

Comparación de señales de vibración y corriente para la detección de la severidad de fallos en engranajes

Comparison of vibration and current signals for the detection of the severity of faults in gears

David Chingal¹.; Vinicio Sánchez².;Diego Cabrera³.;Mariela Cerrada⁴.;
Rafael Vásquez⁵

¹ Ingeniero mecánico, GIDTEC, Universidad Politécnica Salesiana. cide-91@hotmail.com

² PhD Investigador, GIDTEC, Universidad Politécnica Salesiana. rsanchezl@ups.edu.ec

³ PhD Investigador, GIDTEC, Universidad Politécnica Salesiana. dcabrera@ups.edu.ec

⁴ PhD Investigador, GIDTEC, Universidad Politécnica Salesiana. mcerrada@ups.edu.ec

⁵ PhD Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Bolivariana. rafael.vasquez@upb.edu.co

Resumen

Está investigación tiene como objetivo comparar las señales de vibración y corriente de un motor de inducción para la detección de la severidad de fallos en engranajes. Para realizar el estudio de simulación los fallos de picadura y rotura de diente en engranes rectos con un total de nueve niveles de severidad para cada fallo. Como resultado mediante la aplicación de la FFT a las señales adquiridas se identificó la existencia de bandas laterales a través de la frecuencia de línea de alimentación del motor tales como; frecuencias de rotación del eje de entrada, eje de salida y frecuencias de engranaje, donde la vibración pudo detectar fallos incipientes y mediante la señal de corriente fallos severos.

Palabras clave: afcm, engranes, monitoreo de la condición, severidad de fallos.

Abstract

This research aims to compare the vibration and current signals of an induction motor for the detection of the severity of gear faults. To perform the study, they simulated pitting and tooth breakage failures in straight gears with a total of

nine levels of severity for each failure. As a result of the application of the FFT to the acquired signals, the existence of sidebands was identified through the frequency of the motor power line such as; rotation frequencies of the input shaft, output axis and gear frequencies, where the vibration was able to detect incipient failures and through the current signal severe failures. This research aims at the acquisition of electrical current signals from the induction motor coupled to a gearbox using the MCSA technique, this with the purpose of contribution in the study of gears faults detection by electrical current signals. The simulated faults were pitting and tooth breakage in spur gears with a total of nine severity levels for each fault. As a result, the existence was identified of sidebands through the power line frequency of motor such as; rotation frequencies of the input shaft, output shaft and gear frequencies.

Keywords: MCSA, gears, condition monitoring, fault severity.

1. Introducción

Los fallos en sistemas mecánicos como las cajas de engranajes pueden ser determinados por medio del monitoreo de la condición, los métodos de monitoreo más empleados son: vibraciones, emisiones acústicas, corriente eléctrica, ensayos no destructivos y tribológicos.

El monitoreo por vibraciones es la técnica de mayor uso para detectar fallos en cajas de engranajes, las vibraciones identifican con exactitud alrededor del 90% de todos los fallos, de manera que se pueda tomar acciones de mantenimiento tempranas (Devendiran & Manivannan, 2016). El monitoreo por corriente eléctrica, detecta fallos en los motores trifásicos, los fallos de rotura del rotor, excentricidad, rodamientos, etc., son detectados por medio del análisis de firma de corriente del motor (AFCM). El AFCM detecta la vibración generada por la caja de engranajes debido a que el motor eléctrico se comporta como un transductor logrando detectar las frecuencias de los componentes mecánicos de la caja de engranajes y convertirlas en corrientes inducidas, generadas en los devanados del motor (Schoen, Habetler, Kamran, & Bartfield, 1995). Existen varias investigaciones sobre el uso del AFCM en la detección de fallos en sistemas mecánicos los cuales se presentan en (Ye, Wu, & Sadeghian, 2003), (Kar & Mohanty, 2006).

En este trabajo se presenta la comparación de las señales de vibración y corriente adquiridas de la caja de engranes, con el fin de comparar la señal de corriente cuando el engrane presenta fallo en sus dientes.

2. Antecedentes

2.1 Análisis de firma de corriente del motor (AFCM)

La técnica AFCM es la más usada para el diagnóstico de la condición del motor eléctrico (Benbouzid, 2000). EL AFCM puede

diagnosticar el estado de las barras del rotor, devanado, excentricidad y rodamientos. Para realizar este análisis es necesario adquirir información de la señal de corriente que alimenta al motor eléctrico mediante un sensor de corriente eléctrica.

