

DETECCIÓN DE DESBALANCE MECÁNICO EN MÁQUINAS ELÉCTRICAS CON PLATAFORMA DIGITAL DE BAJO COSTO

DETECTION OF MECHANICAL UNBALANCE IN ELECTRICAL MACHINES USING A LOW-COST DIGITAL PLATFORM

Abraham Alvarado Laguna

Tecnológico Nacional de México / IT de Aguascalientes, México
g21153222@aguascalientes.tecnm.mx

Francisco Javier Villalobos Piña

Tecnológico Nacional de México / IT de Aguascalientes, México
francisco.vp@aguascalientes.tecnm.mx

Josué Augusto Reyes Malanche

Universidad Tecnológica de Aguascalientes, México
josue.malanche@utags.edu.mx

Carlos Humberto Saucedo Zárate

Tecnológico Nacional de México / IT de Aguascalientes, México
carloshum777@hotmail.com

Efraín Ramírez Velasco

Tecnológico Nacional de México / IT de Aguascalientes, México
r21153203@aguascalientes.tecnm.mx

Ricardo Álvarez Salas

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
ralvarez@uaslp.mx

Recepción: 24/noviembre/2023

Aceptación: 24/abril/2024

Resumen

Las máquinas eléctricas son ampliamente utilizadas en el sector industrial, el comercial y el hogar. Aplicando herramientas tiempo frecuencia se logra la detección de fallas mecánicas en las máquinas eléctricas, y se evitan grandes pérdidas económicas disminuyendo paros inadvertidos. Es posible efectuar la detección de fallas de desbalance mediante análisis de señales. En el presente trabajo expone un caso de estudio de motor eléctrico al que se le provoca un desbalance. Se diseñó un sistema electrónico que permite la adquisición de señales

y un programa de computadora que permite la adquisición de información de vibración mecánica, aplicando herramientas tiempo frecuencia como la transformada discreta de Fourier y ondeleta. Como resultado de la investigación y desarrollo, se concluye que es posible identificar las frecuencias de firma de falla características de problemas de desbalance, se concluye que utilizando un sistema de bajo costo es posible efectuar la detección de falla de desbalance.

Palabras Clave: Detección de fallas, Fallo de desbalance, Motor eléctrico, Transformada discreta ondeleta, Transformada discreta de Fourier.

Abstract

Electric machines are widely used in industrial, commercial and residential areas. By using time-frequency tools, mechanical faults in electric machines can be detected and large economic losses can be avoided by reducing unscheduled downtime. The detection of unbalance faults is possible by means of signal analysis. In this work, a case study of an electric motor that is causing an unbalance fault is presented. An electronic system was designed to acquire signals and a computer program was developed to acquire mechanical vibration information using time-frequency tools such as the Discrete Fourier Transform and the Wavelet Transform. As a result of the research and development, it is concluded that it is possible to identify the fault signature frequencies that are characteristic of unbalance problems; it is concluded that using a low-cost system it is possible to detect unbalance faults.

Keywords: *Discrete Fourier transform, Discrete Wavelet transform, Electric motor, Fault detection, Unbalance faults.*

1. Introducción

Una sociedad desarrollada no acepta el crecimiento si se pone en riesgo la seguridad del ser humano y el medio ambiente, aun así, se han suscitado catástrofes de proporciones enormes. Parte de las causas de este problema, es el aumento de las interconexiones de los numerosos dispositivos que integran a los actuales sistemas industriales, así como su distribución y distancia entre estos, fenómenos involucrados en los procesos que pueden llegar a ser menos predecibles

umentando la complejidad de los sistemas, obligando a hacerlos más confiables robustos y seguros [Verde, 2011].

Una manera de conseguir dicha confiabilidad en algún proceso es por medio del mantenimiento, el cual, es clasificado por lo general en tres tipos, mantenimiento correctivo, mantenimiento preventivo y mantenimiento predictivo. Las máquinas eléctricas son elementos que son ampliamente utilizados, el mantenimiento preventivo ha evolucionado para ellas y en algunas de ellas es prácticamente nulo, en algunos casos las fallas ocurren de forma incipiente y no de forma abrupta por lo cual lleva a la necesidad de contar con dispositivos de protección para ellas, esto ha evolucionado, en función de la demanda de estos sistemas [Scheffer, 2004]. Los tipos de fallas se pueden clasificar según las fuentes que puedan producir fallos, éstas son internas o externas a la propia máquina eléctrica, que a su vez se clasifican en mecánicas, eléctricos y ambientales. Las fuentes internas de fallos corresponden a anomalías en la estructura de la máquina que provocan fallos mecánicos tales como excentricidades o fallos en el rotor y fallos eléctricos tales como rotura de barras, fallos en los dieléctricos, fallo en circuitos magnéticos, como lo pueden ser fallos en los devanados. Las fuentes de fallos externas no dependen de la máquina y pueden provocar fallos mecánicos tales como desbalances o eléctricos tales como desbalances de voltaje o corriente [Choudhary, 2018]. Cerca del 40 – 50% de las fallas en motores eléctricos están relacionados con fallas mecánicas [Usman, 2019], todas las fallas mencionadas anteriormente tienen como característica común las vibraciones, las cuales al sobrepasar ciertos límites, son indicadores de falla [Scheffer, 2004], si se obtiene la firma de falla, éstas pueden ofrecer una advertencia temprana al usuario para el mantenimiento basado en el tiempo o para tomar una decisión crucial antes de cualquier problema grave o tiempo de inactividad no programado [Goyal, 2016].

