

Comparación de firmas de vibración y corriente para la detección de fallos en engranajes rectos

Galo Segundo Jimenez Ludizaca¹, Mariela Cerrada¹, Mauricio Villacís Marín¹, René Vinicio Sánchez¹

¹Grupo de Investigación Desarrollo de Tecnologías Industriales (GIDTEC), Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Email: gjimenezl@est.ups.edu.ec

Email: mcerrada@ups.edu.ec

Email: mvillacis@ups.edu.ec

Email: rsanchezl@ups.edu.ec

Resumen

El mantenimiento basado en la condición de sistemas de transmisión de potencia, particularmente en cajas de engranajes, es crucial para la fiabilidad y eficiencia operativa en entornos industriales. Este estudio presenta una comparación exhaustiva entre las técnicas de análisis de vibraciones y análisis de firma de corriente del motor (AFCM) para la detección de severidad de fallos en engranajes rectos. Utilizando un banco de pruebas especialmente diseñado, se simulaban fallos por rotura de diente con diez niveles de severidad. Se adquirieron simultáneamente señales de vibración y corriente del motor bajo diferentes condiciones de operación. El procesamiento de señales incluyó la Transformada Rápida de Fourier, análisis de envolvente y análisis cepstral. Los resultados muestran que mientras el análisis de vibraciones es más sensible a fallos incipientes, el AFCM demuestra ser efectivo en la detección de fallos moderados a severos. Se observó una correlación significativa entre la severidad del fallo y las características espectrales de ambas señales. Este estudio proporciona una base cuantitativa para la selección e integración de técnicas de monitoreo de condición en sistemas de engranajes, contribuyendo al desarrollo de estrategias de mantenimiento predictivo más robustas y eficientes.

Palabras clave: mantenimiento basado en la condición; análisis de vibración; análisis de corriente del motor; detección de fallos.

Abstract

Condition-based maintenance of power transmission systems, particularly in gearboxes, is crucial for operational reliability and efficiency in industrial environments. This study presents a comprehensive comparison between vibration analysis and motor current signature analysis (MCSA) techniques for detecting fault severity in spur gears. Using a specially designed test bench, tooth breakage faults were simulated with ten severity levels. Vibration and motor current signals were simultaneously acquired under various operating conditions. Signal processing included Fast Fourier Transform, envelope analysis, and cepstral analysis. Results show that while vibration analysis is more sensitive to incipient faults, MCSA proves effective in detecting moderate to severe faults. A significant correlation was observed between fault severity and spectral characteristics of both signals. This study provides a quantitative basis for selecting and integrating condition monitoring techniques in gear systems, contributing to the development of more robust and efficient predictive maintenance strategies.

Keywords: condition-based maintenance, vibration analysis, motor current analysis, fault detection.

1. Introducción

El mantenimiento basado en la condición (MBC) ha emergido como una estrategia fundamental en la gestión de activos industriales, particularmente en el contexto de los sistemas de transmisión de potencia. Este enfoque, que se centra en el análisis continuo del estado de los equipos para optimizar las intervenciones de mantenimiento, ha ganado una relevancia significativa en las últimas décadas [1]. En el corazón de muchos sistemas de transmisión de potencia se encuentran las cajas de engranajes, componentes críticos que facilitan la conversión y transmisión de energía mecánica en una amplia gama de aplicaciones industriales.

Las cajas de engranajes, al ser elementos fundamentales en la cadena de transmisión de potencia, están sujetas a diversas formas de desgaste y fatiga que pueden comprometer su rendimiento y confiabilidad [2]. Entre los diversos tipos de fallos que pueden afectar a los engranajes tenemos el fallo por rotura de diente y la picadura, los cuales se destacan como dos de los más críticos y potencialmente perjudiciales. Estos tipos de fallos no solo pueden llevar a una pérdida súbita de funcionalidad, sino que también pueden desencadenar una cascada de daños en otros componentes del sistema [3].

La detección temprana y precisa de fallos en engranajes, especialmente aquellos relacionados con la rotura de dientes y picadura, se ha convertido en un área de investigación crucial en el campo del mantenimiento predictivo. Tradicionalmente, el análisis de vibraciones ha sido la técnica predominante para el diagnóstico de fallos en maquinaria rotativa, incluyendo las cajas de engranajes [4]. Esta técnica se basa en la premisa de que los fallos mecánicos generan patrones de vibración característicos que pueden ser detectados y analizados para identificar la naturaleza y severidad del problema.

