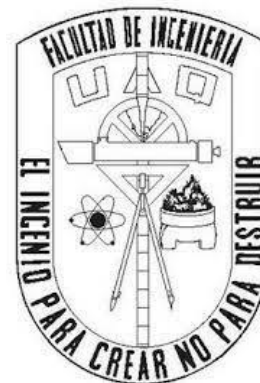




Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Área Electromecánica



Detección de desbalance y desalineamiento en motores de inducción bajo cargas oscilantes
usando corriente y transformada rápida de Fourier

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el título de

INGENIERO ELECTROMECAÁNICO

Línea terminal:

MECATRÓNICA

Presenta:

José Pablo Pacheco Guerrero

Dirigido por:

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos

San Juan del Río, Querétaro. Junio 2023



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales
de Información



Detección de desbalance y desalineamiento en
motores de inducción bajo cargas oscilantes usando
corriente y transformada rápida de Fourier

por

José Pablo Pacheco Guerrero

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0
Internacional](#).

Clave RI: IGLIN-250990



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CAMPUS SAN JUAN DEL RÍO



Detección de desbalance y desalineamiento en motores de inducción bajo cargas oscilantes usando corriente y transformada rápida de Fourier

T E S I S

Como parte de los requisitos para obtener el título de

INGENIERO ELECTROMECAÁNICO

Línea Terminal

MECATRÓNICA

Presenta

José Pablo Pacheco Guerrero

Dirigido por:

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos

SINODALES:

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos (5620)
Presidente

Dr. Juan José Saucedo Dorantes (15647)
Secretario

Dr. Arturo Yosimar Jaen Cuellar (11825)
Vocal

Dr. Miguel Trejo Hernández (6443)
Suplente

San Juan del Río, Qro., Junio 2023.

RESUMEN

La motivación principal para desarrollar este trabajo es la necesidad de detectar dos de los principales fallos en los motores de inducción como lo son el desbalance y desalineamiento ante cargas oscilantes, los cuales pueden desencadenar más problemas operativos en el motor o procesos en los que se aplican, además de que contribuyen a una alta facturación de energía en el sector industrial. Con el desarrollo de este trabajo se logró detectar fallas por desbalance y desalineamiento en motores eléctricos de inducción ante cargas oscilantes usando la transformada rápida de Fourier para obtener el espectro de frecuencias sobre una señal de corriente. Las cargas oscilantes se aplicaron mediante un transductor que convierte una señal eléctrica en una señal de presión que fue empleada en un sistema de frenado constituido por elementos mecánicos como el caliper, bandas, discos de freno, entre otros, para añadir una fuerza al motor y que simuló la carga oscilante. Una vez integrado el sistema de frenado y el sistema mecánico al motor y al variador de velocidad, se indujeron dos tipos de fallas muy comunes en los motores de inducción como lo son la falla por desbalance y desalineamiento en eje del rotor. Para poder realizar la conexión de los dispositivos electromecánicos, se realizó un análisis basado en la norma mexicana NOM-001-SEDE-2018, tanto para la selección de los conductores eléctricos como para el color de estos. Posteriormente, se utilizó un sistema de adquisición de datos de la señal de corriente y se realizaron 15 pruebas para 4 frecuencias diferentes generadas con un variador de velocidad (15, 30, 50 y 60 Hz) ante 3 condiciones propuestas del motor: sano, desbalance y desalineamiento. El procesamiento de dichas señales se hizo utilizando el software de licenciamiento libre GNU Octave, donde se logró discriminar a través de la transformada rápida de Fourier cada una de las 3 distintas condiciones del motor mencionadas. Finalmente, se creó una interfaz de usuario que proporciona dos informes distintos, un informe de carácter técnico que ayuda a un operador a detectar las fallas analizadas en los motores de una manera rápida y sencilla, con la ayuda de un semáforo que devuelve el estado del motor (motor sano o motor presenta fallo), además de que se hace la recomendación de realizar las correcciones del fallo teniendo como base estándares internacionales vigentes. Se muestra otro informe de carácter científico y devuelve al usuario una serie de parámetros matemáticos obtenidos de la amplitud de las frecuencias de las bandas laterales de la transformada rápida de Fourier y que están asociadas con criterios de fallo.

(Palabras clave: Motores de Inducción, desbalance, desalineamiento, carga oscilante, interfaz de usuario, transformada rápida de Fourier.)

SUMMARY

The main motivation to develop this work is the need to detect two of the main failures in induction motors, such as unbalance and misalignment in the face of oscillating loads, which can trigger more operational problems in the motor or processes in which it is applied, in addition to contributing to high energy billing in the industrial sector. With the development of this work, it will be modified to detect failures due to unbalance and misalignment in induction electric motors under oscillating loads using the fast Fourier transform to obtain the frequency spectrum on a current signal. Oscillating loads are applied by means of a transducer that converts an electrical signal into a pressure signal that was used in a braking system made of mechanical elements such as callipers, bands, brake discs, among others, to add force to the motor and which simulated the oscillating charge. Once the braking system and the mechanical system were integrated into the motor and the variable speed drive, two very common types of failures were induced in induction motors, such as failure due to imbalance and misalignment in the rotor axis. To make the connection of the electromechanical devices, an analysis was carried out based on the Mexican standard NOM-001-SEDE-2018, both for the selection of electrical conductors and for their color. Subsequently, a current signal data acquisition system was obtained, and 15 tests were carried out for 4 different frequencies generated with a variable speed drive (15, 30, 50 and 60 Hz) under 3 proposed motor conditions: healthy, unbalance and misalignment. The processing of these signals was done using the free license software GNU Octave, where each of the 3 different engine conditions mentioned was discriminated through the fast Fourier transform. Finally, a user interface was created that provides two different reports, a technical report that helps an operator to detect the faults analysed in the motors quickly and easily, with the help of a traffic light that returns the status of the engine (healthy engine or engine has a fault), in addition to making the recommendation to correct the fault based on current international standards. Another report of a scientific nature is displayed and returns to the user a series of mathematical parameters obtained from the amplitude of the frequencies of the sidebands of the fast Fourier transform and which are associated with failure criteria.

(Keywords: Induction Motors, unbalance, misalignment, oscillating load, user interface, Fast Fourier Transform.)

Dedicatoria

*A mi mamá y mi papá, familia,
amigos y seres queridos.
Por ser mi mayor motivación.*

Agradecimientos

Agradezco a mi mamá María Trinidad y a mi papá Pablo Pacheco por su apoyo y amor incondicional, siendo ellos mi mayor inspiración en cada momento de mi vida.

A mi familia por su cariño y apoyo moral y económico para el desarrollo de mis estudios universitarios.

A mi director de tesis, Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos por siempre tener la disposición de apoyarme y por ayudarme a crecer profesionalmente.

Al Dr. Juan José Saucedo Dorantes y sinodales por su retroalimentación durante el desarrollo de este trabajo.

A los maestros y coordinación que conforman la Facultad de Ingeniería porque siempre buscan la manera de hacer crecer y ayudar a los estudiantes aportando todo su conocimiento.

A los trabajadores de la Facultad, por su increíble labor dentro del Campus y por siempre contagiar su felicidad y amor por lo que hacen.