Debido a que el análisis de las vibraciones mecánicas es una técnica efectiva, confiable y no intrusiva para monitorear la condición de la máquina durante los arranques, paradas y operaciones normales, además de que la principal fuente de vibraciones mecánicas es debida a desbalances de los elementos rotativos de los motores eléctricos [Ewert, 2020], un sistema de adquisición y monitoreo de

vibraciones mecánicas para detectar desbalances es una opción viable para contribuir al mantenimiento de las máquinas eléctricas.

El monitoreo de vibraciones mecánicas es bastante común debido a las ventajas ya descritas y no solo se limita a sistemas con componentes rotatorias, por ejemplo, se realiza en sistemas relacionados al sector ferroviario y al monitoreo de perturbaciones debidas a la aerodinámica de equipos en los que se hace el monitoreo a través de un prototipo de sistema multifuncional aplicado a vías férreas, basado en la captación de vibraciones y temperatura, un sistema de adquisición de datos multisensor, capaz de registrar a altas frecuencias, y un sistema de adquisición de datos basado en Arduino de 5 canales, con la capacidad de muestrear a una velocidad máxima de 500 Hz [Cano, 2020]. Así mismo, ejemplos de sistemas de monitoreo aplicados a máquinas eléctricas son presentadas en trabajos donde se utiliza un sistema de adquisición que incluye un sensor piezoeléctrico marca Siemens, un PLC SIMATIC S7 y un dispositivo de monitoreo marca Siemens CMS 1200, con esto se monitorean y se guardan datos del espectro de las vibraciones mecánicas de fallas en estator, implementándose mediante software redes neuronales y se hacen pruebas teóricas del modelo [Dambrauskas, 2020].

En otro trabajo, se obtienen señales de vibración para encontrar diferencias entre un motor BLDC sano y un motor con daño en los baleros mediante 3 sensores de aceleración colocados estratégicamente en el motor y un software llamado OXIGEN, este software permite adquirir datos, registrar las medidas y analizar los resultados para así comparar el espectro de frecuencia de las señales de vibración de un motor sin escobillas con balero sano y contaminado, existiendo un crecimiento notable en la amplitud del espectro correspondiente a la señal de vibración debido al balero con falla, adicionalmente, cuenta con un módulo de análisis, que permite medir el ruido y la vibración durante el funcionamiento del motor [Vaimann, 2020]. Para la detección de fallos de desbalance, existen trabajos como [Ewert, 2020] y [Ewert, 2022] en los que se realiza la detección de fallas de desbalance por medio de algoritmos de FFT y el método de biespectro de orden superior, se utiliza para la adquisición de señales una tarjeta de medición NI PXIe-4492 en una computadora

industrial de National Instruments y como sensores de vibración son utilizados acelerómetros piezoeléctricos.

2. Métodos

Descripción de la plataforma experimental

El presente trabajo expone el diseño de un sistema electrónico digital de bajo costo, el cual se basa en un microcontrolador PIC18F4550 de la compañía Microchip y el uso de un acelerómetro comercial el ADXL335 de Analog Devices, además para la adquisición de la información se desarrolló un programa de computadora en el lenguaje visual Delphi 7 de la compañía Borland.

Desbalance en máquinas rotatorias

La Organización Internacional de Normalización (ISO por sus siglas en inglés) define el desbalance como aquella condición que existe en un rotor cuando se imparte vibración, fuerza o movimiento a sus rodamientos como resultado de fuerzas centrífugas [Scheffer, 2004]. Esta fuerza está en función del cuadrado de la velocidad angular y es la que actúa sobre la masa del desbalance [Ewert, 2022]. Los espectros de firma de falla mecánica provenientes de la información de vibración mecánica son descritos en [Ewert, 2020] y [Ewert, 2022]. Además, el espectro de frecuencia de vibración mecánica mostrará un aumento en la frecuencia de firma de falla mecánica por desbalance en un elemento rotativo, tal como se muestra en la ecuación 1.

$$f_r = \frac{n}{60} \quad (1)$$

Donde f_r es la frecuencia de rotación mecánica en (Hz) y n la velocidad de rotación en revoluciones por minuto (rpm)

Transformada Rápida de Fourier (FFT)

La Transformada Rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés) es un cálculo eficiente de la Transformada Discreta de Fourier (DFT por sus siglas en inglés), ecuación 2.