Sin embargo, el análisis de vibraciones presenta ciertas limitaciones, particularmente en entornos industriales complejos donde el acceso a los puntos de medición puede representar un peligro para el operario. Además, la instalación de sensores de vibración a menudo requiere modificaciones en la maquinaria llegando a ser en algunos casos costosa [5]. Estas limitaciones han impulsado la búsqueda de métodos alternativos y complementarios para el diagnóstico de fallos en engranajes.

En este contexto, el análisis de firmas de corriente del motor (AFCM) ha emergido como una técnica prometedora para la detección de fallos en sistemas electromecánicos [6]. El AFCM se basa en el principio de que los fallos mecánicos en un sistema de

transmisión se reflejan en las características de la corriente eléctrica consumida por el motor que impulsa el sistema. Esta técnica ofrece varias ventajas potenciales, incluyendo su naturaleza no invasiva, ya que las mediciones de corriente pueden realizarse sin necesidad de acceder directamente a la maquinaria en funcionamiento [7].

Estudios han abordado la aplicación del AFCM y su comparación con técnicas de análisis de vibraciones. El trabajo presentado por Chingal et al. [8] se centró en la detección de fallos en engranajes mediante AFCM, demostrando la viabilidad de esta técnica para identificar fallos de rotura de diente y picadura. Sin embargo, este estudio se limitó a la aplicación del AFCM sin realizar una comparación directa con las técnicas de análisis de vibraciones, dejando un vacío en cuanto a la evaluación comparativa de ambas metodologías.

Por otro lado, el estudio publicado por Chingal et al. [9] comparó las señales de vibración y corriente para la detección de la severidad de fallos en engranajes. Aunque este trabajo proporcionó una base para la comparación de ambas técnicas, se limitó a un análisis cualitativo de los espectros de frecuencia y no profundizó en la cuantificación de la capacidad de detección de cada método para diferentes niveles de severidad de fallo.

El presente estudio busca abordar estos vacíos y avanzar en el conocimiento de la detección de fallos en engranajes mediante una comparación exhaustiva y cuantitativa de las técnicas de análisis de vibraciones y AFCM. La novedad de este trabajo radica en varios aspectos clave:

Se realiza un análisis comparativo detallado de las capacidades de detección de ambas técnicas para diferentes niveles de severidad de fallo, proporcionando una evaluación cuantitativa de la de cada método.

Se implementa un enfoque de procesamiento de señales más avanzado, incluyendo no solo la Transformada Rápida de Fourier (FFT), sino también técnicas de análisis de envolvente y cepstrum, lo que permite una caracterización más completa de las señales [10].

Se desarrolla un marco metodológico riguroso para la simulación controlada de fallos por rotura de diente, con una caracterización más detallada de los niveles de severidad, lo que permite una evaluación más precisa de la progresión del fallo [11].

Se exploran las sinergias y complementariedades entre las técnicas de análisis de vibraciones y AFCM, con el objetivo de desarrollar un enfoque integrado para el

diagnóstico de fallos que aproveche las fortalezas de ambos métodos [12].

Este estudio no solo busca comparar las técnicas existentes, sino también proporcionar una base sólida para el desarrollo de nuevos métodos de diagnóstico que combinen la información de múltiples fuentes de datos [13].

Este artículo se deriva del trabajo de titulación realizado por Galo Segundo Jiménez Ludizaca, titulado "Comparación de las firmas de vibración y corriente de un motor de inducción para la detección de severidad de fallos en engranajes rectos" [14].

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera: la sección de Metodología describe en detalle el diseño experimental, incluyendo la configuración del banco de pruebas, los protocolos de adquisición de datos y las técnicas de procesamiento de señales empleadas. La sección de Resultados presenta los hallazgos clave del estudio, incluyendo la comparación entre las firmas de vibración y corriente para diferentes niveles de severidad de fallo. La sección de Discusión interpreta estos resultados en el contexto de la literatura existente y explora sus implicaciones para la práctica del mantenimiento predictivo. Finalmente, la sección de Conclusiones resume los principales hallazgos del estudio y sugiere direcciones para futuras investigaciones en este campo.

2. Metodología

El presente trabajo se fundamenta en un enfoque experimental riguroso diseñado para comparar la eficacia de las técnicas de análisis de vibraciones y análisis de firma de corriente del motor en la detección de fallos en engranajes rectos. La metodología empleada se desarrolló en varias etapas secuenciales, comenzando con la preparación del banco de pruebas, seguido por la configuración de la caja de engranajes y el sistema de adquisición de datos. Posteriormente, se estableció una línea base, se implementaron fallos controlados, y se adquirieron datos bajo diversas condiciones operativas. Finalmente, se procesaron las señales utilizando técnicas avanzadas y se realizó un análisis comparativo exhaustivo de los resultados obtenidos mediante diferentes métodos de procesamiento de señales.