Para detectar fallos de los elementos mecánicos fuera del motor, se han encontrado algunos documentos como (Kar & Mohanty, 2006) los cuales detectan fallos en engranes por medio de las fluctuaciones de torque en la caja de engranajes que se generan debido a fallos en los engranes.

Los autores (Xu, De Doncker, & Novotny, 1988) desarrollaron una ecuación para calcular el torque del entrehierro de un motor de inducción y se presenta en la Ecuación (1).

$$T = \frac{3 P_p}{2} \lambda_s i_{sT} \quad (1)$$

Donde:

P_p : número de par de polos

λ_s : amplitud de enlace del flujo del estator

i_{sT} : componente de la corriente del estator en la dirección 90 grados por delante del vector de flujo, también denomina componente del torque motor.

En presencia de la vibración torsional a la frecuencia (f_o) el torque del entrehierro (T) del motor de inducción se calcula con la Ecuación (2) (Mohanty, 2014).

$$T = T_0 + A_T \cos(2\pi f_o t + \phi) \quad (2)$$

Donde:

T_0 : torque promedio.

A_T : torque de giro en el eje de la maquinaria rotativa.

f_o : velocidad del eje de la maquinaria rotativa.

ϕ : fase respectiva de f_o .

Por lo tanto, sólo los efectos de las vibraciones torsionales causadas por las frecuencias de rotación del eje son considerados en las señales de corriente. Cada corriente de fase del estator consiste en un componente de corriente magnetizante i_{sM} , que está en fase con el vector de

189
 flujo; y un componente del torque motor i_{sT} , que está 90° por delante del vector de flujo. Estos componentes están dados por las Ecuaciones (3) y (4) (Mohanty, 2014) y se presenta en la Figura. 1.

$$i_{sM} = i_{sM0} + A_{sM} \text{sen}(2\pi f_0 t + \varphi_M) \quad (3)$$

$$i_{sT} = i_{sT0} + A_{sT} \text{sen}(2\pi f_0 t + \varphi_T) \quad (4)$$

Donde:

i_{sM0} e i_{sT0} : valor promedio de las componentes i_{sM} e i_{sT} .

A_{sM} y A_{sT} son proporcionales a A_T .

φ_M y φ_T son las fases respectivas donde se proyecta la corriente magnetizante y torque del motor.

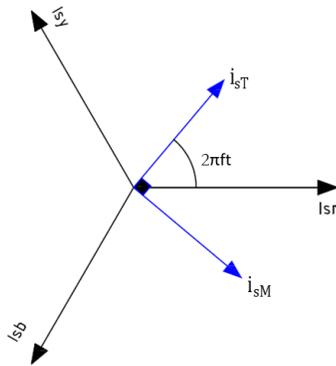


Figura. 1. Diagrama vectorial de las componentes de corriente en el motor de inducción

La corriente del estator I_{sr} como se presenta en la Figura. 1, puede ser medida cuando se proyecta sobre la corriente de fase r del motor trifásico con una frecuencia de alimentación eléctrica f . La corriente se puede calcular con la Ecuación (5) (Mohanty, 2014), (Bravo Imaz, 2018).

$$I_{sr} = i_{s0} \text{sen}(2\pi f t + \varphi_{s0}) + \frac{1}{2} \{ A_{sM} \cos[2\pi(f - f_0)t - \varphi_M] + A_{sT} \cos[2\pi(f - f_0)t - \varphi_T] \} - \frac{1}{2} \{ A_{sM} \cos[2\pi(f + f_0)t + \varphi_M] - A_{sT} \cos[2\pi(f + f_0)t + \varphi_T] \} \quad (5)$$

La Ecuación (5) establece que el efecto de una vibración con una frecuencia f_0 puede observarse fácilmente en la corriente de alimentación como componentes de bandas laterales de frecuencia $(f+f_0)$ y $(f-f_0)$ (Bravo Imaz, 2018).

Cuando no hay defectos en el motor de inducción y ningún torque de carga, la corriente dibuja una onda sinusoidal pura (Mohanty, 2014) cómo se presenta en la Figura. 2. Pero debido a las frecuencias oscilantes i_{sM} e i_{sT} , y la Ecuación (5), la forma de onda de la corriente se verá afectada en cualquiera de sus fases como se presenta en la Figura. 3.