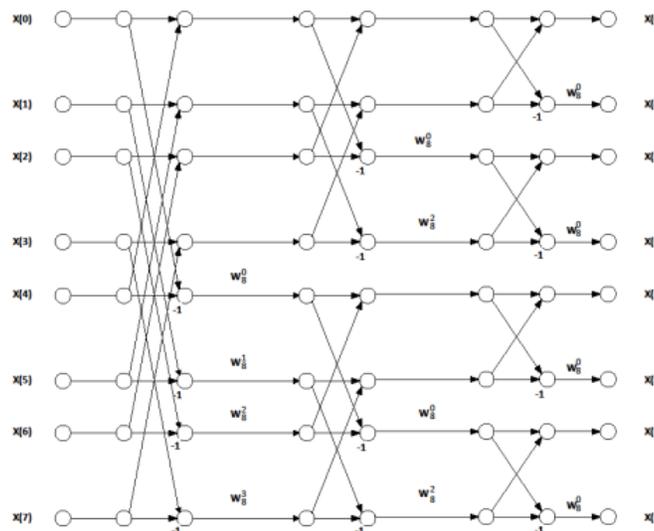
$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi \frac{kn}{N}}, k = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (2)$$

Donde:

$X(k)$: Secuencia en el dominio de la frecuencia

$x(n)$: Secuencia en el dominio temporal

Para el cálculo de la FFT se hace uso de dos propiedades, la de simetría, y la de periodicidad, se llega a la operación conocida como operación mariposa mostrada en la figura 1.



Fuente: Proakis 2007.

Figura 1 Operación mariposa de 8 puntos.

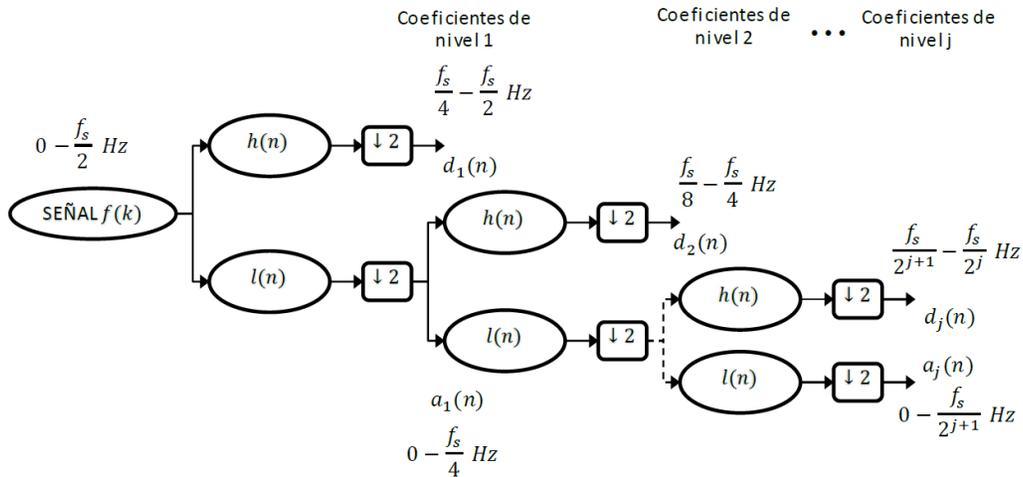
Transformada Discreta Ondeleta (DWT)

La Transformada Discreta Ondeleta, descompone una señal del dominio del tiempo en diferentes componentes de las ondas de duración variable llamada ondeleta [Walker, 2008]. Utilizando las herramientas ondeleta discreta, es posible efectuar un proceso de análisis denominado multiresolución. Dicho proceso consiste en descomponer la señal de tiempo en diferentes bandas de frecuencia y obtener los coeficientes de tendencia ecuación 3 y los coeficientes de detalle ecuación 4. Un ejemplo de descomposición MRA de una señal discreta se muestra en la figura 2.

$$a_m = \frac{f_{2m-1} + f_{2m}}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

$$d_m = \frac{f_{2m-1} - f_{2m}}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

Donde a_m es el coeficiente de aproximación y d_m el de detalle.



Fuente: Walker, 2008.

Figura 2 Proceso de descomposición de una señal con MRA.

Sistema de adquisición de vibración mecánica de bajo costo

Para efectuar la detección de falla de desbalance en motores eléctricos, se optó por el diseño de un sistema electrónico que tenga la característica de bajo costo, este sistema utiliza como unidad central de procesamiento un microcontrolador de la compañía Microchip el PIC18F4550, el cual efectúa comunicación con una computadora personal mediante una interfaz del tipo USB-Serial para lo cual se utiliza un chip comercial transceiver el FTDI-232. Para adquisición de información de vibración mecánica se utiliza un acelerómetro triaxial de la compañía Analog Devices el ADXL335 en su versión analógica de la serie. Para el control y la adquisición en línea de la información de vibración mecánica se desarrolló un programa de computadora en el lenguaje de programación visual Delphi 7 de la compañía Borland, el cual permite el proceso de dialogo para efectuar la captura de paquetes de datos y el almacenamiento de estos en disco. En la figura 7 se ilustra un esquema general del sistema implementado.

Una vez diseñado el sistema electrónico, se montó en una placa de circuito impreso, este trabajo se efectuó utilizando la herramienta ISIS-ARES de PROTEUS de la compañía LabCenter Electronics. El algoritmo del microcontrolador tiene la capacidad de cambiar la frecuencia de muestreo cuando reciba la orden desde el software basado en lenguaje Delphi. De manera similar, tiene la capacidad de modificar el tamaño de los bloques de datos que se transmitirán a la computadora personal. El hardware se monta en una estructura donde se encuentra acoplada la máquina eléctrica, se orienta la placa de tal manera que el eje z del acelerómetro, se encuentre perpendicular al eje de transmisión del motor, tal y como se muestra en la figura 3.



