

Técnicas de análisis de vibraciones para el diagnóstico de fallas en rodamientos automotrices: revisión bibliográfica de métodos convencionales e inteligentes

Vibration Analysis Techniques for Automotive Bearing Fault Diagnosis: A Literature Review of Conventional and Intelligent Methods

Carlos Rigoberto Calderón-Vinueza ¹
carlosrcalderonv@gmail.com

¹Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador, 100150

Citación: Calderón-Vinueza, C. (2026). Técnicas de análisis de vibraciones para el diagnóstico de fallas en rodamientos automotrices: revisión bibliográfica de métodos convencionales e inteligentes. *EKSIGMA*, 2(2), 64-76. <https://eksigma.com/index.php/principal/article/view/29>

Recibido: 20 de abril 2026

Aceptado: 05 de mayo 2026

Publicado: 15 de mayo 2026

EKSIGMA
ISSN: 3121-2689

Correspondencia:
carlosrcalderonv@gmail.com

Resumen: El diagnóstico de fallas en rodamientos es una tarea crítica para la confiabilidad de cubos de rueda, motores eléctricos de tracción, alternadores y transmisiones, debido a que los defectos incipientes generan firmas vibratorias débiles que pueden quedar ocultas por variaciones de velocidad, carga y ruido estructural. La revisión tuvo como objetivo analizar las técnicas de vibración publicadas entre 2022 y 2026 para detectar y caracterizar fallas en rodamientos, con énfasis en su transferibilidad al entorno automotriz. Se realizó una revisión bibliográfica narrativa con búsqueda estructurada y se conformó un corpus analítico de 19 trabajos con DOI verificable, clasificados según procesamiento convencional y de envolvente, técnicas tiempo-frecuencia y de descomposición, aprendizaje automático o profundo, fusión sensorial y revisiones orientadas al mantenimiento predictivo. Los resultados muestran que los indicadores temporales son apropiados para tendencias y alarmas, mientras que la envolvente conserva una ventaja interpretativa al vincular impactos con frecuencias cinemáticas del rodamiento. Las técnicas adaptativas y tiempo-frecuencia ofrecen mayor capacidad frente a señales no estacionarias, aunque dependen del ajuste de parámetros. Los modelos inteligentes amplían la clasificación, pero su generalización se reduce cuando el entrenamiento y la prueba no representan vehículos, sensores y regímenes distintos. La evidencia reciente favorece estrategias híbridas que combinen referencia de velocidad, procesamiento físicamente interpretable y clasificación inteligente, especialmente cuando se integran vibración, corriente, sonido o temperatura.

Palabras clave: análisis de vibraciones; diagnóstico automotriz; mantenimiento predictivo; procesamiento de señales; aprendizaje automático.

Abstract: Bearing fault diagnosis is critical to the reliability of wheel hubs, electric traction motors, alternators, and transmissions because incipient defects generate weak vibration signatures that can be masked by changes in speed, load, and structural noise. This review aimed to analyze vibration techniques published between 2022 and 2026 for detecting and characterizing bearing faults, emphasizing their transferability to automotive applications. A narrative literature review with a structured search was conducted, and an analytical corpus of 19 DOI-verified works was organized into conventional and envelope processing, time-frequency and decomposition techniques, machine/deep learning, sensor fusion, and predictive-maintenance reviews. The findings indicate that time-domain indicators are suitable for trending and alarms, whereas envelope analysis retains an interpretability advantage by linking impacts to bearing kinematic frequencies. Adaptive and time-frequency techniques are more capable under non-stationary signals but remain sensitive to parameter selection. Intelligent models improve classification capacity, although generalization decreases when training and testing do not represent different vehicles, sensors, and operating regimes. Recent evidence therefore supports hybrid strategies that combine speed reference, physically interpretable preprocessing, and intelligent classification, particularly when vibration is fused with current, sound, or temperature.

Keywords: vibration analysis; automotive diagnostics; predictive maintenance; signal processing; machine learning.



Copyright © 2026. Los autores conservan los derechos de autor y los derechos de publicación. Asimismo, otorgan a EKSIGMA el derecho no exclusivo de primera publicación. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0). <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

1. INTRODUCCIÓN

Los rodamientos soportan cargas radiales y axiales en numerosos conjuntos rotativos del vehículo. En cubos de rueda, motores de tracción, alternadores y transmisiones, su deterioro modifica la dinámica local y puede producir incremento de fricción, holguras, impactos periódicos, pérdida de precisión geométrica y elevación de temperatura. Estas alteraciones no siempre generan síntomas audibles en etapas tempranas, por lo que la vibración se utiliza como una vía de observación sensible para detectar cambios antes de que la falla evolucione hacia daño severo o inmovilización del sistema. La literatura reciente sobre maquinaria rotativa coincide en que el diagnóstico basado en condición depende de la capacidad para separar la firma de la falla de excitaciones operativas y estructurales (Gangsar et al., 2022; Lu et al., 2026).