2.1. Banco de pruebas

El trabajo se llevó a cabo utilizando un banco de pruebas especializado desarrollado por el Grupo de Investigación y Desarrollo en Tecnologías Industriales (GIDTEC) de la Universidad Politécnica Salesiana. Este banco de pruebas, diseñado específicamente para la investigación en el campo del monitoreo de condición, está compuesto por cinco unidades

principales: unidad de mando, unidad motriz, unidad de carga, unidad de sistemas rotativos, unidad de sistema de adquisición de datos.

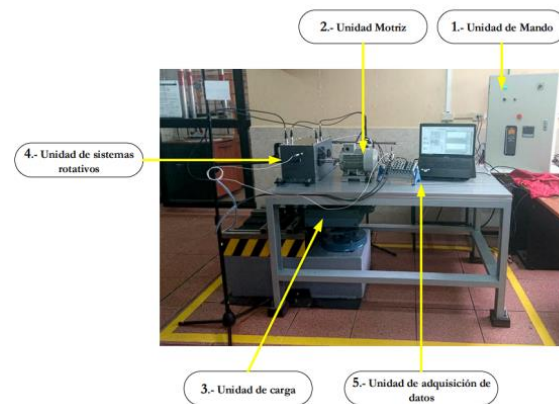


Figura 1: Unidades del Banco de Vibraciones

2.2. Caja de engranajes

La caja de engranajes utilizada en este trabajo fue de una etapa y está compuesta por engranajes rectos. Los engranajes fueron fabricados en material SAE/AISI 4140, con las siguientes especificaciones:

Piñón (Z1): 30 dientes, engrane (Z2): 54 dientes, ancho de los dientes: 20 mm, módulo: 2.5 y ángulo de presión: 20°.

2.3. Sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos está compuesto por los siguientes elementos: tres pinzas amperimétricas para la medición de corriente, 8 acelerómetros para la medición de vibraciones, tarjeta de adquisición de datos NI-9234, chasis cDAQ-9188, computador para el almacenamiento y procesamiento de datos.

La tarjeta NI-9234 es un módulo de adquisición de señales dinámicas de cuatro canales, diseñado para mediciones de alta precisión en aplicaciones de monitoreo de condición. Tiene una frecuencia de muestreo máxima de 51.2 kS/s por canal y una resolución de 24 bits. El chasis cDAQ-9188 proporciona la interfaz entre los módulos de adquisición y el computador, permitiendo una transferencia de datos rápida y eficiente a través de Ethernet.

Para la adquisición de señales de vibración, se utilizaron acelerómetros piezoeléctricos modelo ICP 603C01. Los acelerómetros fueron ubicados estratégicamente en la caja de engranajes siguiendo las recomendaciones de la norma ISO 10816-3. Se colocaron un total de 8 acelerómetros en diferentes posiciones para capturar las vibraciones en múltiples puntos y direcciones.

Para la adquisición de señales de corriente, se emplearon pinzas amperimétricas modelo Fluke i30s. Estas pinzas utilizan la tecnología de efecto Hall, lo que

permite una medición precisa y no invasiva de la corriente del motor. Las pinzas amperimétricas se instalaron en los cables de alimentación del motor, asegurando una medición no invasiva de la corriente en las tres fases.

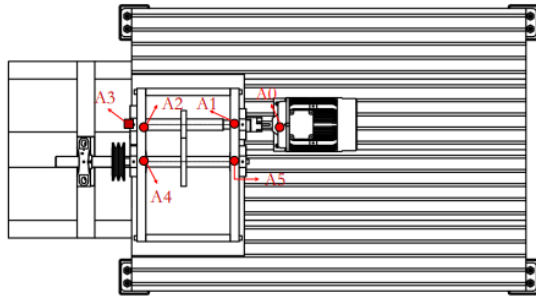


Figura 2: Esquema de emplazamiento de acelerómetros.

2.4. Protocolo experimental

2.4.1. Establecimiento de la línea base

Antes de la implementación de los fallos, se estableció una línea base rigurosa para caracterizar el comportamiento del sistema en condiciones normales de operación. Este proceso incluyó los siguientes pasos:

- 1 Verificación visual del sistema completo.
- 2 Comprobación de la ausencia de ruidos anormales.
- 3 Adquisición y análisis de señales de vibración y corriente en condiciones normales.
- 4 Validación de las frecuencias características del sistema.

