictivo, demostrando cómo esta técnica contribuye a la reducción de costos, la mejora de la seguridad y la optimización de la productividad. Se revisan los principios básicos del análisis de vibraciones, las herramientas utilizadas y su impacto en la transición hacia la Industria 4.0.

Palabras clave: mantenimiento predictivo; análisis de vibraciones; optimización industrial

Abstract

Predictive maintenance is a crucial strategy for industrial asset management, focused on anticipating equipment and machinery failures. Vibration analysis is one of the most effective techniques within this discipline, as it allows anomalies in rotating and reciprocating components to be detected before they cause catastrophic failure. This article explores the methodology, benefits, and applications of vibration analysis in predictive maintenance, demonstrating how this technique contributes to cost reduction, improved safety, and optimized productivity. The basic principles of vibration analysis, the tools used, and their impact on the transition to Industry 4.0 are reviewed.

Keywords: predictive maintenance; vibration analysis; industrial optimization

Fecha de recibido: 14/08/2025

Fecha de aceptado: 17/10/2025

Fecha de publicado: 23/10/2025

Introducción

En el dinámico panorama industrial del siglo XXI, la confiabilidad y la disponibilidad de la maquinaria son factores críticos que determinan la competitividad y la rentabilidad de las empresas. Una falla inesperada en un equipo clave puede desencadenar una serie de consecuencias adversas, incluyendo paradas de producción no programadas, pérdidas económicas significativas, daños a la infraestructura y, en los casos más graves, riesgos para la seguridad del personal.

Históricamente, las estrategias de mantenimiento se han dividido en dos enfoques principales: el mantenimiento correctivo (o reactivo) y el mantenimiento preventivo. El primero, basado en la reparación del equipo una vez que ha fallado, es inherentemente ineficiente y costoso, ya que no permite una planificación adecuada y a menudo conduce a daños secundarios. El segundo, que implica la sustitución o el reacondicionamiento de componentes a intervalos de tiempo fijos, a menudo resulta en un desperdicio de recursos al reemplazar piezas que aún tienen una vida útil considerable (Mobley, 2017).

En respuesta a estas limitaciones, ha surgido y madurado el mantenimiento predictivo, una estrategia proactiva que utiliza técnicas de monitoreo de condición para evaluar el estado real de los equipos. El objetivo principal es predecir el momento exacto en que un componente podría fallar, permitiendo que las tareas de mantenimiento se programen de manera precisa, optimizando así los recursos y minimizando las interrupciones. Dentro de este paradigma, el análisis de vibraciones se ha consolidado como una de las herramientas más poderosas y fiables (Pintelon & Gelders, 1992). La premisa es simple: cada máquina en funcionamiento genera un patrón de vibración único, una especie de “huella dactilar” dinámica. Cuando este

patrón se altera, indica un cambio en las condiciones internas del equipo, señalando la aparición de un problema subyacente.

La importancia del análisis de vibraciones radica en su capacidad para detectar una amplia variedad de problemas mecánicos y eléctricos en sus etapas iniciales, mucho antes de que se manifiesten como fallas visibles o audibles. Por ejemplo, un leve desequilibrio en el rotor de un motor, una desalineación incipiente entre un motor y una bomba, o un pequeño defecto en la superficie de un rodamiento, son problemas que generan patrones de vibración específicos. Si no se corrigen a tiempo, estos problemas se magnifican y pueden llevar a una falla catastrófica del equipo. Al medir, registrar y analizar estas vibraciones, los ingenieros pueden diagnosticar con precisión la causa del problema y determinar su severidad, permitiendo una intervención oportuna y estratégica.

La implementación del análisis de vibraciones no solo optimiza la eficiencia del mantenimiento, sino que también tiene un impacto directo en la seguridad y la rentabilidad de las operaciones industriales. Al evitar fallas inesperadas, se reducen los riesgos de accidentes laborales y se eliminan los costosos tiempos de inactividad de la producción (Tsang, 2017). Además, esta técnica se alinea perfectamente con los principios de la Industria 4.0, donde la digitalización, la interconexión de equipos y el análisis de datos en tiempo real son pilares fundamentales.