En un rodamiento con defecto localizado, el paso repetido de elementos rodantes sobre una discontinuidad genera impulsos cuya periodicidad se relaciona con la geometría, la velocidad del eje y la ubicación de la falla. Sin embargo, la señal medida no es una reproducción directa del contacto. La ruta de transmisión por carcasa, soporte y estructura introduce resonancias, atenuaciones y contribuciones de otras fuentes. En el entorno automotriz se agregan excitaciones de neumáticos, irregularidad de la vía, engranajes, combustión, máquinas eléctricas y suspensión. Esta superposición limita la utilidad de un único indicador y obliga a seleccionar el dominio de análisis de acuerdo con el régimen de operación (Shah et al., 2025).

Los métodos convencionales incluyen parámetros temporales como RMS, valor pico, factor de cresta y curtosis, así como análisis espectral mediante transformada rápida de Fourier. Cuando los impactos excitan una banda resonante, la demodulación por envolvente permite recuperar la periodicidad de baja frecuencia asociada con la cinemática del rodamiento. Estudios recientes mantienen esta lógica física y la combinan con selección adaptativa de características o modelos de clasificación; Najim y Alsalaet (2024) integraron rasgos derivados de envolvente con redes neuronales, mientras Liu et al. (2024) analizaron defectos de pista mediante vibración en dominios temporal y frecuencial.

La necesidad de trabajar con señales no estacionarias ha impulsado transformadas tiempo-frecuencia, descomposición modal y aprendizaje automático. Fort et al. (2023) mostraron que el preprocesamiento inteligente puede reducir la complejidad computacional del diagnóstico, y Su et al. (2024) sintetizaron el uso de aprendizaje profundo en maquinaria rotativa. En aplicaciones cercanas al transporte, Wang et al. (2024) combinaron vibración y sonido para diagnosticar rodamientos de rueda, mientras Luo et al. (2026) analizaron el despliegue de métodos basados en datos en vehículos metropolitanos. Estos avances son relevantes para el automóvil, aunque no eliminan el problema de transferencia entre bancos de ensayo y condiciones reales.

La revisión tuvo como objetivo analizar las técnicas de procesamiento y análisis de vibraciones publicadas entre 2022 y 2026 para el diagnóstico de fallas en rodamientos, con énfasis en su transferibilidad al entorno automotriz. Para ello, se compararon indicadores temporales, métodos espectrales y de envolvente, representaciones tiempo-frecuencia, técnicas de descomposición, aprendizaje automático y fusión sensorial, con el propósito de

identificar ventajas, limitaciones y criterios de selección aplicables al mantenimiento predictivo de vehículos.

2. DESARROLLO

2.1 Fundamentos vibratorios y frecuencias características

La detección física de una falla localizada parte de la periodicidad de los contactos. La frecuencia de paso por la pista exterior (BPFO), la frecuencia de paso por la pista interior (BPFI), la frecuencia de giro del elemento rodante (BSF) y la frecuencia de la jaula (FTF) se estiman a partir del número de elementos rodantes, el diámetro de paso, el diámetro del elemento, el ángulo de contacto y la velocidad de rotación. Estas frecuencias no deben interpretarse como líneas espectrales invariables: el deslizamiento, la modulación de carga y la variación de velocidad producen ensanchamiento, bandas laterales y desplazamientos que modifican la lectura del espectro.

La ubicación del acelerómetro condiciona la relación señal-ruido. Un sensor situado cerca del soporte del rodamiento recibe una trayectoria estructural más corta que otro instalado sobre una pieza flexible o alejada del contacto. En cubos de rueda, además, la referencia de velocidad resulta especialmente valiosa porque permite ordenar la señal respecto de la rotación y separar componentes que cambian con la velocidad de aquellas vinculadas con resonancias estructurales. La revisión de Shah et al. (2025) destaca precisamente la importancia del seguimiento de orden, la demodulación y el procesamiento físicamente guiado en trenes motrices modernos.

2.2 Indicadores en el dominio del tiempo

Los indicadores temporales condensan la señal en descriptores de rápida interpretación. El valor eficaz (RMS) representa energía global, mientras el valor pico y el factor de cresta enfatizan transitorios. La curtosis responde a distribuciones con impulsos pronunciados y suele ser útil en etapas tempranas, cuando el daño genera eventos breves separados por intervalos relativamente regulares. Su ventaja es el bajo costo de cálculo, lo que facilita la implementación en equipos portátiles, sistemas embebidos y rutinas de inspección de taller.

La principal limitación es la baja especificidad. Un aumento de RMS puede originarse en desbalance, holgura, engranamiento, rugosidad de pavimento o excitación electromagnética; de forma similar, la curtosis puede elevarse por impactos ajenos al rodamiento. Por ello, los indicadores temporales funcionan mejor como alarma o tendencia que como criterio único de localización. Hemati (2026) mostró que el análisis multidominio puede revelar pitting que resulta menos evidente cuando se observa una sola familia de descriptores.