Para la validación de la línea base, se calcularon las frecuencias características de los elementos de la caja de engranajes en buenas condiciones a una velocidad de 800 rpm. Estas frecuencias incluyen:

Frecuencia de giro (F_g): 13.3 Hz

Frecuencia de giro del piñón (1X piñón): 13.3 Hz

Frecuencia de giro del engrane (1X engrane): 13.3 Hz * (30/54)7.4 Hz

Frecuencia de engrane (GMF): 13.3 Hz * 30= 399 Hz

2.4.2. Simulación de fallos

Se implementaron fallos por rotura de diente en el piñón (Z1) de la caja de engranajes. Se diseñaron y fabricaron un total de 10 niveles de severidad, desde P1 (fallo incipiente) hasta P10 (fallo severo). Para este estudio, se analizaron específicamente los niveles P1, P4, P8 y P10. La caracterización de los niveles de severidad se realizó mediante las métricas presentadas en la Tabla 1.

Los fallos fueron implementados de manera progresiva, iniciando con un fallo leve y terminando

con la rotura completa del diente (Figura 3). Esta progresión permitió estudiar la evolución de las señales de vibración y corriente a medida que aumentaba la severidad del fallo.

Tabla 1. Métricas de los niveles de severidad.

Fallo	Porcentaje de rotura	Área [mm ²]	Esquema Área removida
P1	0%	0	
P4	31.25%	25.4063	
P8	81.25%	66.0563	
P10	100%	81.3	

2.4.3. Protocolo de adquisición de datos

Para cada nivel de severidad, se adquirieron señales de vibración y corriente bajo las siguientes condiciones:
Velocidad de operación: 800 rpm

Niveles de carga: 0V, 5V y 10V (controlados por el freno magnético)

Los parámetros de adquisición de señales incluyeron un tiempo de adquisición de 10 segundos y una frecuencia de muestreo de 50 kS/s para los sensores de corriente y acelerómetros.

Se realizaron diez repeticiones para cada combinación de condiciones, asegurando la reproducibilidad y fiabilidad de los resultados. Esto permitió obtener un conjunto de datos robusto para el análisis comparativo posterior.

2.5. Procesamiento de señales

El procesamiento de las señales adquiridas se realizó mediante técnicas avanzadas implementadas en MATLAB 2022a. Los principales métodos de análisis incluyeron:

2.5.1. Transformada Rápida de Fourier (FFT)

La FFT se aplicó tanto a las señales de vibración como a las de corriente para obtener sus respectivos espectros de frecuencia. Este análisis permite identificar las componentes de frecuencia características asociadas a los fallos en los engranajes.

Para las señales de vibración, se analizaron los espectros en términos de frecuencia vs. aceleración (m/s^2) y frecuencia vs. decibelios. Para las señales de corriente, se utilizaron representaciones de frecuencia vs. amplitud (A) y frecuencia vs. decibelios.

2.5.2. Análisis de envolvente

El análisis de envolvente se utilizó principalmente para las señales de vibración, con el objetivo de detectar y caracterizar las modulaciones de amplitud asociadas a los fallos en los engranajes. Esta técnica es particularmente útil para la detección de fallos

incipientes y la caracterización de la severidad del fallo.

2.5.3. Análisis Cepstral

El análisis cepstral se aplicó como técnica complementaria para la detección de periodicidades en el espectro, lo cual es particularmente útil para la identificación de fallos en engranajes. Esta técnica permite separar las componentes de excitación de las componentes de respuesta del sistema, facilitando la identificación de patrones característicos de fallo.

2.6. Análisis comparativo

El análisis comparativo se centró en evaluar la eficacia de las técnicas de análisis de vibraciones y AFCM para la detección y caracterización de fallos en engranajes. Este análisis incluyó los siguientes aspectos:

2.6.1. Comparación visual de espectros

Se realizó una comparación visual detallada de los espectros obtenidos mediante las diferentes técnicas de procesamiento (FFT, envolvente, cepstrum) tanto para las señales de vibración como para las de corriente. Esta comparación permitió identificar las características más prominentes asociadas a los fallos y evaluar la capacidad de cada técnica para resaltar estas características.

2.6.2. Análisis de sensibilidad

Se evaluó la capacidad de cada técnica para detectar fallos incipientes, determinando el nivel mínimo de severidad detectable. Esto se realizó comparando los espectros obtenidos para diferentes niveles de severidad con la línea base establecida.

2.6.3. Análisis de progresión del fallo

Se estudió la evolución de los indicadores espectrales a medida que aumentaba la severidad del fallo, estableciendo curvas de tendencia para cada técnica. Esto permitió evaluar la capacidad de cada método para cuantificar la progresión del fallo.