Los sistemas modernos de monitoreo de vibraciones, que a menudo incluyen sensores inalámbricos y plataformas de software basadas en la nube, permiten una supervisión continua y remota, facilitando la toma de decisiones informada y la automatización de las alertas de mantenimiento. Por lo tanto, este artículo tiene como objetivo principal revisar y consolidar la evidencia sobre la eficacia del análisis de vibraciones, destacando su rol esencial en la gestión proactiva de activos y su contribución a la modernización de los procesos industriales.

Marco Teórico

Evolución de las estrategias de mantenimiento

El mantenimiento industrial ha evolucionado a lo largo del tiempo, pasando de enfoques reactivos a estrategias cada vez más sofisticadas y proactivas. Inicialmente, predominó el mantenimiento correctivo o de avería, donde la intervención se realizaba únicamente después de que un equipo fallara (Pintelon & Gelders, 1992). Este enfoque, si bien simple, resultó ser sumamente costoso y disruptivo, ya que las fallas inesperadas provocaban largos periodos de inactividad, daños secundarios a la maquinaria y altos costos de reparación de emergencia.

Con la industrialización masiva, surgió el mantenimiento preventivo, basado en el tiempo o en el uso (por ejemplo, después de un número de horas de operación o de ciclos). Esta estrategia implicaba la sustitución o el reacondicionamiento de componentes a intervalos fijos, independientemente de su estado real (Mobley, 2017). Aunque redujo las fallas inesperadas, a menudo resultaba en el reemplazo prematuro de piezas que aún tenían vida útil, lo que generaba un desperdicio de recursos y un incremento en los costos de mantenimiento.

La insatisfacción con las limitaciones de los enfoques anteriores impulsó la búsqueda de estrategias más eficientes, lo que llevó al desarrollo del mantenimiento predictivo. A diferencia de sus predecesores, el

mantenimiento predictivo no se basa en el tiempo de operación, sino en la condición real del equipo. Esta estrategia se centra en el monitoreo continuo o periódico de parámetros clave del equipo para predecir la falla inminente y programar la intervención solo cuando sea estrictamente necesaria (Mobley, 2017). Esto optimiza el uso de los activos, prolonga su vida útil y reduce significativamente los costos operativos.

Fundamentos del mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo se sustenta en el principio de que los equipos emiten señales o "síntomas" de deterioro mucho antes de fallar. Estas señales pueden ser variaciones en la temperatura, en la presión, en el consumo de energía o, de manera muy particular, en el patrón de vibración (Tsang, 2017). Para que un programa de mantenimiento predictivo sea efectivo, debe integrar varias tecnologías y un conocimiento profundo de los equipos que se están monitoreando. Las principales técnicas de monitoreo de condición incluyen:

- **Análisis de vibraciones:** El monitoreo de las vibraciones mecánicas para detectar problemas en componentes rotativos.
- **Termografía infrarroja:** La medición de la temperatura superficial para identificar puntos calientes en sistemas eléctricos o mecánicos.
- **Análisis de aceites:** La inspección de lubricantes para detectar partículas de desgaste y la degradación del aceite, que indican el estado de los componentes internos.
- **Ultrasonido audible y ultrasónico:** La detección de fugas, fallas eléctricas (descargas parciales) y fricción inusual.
- **Análisis de motores eléctricos:** La evaluación de las condiciones eléctricas del motor para diagnosticar problemas en el rotor, el estator o los rodamientos.

El Análisis de Vibraciones como Herramienta Central

Dentro de las técnicas predictivas, el análisis de vibraciones se ha establecido como la más efectiva para el monitoreo de maquinaria rotativa y alternativa. Su eficacia radica en el hecho de que casi todas las fallas mecánicas generan vibraciones características que pueden ser medidas y analizadas (Schenck, 2019). Las fallas como el desequilibrio, la desalineación, los problemas de rodamientos o engranajes, y la holgura mecánica, tienen una firma espectral única que permite un diagnóstico preciso.