2.3 Análisis espectral, envolvente y demodulación

La FFT permite identificar armónicos, órdenes y bandas laterales, pero los impactos de un defecto suelen excitar resonancias a frecuencias mucho mayores que la frecuencia cinemática de la falla. La demodulación por envolvente aborda este problema: se selecciona una banda resonante, se filtra la señal, se obtiene la envolvente mediante una representación analítica —habitualmente asociada con la transformada de Hilbert— y se analiza el espectro

de la envolvente. El resultado permite comparar picos y armónicos con BPFO, BPFI, BSF y FTF.

La selección de la banda es decisiva. Si contiene poca energía de impacto, la envolvente pierde sensibilidad; si incluye fuentes dominantes no relacionadas, pueden aparecer picos engañosos. Najim y Alsalaet (2024) integraron características de envolvente adaptativas con una red neuronal para mejorar la clasificación entre dominios. En una perspectiva aplicada, Liu et al. (2024) confirmaron que los defectos de pista modifican el contenido vibratorio y que la lectura conjunta de tiempo y frecuencia aporta mayor información que una métrica aislada.

2.4 Técnicas tiempo-frecuencia y descomposición adaptativa

Cuando la velocidad cambia durante la adquisición, la hipótesis de estacionariedad de una FFT global deja de ser adecuada. La STFT introduce una ventana temporal y permite observar la evolución del espectro, mientras las transformadas wavelet ofrecen resolución variable en tiempo y frecuencia. Métodos como EMD, EEMD y VMD descomponen señales complejas en componentes o modos que pueden concentrar información de falla. Estas técnicas son atractivas cuando la firma del rodamiento cambia rápidamente o queda oculta por otras excitaciones.

La ganancia de resolución implica nuevos riesgos. Las descomposiciones dependen de parámetros, criterios de parada y reglas de selección modal. Una componente matemáticamente separada no siempre tiene significado físico, y el mode mixing puede repartir información de una misma falla entre varios modos. Shi y Yang (2025) utilizaron componentes derivados de EMD para construir imágenes de vibración orientadas a fallas compuestas, y Shi et al. (2025) aplicaron selección de banda resonante mediante transformada wavelet ajustable en rodamientos de rueda. La utilidad práctica depende de conservar una conexión verificable entre la representación procesada y la dinámica del conjunto.

2.5 Aprendizaje automático, aprendizaje profundo y fusión sensorial

Los clasificadores supervisados permiten combinar múltiples rasgos y construir fronteras de decisión entre estados de salud. SVM, redes neuronales, árboles y métodos de conjunto siguen siendo útiles cuando el número de observaciones es limitado y las características mantienen interpretación física. Los modelos profundos, en cambio, pueden aprender representaciones directamente desde series temporales, espectrogramas o imágenes tiempo-frecuencia. Su et al. (2024) describen esta transición hacia arquitecturas profundas en maquinaria rotativa, mientras He (2025) combina CNN y LSTM para integrar patrones espaciales y dependencias temporales.

La principal dificultad no es únicamente la precisión dentro del conjunto de prueba, sino la generalización. Un modelo puede aprender características del banco, del sensor, de la velocidad o de la estrategia de segmentación y conservar un rendimiento elevado sin haber aprendido una firma transferible de la falla. Işık et al. (2026) estudian la detección bajo ruido mediante redes neuronales y análisis tiempo-frecuencia, y Luo et al. (2026) muestran que el despliegue en vehículos requiere examinar diferencias de dominio y condiciones operativas.

En aplicaciones automotrices se recomienda separar corridas, vehículos y regímenes entre entrenamiento y evaluación.

La fusión sensorial amplía la evidencia disponible. Wang et al. (2024) combinaron vibración y sonido, mientras Mhalhal et al. (2026) integraron vibración y corriente con DWT y una CNN de dos ramas para diagnosticar estados de motores de inducción. En vehículos electrificados, esta estrategia es especialmente pertinente porque corriente, temperatura y velocidad suelen estar disponibles en la electrónica de control. La fusión, sin embargo, exige sincronización, trazabilidad de sensores y criterios que eviten que una modalidad dominante oculte la pérdida de información de otra.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Enfoque y tipo de revisión

Se realizó una revisión bibliográfica narrativa con búsqueda estructurada y síntesis comparativa. El alcance fue descriptivo y analítico, orientado a organizar técnicas de diagnóstico por vibraciones y valorar su pertinencia para sistemas automotrices. La revisión no se presentó como revisión sistemática ni metaanálisis, porque los trabajos seleccionados emplearon bancos, sensores, defectos, velocidades, cargas y métricas heterogéneas que impiden una agregación estadística directa.