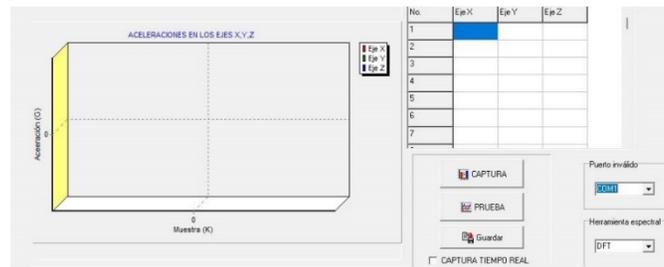
Fuente: elaboración propia.

Figura 3 Implementación del sistema de adquisición de vibración mecánica.

Programa de computadora

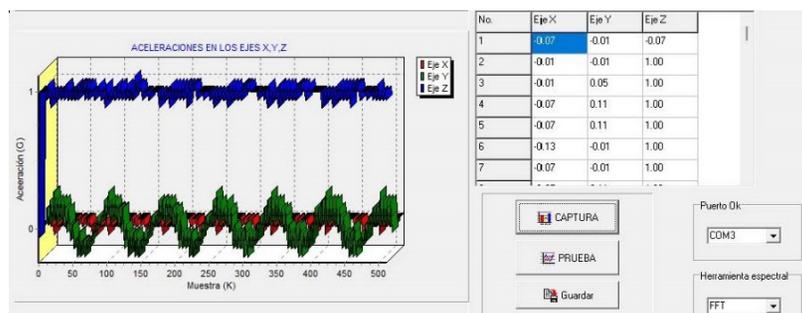
El programa de computadora permite el cambio de la frecuencia de muestreo de la señal de vibración mecánica (22Hz a 10kHz), además, el programa de computadora permite modificar el tamaño del paquete de datos que se transfiere desde la unidad central de procesamiento, con esto, se logra una gran versatilidad en el diseño. Una vez capturado un paquete de datos es posible efectuar el análisis espectral de la señal por cada eje (X, Y, Z) a elección del usuario. Cabe mencionar que el sistema cuenta con la capacidad de captura y análisis con el recurso de tiempo real, así como el paquete de datos recibido en gravedades, además, es posible modificar el puerto serial en caso de que la computadora personal cuente con varios dispositivos instalados en el sistema operativo Windows. En la figura 4 se ilustra una pantalla del programa de computadora que efectúa el diálogo para la adquisición de información con el sistema embebido. En la figura 5 y 6 se ilustran los detalles del

programa de computadora que muestra la adquisición de información de vibración mecánica del caso de estudio y el análisis en frecuencia de dicha secuencia.



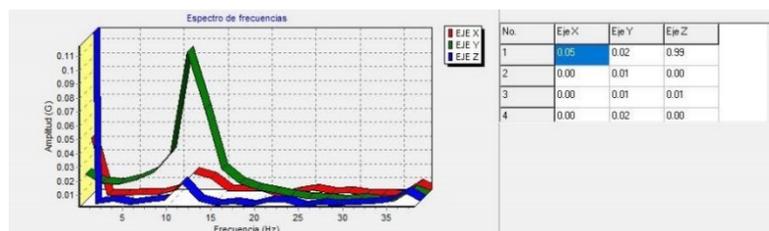
Fuente: elaboración propia.

Figura 4 Entorno del programa de computadora.



Fuente: elaboración propia.

Figura 5 Detalle de la captura de vibración mecánica



Fuente: elaboración propia.

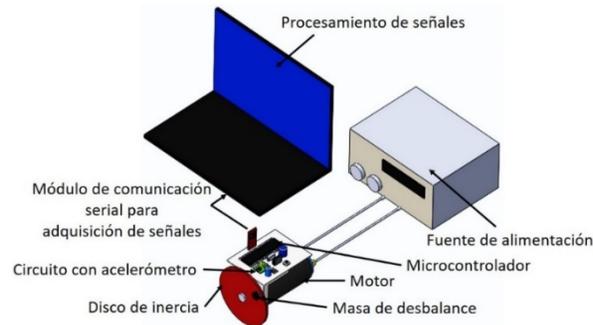
Figura 6 Detalle del análisis en frecuencia de la señal capturada

3. Resultados

Descripción del caso de estudio experimental

Los resultados presentados en esta sección fueron obtenidos de 6 escenarios distintos bajo tres regímenes de velocidad, cada uno bajo su condición sana y con fallo de desbalance, de los cuales se han realizado 30 experimentos en cada escenario. Se validó la plataforma experimental mediante 3 casos de velocidades,

703, 1289 y 1757 rpm. Se probaron condiciones sanas y de falla de desbalance, la frecuencia de muestreo utilizada es de 1 kHz, se capturaron en todos los escenarios paquetes de datos en su capacidad máxima de 512 muestras. El fallo de desbalance es posible colocarlo debido a que, en el extremo del eje de transmisión, se encuentra acoplada una pieza de Nylamid modificado para colocar la masa de desbalance a una distancia fija del centro de rotación del motor tal como se ilustra en la figura 7.