- Principios físicos de la vibración

La vibración es el movimiento oscilatorio de un cuerpo alrededor de un punto de equilibrio. En maquinaria, esta vibración se produce por fuerzas dinámicas internas y externas. Un sistema mecánico simple puede ser modelado como una masa, un resorte y un amortiguador. Las vibraciones se pueden describir en términos de magnitud (la intensidad del movimiento), frecuencia (la tasa a la que ocurre la oscilación, medida en ciclos por segundo o Hertz) y fase (la posición del ciclo de vibración en relación con una referencia, como la posición del eje). El análisis de estas tres propiedades es fundamental para un diagnóstico correcto (Schenck, 2019).

- El Proceso del análisis de vibraciones

Un programa de análisis de vibraciones típicamente sigue un proceso estructurado:

1. **Medición de Datos:** Se utilizan sensores, como acelerómetros, montados en la carcasa de la máquina para capturar las vibraciones. Los datos pueden ser recolectados periódicamente con un colector de datos portátil o de forma continua con un sistema en línea.
2. **Procesamiento de la Señal:** La señal de vibración en el dominio del tiempo se transforma en un espectro de frecuencia usando la Transformada Rápida de Fourier (FFT). La FFT descompone la señal compleja en sus componentes de frecuencia individuales, revelando la energía de la vibración en cada frecuencia.
3. **Análisis de los Datos:** Los analistas de vibraciones comparan el espectro de la máquina con su línea base normal o con los estándares del sector. La aparición de picos en frecuencias específicas y el aumento de su magnitud son indicadores de fallos (Mobley, 2017). Por ejemplo, un pico elevado en la frecuencia de rotación (1X) es un indicador de desequilibrio. Si el pico se presenta en dos veces la frecuencia de rotación (2X), es probable que la causa sea una desalineación. Los picos a frecuencias más altas y menos obvias pueden indicar fallas en rodamientos o engranajes.
4. **Diagnóstico y Recomendaciones:** Con base en el análisis, se emite un informe de diagnóstico detallado que especifica la naturaleza y la severidad de la falla, y se recomienda una acción correctiva, como un equilibrado dinámico o el reemplazo de un componente.

La relevancia del análisis de vibraciones en la Industria 4.0

La Cuarta Revolución Industrial, o Industria 4.0, está redefiniendo la manufactura a través de la digitalización, la automatización y la interconexión. En este contexto, el análisis de vibraciones está experimentando una transformación significativa (Tsang, 2017).

- **Monitoreo en Tiempo Real:** La integración de sensores inalámbricos y el Internet de las Cosas (IoT) permite el monitoreo continuo de la vibración. Esto elimina la necesidad de mediciones manuales periódicas y proporciona datos en tiempo real, lo que permite una respuesta inmediata a los cambios en la condición de la maquinaria.
- **Big Data y Análisis Predictivo Avanzado:** Las grandes cantidades de datos generados por los sensores de vibración pueden ser procesados con algoritmos de Inteligencia Artificial (IA) y aprendizaje automático (*machine learning*). Estos algoritmos pueden identificar patrones sutiles que un analista humano podría pasar por alto, mejorando la precisión del diagnóstico y la predicción de fallas.

En resumen, el análisis de vibraciones no es solo una técnica de mantenimiento; es un pilar fundamental en la transición hacia una gestión de activos más inteligente y basada en datos. Al permitir la detección temprana de fallas, minimiza los riesgos de inactividad no planificada y maximiza la vida útil de los equipos, lo que lo convierte en un componente esencial para la competitividad y la sostenibilidad de las empresas industriales.