2.6.4. Robustez frente a condiciones operativas

Se analizó la consistencia de los indicadores de fallo bajo diferentes cargas (0V, 5V, 10V), evaluando la robustez de cada técnica frente a variaciones en las condiciones de operación.

2.6.5. Comparación de frecuencias características

Se realizó una comparación detallada de las frecuencias características (GMF, armónicos, bandas laterales) identificadas por cada técnica. Se evaluó la precisión en la localización de estas frecuencias y la capacidad de cada método para detectar cambios sutiles en su amplitud y distribución.

3. Resultados

3.1 Comparación visual de espectros

La comparación visual de los espectros obtenidos mediante las diferentes técnicas de procesamiento reveló diferencias significativas en la capacidad de cada método para detectar y caracterizar los fallos en engranajes.

3.1.1 Análisis de vibraciones

En el análisis de vibraciones, la Transformada Rápida de Fourier (FFT) y el análisis de envolvente demostraron ser las técnicas más efectivas para la identificación de fallos. La FFT, en particular, permitió una clara visualización de la frecuencia de engrane (GMF) y sus armónicos.

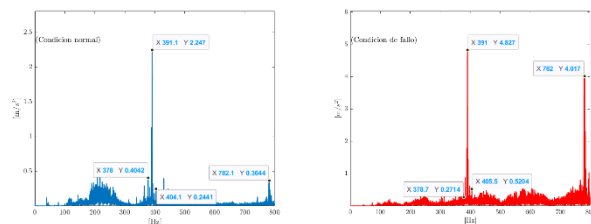


Figura 3: Comparación de espectros de vibración en condición normal y con fallo.

Como se observa en la Figura 3, la amplitud de la GMF (localizada aproximadamente en 391 Hz) aumentó significativamente en presencia de fallos, pasando de 2.247 m/s² en condición normal a 6.266 m/s² en condición de fallo. Además, se observó la aparición de bandas laterales alrededor de la GMF, indicativas de la modulación causada por el fallo.

El análisis de envolvente, por su parte, demostró ser particularmente sensible a fallos incipientes, permitiendo detectar cambios sutiles en la modulación de la señal de vibración incluso en etapas tempranas del desarrollo del fallo.

3.1.2 Análisis de corriente

En el caso del análisis de firma de corriente del motor (AFCM), la FFT también demostró ser la técnica más efectiva para la detección de fallos.

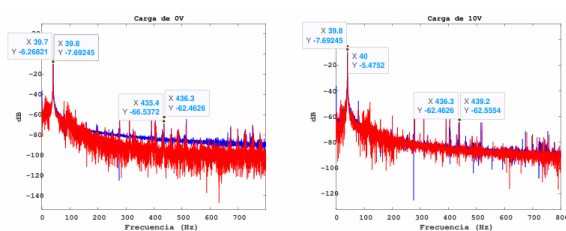


Figura 4: Comparación de los espectros de corriente en condición normal y con fallo.

Como se aprecia en la Figura 4, aunque los cambios en la amplitud de la GMF no fueron tan pronunciados como en el análisis de vibraciones, se observó un incremento significativo en el ruido de fondo del espectro en presencia de fallos. La GMF se localizó alrededor de 436 Hz en la mayoría de los casos, con ligeras variaciones dependiendo de la carga aplicada.

3.1.3 Comparación entre técnicas

La comparación visual entre las técnicas de análisis de vibraciones y AFCM reveló que, en general, el análisis de vibraciones proporcionó indicaciones más claras y directas de la presencia de fallos. Sin embargo, el AFCM demostró ser una herramienta complementaria valiosa, especialmente en la detección de fallos más severos.

3.2. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se centró en evaluar la capacidad de cada técnica para detectar fallos incipientes y discriminar entre diferentes niveles de severidad.

3.2.1 Análisis de vibraciones

El análisis de vibraciones demostró una alta sensibilidad a fallos incipientes. En el nivel de severidad P1 (1.3% de rotura), la amplitud de la GMF en el espectro de vibración aumentó de 2.897 m/s² en condición normal a 6.15 m/s² en condición de fallo, un incremento de más del 112%.

La técnica de envolvente mostró una sensibilidad aún mayor, con un aumento en la amplitud de la GMF de 1.013 m/s² en condición normal a 26.78 m/s² en el nivel P1, representando un incremento de más del 2500%.