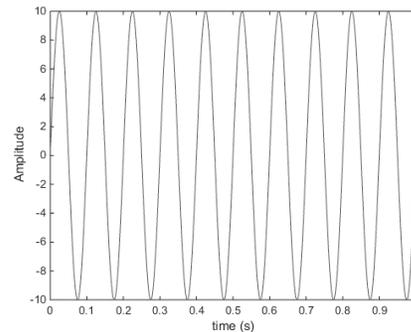


Figura. 2. Onda sinusoidal de un motor sin carga

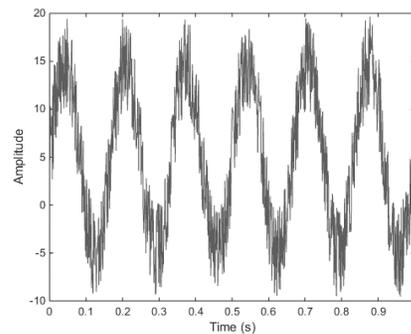


Figura. 3. Onda sinusoidal con torque y carga en el motor

En la Figura. 3, se presenta que el torque ejercido en el eje del motor, induce bandas laterales a través de la frecuencia de alimentación eléctrica en la firma de corriente dibujada por un motor de inducción. Este torque dará lugar posteriormente a fluctuaciones en la velocidad, que es simplemente la vibración torsional del eje.

Los fallos en engranes producen una anomalía en el par de carga, el cual es detectado por el motor. Esta anomalía se transfiere a la corriente del motor desde la carga. Dependiendo de la anomalía, se pueden ver frecuencias únicas en el espectro de frecuencia actual (Wang, 2001). Las oscilaciones mecánicas en la caja de engranajes cambian la excentricidad en el entrehierro, lo que resulta en cambios en la forma de onda de la corriente. En consecuencia, esto puede inducir componentes de corriente a la frecuencia de alimentación y se observa en la Figura. 4.

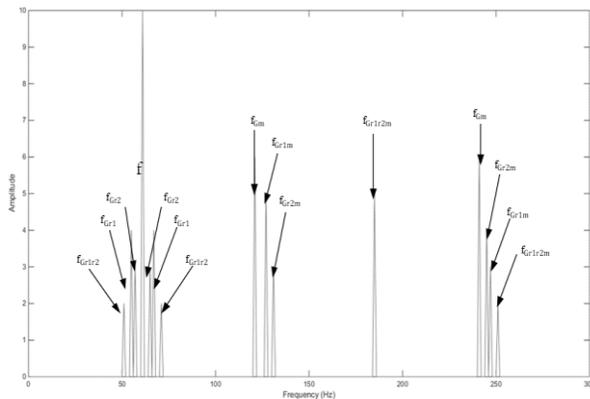


Figura. 4. Componentes de frecuencia de corriente alrededor de la frecuencia de alimentación

Donde:

f es la frecuencia de alimentación eléctrica del motor.

$m, n, q=1, 2, 3, \dots$ son los números de armónicos presentes en la señal de corriente.

f_{r1} y f_{r2} son las velocidades de rotación del eje de entrada y salida de la caja de engranajes.

f_m es la frecuencia de engranaje (GMF).

f_{Gr1} y f_{Gr2} son las componentes de frecuencia de giro del eje de entrada y salida de la caja de engranajes.

f_{Gr1r2} es la suma de las componentes de la frecuencia de giro del eje de entrada y salida de la caja de engranajes.

f_{Gm} es la componente de la frecuencia de engranaje (GMF).

f_{Gr1m} y f_{Gr2m} es la suma de las componentes de la frecuencia de engranaje y frecuencia de giro de los ejes de entrada y salida de la caja de engranajes respectivamente.

f_{Gr1r2m} es la suma total de la frecuencia de engranaje y frecuencia de giro de los ejes de entrada y salida de la caja de engranajes respectivamente.

2.2 Frecuencia de engranaje (GMF)

La frecuencia de engranaje (GMF), es la frecuencia a la que los dientes del engranaje se acoplan en una caja de engranajes. Hay tres frecuencias importantes involucradas en las cajas de engranajes: velocidad de entrada, frecuencia de engranaje y velocidad de salida. Las cajas de engranajes siempre tendrán un fuerte componente de vibración en la frecuencia de engranaje (Jin, Cheng, Peng, Qiao, & Qu, 2016).