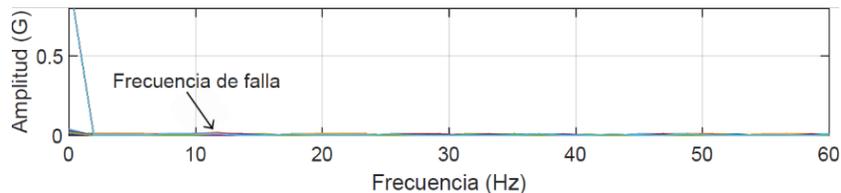


Fuente: elaboración propia.

Figura 7 Esquema del sistema de adquisición de vibraciones mecánicas.

Resultados con la transformada rápida de Fourier

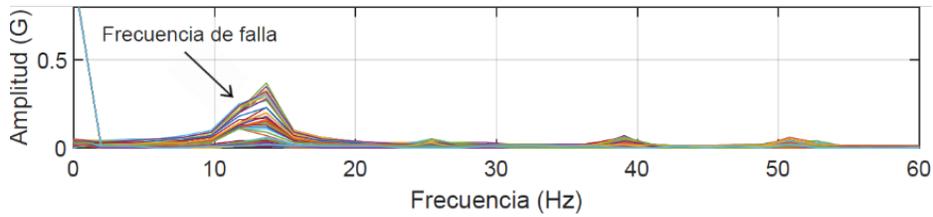
Al analizar los datos obtenidos con la transformada rápida de Fourier, se obtienen los espectros de frecuencia de los 6 escenarios. La figura 8 muestra el análisis espectral de vibración mecánica de desbalance bajo condición sana de operación. En dicha figura se puede apreciar que existe un armónico de 11.7 Hz asociada a una velocidad de rotación de 703 rpm, donde la magnitud del armónico es 0.02 G.



Fuente: elaboración propia.

Figura 8 Espectro de frecuencias de escenario 1.

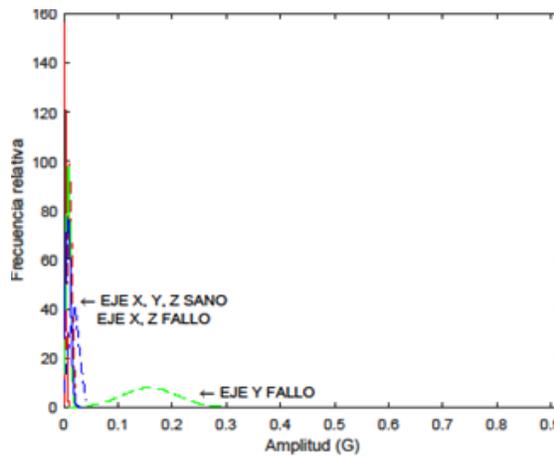
La figura 9 ilustra un segundo escenario bajo condición de falla de desbalance mecánico ocasionado por un cambio de masa en el disco de inercia generando un aumento en la magnitud del armónico a 0.37 G.



Fuente: elaboración propia.

Figura 9 Espectro de frecuencias de escenario 2.

Para un análisis claro de los 30 experimentos y obtener una prueba de credibilidad estadística, se hace el acomodo de los datos de las amplitudes en la frecuencia de falla en una Campana Gaussiana [Beaver, 2010]. Para poder determinar si hay falla se realiza una comparación de las campanas gaussianas que se obtienen de las frecuencias donde aparecería la falla en los escenarios sano y con desbalance. La figura 10 muestra la comparación de las campanas gaussianas de las aceleraciones obtenidas de los escenarios 1 y 2. En la figura 10 se puede ver que la campana que se va hacia la derecha corresponde al eje Y que es el eje que mayor aceleración presentó debido a la falla de desbalance.

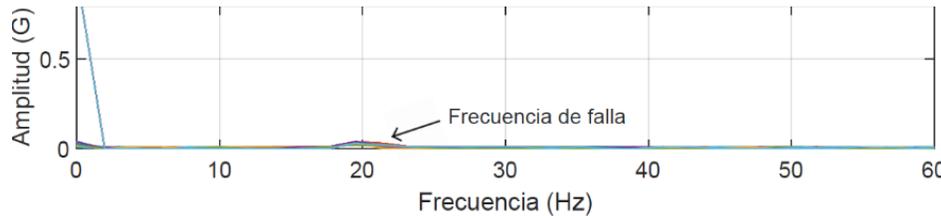


Fuente: elaboración propia.

Figura 10 Campanas de Gauss escenario 1 y 2.

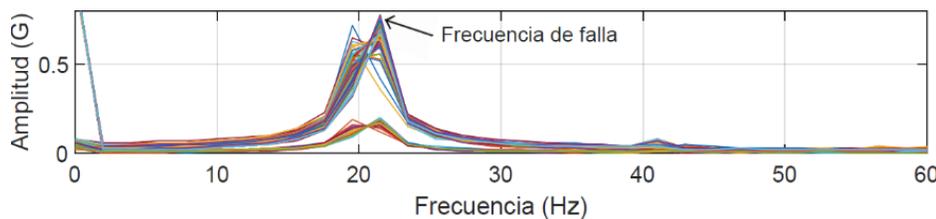
En el escenario 3 mostrado en figura 11, la frecuencia que sería afectada por una falla si esta ocurriera (21.48 Hz) la cual tiene una magnitud de 0.02 G que en este caso es pequeña por no existir falla. En el escenario 4, representado en la figura 12 se puede observar la frecuencia de falla muestra un aumento significativo de 0.78

G. Al comparar los dos escenarios (sano y con falla) mediante las campanas de probabilidad se aprecia que en el eje X ocurren las mayores aceleraciones, tal y como se muestra en la figura 13.