A mis compañeros de generación que conforme pasaba el tiempo se volvieron grandes amigos, siendo una parte indispensable en este camino por su cariño y apoyo.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN -----	I
SUMMARY -----	II
DEDICATORIA -----	III
AGRADECIMIENTOS-----	IV
ÍNDICE DE TABLAS-----	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS -----	IX
CAPÍTULO 1 -----	1
1.1 INTRODUCCIÓN-----	1
1.2 ANTECEDENTES -----	3
1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA -----	8
1.4 JUSTIFICACIÓN -----	9
1.5 OBJETIVOS-----	10
1.5.1 Objetivo general -----	10
1.5.2 Objetivos particulares -----	10
1.6 PLANTEAMIENTO GENERAL -----	11
CAPÍTULO 2 -----	14
2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA -----	14
2.1 Motor de inducción -----	14
2.1.1 Partes principales de un motor de inducción -----	15
2.2 Principales fallas en motores eléctricos de inducción -----	16
2.3 Desbalance mecánico-----	19
2.4 Desalineamiento mecánico -----	20
2.5 Principales métodos de detección de fallos -----	22
2.6 Transformada de Fourier -----	24
2.6.1 Transformada rápida de Fourier-----	24
2.7 Bandas laterales -----	25
2.8 Normativas para desbalance y desalineamiento -----	26

2.9 Sensor para detectar carga oscilante (Sensor de alta presión Bosch 0 265 005 303)	27
2.10 Sistema de control para generar carga oscilante y características del motor utilizado	28
2.11 Tratamiento digital de señales	29
2.12 Filtrado	29
2.13 Diezmado	30
2.14 GNU Octave, una herramienta con licenciamiento libre	30
2.15 GNU Octave vs Softwares con licenciamiento	31
2.16 GuiEditor: Una herramienta para crear interfaces gráficas con GNU Octave	31
CAPÍTULO 3	32
3 METODOLOGÍA	32
3.1 Condiciones para el motor	33
3.2 Matriz experimental de pruebas	33
3.3 Configuración de la bancada	34
3.4 Instrumentación del sistema de medición de corriente usando sensores	36
3.5 Sistema de adquisición de datos propietario	37
3.6 Procesamiento en PC	38
3.7 Interfaz de usuario	41
3.8 Propuesta de evaluación y corrección del fallo con base en normas	43
3.9 Restricciones para el desarrollo del proyecto	43
3.10 Descripción del lugar de trabajo	46
CAPÍTULO 4	47
4 RESULTADOS	47
4.1 Configuración de la bancada y sistema de cargas oscilantes	47
4.2 Adquisición y acondicionamiento de señales	50
4.2.1 Algoritmo FFT para evaluación de fallos	51
4.3 Interfaz de usuario desarrollada	52
CAPÍTULO 5	56
5 CONCLUSIONES	56

REFERENCIAS -----	58
APÉNDICE A: REGLAS DE LABORATORIO SEGUIDAS -----	62
APÉNDICE B: CÓDIGO PARA PROGRAMA DETECTOR DE FALLOS POR DESBALANCE Y DESALINEAMIENTO -----	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Matlab vs GNU Octave.

Tabla 2: Matriz experimental.

Tabla 3: Parámetros característicos de operación del motor.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Diagrama propuesto para el desarrollo del proyecto (autoría propia).

Figura 2.1: Motor de inducción trifásico tipo jaula de ardilla utilizado (autoría propia).

Figura 2.2: Partes de un motor de inducción: a) estator de un motor de inducción y devanados del estator, b) dibujo de un rotor de tipo jaula de ardilla y c) rotor tipo jaula de ardilla (Chapman, 2005).

Figura 2.3: Diagramas característicos de: a) comportamiento internacional de fallas y b) diagrama causa-efecto de las principales fallas en MI de gran potencia (Dorrbercker et al., 2007).

Figura 2.4: Representación gráfica del desbalance estático (autoría propia).

Figura 2.5: Representación gráfica del desbalance dinámico (autoría propia).

Figura 2.6: Representación gráfica del desbalance cuasi-estático (autoría propia).

Figura 2.7: Representación gráfica del desbalance de cupla o par (autoría propia).

Figura 2.8: Representación gráfica de la desalineación paralela (autoría propia).

Figura 2.9: Representación gráfica de la desalineación angular (autoría propia).

Figura 2.10: Diagrama característico de un sistema de detección de fallos en motores de inducción (autoría propia).

Figura 2.11: Análisis FFT de la señal de corriente dadas las bandas laterales asociadas a fallos (autoría propia).

Figura 2.12: Características principales del sensor Bosch 0 265 005 303 a) Sensor de alta presión Bosch b) Curva característica del sensor V vs P (Sensores Bosch, 2023).

Figura 2.13: Señal sinusoidal para generar carga oscilante en motor de inducción (autoría propia).

Figura 3.1: Metodología propuesta (autoría propia).

Figura 3.2: Sistema mecánico desarrollado para fallas bajo cargas oscilantes (autoría propia).

Figura 3.3: Desbalance estático (autoría propia).

Figura 3.4: Desalineamiento angular (autoría propia).

Figura 3.5: Sensor de corriente modelo L08P050D15 (DigiKey.com, 2023).

Figura 3.6: FPGA Spartan 3E de 1600 compuertas lógicas (autoría propia).

Figura 3.7: Diagrama de flujo lógico para detección de bandas laterales (autoría propia).

Figura 3.8: Diagrama lógica para detección de fallas con base en bandas laterales (autoría propia).

Figura 3.9: Interfaz de usuario creada en guiEditor (autoría propia).

Figura 3.9.1: Interfaz de usuario creada en guiEditor con a) funciones interactivas de guiEditor b) consola y editor de código fuente de Octave en guiEditor c) datos a insertar por el usuario y d) reporte de resultados (autoría propia).

Figura 3.10: Placa de datos del motor usado (autoría propia).

Figura 3.11: Variador de frecuencia utilizado (autoría propia).

Figura 3.12: Lugar de trabajo (autoría propia).

Figura 4.1: Sistema mecánico desarrollado (autoría propia).

Figura 4.2: Cople con falla por desalineamiento (autoría propia).

Figura 4.3: Cople con masa independiente para generar falla por desbalance (autoría propia).

Figura 4.4: Señal de voltaje para generar carga oscilante (autoría propia).

Figura 4.5: Señal de corriente para cada fase ante frecuencias de: a) 15 Hz con motor sano, b) 30 Hz con motor desbalanceado, c) 50 Hz con motor desalineado y d) 60 Hz con motor desbalanceado (autoría propia).

Figura 4.6: Gráfico de la FFT de la corriente del estator (autoría propia).

Figura 4.7: Gráfico de la FFT en decibelios de la corriente del estator (autoría propia).

Figura 4.8: Resultados obtenidos para a) $f = 15$ Hz, b) $f = 30$ Hz, c) $f = 50$ Hz y d) $f = 60$ Hz (autoría propia).

Figure 4.9 Resultados técnicos con a) desbalance y b) desalineamiento (autoría propia).

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo surge de la necesidad de detectar fallas en los motores eléctricos más usados en la industria a nivel mundial. Los motores de inducción son aquellas máquinas encargadas de, con base a un voltaje de corriente alterna, inducir un campo magnético giratorio del estator en el circuito del rotor. Estos motores tienen múltiples aplicaciones, como bombeo de agua, grúas, elevadores, poleas, sistemas de engranajes, entre otros, debido a su alto rendimiento, bajo costo, confiabilidad y nobleza (a pesar de presentar ciertas fallas, pueden seguir funcionando). Está documentado que los motores eléctricos consumen hasta el 60% de la energía mundial e incluso pueden multiplicar su costo inicial de energía consumida hasta 20 veces y estos consumen hasta el 50% de la energía disponible en el mundo (Calzada & Pazos, 2009).