Para calcular la frecuencia de engranaje se utiliza la Ecuación (6) y la forma del espectro de frecuencia se presenta en la Figura. 5.

$$GMF = F_g Z_1 \text{ [Hz]} \quad (6)$$

Donde:

F_g es la velocidad de entrada del motor eléctrico en Hertz

Z_1 es el número de dientes del piñón

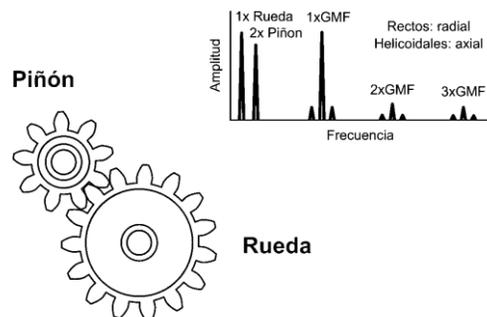


Figura. 5. Espectro característico de los engranes

3. Metodología

3.1 Banco de vibraciones

El banco de vibraciones está compuesto por un motor de inducción trifásico, una caja de engranajes de diente rectos de una etapa, un freno magnético que actúa como carga mecánica.

El motor de inducción trifásico es de 2 Hp, 1110 rpm, 60 Hz y 3 polos el cual está conectado a un variador de frecuencia Danfoss VLT 1.5 kW, el movimiento que se transmite al eje de entrada de la caja de engranajes es mediante un acople flexible. En el eje de salida de la caja de engranajes se ubica una polea que trasmite el movimiento al freno magnético Rosati de 8.83 kW, el cual permite simular la aplicación de cargas. La carga del freno es controlada por una fuente de voltaje de corriente continua marca TDK-Lambda, GEN 100-15-is510. La configuración del banco de vibraciones se presenta en la Figura. 6 y las especificaciones técnicas en la tabla 1.

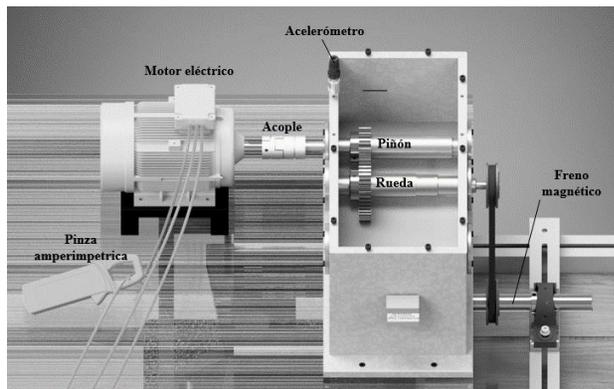


Figura. 6. Banco de vibraciones

Tabla 1. Especificaciones del banco de vibraciones

Características del banco	
Piñón	32 dientes
Rueda	48 dientes
Pinza amperimétrica	Cantidad 1
Acelerómetro	Cantidad 1
Velocidad	6 Hz, 12Hz, 16Hz
GMF	192 Hz, 384 Hz, 512Hz
Frecuencia alimentación motor	18 HZ, 36Hz, 48Hz

3.2 Severidad de fallos

Los fallos en engranes se pueden atribuir a la deficiencia del material, desgaste con el transcurrir de las horas de funcionamiento, funcionamiento defectuoso, defecto de montaje y mala lubricación (Radzevich, 2016), (Moya Rodríguez et al., 2014). Los tipos de fallos utilizados son rotura de diente (*tooth breakage*) y picadura (*pitting*).

3.2.1 Rotura de diente

Los fallos por rotura de diente fueron construidos con una máquina fresadora, y fueron diseñados para replicar un fallo de rotura iniciando con un fallo leve, hasta concluir con un fallo severo con un total de 9 niveles de severidad tal como se presenta en la tabla 2 y Figura. 7.