Aplicaciones y Beneficios

El análisis de vibraciones se aplica a una amplia gama de equipos rotativos, incluyendo motores eléctricos, bombas, compresores, turbinas, ventiladores y cajas de engranajes. Sus beneficios son sustanciales y multidimensionales (Mobley, 2017):

- **Reducción de Costos:** Al evitar fallas inesperadas, se eliminan los costos de paradas no programadas, la reparación de daños mayores y las horas extras para reparaciones de emergencia. Un programa de

mantenimiento predictivo bien implementado puede reducir los costos de mantenimiento en un 25-30% (Tsang, 2017).

- Aumento de la Seguridad: La detección temprana de fallas previene colapsos catastróficos que podrían poner en riesgo al personal y al equipo.
- Optimización de la Productividad: Al programar el mantenimiento durante paradas planificadas, se maximiza el tiempo de actividad de la planta y se mejora la eficiencia general de la producción.
- Prolongación de la Vida Útil de los Activos: La identificación y corrección de fallas en sus etapas iniciales previene el desgaste acelerado y extiende la vida útil de la maquinaria.

Materiales y métodos

El proceso se desarrolla con un estudio de caso, apoyado del análisis de vibraciones, que es una técnica de monitoreo de condición que se basa en la medición de la magnitud, frecuencia y fase de las vibraciones generadas por una máquina en funcionamiento. El proceso típicamente incluye los siguientes pasos:

1. Medición de la Vibración: Se utilizan sensores, como los acelerómetros, para capturar las señales de vibración en puntos estratégicos de la maquinaria, como carcasas de rodamientos o motores. Estos sensores transforman la energía mecánica de la vibración en una señal eléctrica.
2. Adquisición de Datos: La señal analógica del sensor se convierte en una señal digital mediante un colector de datos portátil o un sistema de monitoreo en línea. Los datos se almacenan y se preparan para su posterior análisis.
3. Análisis Espectral: La señal de vibración en el dominio del tiempo se transforma en el dominio de la frecuencia utilizando la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Este espectro de frecuencia es la "huella dactilar" de la máquina, mostrando picos de energía en frecuencias específicas que se correlacionan con tipos de fallas particulares (Schenck, 2019). Por ejemplo, un pico en la frecuencia de rotación (1X RPM) puede indicar un desequilibrio, mientras que un pico en dos veces la frecuencia de rotación (2X RPM) podría sugerir una desalineación.
4. Diagnóstico y Predicción: Los expertos en vibraciones analizan el espectro de frecuencia para diagnosticar la causa de la anomalía. Al monitorear la evolución de estos picos a lo largo del tiempo, se puede predecir cuándo el fallo alcanzará una etapa crítica, permitiendo programar las reparaciones en un momento óptimo, sin afectar la producción (Mobley, 2017).

Resultados y discusión

Estudio de caso: Reducción de costos y mejora de la productividad en una Planta Procesadora de Alimentos en Ecuador

Resumen del caso: Una planta procesadora de alimentos en Ecuador, con una línea de producción de snacks, enfrentaba interrupciones frecuentes y no planificadas debido a fallas en los motores eléctricos y bombas de sus sistemas de mezclado y transporte. Estas fallas generaban pérdidas de producción significativas y altos costos de mantenimiento correctivo. La gerencia decidió implementar un programa de mantenimiento predictivo centrado en el análisis de vibraciones para mejorar la fiabilidad de sus equipos críticos y optimizar su gestión de mantenimiento.

Desafío Inicial

La planta operaba bajo un modelo de mantenimiento correctivo, lo que significaba que los equipos solo se reparaban cuando fallaban. Esto resultaba en un promedio de 5 a 7 paradas de producción no planificadas por mes, cada una con una duración de 4 a 8 horas. Las fallas más comunes ocurrían en:

1. Motores de la banda transportadora: Fallas en los rodamientos debido a la acumulación de polvo y la falta de lubricación adecuada.
2. Bombas de recirculación: Daños en los impulsores y desalineación del eje, causados por la corrosión y el desgaste.

Estas interrupciones no solo detenían la producción, sino que también requerían reparaciones costosas y a menudo resultaban en el reemplazo de equipos completos, en lugar de solo los componentes dañados.