En el sector industrial, se conoce que el 70% de la energía consumida se atribuye a los motores eléctricos (Londoño & Ramírez, 2013). Las consecuencias que puede tener un motor de inducción si presenta una falla pueden ser múltiples, pero empiezan con aumentos en el consumo de corriente (Calzada & Pazos, 2009) y, por ende, en el consumo de potencia que finalmente se traduce en un mayor costo de facturación, por lo tanto, es necesario estudiar estas condiciones y corregirlas para evitar esas altas tasas o daños aún mayores en el motor. El aumento del costo de la energía no es la única desventaja de no analizar y corregir errores en los motores, sino que la parte ambiental y social se ve afectada debido a que los motores eléctricos aportan hasta un 16% de las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía (Londoño & Ramírez, 2013), además de que el 65 % de la energía mundial se produce utilizando combustibles fósiles.

Los motores más utilizados a nivel mundial son los motores de inducción (Calzada & Pazos, 2009) y de aquí la importancia de conocer sus principales fallas y los métodos principales de detección, las cuales se deben principalmente a rodamientos dañados, barras rotas, desbalance y desalineamiento (Castelli & Andrade, 2007) (estas últimas dos son las que se analizarán a lo largo del proyecto por su incidencia, además de mostrar tendencias de ser causantes de otro tipo de fallos como se analiza en la sección 1.2). Se han estudiado múltiples formas de analizar y clasificar este tipo de fallas y se pueden dividir en dos tipos principales: las técnicas modernas como la transformada wavelet o la descomposición en modo empírico, que son técnicas avanzadas

y más complejas que las técnicas convencionales, las cuales utilizan el filtrado y la transformada de Fourier y que son bastante simples de implementar. Por otro lado, existen condiciones diferentes de carga en un motor de inducción, la carga oscilante y la constante, esta última es muy utilizada en laboratorios para analizar criterios de falla, sin embargo, en la vida real las cargas a las que se somete un motor son difícilmente del tipo constante, por lo que el proyecto analiza fallos por desbalance y desalineamiento bajo cargas oscilantes. Estos últimos han sido muy poco desarrollados, pero en los últimos años ha aumentado el interés por estudiarlos de manera precisa porque los motores normalmente están sometidos a cargas oscilantes, por ejemplo, en un centro comercial que tiene cinta transportadora o las mismas escaleras mecánicas, no es posible tener la carga de tipo constante porque en algunas ocasiones habrá más carga que en otras debido al peso de las personas.

Para considerar fallas en un motor de inducción se deben tener algunos parámetros iniciales de donde partir, cuando el motor está completamente sano, es decir debe estar sujeto a una normatividad nacional o internacional, por lo que la normativa es bastante útil para encontrar fallas en motores de inducción. Entre las normas dirigidas al desbalance y desalineamiento, se encuentra la ISO 21940 (ISO 21940-1, 2019), que presenta configuraciones típicas de rotores con comportamiento flexible de acuerdo con sus características y requerimientos de balanceo, describe los procedimientos de balanceo y especifica el método de evaluación del estado final del balanceo y establece pautas para los criterios de calidad (Kuemmler & Kolerus, 2013). Por otro lado, la ISO 20816 (ISO 20816-3, 2022) establece condiciones y procedimientos generales para la medición y evaluación de vibraciones utilizando mediciones realizadas en partes giratorias, no giratorias y no recíprocas de máquinas completas. Con la ayuda de esta norma, se pueden detectar fallas en motores de inducción debido a desbalance y desalineamiento (España, 2020).

Por todo lo mostrado, el presente trabajo tiene como principal objetivo crear un sistema capaz de detectar fallas por desbalance y desalineamiento en los motores de inducción utilizando cargas oscilantes y proponer soluciones con base en normas vigentes, además de crear una interfaz de usuario que permita identificar si el motor está fallando o no y que brinde información al operario: una interfaz es de carácter técnico y otra con información matemática obtenida de la transformada rápida de Fourier que le sirve a un ingeniero o investigador a obtener ciertos parámetros característicos.

Para lograr lo anteriormente mencionado, el presente trabajo consta de 5 capítulos los cuales se resumen a continuación:

En el capítulo 1 se presenta una visión general de la tesis, así como la motivación surgida para realizarla. Por su parte, en el capítulo 2 se muestran los elementos y bases teóricas que ayudan a comprender de una mejor manera el desarrollo de este trabajo. Para el capítulo 3 se describe a detalle la metodología seguida para obtener un sistema capaz de detectar fallos en motores de inducción y se muestre en una interfaz de usuario. En el capítulo 4 se muestran los resultados obtenidos dada la metodología seguida. Finalmente, en el capítulo 5 se discuten las conclusiones y perspectivas del trabajo tomando los resultados presentados en el capítulo 4, además de presentar cómo se están cumpliendo los objetivos planteados.

1.2 ANTECEDENTES

Dentro de la literatura revisada, se ha encontrado que la mayoría de los trabajos que analizan fallas en motores de inducción (MI) se realiza con software con un costo de licenciamiento importante como MATLAB, e incluso se tienen algunos instrumentos que pueden ser capaces de detectar el desbalance o desalineamiento y otro tipo de fallas, pero tienen precios elevados y son de arquitectura cerrada. Además, se encontró que existen muy pocos trabajos que se enfocan en detectar fallos bajo condiciones de carga oscilante y se encontró que las fallas por desbalance y desalineamiento son causantes de otro tipo de fallos si no se da un mantenimiento oportuno.

Se mencionó anteriormente la incidencia en la literatura de usar softwares con un alto costo de licenciamiento para detección de fallos. Prueba de ello es que Villada et al. (2007) utilizaron redes neuronales artificiales para diagnosticar fallas entre espiras del estator en MI, utilizaron un modelo de la máquina que les permitió simular las distintas fallas propuestas bajo condiciones de carga y desequilibrios de tensión.

De igual manera, Hernández (2017) utilizó un análisis de tiempo-frecuencia mediante la Transformada en Tiempo Corto de Fourier (STFT, de sus siglas en inglés) en MATLAB para detectar fallas por barras rotas en los MI. Crearon un sistema de detección de barras rotas que se presentan en los rotores de los motores de inducción de tipo jaula de ardilla mediante el análisis

de la corriente eléctrica que se consume y que es producto del mal funcionamiento del motor. Para hacer la detección, el autor comparó las señales de corriente eléctrica del estado sano y con presencia de barras rotas para poder comparar y detectar correctamente el fallo presentado, concluyendo que logró detectarlo para llevar a cabo procesos más eficientes, seguros y económicos en la industria.

Por su parte, Valdez et al. (2021) utilizaron análisis de entropía de la información en señales de corriente para detectar fallas por barras rotas en MI usando MATLAB. Realizaron un examen experimental para analizar cuál era la factibilidad de utilizar un análisis por un método poco desarrollado como la entropía de la información que contiene la señal de corriente en un motor de inducción para poder reducir el costo computacional y poder detectar el fallo de las barras rotas, concluyendo que alcanzaron una efectividad mínima del 99.7% en el arranque del motor y un 95% durante el estado estable para diagnosticar un estado sano y con una barra rota en el motor de inducción.