Tabla 2. Niveles de severidad para rotura de diente

Código	Número de dientes	Longitud del fallo (m)	Área fallo (mm ²)	Volumen fallo (mm ³)	Porcentaje de fallo (%)	Nivel de severidad
----	0	0	0	0	0.0	Normal
P1	1	5.5	0.84	4.62	1.3	Leve
P2	1	15	0.95	14.25	4.0	Leve
P3	1	20	1.35	27.00	7.5	Leve
P4	1	10	4.05	40.50	11.3	Leve
P5	1	20	3.66	73.20	20.4	Leve
P6	1	20	10.96	109.6	30.6	Moderado
P7	1	20	7.3	146.00	40.8	Moderado
P8	1	10	25.16	251.60	70.2	Severo
P9	1	20	17.9	357.20	100.0	Severo

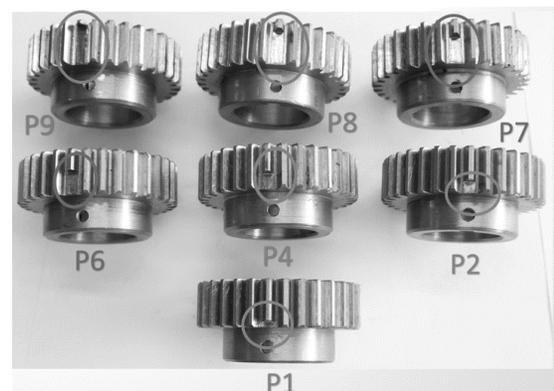


Figura. 7. Fallos construidos por rotura de diente

3.2.2 Picadura de diente

Los fallos por picaduras fueron construidos artificialmente por medio del mecanizado por electroerosión, debido a que con esta técnica de mecanizado se puede ir controlando los porcentajes requeridos del fallo. Se construyeron fallos iniciando con un fallo leve, hasta concluir con un fallo severo con un total de 9 niveles de severidad tal como se presenta en la tabla 3 y Figura. 8.

Tabla 3. Niveles de severidad para picadura de diente

Código	Diámetro (mm)	Área picadura (mm ²)	Porcentaje de picadura (%)	Profundidad (mm)	Severidad
P1	1.5	1.77	1.96	0.5	Normal
P2	1.5	5.30	5.89	0.5	Leve
P3	1.5	7.07	7.85	0.5	Leve
P4	1.5	10.60	11.78	0.5	Leve
P5	1.5	14.14	15.71	0.5	Leve
P6	2	25.13	27.93	0.5	Moderado
P7	2	37.70	41.89	0.5	Moderado
P8	2	62.83	69.81	0.5	Severo
P9	Irregular	Irregular	Irregular	Irregular	Severo

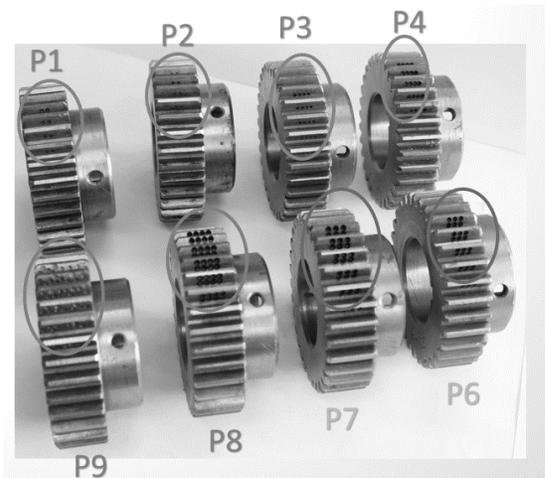


Figura. 8. Fallos construidos por picadura de diente

4. Resultados

En esta sección se comparan las señales de corriente y vibración, demostrando que la técnica análisis de firma de corriente del motor es una opción aparte del monitoreo por vibración para la detección de fallos en cajas de engranajes.

Las señales de vibración y corriente son adquiridas por los sensores y visualizadas mediante la transformada rápida de Fourier, donde se puede observar los espectros de las frecuencias características de la caja de engranajes.

4.1 Comparación de las señales

En la Figura. 9 y Figura. 10 se presentan las señales de vibración y corriente del piñón sin condición de fallo. La GMF se puede reconocer fácilmente en el espectro de vibración a una frecuencia de 185.8 Hz con sus respectivas bandas laterales a ± 6 Hz que corresponden a la frecuencia de giro del piñón.

En el espectro de corriente también se puede detectar la GMF del piñón a una frecuencia 203.1 Hz que es el resultado de sumar la GMF y la frecuencia de alimentación del motor ($f_{GMF}+f$).