3.2.2 Análisis de corriente

El AFCM mostró una sensibilidad menor a fallos incipientes en comparación con el análisis de vibraciones. En el nivel P1, los cambios en la amplitud de la GMF fueron menos pronunciados, pasando de 0.00082 A en condición normal a 0.0008 A en condición de fallo.

Sin embargo, el AFCM demostró ser sensible a cambios en la distribución espectral general, con un aumento notable en el ruido de fondo en presencia de fallos, incluso en niveles de severidad bajos.

3.3 Análisis de progresión de fallo

El análisis de la progresión del fallo se realizó comparando los espectros obtenidos para los diferentes niveles de severidad (P1, P4, P8 y P10).

3.3.1 Análisis de vibraciones

En el análisis de vibraciones, se observó una clara tendencia de aumento en la amplitud de la GMF y sus armónicos a medida que aumentaba la severidad del fallo, lo cual se observa en esta progresión:

- P1: 6.15 m/s²
- P4: 6.34 m/s²
- P8: 4.82 m/s²
- P10: 6.26 m/s²

Es interesante notar que la amplitud en P8 es menor que en P4 y P10, lo que podría indicar un comportamiento no lineal en la progresión del fallo.

La técnica de envolvente mostró una tendencia diferente:

- P1: 39.02 m/s²
- P4: 24.08 m/s²
- P8: 13.05 m/s²
- P10: 14.46 m/s²

En este caso, se observa una disminución en la amplitud con el aumento de la severidad, excepto para P10.

3.3.2 Análisis de corriente

En el AFCM, la progresión del fallo se reflejó principalmente en cambios en la localización de la GMF y en el aumento del ruido de fondo. Lo cual se observa a continuación:

- P1: 440.5 Hz, -61.36 dB
- P4: 439.5 Hz, -60.97 dB
- P8: 436.6 Hz, -62.88 dB
- P10: 439.2 Hz, -62.55 dB

Aunque las variaciones en amplitud son menos pronunciadas que en el análisis de vibraciones, se observa una tendencia general de desplazamiento de la GMF hacia frecuencias más cercanas al valor teórico (440 Hz) a medida que aumenta la severidad del fallo.

3.4 Robustez frente a condiciones operativas

Se evaluó la robustez de cada técnica analizando su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga (0V, 5V y 10V).

3.4.1 Análisis de vibraciones

El análisis de vibraciones demostró ser relativamente robusto frente a cambios en las condiciones de carga. Aunque se observaron ligeras variaciones en las amplitudes, las frecuencias características (GMF y sus armónicos) se mantuvieron consistentes en todas las condiciones de carga.

Por ejemplo, para el nivel de severidad P10:

- 0V: GMF a 391.2 Hz, 4.26 m/s²
- 5V: GMF a 391.1 Hz, 4.82 m/s²
- 10V: GMF a 390.7 Hz, 6.26 m/s²

Aunque hay un aumento en la amplitud con la carga, la frecuencia se mantiene estable, facilitando la identificación del fallo independientemente de las condiciones operativas.

3.4.2 Análisis de la firma de corriente

El AFCM mostró una mayor sensibilidad a las variaciones en las condiciones de carga. Se observaron cambios tanto en la amplitud como en la localización de la GMF bajo diferentes cargas.

Para el nivel de severidad P10:

- 0V: GMF a 435.4 Hz, -69.81 dB
- 5V: GMF a 436.2 Hz, -66.30 dB
- 10V: GMF a 439.2 Hz, -62.55 dB

Esta variabilidad sugiere que el AFCM puede requerir de calibraciones para diferentes condiciones operativas que permitan garantizar una detección de fallos confiable.

3.5 Comparación de frecuencias características

Se realizó una comparación detallada de las frecuencias características identificadas por cada técnica, centrándose en la GMF y sus armónicos.

3.5.1 Análisis de vibraciones

En el análisis de vibraciones, la GMF se localizó consistentemente alrededor de 391 Hz, muy cerca del valor teórico calculado de 399 Hz. Además, se identificaron claramente los armónicos de la GMF, particularmente el segundo armónico (2GMF) alrededor de 782 Hz.

Las bandas laterales alrededor de la GMF también fueron claramente visibles, ubicadas a ± 13.3 Hz de la GMF, correspondiendo a la frecuencia de rotación del eje de entrada.

3.5.2 Análisis de firmas de corriente

En el AFCM, la identificación de la GMF fue más variable, oscilando entre 435 Hz y 440 Hz dependiendo de las condiciones de carga y severidad del fallo. Esta variabilidad puede atribuirse a las interacciones complejas entre el campo electromagnético del motor y las vibraciones mecánicas inducidas por el fallo.