En otro estudio, Burgueño et al. (2017) aplicaron técnicas desarrolladas en MATLAB para la detección de fallas por excentricidad en motores de inducción. Ellos implementaron un modelo de detección basado en la tesis de Long Wu, titulada “Separación de la oscilación del par de carga y las fallas del rotor en el monitoreo del estado del motor de inducción basado en la corriente del estator”. Los resultados indican que es posible detectar la falla de excentricidad en los MI a través del monitoreo de la corriente estática, utilizando múltiples registros del espectro del motor.

De igual forma, Ramírez (2022) utilizó la señal de corriente en MATLAB para detectar falla por barras rotas y desbalance en motores eléctricos de inducción. Menciona que las barras rotas y el desbalance son dos de las condiciones de falla más comunes frecuentes y que atraen la atención de los investigadores, quienes optan por detectar fallas durante el transitorio de arranque del motor y no en la condición donde trabajan los motores regularmente como lo es el régimen de estado estable. Concluyeron que su técnica sobrepasa el 90% de certeza en cuanto a la identificación y clasificación de la condición de operación del motor de inducción.

Además de que los sistemas se basan en software con altos costos de licenciamiento, también existen equipos comerciales capaces de detectar fallas en los motores de inducción, pero que utilizan técnicas que no contemplan a la corriente del motor de inducción como las vibraciones

mecánicas. Por otro lado, estos equipos comerciales regularmente tienen un alto costo, además de requerir mantenimientos periódicos para mantenerse funcionando en cuanto a normas eléctricas y la gran mayoría son de arquitectura cerrada, es decir, no se pueden modificar a futuro para detectar otro tipo de fallas o usar otro tipo de técnicas a las que el fabricante ofrece.

Claro ejemplo de lo antes mencionado es la existencia de un equipo electrónico que ayuda a detectar fallas en motores de inducción, este dispositivo que lleva por nombre WEG Motor Scan es un dispositivo de arquitectura cerrada capaz de detectar fallas en los motores eléctricos de inducción midiendo temperatura, vibraciones, carga, etc. y que ayudan al mantenimiento predictivo, detectando fallas como las de desbalance y desalineamiento usando el espectro de vibración (WEG, 2023).

Por su parte, la empresa de software TRACTIAN ofrece una serie de algoritmos capaces de detectar diferentes tipos de fallas en motores de inducción, incluyendo desbalance y desalineamiento utilizando vibraciones, generando prescripciones sobre la falla y cómo prevenirlas en caso de que estén cerca de ocurrir. El sistema que ofrece de igual manera que el mostrado anteriormente, es de arquitectura cerrada, por lo que no se podrá manipular el algoritmo para detectar otro tipo de fallas ni para cambiar las condiciones de las pruebas (TRACTIAN, 2023).

Por otro lado, después de revisar la literatura se encontró que existen pocos trabajos, investigaciones, artículos o tesis enfocados en la detección de fallos por desbalance y desalineamiento u otro tipo que utilicen cargas oscilantes, la mayor parte de los investigadores se centran en las cargas constantes debido a las complicaciones y confusiones entre los fallos y cargas oscilantes. Es importante recordar que, en la vida real, las cargas oscilantes son las cargas más comunes a las que se someten los motores de inducción durante su operación.

Un grupo de investigadores, Bossio et al. (2017), utilizaron redes neuronales autoorganizadas para detectar y cuantificar fallas en MI. Este trabajo se basa en el estudio de las potencias activas y reactivas instantáneas del motor, con el fin de discriminar fallas cuyas frecuencias estén muy próximas como las de barras rotas y cargas oscilantes, concluyendo que su estrategia fue exitosa, logrando detectar fallas en motores eléctricos de inducción y mostrando su deseo de utilizar esta estrategia en trabajos futuros para detectar fallos por desbalance y desalineamiento utilizando la condición de cargas oscilantes. A pesar de esto, utilizaron otro tipo

de técnicas diferentes a las desarrolladas a lo largo de este proyecto y solo describieron la técnica que se puede utilizar para la detección de fallos usando cargas oscilantes.

De igual manera, García et al. (2011) realizaron un análisis espectral de señales de corriente en el estator “análisis de las características de la corriente en el motor de inducción (MCSA por sus siglas en inglés)”, mencionando que el análisis de corriente presenta dificultades cuando se aplica al motor una carga oscilante a bajas velocidades y, por ende, causando dificultades en el cálculo de la transformada rápida de Fourier. Por ello, proponen un método basado en la transformada de Fourier en tiempo corto y la transformada Wavelet, en el cual concluyen que fue posible detectar los fallos de cortocircuito utilizando su técnica.

También, Bossio & Bossio (2016) mencionaron en su trabajo que la estrategia basada en el análisis de corriente activa y reactiva permite conocer y separar diferentes tipos de condiciones de falla como lo pueden ser las barras rotas y cargas oscilantes, sin embargo, mencionan que esta separación puede no tener éxito para perturbaciones de cargas de mayor frecuencia y por ello analizan la respuesta en frecuencia de la corriente eléctrica ante cargas oscilantes, y con ello, detectar el rango de frecuencias para el cual la estrategia puede ser correctamente aplicada, concluyendo que aquellas fluctuaciones de carga menores a 10 Hz tienen una mayor tasa de éxito en detección de fallos.

Por otro lado, el factor ambiental juega un papel importante en la crisis que se ha desatado en los últimos años a nivel mundial del calentamiento global y la ruptura de la capa de ozono. Por ello, es bastante importante mencionar el factor del consumo de energía y los aspectos ambientales contra los principales fallos en los motores eléctricos de inducción y que incluyen a las de desbalance y desalineamiento, y es que al revisar literatura se ha encontrado una relación directa entre el aumento en el consumo de energía y situaciones perjudiciales para el medio ambiente cuando se presenta una falla en el motor y con situaciones económicas como el incremento en el consumo de energía.

Por ejemplo, Taborda et al. (2012) mencionaron que las fallas en los motores de inducción se traducen principalmente en vibraciones mecánicas, además que existe un aumento en los niveles de ruido y concluyeron que existe un gran aumento en el consumo eléctrico del motor a raíz de los fallos por desbalance y desalineamiento, y que se deben de analizar para evitar la

pérdida de la disponibilidad del equipo y se sabe que este incremento de consumo eléctrico está relacionado directamente con las emisiones de dióxido de carbono.

De igual forma, Flores et al. (2017) obtuvieron un modelo empírico que relaciona el incremento en el consumo energético con la falla por desalineamiento en MI. Mencionan que desarrollaron su modelo mediante observaciones experimentales de las fallas con la comparación en consumo energético y concluyen que las vibraciones mecánicas causadas por desalineaciones son mayores cuando se usa un acoplamiento rígido, ya que el acoplamiento flexible absorbe las vibraciones. De igual manera, concluyen que el conocimiento de la falla por desalineamiento ayudará a los operadores de los motores de inducción a tomar mejores decisiones para mantener a las máquinas en un contexto operacional adecuado con el fin de mejorar la eficiencia energética.