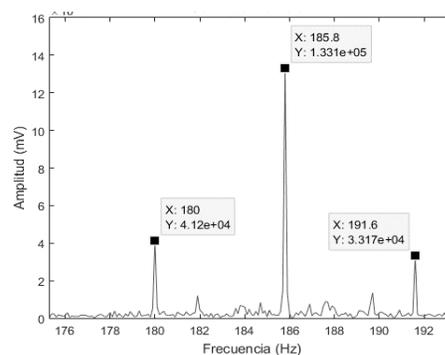


Figura. 9. Señal de vibración del piñón sin condición de fallo

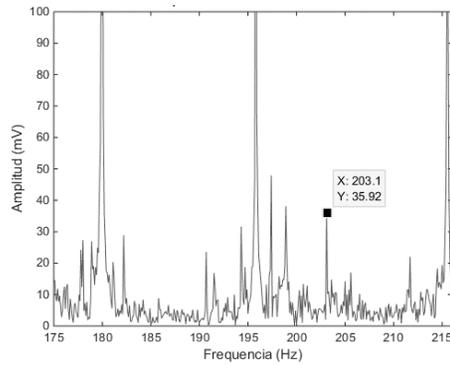


Figura. 10. Señal de corriente del piñón sin condición de fallo

A continuación, se obtuvieron las señales de vibración y corriente con diferentes niveles de severidad de fallo los cuales se presentan en las Figura. 11, 12, 13 y 14.

En las Figuras. 11 y 12 se observa como los fallos en el piñón afectan en la visualizan de las señales de vibración por lo que los resultados son válidos para detectar fallos en engranes.

En las Figuras. 13 y 14 puede observarse que, aunque se puede rastrear la GMF en las señales de corriente, es difícil interpretar el resultado debido al ruido entremezclado.

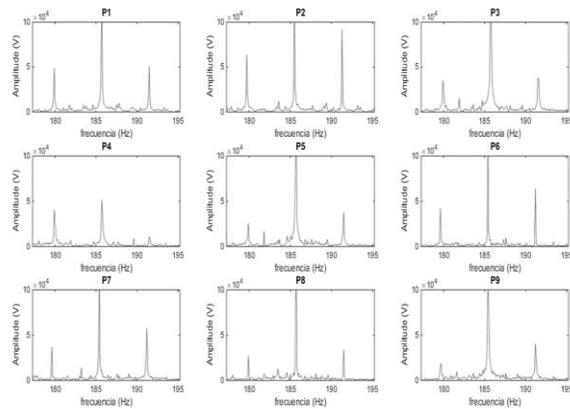


Figura. 11. Señales de vibración de severidad de fallo por rotura de diente

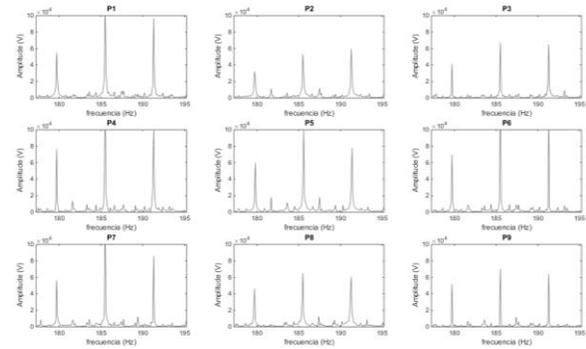


Figura. 12. Señales de vibración de severidad de fallo por picadura

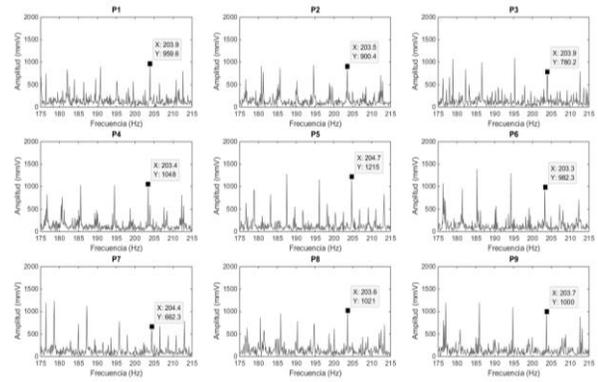


Figura. 13. Señales de corriente de severidad de fallo por rotura de diente

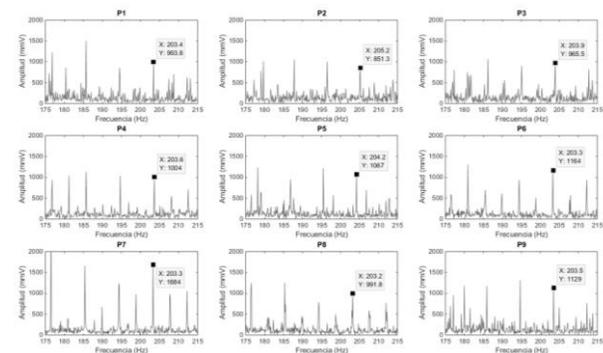


Figura. 14. Señales de corriente de severidad de fallo por picadura

Conclusiones

Los resultados obtenidos establecen que, al existir fluctuaciones de torque en el eje de entrada de la caja de engranes ocasionados por fallos de



engrane como la rotura de diente, pueden ser detectados por el AFCM.