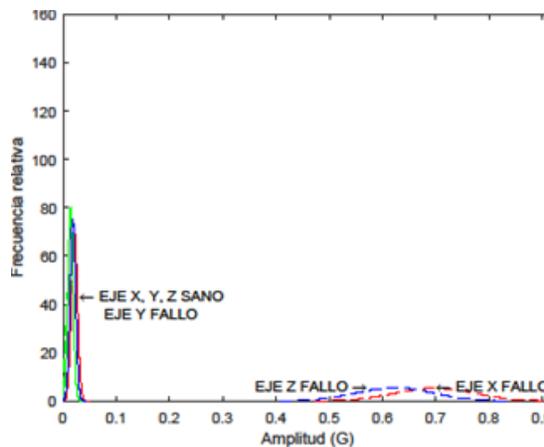
Fuente: elaboración propia.

Figura 11 Espectro de frecuencias de escenario 3.



Fuente: elaboración propia.

Figura 12 Espectro de frecuencias de escenario 4.

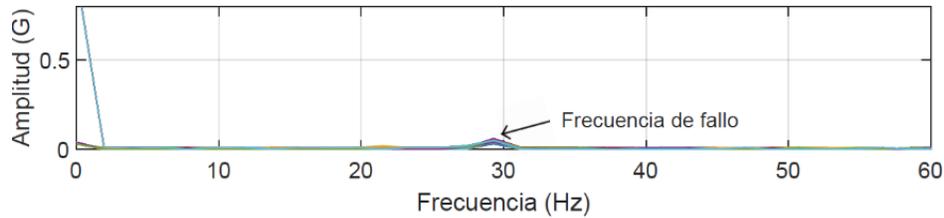


Fuente: elaboración propia.

Figura 13 Campanas de Gauss escenario 3 y 4.

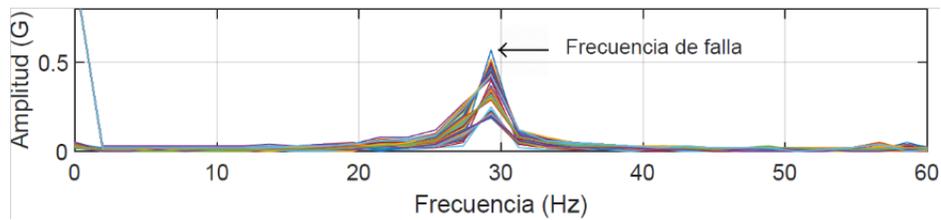
Es presentado en la figura 14, el espectro de frecuencias del escenario 5, en el que, debido a la velocidad de giro del rotor, se tiene que la frecuencia de falla es de 29.3 Hz, en la que se presenta una magnitud del armónico de 0.06 G debido a desperfectos en el banco de pruebas. En el espectro de frecuencias, presentado en

la figura 15, se puede observar que en la frecuencia donde aparece la falla con una magnitud de 0.57 G.



Fuente: elaboración propia.

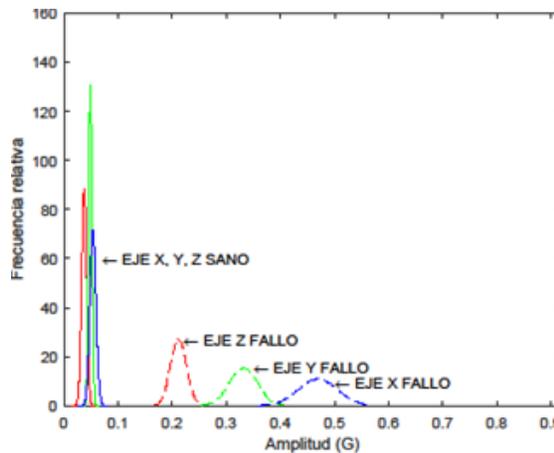
Figura 14 Espectro de frecuencias de escenario 5.



Fuente: elaboración propia.

Figura 15 Espectro de frecuencias de escenario 6.

En las campanas de probabilidad de la figura 16 es posible observar que las aceleraciones de los dos escenarios (5 y 6), se tiene el mayor efecto debido a la falla en el eje Z, con lo que se comprueba que, con los 30 experimentos, la diferencia de las aceleraciones es debida al desbalance inducido.

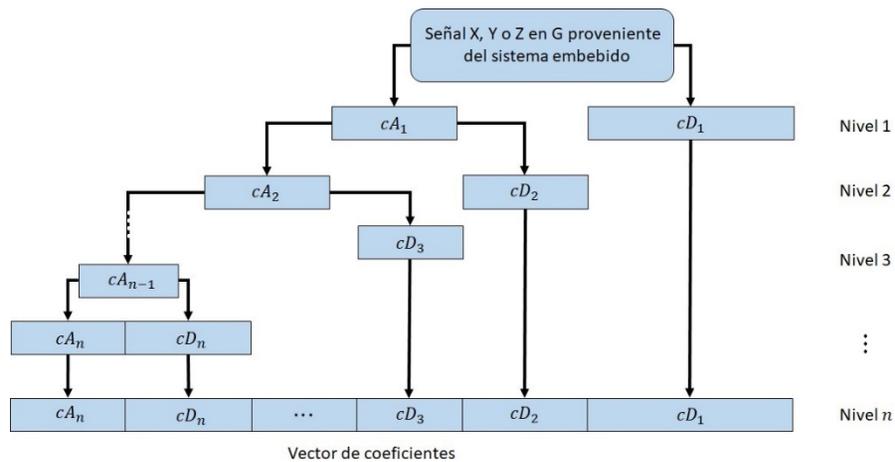


Fuente: elaboración propia.