Igualmente, Londoño et al. (2013) mencionaron que los motores eléctricos aportan hasta un 16% de emisiones de CO₂ relacionadas a la energía, además de que el 41% de las emisiones de CO₂ son relacionadas al sector eléctrico. También mencionan que se pronostica que entre los años 2010 y 2030, la energía eléctrica demandada por el sistema del motor eléctrico se incrementará en aproximadamente el 63%, por lo que, consecuentemente, se incrementará el nivel de emisiones de CO₂ en aproximadamente 75%, por ello la importancia de reducir estos incrementos de energía que se asocian a las fallas de desbalance y desalineamiento que se muestran en los dos artículos anteriores.

Finalmente, se encontró que el desbalance y desalineamiento en los motores de inducción son dos de los fallos más recurrentes en estas máquinas. Así, Castelli & Andrade (2007) mencionaron que dentro de las principales fallas que se presentan en los motores de inducción se pueden dividir en principalmente 2 tipos: fallas mecánicas y fallas de aislamiento. Dentro de las fallas mecánicas, se asocian generalmente a fallas en el rotor o en componentes que se relacionan a este, además de que sus principales causas son el desbalance, desalineamiento y flexión como recopila Chen et al. (2019) en su trabajo. Por otro lado, se dice que las fallas por desbalance y desalineamiento son los grandes causantes de las vibraciones excesivas en los motores eléctricos en un porcentaje de entre el 40 y 50% de todos los casos (Marín, 1997).

1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Con la literatura revisada se descubrieron múltiples áreas para aportar y se dividieron principalmente en 3 vertientes: la primera es la económico-comercial, científico-tecnológica y social-ambiental.

Económico-comercial: Se encontraron problemas como el alto costo de las licencias en que se desarrollan los algoritmos, además, se descubrió que, a causa de las fallas en los motores de inducción, se da un incremento en el consumo de energía y, por lo tanto, existe un alto precio en la facturación de las fábricas y empresas.

Científico-tecnológica: Se determinó que los sistemas comerciales son de arquitectura cerrada, es decir, una vez realizada la compra, el equipo no puede recibir actualizaciones ni tampoco se puede modificar para que detecte otro tipo de fallas y bajo otras condiciones, el operador tendrá que ajustarse a los requerimientos de fabricación. Se encontró que hay pocos trabajos enfocados en las cargas oscilantes, y que, como se mencionó anteriormente, la carga oscilante es la que se encuentra en prácticamente todas las aplicaciones de los motores eléctricos. Por otro lado, se concluyó en diversos artículos que hay una confusión entre los parámetros de falla con las cargas oscilantes que hacen muy complicado encontrar y clasificar los fallos en los motores de inducción. Se añade el hecho que este tipo de fallas generalmente son las principales causantes de vibraciones en el motor, contribuyendo al desarrollo de más problemas en este. Finalmente, se observó que hay pocos trabajos enfocados en analizar las fallas por desbalance y desalineamiento y entre estos, analizan otro tipo de variables o por diversos tipos de técnicas que son más difíciles de computarizar.

Social-ambiental: La última vertiente es la social-ambiental, en donde se encontró que las fallas incrementan las vibraciones y, por lo tanto, aumentan el consumo de energía. También se encontró que los motores de inducción aportan emisiones de CO₂ y que, los combustibles fósiles que son necesarios para la creación de la energía eléctrica como el petróleo y carbón contribuyen al efecto invernadero, por lo tanto, entre más sea la energía que requiere un motor, habrá una contribución en esta índole.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Dadas las problemáticas que se describieron en la sección anterior, la justificación se enfoca en las mismas 3 vertientes:

Económico-comercial: Se generó un algoritmo de bajo costo, usando un software de licenciamiento libre para la detección de las fallas que se presentan en los motores de inducción, y así, brindar una herramienta que puedan utilizar los distintos tipos de operarios de los motores de inducción en una industria, como los técnicos que buscan saber en una respuesta sencilla si el motor presenta o no un fallo para poder solucionarlo, por otro lado, se busca brindar una serie de parámetros matemáticos para la detección del fallo a un ingeniero o investigador y que puedan utilizar estos datos para el beneficio conjunto de la industria, por ejemplo, buscar el decremento en el consumo de energía y por ende la baja en la facturación mensual del servicio de electricidad, adicionalmente el sistema se realizará con algoritmo de detección de fallos basado en GNU Octave, un software de uso libre como se mencionó anteriormente.

Científico-tecnológica: Se implementó un sistema que usa la transformada rápida de Fourier para detectar las fallas de desbalance y desalineamiento en motores de inducción bajo cargas oscilantes usando como variable la corriente eléctrica. El sistema desarrollado no presentó ningún problema en los efectos que pueden presentar las cargas oscilantes con los parámetros del fallo. Se logró crear una herramienta que no tiene una arquitectura cerrada, como los equipos que se presentaron en la sección de antecedentes, esta herramienta creada tiene diversas áreas de oportunidad para en un futuro detectar otro tipo de fallas usando la misma metodología. Además, el desarrollo de este trabajo se realizó con base a normas, en cuanto a las conexiones eléctricas del motor de inducción se utilizó la norma mexicana NOM-001-SEDE-2018 en la sección de conductores eléctricos. Por otro lado, se usó el estándar internacional ISO 21940 como una herramienta para corregir la falla por desbalance.

Social-ambiental: Finalmente, ante los problemas ambientales, por ejemplo, que la energía consumida por un motor de inducción contribuye a las emisiones de dióxido de carbono y que las vibraciones causadas por las fallas en MI incrementan el consumo de energía, es importante realizar este tipo de análisis para el diagnóstico de los fallos, antes de que el motor siga incrementando el uso de energía, y, por ende, el uso de los diversos tipos de combustibles fósiles que se requieren para la creación del suministro eléctrico.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo general

Desarrollar una herramienta de bajo costo en base a normas que permita identificar las fallas de desbalance y desalineamiento en un motor de inducción sometido a una carga oscilante mediante el análisis de la transformada rápida de Fourier (FFT) en corriente.

1.5.2 Objetivos particulares

1. Realizar un análisis de normas, equipos comerciales y trabajos de investigación relacionados con la detección de fallos de desbalance y desalineamiento mediante una revisión de literatura y manuales para establecer una comparativa y las bases de la propuesta.
2. Definir la matriz de pruebas a experimentar para obtener los datos que se analizarán mediante la selección de frecuencias, severidad de fallo/daño y magnitud de carga oscilante.
3. Configurar la bancada para ejecutar la matriz de pruebas mediante la integración de un motor de inducción, variador de velocidad, elementos de acoplamiento y un sistema de generación de carga oscilante.
4. Instrumentar la bancada a experimentar mediante la integración de un sensor de corriente y un sistema de adquisición propietario para la obtención de señales de las fallas de desbalance y desalineamiento bajo una carga oscilante.
5. Desarrollar un análisis de datos de corriente basado en transformada rápida de Fourier (FFT) mediante el software libre GNU Octave para discriminar los fallos ante diversas condiciones de carga oscilantes.
6. Programar una interfaz de usuario basado en los resultados del procesamiento para determinar fallos y condiciones que ayuden a un usuario para interpretar el estado del motor.
7. Validar el sistema desarrollado mediante diversos datos obtenidos de la matriz de pruebas y realizar ajustes y/o comparativas cualitativas con otros trabajos o sistemas.