Las bandas laterales en el espectro de corriente fueron menos prominentes que en el análisis de vibraciones,

pero aún detectables, especialmente en los niveles de severidad más altos.

3.5.3 Comparación entre técnicas

Aunque ambas técnicas fueron capaces de identificar las frecuencias características asociadas a los fallos en engranajes, el análisis de vibraciones demostró una mayor precisión y consistencia en la localización de estas frecuencias. El AFCM, por otro lado, mostró una mayor sensibilidad a las condiciones operativas, lo que podría ser ventajoso en ciertas aplicaciones donde se requiere detectar cambios sutiles en el comportamiento del sistema.

3.6 Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio proporcionan una comparación exhaustiva entre las técnicas de análisis de vibraciones y AFCM para la detección de fallos en engranajes rectos. Estos hallazgos se alinean en varios aspectos con los trabajos previos de Chingal et al. [8], al tiempo que ofrecen nuevas perspectivas sobre las capacidades y limitaciones de cada técnica.

En concordancia con el estudio de Chingal et al. [8] presentado en el XV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, nuestros resultados confirman la viabilidad del AFCM para la detección de fallos en engranajes. Sin embargo, nuestro estudio va más allá al proporcionar una comparación directa con el análisis de vibraciones, revelando que, aunque el AFCM es capaz de detectar fallos, generalmente muestra una menor sensibilidad a fallos incipientes en comparación con las técnicas de análisis de vibraciones.

Por otro lado, nuestros hallazgos amplían las observaciones de Chingal et al. [9] publicadas en la revista *Bistua*. Mientras que su estudio se limitó a un análisis cualitativo de los espectros de frecuencia, nuestro trabajo proporciona una evaluación cuantitativa detallada de la capacidad de detección de cada método para diferentes niveles de severidad de fallo. Esta cuantificación permite una evaluación más precisa de la progresión del fallo y de la sensibilidad de cada técnica a diferentes niveles de daño.

Un aspecto notable de nuestro estudio es la observación de que el AFCM muestra una mayor sensibilidad a las condiciones operativas, particularmente a los cambios en la carga, en comparación con el análisis de vibraciones. Esta característica, no explorada en detalle en los trabajos anteriores de Chingal et al., sugiere que el AFCM podría ser especialmente útil en aplicaciones donde se requiere detectar cambios sutiles en las condiciones de operación del sistema, complementando así la información proporcionada por el análisis de vibraciones.

En resumen, nuestros resultados subrayan la complementariedad de las técnicas de análisis de vibraciones y AFCM para la detección y caracterización de fallos en engranajes. Mientras que el análisis de vibraciones demuestra ser más robusto y sensible para la detección de fallos incipientes, el AFCM ofrece ventajas en términos de facilidad de implementación y sensibilidad a cambios en las condiciones operativas. Estos hallazgos sugieren que un enfoque integrado que combine ambas técnicas podría proporcionar una estrategia de diagnóstico más completa y confiable para el mantenimiento basado en la condición de sistemas de engranajes.

4. Conclusiones

El presente estudio ha proporcionado una comparación exhaustiva entre las técnicas de análisis de vibraciones y análisis de firma de corriente del motor (AFCM) para la detección y caracterización de fallos en engranajes rectos. A través de un riguroso protocolo experimental y un análisis detallado de los datos obtenidos, se han revelado importantes hallazgos que contribuyen significativamente al campo del mantenimiento basado en la condición.

En primer lugar, se ha confirmado la eficacia general de ambas técnicas para la detección de fallos en engranajes. Sin embargo, se han observado diferencias significativas en su sensibilidad, robustez y capacidad para caracterizar la progresión de los fallos. El análisis de vibraciones ha demostrado ser particularmente efectivo en la detección temprana de fallos, mostrando una alta sensibilidad incluso a fallos incipientes. La clara visualización de la frecuencia de engrane (GMF) y sus armónicos en los espectros de vibración proporciona indicadores confiables de la presencia y severidad de los fallos.

Por otro lado, el AFCM, aunque menos sensible a fallos incipientes, ha demostrado ser una herramienta valiosa, especialmente para la detección de fallos más severos. Su principal ventaja radica en la facilidad de implementación y en su capacidad para detectar cambios sutiles en las condiciones operativas del sistema. El aumento del ruido de fondo en los espectros de corriente se ha revelado como un indicador significativo de la presencia de fallos, incluso cuando los cambios en la amplitud de la GMF no son tan pronunciados como en el análisis de vibraciones.