En las señales de vibración, las frecuencias cambian su amplitud a medida que el fallo es más severo. Las frecuencias rotatorias y GMF pueden identificarse claramente en señales de corriente.

El AFCM puede proporcionar un método de detección de fallos no intrusivo sin sensores adicionales en la caja de engranajes.

Con la base de datos de severidad de fallos obtenida, se logra detectar fallos en engranes identificar la existencia de bandas laterales a través de la frecuencia de línea de alimentación del motor; tales como frecuencias de rotación del eje de entrada, eje de salida y frecuencias de engranaje, pero la amplitud de estas bandas laterales tiene menor amplitud en comparación con la frecuencia de la línea lo cual limita la detección de la severidad de manera visual en el espectro de frecuencia.

Referencias Bibliográficas

Benbouzid, M. E. H. (2000). A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection. *IEEE transactions on industrial electronics*, 47(5), 984–993. <https://doi.org/10.1109/41.873206>

Bravo Imaz, I. (2018). *Acquisition and processing of new data sources for improved condition monitoring of mechanical systems* (Tesis Doctoral). Universidad del País Vasco, Leioa. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10810/26690>

Devendiran, S., & Manivannan, K. (2016). Vibration Based Condition Monitoring and Fault Diagnosis Technologies For Bearing and Gear Components-A Review. *International Journal of Applied Engineering Research*, 11(6), 3966–3975.

Jin, X., Cheng, F., Peng, Y., Qiao, W., & Qu, L. (2016). A comparative study on Vibration- and current-based approaches for drivetrain gearbox fault diagnosis. En *Industry Applications Society Annual Meeting, 2016 IEEE* (pp. 1–8). IEEE. Recuperado de

<http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7731964/>

Kar, C., & Mohanty, A. R. (2006). Monitoring gear vibrations through motor current signature analysis and wavelet transform. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(1), 158–187.

Laverde P Luz Amanda., Rivera María Esther (2015). .Bochalema-sistema de alerta temprana. *Bistua Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 13(2):91-111.

Mohanty, A. (2014). *Machinery Condition Monitoring*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17941>

Moya Rodríguez, J., Dantas, M., Santos, D., Alvarez, C., Da, R., Botelho, S., ... Junio França, F. (2014). Deterioro y modos de fallo en engranajes. Presentado en COMEC, Cuba. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4579.3766>

Radzevich, S. P. (2016). *Dudley's handbook of practical gear design and manufacture*. CRC Press.

Schoen, R. R., Habetler, T. G., Kamran, F., & Bartfield, R. G. (1995). Motor bearing damage detection using stator current monitoring. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 31(6), 1274–1279. <https://doi.org/10.1109/28.475697>

Wang, W. (2001). Early detection of gear tooth cracking using the resonance demodulation technique. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 15(5), 887–903. <https://doi.org/10.1006/mssp.2001.1416>

Xu, X., De Doncker, R., & Novotny, D. W. (1988). A stator flux oriented induction machine drive. En *Power Electronics Specialists Conference, 1988. PESC'88 Record., 19th Annual IEEE* (pp. 870–876). IEEE.

Ye, Z., Wu, B., & Sadeghian, A. (2003). Current signature analysis of induction motor mechanical faults by wavelet packet decomposition. *IEEE transactions on industrial electronics*, 50(6), 1217–1228. <https://doi.org/10.1109/TIE.2003.819682>



*Para citar este artículo: Chingal D.;Sánchez V.; Cabrera D.;Cerrada M.;Vásquez R. Comparison of vibration and current signals for the detection of the severity of faults in gears. .Revista Bistua. 2019 17(1):187-195

+ Autor para el envío de correspondencia y la solicitud de las separatas: Chingal D. GIDTEC, Universidad Politécnica Salesiana. cide-91@hotmail.com

Recibido: Marzo 21 de 2018

Aceptado: Agosto 17 de 2018