1.6 PLANTEAMIENTO GENERAL

La Figura 1.1 muestra el planteamiento general a desarrollarse durante el proyecto y a continuación se describen los pasos seguidos de manera detallada:

1. Primero, se hace una revisión en literatura de los temas relacionados para entrar en un contexto actual de lo que se ha desarrollado para esta área de la detección de fallos en motores eléctricos de inducción ante los efectos de las cargas oscilantes.
2. Posteriormente, teniendo en cuenta el contexto actual se creó un plan para detección de dos de los principales fallos que se dan en los motores de inducción como lo es el desbalance y desalineamiento, además de que se planteó el uso de las cargas oscilantes. Dado este contexto, se realiza la adecuación de los sensores y transductores a utilizar encaminados a los objetivos del proyecto, se hará uso de un transductor que convierte energía eléctrica en presión.
3. Luego, se realizará la integración del conjunto de sistemas mecánico, los cual constarán de una serie de elementos que permitan simular las cargas oscilantes y que se pueda modificar tanto la condición del motor como la frecuencia de operación.
4. Una vez integrado el sistema mecánico y teniendo los sensores a utilizar, integró un sistema de control para el transductor que convierte la energía eléctrica en presión para así controlar la fuerza que se ejercerá al motor simulando así las cargas oscilantes mediante un sistema de frenado que utiliza un caliper, discos de freno, bandas, etc.
5. Una vez listos los sistemas, se pueden comenzar a desarrollar las pruebas en combinación con las condiciones que se van a inducir (sano, desbalance y desalineamiento).
6. Entonces, se utiliza un sistema de adquisición de datos propietario teniendo en cuenta las variables que se van a medir, en este caso, corriente eléctrica.
7. Una vez adquiridas las señales y haciendo varias pruebas con base a una matriz de experimentación, se realizará un ordenamiento de los archivos generados para el posterior procesamiento de la señal de corriente, haciendo uso de filtros, diezmado, etc.

8. Estando la señal filtrada, se utilizó la tecnología basada en corriente en función de la frecuencia, se procesó mediante la transformada rápida de Fourier usando un software de licenciamiento libre como lo es GNU Octave para su posterior discriminación y detección de fallos.
9. Finalmente, se programaron dos interfaces de usuario con el despliegue de la información obtenida en los pasos anteriores.

Por otro lado, la carrera de Ingeniería Electromecánica en su línea terminal en Mecatrónica fue de gran ayuda para la realización de este proyecto, ya que aporta múltiples conocimientos vistos a lo largo del mapa curricular que ofrece; claro ejemplo es la adquisición de señales en la materia de Sistemas de adquisición de datos vista en el 8vo semestre de la especialidad en Mecatrónica; la programación en software como GNU Octave visto en los cursos de Programación y Programación avanzada en los semestres 2 y 3 respectivamente; el uso y programación de tarjetas FPGA propietarias modelo Spartan 3E de 1600 compuertas lógicas visto a lo largo del 5to semestre en la materia de Circuitos lógicos; de igual manera, se utilizaron sistemas de control, los cuales fueron estudiados en un área de conocimiento en que la universidad desarrolla correctamente a los estudiantes y los prepara para resolver problemas reales de este tipo, por ejemplo, en el curso de Control 1 y Control 2 se aprendieron múltiples tipos de controladores, de tipo P, PI, PID, etc. y con ello se buscó crear un controlador para crear el sistema de cargas oscilantes. Asimismo, se conjuntan los conocimientos de áreas como la eléctrica y que se abordó a lo largo de la carrera en materias como Circuitos eléctricos en corriente directa y alterna aunado con el conocimiento adquirido en Electromagnetismo; por otro lado, el desarrollo de este trabajo no hubiera sido posible sin los conocimientos en la materia impartida en 5to semestre de Máquinas eléctricas para poder lograr un control en el motor acorde a las características del trabajo. Se utilizó la materia de Electrónica, se realizaron cálculos matemáticos y el uso de la transformada de Fourier que se impartió tanto en el curso de Ecuaciones diferenciales como en el de Análisis de señales; se requirió de conocimiento en sistemas mecánicos y se logró un conocimiento sólido gracias a los cursos de Dinámica, Estática y Mecánica de materiales, además del curso de Ciencia de Materiales, lo cual permitió desarrollar un proyecto bastante completo y un correcto análisis de los elementos mecánicos que requiere el trabajo. Finalmente, para poder utilizar el Laboratorio de Electromecánica de la Universidad Autónoma de Querétaro es necesario apearse a las reglas propuestas en el Apéndice A de este documento.

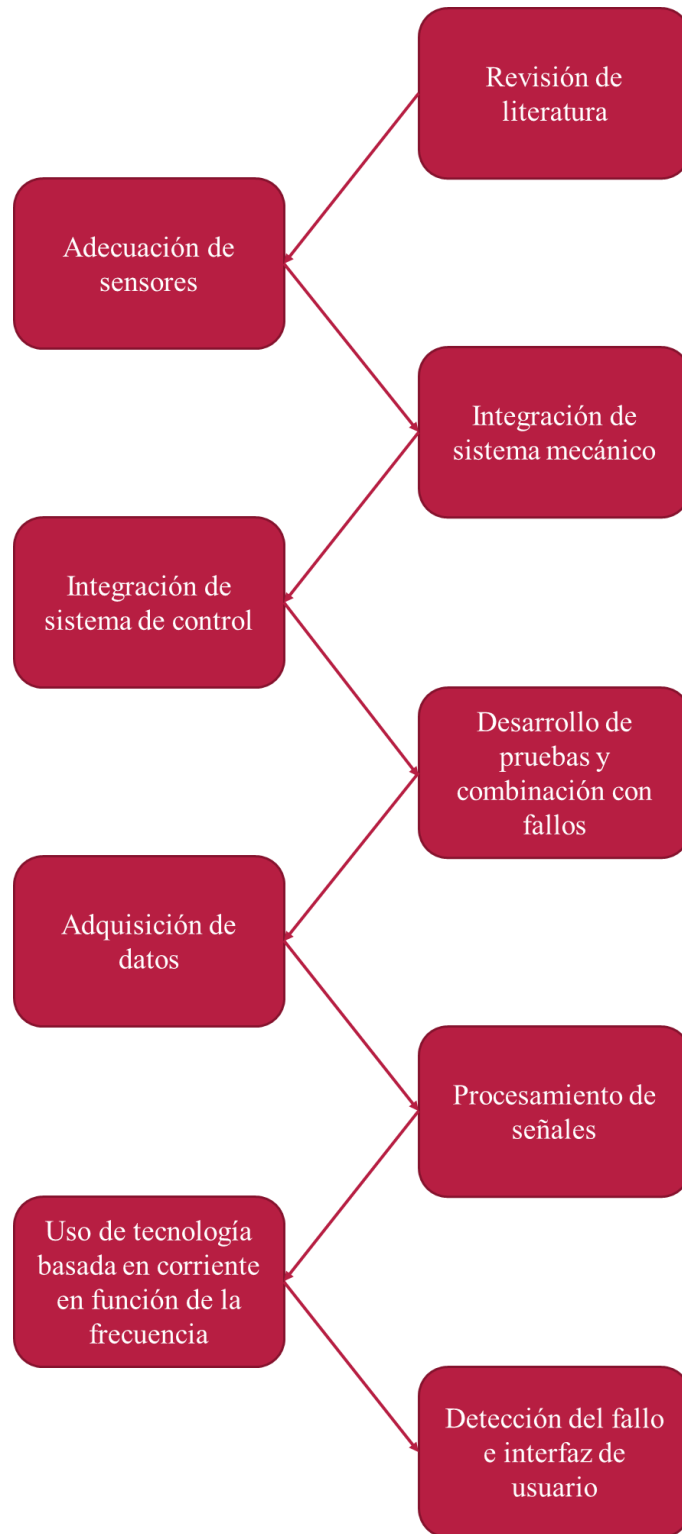


Figura 1.1: Diagrama propuesto para el desarrollo del proyecto (autoría propia).