Un hallazgo importante de este estudio es la variabilidad observada en la progresión de los fallos. Contrariamente a lo que se podría esperar, no se observó una relación lineal simple entre la severidad del fallo y la amplitud de las frecuencias características. Esto subraya la complejidad de los sistemas de engranajes y la

necesidad de un enfoque multidimensional en el diagnóstico de fallos.

La robustez de las técnicas frente a diferentes condiciones operativas también ha sido un aspecto clave de este estudio. El análisis de vibraciones ha demostrado ser más consistente bajo diferentes condiciones de carga, manteniendo una localización estable de las frecuencias características. El AFCM, por su parte, mostró una mayor sensibilidad a las variaciones en las condiciones de carga, lo que podría ser ventajoso en ciertas aplicaciones, pero también requiere una calibración más cuidadosa para garantizar resultados confiables.

En cuanto a la identificación de frecuencias características, ambas técnicas fueron capaces de localizar la GMF y sus armónicos. Sin embargo, el análisis de vibraciones mostró una mayor precisión y consistencia en esta tarea. La variabilidad observada en la localización de la GMF en el AFCM subraya la complejidad de las interacciones entre los fallos mecánicos y las señales eléctricas del motor.

Estos resultados tienen implicaciones significativas para la práctica del mantenimiento predictivo. Sugieren que un enfoque integrado que combine ambas técnicas podría proporcionar una estrategia de diagnóstico más completa y confiable. El análisis de vibraciones podría ser la herramienta principal para la detección temprana de fallos y su caracterización detallada, mientras que el AFCM podría complementar esta información proporcionando insights adicionales sobre las condiciones operativas del sistema y sirviendo como una técnica de respaldo en situaciones donde la instalación de sensores de vibración no es práctica o segura.

Es importante señalar las limitaciones de este estudio. Los experimentos se realizaron en un banco de pruebas controlado, y la extrapolación de estos resultados a sistemas industriales complejos debe hacerse con cautela. Además, solo se consideraron fallos por rotura de diente en engranajes rectos. Futuros estudios podrían expandir esta investigación a otros tipos de fallos y configuraciones de engranajes.

5. Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Politécnica Salesiana por su apoyo a esta investigación por medio de grupo de investigación GIDTEC.

6. Referencias

[1] A. K. S. Jardine, D. Lin, and D. Banjevic, "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance,"

- Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 20, no. 7, pp. 1483-1510, 2006.
- [2] F. Chaari, W. Baccar, M. S. Abbes, and M. Haddar, "Effect of spalling or tooth breakage on gearmesh stiffness and dynamic response of a one-stage spur gear transmission," *European Journal of Mechanics - A/Solids*, vol. 27, no. 4, pp. 691-705, 2008.
- [3] Z. Feng and M. J. Zuo, "Vibration signal models for fault diagnosis of planetary gearboxes," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 331, no. 22, pp. 4919-4939, 2012.
- [4] R. B. Randall, *Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [5] W. Wang and A. K. Wong, "Autoregressive model-based gear fault diagnosis," *Journal of Vibration and Acoustics*, vol. 124, no. 2, pp. 172-179, 2002.
- [6] M. E. H. Benbouzid, "A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 5, pp. 984-993, 2000.
- [7] S. Nandi, H. A. Toliyat, and X. Li, "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors—A review," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 4, pp. 719-729, 2005.
- [8] D. Chingal et al., "Detección de fallos en engranajes a través del análisis de firma de corriente del motor," *XV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, 2022.
- [9] D. Chingal et al., "Comparación de señales de vibración y corriente para la detección de la severidad de fallos en engranajes," *Revista Bistua*, vol. 17, no. 1, pp. 187-195, 2019.
- [10] R. Yan, R. X. Gao, and X. Chen, "Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: A review with applications," *Signal Processing*, vol. 96, pp. 1-15, 2014.
- [11] Y. Lei, J. Lin, M. J. Zuo, and Z. He, "Condition monitoring and fault diagnosis of planetary gearboxes: A review," *Measurement*, vol. 48, pp. 292-305, 2014.
- [12] J. Zarei and J. Poshtan, "Bearing fault detection using wavelet packet transform of induction motor stator current," *Tribology International*, vol. 40, no. 5, pp. 763-769, 2007.
- [13] P. Večeř, M. Kreidl, and R. Šmíd, "Condition indicators for gearbox condition monitoring systems," *Acta Polytechnica*, vol. 45, no. 6, pp. 35-43, 2005.
- [14] G. S. Jiménez Ludizaca, "Comparación de las firmas de vibración y corriente de un motor de inducción para la detección de severidad de fallos en engranajes rectos," *Trabajo de titulación, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador*, 2023. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/26895>