3.2 Estrategia de búsqueda y criterios de selección

La búsqueda se delimitó al periodo 2022-2026 y empleó combinaciones de términos en inglés y español relacionados con bearing fault diagnosis, rolling bearing, vibration, envelope, time-frequency, wavelet, VMD, machine learning, automotive, vehicle, wheel, traction motor y drivetrain. Se consultaron índices académicos multidisciplinarios y páginas editoriales de revistas científicas. Se incluyeron artículos y revisiones con DOI verificable, relación explícita con diagnóstico de rodamientos o maquinaria rotativa y uso de vibración como señal principal o complementaria. Se excluyeron duplicados, trabajos sin relación con fallas de rodamientos, fuentes sin trazabilidad bibliográfica suficiente y documentos cuyo método no permitía identificar la técnica analizada.

La selección final quedó conformada por 19 trabajos. La unidad de análisis fue cada publicación y no cada experimento individual. La presencia de estudios ferroviarios o industriales se mantuvo cuando el método era transferible a cubos de rueda, motores eléctricos o transmisiones automotrices; esta decisión se registró expresamente para evitar equiparar el contexto de validación original con el contexto de aplicación propuesto.

3.3 Extracción y clasificación de la evidencia

Para cada trabajo se registraron año, tipo de señal, familia de procesamiento, uso de modelos inteligentes, condición operativa reportada, aplicación y principal limitación metodológica. La evidencia se clasificó por énfasis principal en cinco familias mutuamente excluyentes para fines descriptivos: procesamiento convencional y envolvente; tiempo-frecuencia y descomposición; aprendizaje automático o profundo; fusión sensorial; y revisiones orientadas a mantenimiento predictivo. La clasificación no implica que un estudio utilice una sola técnica, sino que identifica el componente dominante de su contribución.

3.4 Procedimiento de síntesis y análisis

El procedimiento se organizó en tres etapas. En la primera se depuraron las publicaciones y se verificó el DOI. En la segunda se construyó una matriz comparativa con los rasgos técnicos y la relación entre método, condición de señal y tipo de falla. En la tercera se analizaron patrones de convergencia y limitaciones, con énfasis en no estacionariedad, ruido, variación de velocidad, transferencia entre dominios y costo computacional. Se utilizaron frecuencias simples para describir el corpus y una síntesis cualitativa para contrastar la utilidad automotriz de las técnicas.

3.5 Consideraciones éticas e integridad de la revisión

La revisión utilizó exclusivamente información publicada y no involucró participantes humanos, animales ni datos personales. Se mantuvo la atribución de las fuentes mediante citas y DOI, y no se extrapolaron cifras de exactitud entre estudios con protocolos diferentes. Cuando un trabajo fue realizado en contexto ferroviario o industrial, su contribución se interpretó como evidencia metodológica transferible y no como validación directa en automóviles.

4. RESULTADOS

Los resultados se organizan desde la composición temporal del corpus hasta la comparación de familias metodológicas, con el fin de mostrar la evolución reciente de las técnicas, la relación entre tipo de falla y evidencia vibratoria, el papel de los métodos inteligentes y las condiciones que limitan su transferencia al diagnóstico automotriz.

4.1 Composición temporal del corpus

La selección reunió 19 publicaciones entre 2022 y 2026. Se observó una concentración reciente: siete trabajos correspondieron a 2026 y cinco a 2025, mientras 2024 aportó cinco estudios y 2022-2023 un trabajo por año. La Figura 1 presenta la distribución temporal. Esta concentración no demuestra por sí sola un crecimiento absoluto de la producción científica, porque la revisión fue narrativa; sí refleja que la síntesis privilegió evidencia reciente y métodos contemporáneos.

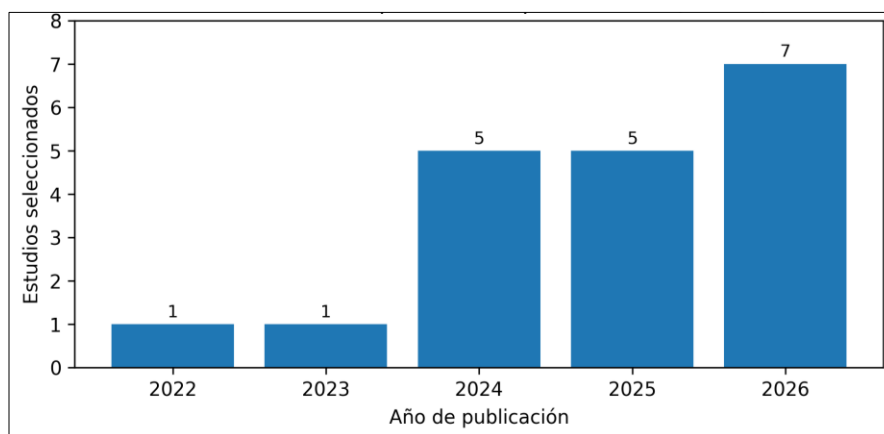


Figura 1. Distribución temporal del corpus bibliográfico analizado
Fuente: elaboración propia a partir del corpus bibliográfico seleccionado.