Figura 16 Campanas de Gauss escenario 5 y 6.

Resultados experimentales ondeleta de Haar nivel 1

La transformada discreta wavelet de Haar nivel 1, fue utilizada para analizar los datos de vibración de los tres ejes del acelerómetro a fin de tener una comparativa con la FFT, realizada para los 6 escenarios descritos anteriormente, se han utilizado 9 niveles de descomposición llegando a una frecuencia mínima de 0.98 Hz y una máxima de 500 Hz. Se han acomodado los coeficientes de manera que, colocándose en primer lugar los valores de aproximación del nivel uno, en seguida se posicionan los coeficientes de detalle de todos los niveles, tal como se muestra en la figura 17.



Fuente: elaboración propia.

Figura 17 Acomodo de los coeficientes del análisis con la Wavelet Haar.

Para un análisis eficiente de los coeficientes obtenidos, se calculó el valor cuadrático medio (RMS por sus siglas en inglés) de todos los experimentos realizados, para lo cual se utiliza la ecuación 5.

$$RMS = \sqrt{\frac{(f_1)^2 + (f_2)^2 + \dots + (f_n)^2}{N_m}} \quad (5)$$

Donde f_1, f_2, \dots, f_n son los coeficientes de fluctuación del análisis con la ondeleta y N_m el número de muestras del nivel de descomposición.

Para el análisis estadístico de los 30 experimentos realizados se ha calculado el promedio de los RMS de cada banda de frecuencia obtenida para cada eje espacial, agrupando los escenarios de prueba de acuerdo con su velocidad consiguiendo

comparar el caso con y sin fallo. En la tabla 1 se puede observar la comparativa del escenario 1 y 2 para el eje Y que es el eje que mayor aceleración presenta para esta velocidad, cuya frecuencia de firma de falla es de 11.7 Hz, que coincide con la banda 6 de la descomposición multinivel, donde se puede observar un incremento considerable del valor RMS.

Tabla 1 Valores promedio de los RMS del eje Y del escenario 1 y 2.

Banda	Frecuencia	Escenario 1	Escenario 2
1	250.0–500.0	0.0498	0.0539
2	125.0–250.0	0.0948	0.1022
3	62.5–125.0	0.0569	0.1242
4	31.25–62.5	0.0586	0.2762
5	15.625–31.25	0.0266	0.6473
6	7.8125–15.625	0.0366	1.1674
7	3.9062–7.8125	0.0265	0.2690
8	1.9531–3.9062	0.0285	0.5136
9	0.9765–1.9531	0.0304	0.2092

Fuente: elaboración propia.

En la velocidad utilizada para los escenarios 3 y 4, se puede observar un incremento debido a la falla en el eje X, ahora en la banda 5 de descomposición multinivel que coincide con la frecuencia de firma de falla a dicha velocidad, los resultados son presentados en la tabla 2.

Tabla 2 Valores promedio de los RMS del eje X del escenario 3 y 4.

Banda	Frecuencia	Escenario 3	Escenario 4
1	250.0–500.0	0.0228	0.0754
2	125.0–250.0	0.0268	0.1854
3	62.5–125.0	0.0329	0.4838
4	31.25–62.5	0.0687	1.2580
5	15.625–31.25	0.1424	2.7169
6	7.8125–15.625	0.1093	1.9526
7	3.9062–7.8125	0.0653	1.3343
8	1.9531–3.9062	0.0588	0.9952
9	0.9765–1.9531	0.0233	0.5617

Fuente: elaboración propia.

Situación similar ocurre con la comparación de los escenarios 5 y 6 presentada en la tabla 3, analizada desde el eje Z en la misma banda (5), ya que la frecuencia de

falla cae en la misma banda, validándose así que el incremento de los RMS es debido al fallo inducido de desbalance.

Tabla 3 Valores promedio de los RMS del eje Z del escenario 5 y 6.

Banda	Frecuencia	Escenario 5	Escenario 6
1	250.0–500.0	0.0499	0.0880
2	125.0–250.0	0.0543	0.1775
3	62.5–125.0	0.0641	0.3986
4	31.25–62.5	0.1070	0.9503
5	15.625–31.25	0.1617	1.5032
6	7.8125–15.625	0.0492	0.1043
7	3.9062–7.8125	0.0541	0.1940
8	1.9531–3.9062	0.0728	0.4058
9	0.9765–1.9531	0.0866	0.2607

Fuente: elaboración propia.