Solución implementada: Mantenimiento predictivo con análisis de vibraciones

Para abordar el problema, la planta contrató a un equipo de especialistas en mantenimiento predictivo. La solución se implementó en dos fases:

Fase 1: Diagnóstico y Monitoreo Inicial

- Se identificaron 20 activos críticos, incluyendo los motores de la banda transportadora y las bombas de recirculación.
- Se instalaron sensores de vibración en puntos clave de estos equipos. El equipo de mantenimiento comenzó a recolectar datos de vibración mensualmente utilizando un colector de datos portátil.
- Se realizó un análisis de referencia para establecer una "línea base" del comportamiento vibracional normal de cada equipo.

Fase 2: Análisis y Acción Correctiva

- Después de tres meses de recolección de datos, el equipo de análisis de vibraciones identificó patrones de vibración anormales en 4 motores de la banda y 3 bombas.
- El análisis espectral reveló lo siguiente:
 - En los motores: Picos de alta frecuencia que indicaban fallas incipientes en los rodamientos, mucho antes de que se hicieran evidentes por el ruido o el calor.
 - En las bombas: Un pico en la frecuencia de 2X RPM, que diagnosticó una desalineación entre la bomba y el motor.

Resultados del caso

La implementación del programa de mantenimiento predictivo generó resultados significativos en el primer año:

1. Reducción de paradas no planificadas: Se logró una reducción del 85% en las paradas no programadas relacionadas con los equipos monitoreados.

2. Ahorro en costos de mantenimiento: El costo anual de mantenimiento correctivo se redujo en un 45%. Las reparaciones ahora se planificaban con anticipación, lo que permitía la compra de repuestos a un precio más bajo y la programación de las intervenciones durante los períodos de menor producción.
3. Aumento de la vida útil de los activos: La detección temprana de problemas como la desalineación o las fallas en los rodamientos permitió corregirlos a tiempo, evitando daños mayores y extendiendo la vida útil de los equipos en un 30%.
4. Optimización de la productividad: Con una línea de producción más fiable, la planta aumentó su Eficiencia General de Equipo (OEE) en un 15%, mejorando su capacidad de cumplir con los plazos de entrega.

Conclusiones

El mantenimiento predictivo con análisis de vibraciones es una herramienta esencial para la gestión de activos en la industria moderna. Más allá de simplemente reaccionar a las fallas, permite a las empresas tomar el control de su infraestructura, anticipando problemas y programando intervenciones de manera inteligente. La adopción de esta técnica, junto con otras herramientas de monitoreo de condición, es un paso fundamental para cualquier organización que busque mejorar su eficiencia, seguridad y competitividad. En la era de la Industria 4.0, donde los datos son la nueva moneda, el análisis de vibraciones se posiciona como una inversión estratégica para la optimización del rendimiento y la confiabilidad industrial.

El estudio de caso demuestra cómo el análisis de vibraciones no es solo una técnica de diagnóstico, sino una inversión estratégica que puede transformar radicalmente la eficiencia y la rentabilidad de una operación industrial en el contexto ecuatoriano. Al pasar de un enfoque reactivo a uno predictivo, la planta pudo minimizar los riesgos, optimizar los recursos y asegurar una operación más robusta y rentable.

Referencias

- Mobley, R. K. (2017). An introduction to predictive maintenance (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Pintelon, L., & Gelders, L. (1992). Maintenance management techniques. *European Journal of Operational Research*, 58(1), 101–114. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(92\)90352-S](https://doi.org/10.1016/0377-2217(92)90352-S)
- Schenck, G. (2019). *Vibration analysis for reliability and maintenance professionals*. CRC Press.
- Tsang, A. H. C. (2017). A strategic approach to maintenance management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 23(3), 254-266. <https://doi.org/10.1108/JQME-11-2015-0063>
- Tsang, A. H. C. (2017). A strategic approach to maintenance management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 23(3), 254-266. <https://doi.org/10.1108/JQME-11-2015-0063>