4.2 Relación entre fallas y rasgos vibratorios

El análisis de los mecanismos físicos permitió distinguir señales esperables según la zona dañada. Los defectos de pista exterior e interior tienden a producir trenes de impactos relacionados con BPFO y BPFI, mientras que daños en elementos rodantes y jaula se asocian con BSF y FTF. La Tabla 1 resume la relación entre mecanismo, indicador y precauciones de interpretación en vehículos.

Tabla 1. Relación entre tipo de falla y evidencia vibratoria esperada

Falla o condición	Mecanismo vibratorio	Indicadores útiles	Precaución en vehículo
Pista exterior	Impactos periódicos al paso de elementos rodantes	BPFO, envolvente, curtosis espectral	Ruido de rueda y ruta de transmisión
Pista interior	Impactos modulados por rotación y zona de carga	BPFI, bandas laterales, seguimiento de orden	La velocidad variable desplaza componentes
Elemento rodante	Contacto alternante con ambas pistas	BSF, envolvente, tiempo-frecuencia	La firma puede ser débil o modulada
Jaula	Modulación de baja frecuencia	FTF y armónicos	Puede solaparse con excitaciones de baja frecuencia
Pitting/lubricación deficiente	Mayor impulsividad, fricción y rugosidad	RMS, curtosis, banda resonante, envolvente	Carga y temperatura modifican la amplitud

Fuente: elaboración propia a partir de la evidencia seleccionada.

Los datos muestran que la interpretación basada en frecuencias cinemáticas mantiene un valor diagnóstico que los modelos puramente estadísticos no sustituyen. La envolvente resulta especialmente útil cuando el impacto excita una resonancia estructural y la periodicidad de baja frecuencia no aparece con claridad en el espectro bruto. No obstante, la estimación de velocidad y la elección de la banda condicionan el resultado, por lo que la presencia de un pico aislado no debe considerarse suficiente para localizar una falla.

4.3 Familias metodológicas predominantes

La clasificación por énfasis metodológico mostró cinco grupos. Las revisiones y trabajos orientados a mantenimiento predictivo fueron cinco; procesamiento convencional o de envolvente, técnicas tiempo-frecuencia y aprendizaje automático reunieron cuatro estudios cada uno; y la fusión sensorial agrupó dos trabajos. La Figura 2 resume esta distribución. El equilibrio entre procesamiento físico e inteligencia artificial indica que la literatura reciente no abandona los rasgos clásicos, sino que los incorpora a cadenas de análisis más complejas.

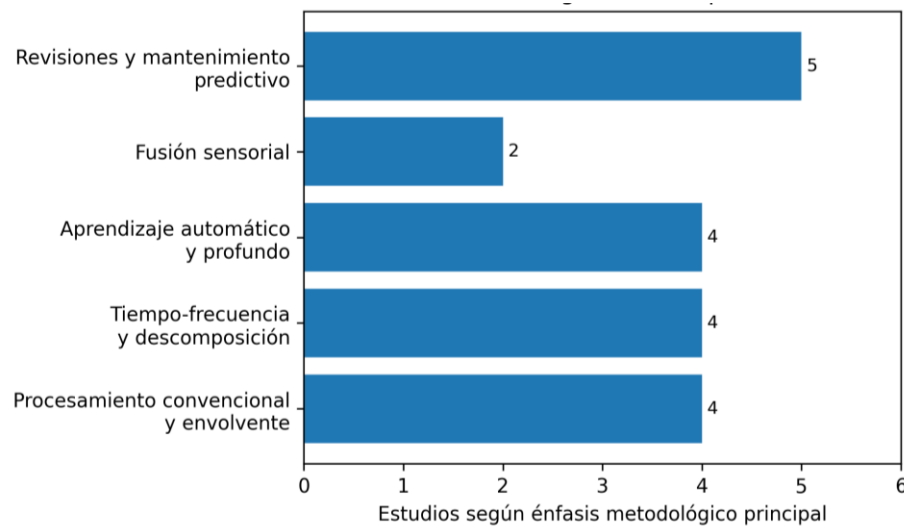


Figura 2. Familias metodológicas predominantes en el corpus analizado

Fuente: elaboración propia a partir del corpus bibliográfico seleccionado.

4.4 Evidencia reciente y transferibilidad automotriz

La comparación de estudios mostró diferencias importantes en sensores, régimen de operación y estrategia de validación. Por esta razón, no se calcularon promedios de exactitud entre artículos. En su lugar, se examinó el aporte metodológico y la posibilidad de traslado a cubos de rueda, motores eléctricos y transmisiones. La Tabla 2 presenta una matriz abreviada de trabajos representativos.