CAPÍTULO 2

2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En el presente capítulo se analizan los fundamentos teóricos necesarios que respaldan el presente trabajo de investigación, por lo tanto, esta sección es bastante importante para comprender la metodología seguida en el capítulo 3. Dentro de los conceptos más importantes que se analizan se encuentran definiciones de los motores de inducción y sus principales fallos, además de los métodos de procesamiento y detección usando la transformada rápida de Fourier. También se analizan las principales normativas encaminadas al desbalance y desalineamiento y normas eléctricas.

2.1 Motor de inducción

Los motores eléctricos de inducción son aquellas máquinas encargadas de convertir una corriente eléctrica en un campo magnético de tipo giratorio y son unas de las máquinas más importantes en la actualidad, ya que son ampliamente usados en distintos tipos de aplicaciones como el bombeo de agua, ascensores, poleas, grúas, compresores, aplicaciones industriales, etc. por su bajo costo, confiabilidad y nobleza. Los motores de inducción pueden ser de dos tipos: los motores trifásicos y los motores monofásicos. A su vez, los motores trifásicos pueden ser clasificados en dos grupos, los de rotor bobinado y el motor de inducción de tipo jaula de ardilla, con el que se trabajó en este proyecto y que se muestra en la Figura 2.1.

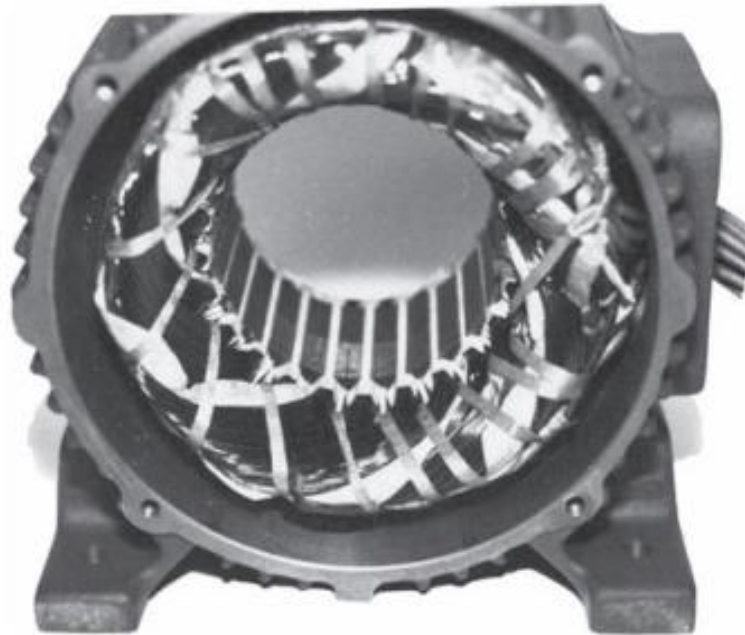


Figura 2.1: Motor de inducción trifásico tipo jaula de ardilla utilizado (autoría propia).

2.1.1 Partes principales de un motor de inducción

Dentro de las principales partes de un motor de inducción trifásico con rotor de tipo jaula de ardilla se destacan tres, las cuales se describen a continuación:

- Estator: Esta es la parte fija del motor de inducción (Figura 2.2a) y se compone principalmente de alambres de cobre esmaltados que se enrollan en bobinas y que son colocados alrededor del interior del motor y serán conectados a una fuente de corriente alterna, y con ello, se genera un campo magnético giratorio.
- Rotor: Es la parte móvil del motor de inducción (Figura 2.2b y 2.2c) y está constituido por dos anillos en los extremos y por una serie de barras que giran simultáneamente. Además, el rotor también está constituido por una serie de láminas de acero que permiten concentrar el campo magnético que genera el estator, y esto le permite al rotor girar.
- Carcasa: Es la estructura externa del motor de inducción y funciona como una capa protectora hacia los elementos internos, evitando así posibles daños en el motor.



a)

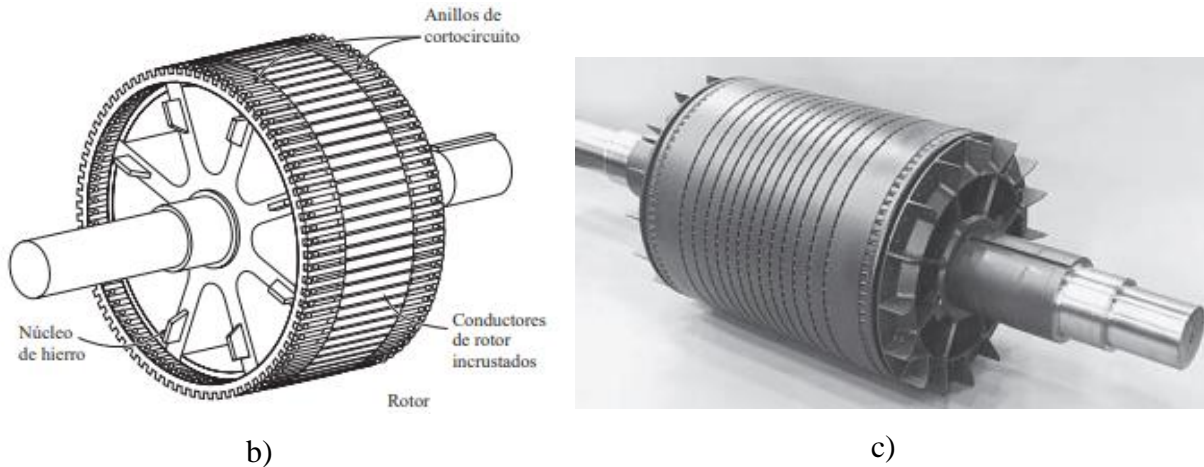


Figura 2.2: Partes de un motor de inducción: a) estator de un motor de inducción y devanados del estator, b) dibujo de un rotor de tipo jaula de ardilla y c) rotor tipo jaula de ardilla (Chapman, 2005).

Otras partes que componen al motor de inducción son el eje que está acoplado junto a un ventilador y, por ende, giran al mismo tiempo, este sistema permite circular aire que proviene del medio ambiente sobre la carcasa y esto hace que el motor de inducción no se sobrecaliente, ya que tienden a producir calor cuando están en funcionamiento.