4. Discusión

En el presente trabajo se llevó a cabo un caso de estudio que efectuó una comparativa de un caso sano con uno de desbalance en el cual se evaluaron 30 experimentos para cada uno de los dos escenarios. El sistema embebido desarrollado mostró ser capaz de diferenciar el caso sano del caso con falla, esto se logró mediante dos herramientas tiempo frecuencia logrando obtener el espectro de firma de falla característico mediante la herramienta FFT y se logró un cambio en los niveles efectivos de los coeficientes ondeleta en la banda de frecuencia esperada. En la introducción presentada en esta investigación, se efectúa una comparativa de diferentes trabajos similares ya reportados que respaldan los resultados obtenidos.

5. Conclusiones

Es de resaltar que se desarrolló un sistema electrónico de bajo costo, en la tabla 4 se muestra un análisis comparativo con otras herramientas similares, el dispositivo desarrollado para la detección de vibraciones mecánicas de desbalance ha demostrado ser capaz de detectar fallas por este fenómeno, que, aunque se pueden detectar algunos otros desperfectos, los de desbalance, tal como se puede apreciar en los resultados, son característicos ya que la frecuencia de falla aparecerá

proporcionalmente a la velocidad de giro del eje del motor. Se ha observado que añadir funciones al sistema mejoraría la efectividad de la detección, una de ellas sería un control de velocidad a la máquina eléctrica lo que ayudaría a reducir las variaciones en las mediciones. Además, al tener la opción de modificar la velocidad de muestreo y la cantidad de datos a adquirir, se pueden adecuar para detectar otros defectos en la máquina eléctrica que tengan que ver con vibraciones mecánicas. La otra función sería implementar los algoritmos utilizados para detectar fallas eléctricas, lo que implicaría medir las corrientes presentes en la máquina eléctrica con un sistema de adquisición de señales de corriente y, dentro del programa de computadora, procesar las señales para encontrar las firmas de falla eléctrica.

Tabla 4 Análisis comparativo de costos de plataformas comerciales.

Sistema	Precio (USD)
Sistema de bajo costo basado en microcontrolador PIC18F4550 (Sistema montado en circuito impreso)	\$40.65
Dispositivo Embebido Estudiante, myRIO-1950, Xilinx Z-7010, Compra de Universidad, WIFI & MSP (Fuente: Newark)	\$744.9
Placa central DSP28335 DSP28335 TMS320F28335 placa de aprendizaje de desarrollo (Fuente: Ebay)	\$95.00
EZDSP F28335 - Kit de desarrollo con CC Studio, visualización a color de 16 bits, emulador J-TAG incorporado (EZDSP F28335) (Fuente: Amazon)	\$271.95

Fuente: elaboración propia.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Beaver B. M., Mendenhall W., Beaver R. J. Introducción a la probabilidad y estadística. Cengage Learning, 13 edition, 2010.
- [2] Cano-Moreno J. D., Soto-Ocampo C. R., Mera J. M. & García-Bernardo J. L. Low-cost, high-frequency, data acquisition system for condition monitoring of rotating machinery through vibration analysis-case study. *Sensors*, vol. 20, pp. 3493, 2020, doi:10.3390/s20123493.
- [3] Choudhary A., Goyal D., Shimi S. L., Akula A. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Induction Motors: A Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, Vol. 26, pp. 1221-1238, 2018, <https://doi.org/10.1007/s11831-018-9286-z>.

- [4] Dambrauskas K., Kalvaitis A., Zimnickas T., Vanagas J. & Azubalis M. Application of advanced vibration monitoring systems and long short-term memory networks for brushless dc motor stator fault monitoring and classification. *Energies*, Vol.13, pp.820, 2020, doi:10.3390/en13040820.
- [5] Ewert P. The Application of the Bispectrum Analysis to Detect the Rotor Unbalance of the Induction Motor Supplied by the Mains and Frequency Converter. *Energies*, Vol.13, pp. 3009, 2020.
- [6] Ewert P., Kowalski T. & Jaworski M. Comparison of the Effectiveness of Selected Vibration Signal Analysis Methods in the Rotor Unbalance Detection of PMSM Drive System. *Electronics*, Vol. 11, pp. 1748, 2022, <https://doi.org/10.3390/electronics11111748>.
- [7] Goyal D. & Pabla B. S. The vibration monitoring methods and signal processing techniques for structural health monitoring: A review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, Vol. 23, no. 4, pp. 585-594, 2016, DOI 10.1007/s11831-015-9145-0.
- [8] Proakis J. & Manolakis D. *Tratamiento Digital De Señales*, Pearson Education, 2007.
- [9] Scheffer C. & Girdhar P. *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*. Elsevier, 2004.
- [10] Usman A., Doiphode T. & Rajpurohit S. Stator winding faults investigation in permanent magnet synchronous motor using motor signatures: Part I. 2019 International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE), pp. 160-168, 2019, doi:10.1109/edpe.2019.8883929.
- [11] Vaimann T., Rassõlkin A., Kudelina K., Asad B. & Kallaste A. Effect of bearing faults on vibration spectrum of bldc motor. 2020 IEEE Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences, pp. 1-6, 2020.
- [12] Verde C., Gentil S. & Morales R. *Monitoreo y Diagnóstico Automático de Fallas en Sistemas Dinámicos*. Trillas México, 2011.
- [13] Walker J. *A Primer on WAVELETS and Their Scientific Applications*. Taylor & Francis Group, 2008.