Tabla 2. Matriz abreviada de evidencia reciente y utilidad diagnóstica

Estudio	Técnica principal	Señal/representación	Aporte diagnóstico	Transferibilidad automotriz
Gangsar et al. (2022)	Revisión de aprendizaje profundo	Vibración de maquinaria rotativa	Organiza tendencias y límites de DL	Marco general para motores y transmisión
Fort et al. (2023)	ML con preprocesamiento de baja complejidad	Vibración + referencia de velocidad	Reduce carga de procesamiento	Adecuado para implementación embarcada
Najim y Alsalaet (2024)	Envolvente adaptativa + ANN	Rasgos espectrales	Mejora discriminación entre dominios	Requiere validar por vehículo y régimen
Wang et al. (2024)	GWO-SVM con fusión	Vibración + sonido	Combina modalidades complementarias	Transferible a rodamientos de rueda
Liu et al. (2024)	Tiempo y frecuencia	Vibración de caja de eje	Relaciona defectos de pista con respuesta	Útil para lógica física de rueda
Shi y Yang (2025)	EMD-AADPCI	Imágenes derivadas de vibración	Aborda fallas compuestas	Interesante con no estacionariedad
Shah et al. (2025)	Revisión automotriz	Vibración en powertrain	Integra orden, demodulación e IA	Directamente aplicable a vehículos
Hemati (2026)	Análisis multidominio	Tiempo, frecuencia y señal procesada	Detecta pitting difícil de observar	Útil para deterioro progresivo
Lu et al. (2026)	Revisión condition-based	Vibración + IA	Compara métodos y métricas	Guía para mantenimiento predictivo
Işık et al. (2026)	ANN + tiempo-frecuencia	Señal bajo ruido	Evalúa robustez frente a contaminación	Clave para entorno estructural ruidoso

Estudio	Técnica principal	Señal/representación	Aporte diagnóstico	Transferibilidad automotriz
Mhalhal et al. (2026)	DWT + CNN de dos ramas	Vibración + corriente	Fusión multimodal	Relevante para motores electrificados
Luo et al. (2026)	Métodos basados en datos	Datos de vehículos metropolitanos	Analiza despliegue y transferencia	Aporta criterios de validación en movilidad

Fuente: elaboración propia a partir de los estudios citados.

La matriz muestra que los métodos de mayor cercanía al entorno automotriz comparten tres rasgos: referencia explícita del régimen de operación, procesamiento capaz de manejar no estacionariedad y evaluación de la señal más allá de un único indicador global. Las propuestas basadas en IA añaden capacidad de clasificación, pero requieren protocolos que eviten segmentar una misma corrida entre entrenamiento y prueba, ya que esa práctica puede introducir fuga de información y sobreestimar la generalización.

4.5 Criterios de selección para diagnóstico automotriz

A partir de la comparación se establecieron criterios prácticos para seleccionar una técnica según la condición de operación. La Tabla 3 no asigna una jerarquía universal; organiza fortalezas y restricciones observadas en el corpus. El hallazgo más consistente fue que la combinación de referencia de velocidad, demodulación o tiempo-frecuencia y un clasificador validado entre condiciones ofrece una ruta más defendible que el uso aislado de exactitud de clasificación.

Tabla 3. Criterios comparativos para seleccionar técnicas de análisis de vibraciones

Técnica	Interpretabilidad	Adecuación a variación de régimen	Costo computacional	Uso recomendado
Indicadores temporales	Alta	Baja	Baja	Alarmas, tendencia y cribado rápido
FFT / espectro de orden	Alta	Media-alta con referencia de velocidad	Baja-media	Desbalance, armónicos y seguimiento por orden
Envolvente / demodulación	Muy alta	Media-alta	Media	Defectos localizados con impactos repetitivos
Tiempo-frecuencia / wavelet	Media-alta	Alta	Media-alta	Velocidad/carga variables y transitorios
EMD/VMD y variantes	Media	Alta	Alta	Separación de componentes débiles o no estacionarias
ML/DL	Variable	Alta si el entrenamiento representa el dominio	Media-muy alta	Clasificación multiclase y sistemas automáticos
Fusión sensorial	Alta cuando conserva rasgos físicos	Alta	Alta	Motores eléctricos y sistemas con sensores disponibles

Fuente: elaboración propia a partir de la síntesis comparativa.

5. DISCUSIÓN

La revisión confirma una continuidad entre las técnicas clásicas y los métodos inteligentes. El análisis temporal sigue siendo útil por su bajo costo y facilidad de implementación, pero su capacidad para identificar la localización de una falla es limitada cuando varias fuentes incrementan simultáneamente la vibración. La envolvente conserva una ventaja metodológica

porque conecta el impacto mecánico con frecuencias cinemáticas y permite interpretar el resultado antes de clasificarlo. Este principio es coherente con el uso de rasgos adaptativos de envolvente propuesto por Najim y Alsalaet (2024) y con los análisis multidominio de Hemati (2026).

La no estacionariedad es una dificultad central en vehículos. Durante aceleración, frenado o cambios de carga, las líneas espectrales relacionadas con rotación se desplazan y una FFT calculada sobre toda la señal mezcla estados distintos. El seguimiento de orden, las transformadas tiempo-frecuencia y las descomposiciones adaptativas ofrecen una respuesta más adecuada. Fort et al. (2023) muestran que una estrategia de preprocesamiento inteligente puede mantener baja complejidad, mientras Shi y Yang (2025) ilustran cómo la descomposición puede generar representaciones más discriminantes para fallas compuestas.

Los modelos de aprendizaje automático y profundo amplían la capacidad de clasificación, pero la comparación entre estudios exige cautela. Su et al. (2024) describen la expansión de redes profundas en maquinaria rotativa y He (2025) combina CNN y LSTM; sin embargo, una precisión elevada no garantiza transferencia si segmentos de una misma adquisición aparecen en entrenamiento y prueba. En una aplicación automotriz, la validación debería separar corridas, velocidades y, cuando sea posible, vehículos o unidades físicas distintas. Işık et al. (2026) refuerzan esta necesidad al estudiar explícitamente condiciones ruidosas.

La transferencia desde bancos industriales o ferroviarios debe hacerse mediante el mecanismo y no mediante la cifra de desempeño. Los defectos de pista y la cinemática del rodamiento son comparables entre sectores, pero la ruta estructural, el tamaño del rodamiento, la carga y las fuentes de ruido cambian. Wang et al. (2024) y Liu et al. (2024) aportan evidencia relevante para conjuntos de rueda, mientras Shah et al. (2025) sitúan el procesamiento de vibraciones dentro de trenes motrices automotrices. Estos trabajos apoyan el uso de referencia de velocidad y análisis por orden antes de aplicar clasificación.

La fusión sensorial aparece como una línea de especial interés para vehículos electrificados. La corriente del motor, la temperatura y la velocidad ya forman parte de numerosos sistemas de control, de modo que pueden complementar un acelerómetro sin añadir necesariamente una arquitectura de instrumentación compleja. Mhalhal et al. (2026) muestran que la combinación de vibración y corriente puede sostener una clasificación multiclase bajo distintos estados. La limitación es que un sistema multimodal exige sincronización y validación de la contribución individual de cada señal para evitar dependencia inadvertida de una sola modalidad.

Las limitaciones de esta revisión se relacionan con su carácter narrativo, el tamaño del corpus y la heterogeneidad de protocolos. No se realizó metaanálisis ni se compararon exactitudes como si provinieran de un mismo experimento. También existen diferencias entre fallas sembradas y naturales, sensores piezoeléctricos y MEMS, velocidades fijas y variables, y condiciones de laboratorio o campo. Trabajos futuros deberían priorizar defectos naturales, pruebas en carretera o dinamómetro con cambios controlados de carga, particiones de validación por unidad física y reporte conjunto de sensibilidad, falsos positivos, costo computacional e incertidumbre.

Los hallazgos aportan una ruta de selección para diagnóstico automotriz basada en la integración de interpretación física, análisis no estacionario y validación entre condiciones. La utilidad del enfoque radica en que permite elegir la complejidad del método según el objetivo: indicadores temporales para alarma, envolvente para localización de impactos, tiempo-

frecuencia para regímenes variables y modelos inteligentes para clasificación cuando existe un conjunto de entrenamiento suficientemente representativo.

6. CONCLUSIONES

El análisis bibliográfico mostró que ninguna técnica aislada domina en todas las condiciones de operación. Los indicadores temporales son adecuados para tendencias y alarmas, mientras que el análisis espectral y, especialmente, la envolvente conservan mayor capacidad de interpretación física al relacionar impactos con frecuencias características del rodamiento.

La principal dificultad para trasladar el diagnóstico al vehículo es la combinación de no estacionariedad y superposición de fuentes. Cambios de velocidad, carga, ruta de transmisión, neumáticos, engranajes y excitaciones eléctricas modifican la señal y pueden ocultar la firma del rodamiento. En estas condiciones, el seguimiento de orden, las representaciones tiempo-frecuencia y las descomposiciones adaptativas ofrecen ventajas sobre una FFT global.

El aprendizaje automático y profundo amplía la clasificación de fallas, pero su aporte depende de la calidad del protocolo de validación. Separar corridas, velocidades, sensores y unidades físicas entre entrenamiento y prueba resulta más relevante para la aplicación automotriz que maximizar una exactitud obtenida sobre segmentos del mismo ensayo. La fusión con corriente, sonido o temperatura es prometedora cuando se mantiene trazabilidad de cada modalidad.

El principal aporte de la revisión fue integrar criterios técnicos para seleccionar métodos de vibración aplicables a cubos de rueda, motores y transmisiones. Se recomienda que futuras evaluaciones combinen aceleración medida cerca del soporte, referencia de velocidad, análisis de orden o demodulación y clasificadores con incertidumbre explícita, además de incorporar fallas naturales y pruebas bajo condiciones reales de conducción.

7. CONFLICTO DE INTERÉS

El autor o los autores declaran que no existen conflictos de interés relacionados con la preparación de este manuscrito.

9. REFERENCIAS

- Gangsar, P., Bajpei, A. R., & Porwal, R. (2022). A review on deep learning based condition monitoring and fault diagnosis of rotating machinery. *Noise & Vibration Worldwide*. <https://doi.org/10.1177/09574565221139638>
- Fort, A., Landi, E., Mugnaini, M., & Vignoli, V. (2023). A low complexity rolling bearing diagnosis technique based on machine learning and smart preprocessing. *Sensors*, 23(17), 7546. <https://doi.org/10.3390/s23177546>
- Najim, H. S., & Alsalaet, J. K. (2024). Cross-domain diagnosis of roller bearing faults based on the envelope analysis adaptive features and artificial neural networks. *Journal of Vibration and Control*. <https://doi.org/10.1177/10775463231191684>
- Su, H., Xiang, L., & Hu, A. (2024). Application of deep learning to fault diagnosis of rotating machineries. *Measurement Science and Technology*. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad1e20>

- Chung, K. J., & Lin, C. W. (2024). Condition monitoring for fault diagnosis of railway wheels using recurrence plots and convolutional neural networks (RP-CNN) models. *Measurement and Control*. <https://doi.org/10.1177/00202940231201376>
- Wang, T., Meng, H., Zhang, F., & Qin, R. (2024). Fault detection of wheelset bearings through vibration-sound fusion data based on grey wolf optimizer and support vector machine. *Technologies*, 12(9), 144. <https://doi.org/10.3390/technologies12090144>
- Liu, C., Zhang, X., Wang, R., Guo, Q., & Li, J. (2024). Vibration-based detection of axlebox bearing considering inner and outer ring raceway defects. *Lubricants*, 12(5), 142. <https://doi.org/10.3390/lubricants12050142>
- Shi, Q., & Yang, F. (2025). Composite fault diagnosis of rolling bearings based on EMD-AADPCI vibration images. *Frontiers in Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.3389/fmech.2025.1688598>
- Gao, W., Zhang, L., Ding, S., & Yang, G. (2025). A comparative experimental study on fault diagnosis of rolling bearings based on vibration and acoustic emission. *Journal of Physics: Conference Series*, 3009, 012074. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/3009/1/012074>
- He, X. (2025). Research on bearing fault diagnosis based on the fusion of CNN and LSTM algorithms. *Journal of Physics: Conference Series*, 3057, 012054. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/3057/1/012054>
- Shi, T., Ding, J., & He, X. (2025). A novel optimal resonance band selection method for wheelset-bearing fault diagnosis based on tunable-Q wavelet transform. *Journal of Vibration and Control*. <https://doi.org/10.1177/10775463241283663>
- Shah, R., Mittal, V., & Lotwin, M. (2025). Recent advances in vibration analysis for predictive maintenance of modern automotive powertrains. *Vibration*, 8(4), 68. <https://doi.org/10.3390/vibration8040068>
- Govindaswamy, T. R., & Ramadoss, R. (2026). A review of various fault diagnosis and RUL estimation techniques for predictive maintenance in industrial rotating machinery. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. <https://doi.org/10.1007/s42417-025-02322-6>
- Yadav, O. P., Joshi, D., & Chauhan, R. K. (2026). Recent trends on bearing faults diagnosis of IM using vibration signal: A critical review. *Sādhanā*. <https://doi.org/10.1007/s12046-026-03235-0>
- Hemati, A. (2026). Experimental investigation on bearing pitting fault diagnosis using multi-domain vibration analysis and advanced signal processing. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. <https://doi.org/10.1007/s11668-025-02361-x>
- Lu, R., Yang, Q., Li, C., & Yang, K. (2026). Recent advances in vibration condition-based fault diagnosis of rotating machinery. *Journal of Control and Decision*. <https://doi.org/10.1080/23307706.2025.2526054>
- Işık, B., Kılıç, K., Tanikyan, A., & Olcay, A. B. (2026). Artificial neural networks and time-frequency analysis for bearing fault detection under noisy conditions. *International*

Journal of System Assurance Engineering and Management.
<https://doi.org/10.1007/s13198-026-03297-7>

- Mhalhal, R. A., Shandiz, H. T., Pariz, N., & Jaber, A. A. (2026). An intelligent fault diagnosis framework for induction motors using vibration-current fusion based DWT with feature selection and dual-branch 1D CNN. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s40998-026-01114-2>
- Luo, X., Mao, J., Liu, T., & Sun, Z. (2026). Experimental investigation and deployment analysis of data-driven fault diagnosis methods for metro vehicles. *Journal of Engineering and Applied Science*. <https://doi.org/10.1186/s44147-026-01085-5>