2.2 Principales fallas en motores eléctricos de inducción

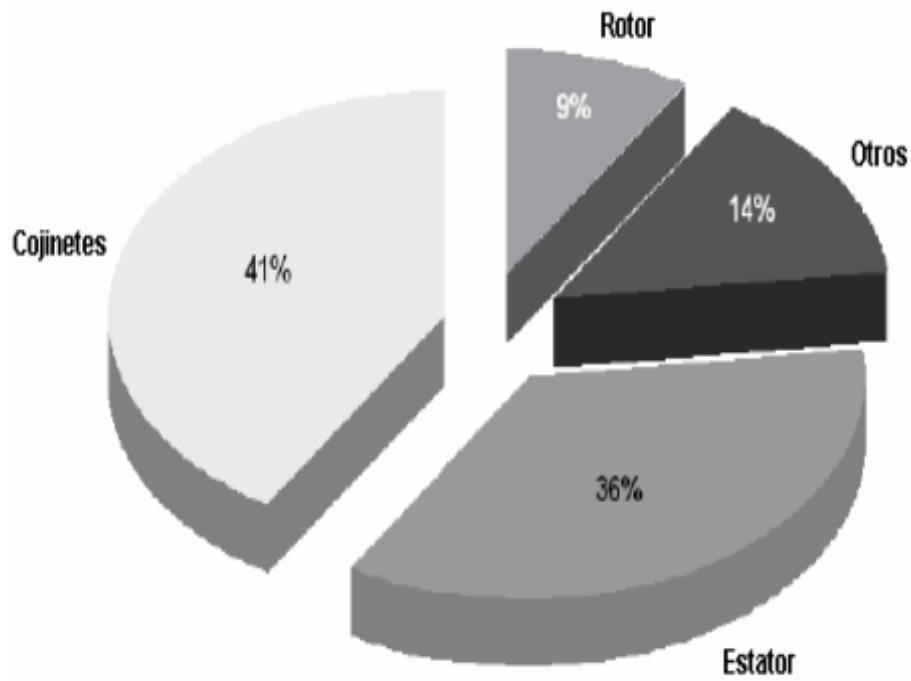
Hoy en día, los motores de inducción son las máquinas más utilizadas a nivel industrial y este sobreuso puede causar que los motores se estresen y con el tiempo, tiendan a presentar diversas fallas. Skowron et al. (2019) realizan una recopilación de diversas bibliografías que clasifican a las fallas de los motores de inducción, concluyendo con la siguiente proporción cuantitativa de tipos individuales de daños:

- Fallas en rodamientos constituyen el 40%
- Fallas en el estator constituyen el 38%
- Fallas en el rotor constituyen el 10%
- Otro tipo de fallas constituyen el 12%

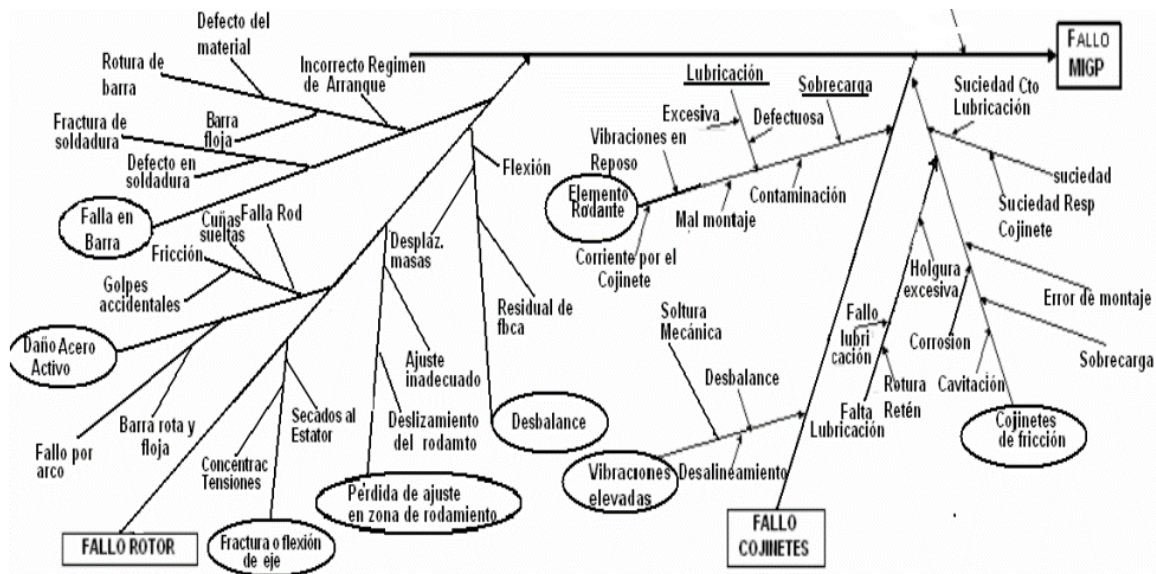
Anteriormente se mencionó que dentro de las fallas mecánicas se dan las fallas en el rotor con una incidencia del 10%, que, combinado con fallas en sus elementos asociados como el de rodamientos, representan un 50% de problemas, además de que sus principales causas son el desbalance, desalineamiento y flexión como recopilaron Chen et al. (2019) en su trabajo. También se mencionó que las fallas por desbalance y desalineamiento son los grandes causantes de las vibraciones excesivas en los motores eléctricos en un porcentaje de entre el 40 y 50% de todos los casos (Marín, 1997). Por su parte, Bedoya & López (1997) mencionan que las fallas en los rodamientos son causadas por fallas mecánicas que se deben principalmente a la excentricidad del eje y a un aumento en las vibraciones, por lo que se puede deducir que las fallas por desbalance y desalineamiento pueden ser los causantes de otro tipo de fallas y de ahí la necesidad de analizarlas. Del mismo modo, Norton & Karczub (2003) mencionan que 2 principales causas de la vibración mecánica son el desbalance y desalineamiento.

Ahora bien, Choudhary et al. (2019) clasifican las fuentes de falla en los motores en dos tipos principales, las fallas internas y las fallas externas. Las fallas internas, a su vez, se dividen en mecánicas (causadas principalmente por rotores rotos, fallas en baleros, excentricidades del rotor y movimiento de bobinas) y eléctricas (causadas por falla dieléctrica, cortocircuito en el embobinado y arrastre eléctrico). Las fallas externas se dividen en mecánicas (causadas en su mayoría por **desbalance**, fallas en el rotor, estator y **desalineamientos**), ambientales (causadas por humedad y que afectan principalmente a los rodamientos, temperatura ambiente y contaminación) y eléctricas (causadas por falla en la fase, secuencia inversa de fases, fallas en tierra y desbalance de voltaje o corriente).

De igual manera, los motores de inducción de gran potencia tienen una tendencia similar a la mostrada anteriormente en cuanto a su distribución de fallos, como muestran Dorrbercker et al. (2007) en su artículo de investigación (Figura 2.3a). Además, también brinda un diagrama de causa (Figura 2.3b) y efecto de las principales fallas que se presentan en este tipo de motores, siendo el desbalance y desalineamiento dos de las principales, por ello y por todo lo mencionado anteriormente, son dos de las fallas más relevantes en el ámbito científico y técnico.



a)



b)

Figura 2.3: Diagramas característicos de: a) comportamiento internacional de fallas y b) diagrama causa-efecto de las principales fallas en MI de gran potencia (Dorrbercker et al., 2007).

2.3 Desbalance mecánico

El desbalance es una de las principales fallas que se presentan en los rotores, Tahir et al. (2016) definen al desbalance como una distribución no uniforme de masa alrededor del centro de rotación del rotor. Por otro lado, Estupiñan et al. (2006) hacen un resumen de la norma ISO 1925 (2002), la cual presenta una clasificación del desbalance según una distribución de masas desbalanceadoras en las siguientes clasificaciones:

- Desbalance estático: se define el desbalance estático como la condición donde el eje principal de inercia del rotor se encuentra con un desplazamiento paralelo con respecto al eje de rotación (Figura 2.4).

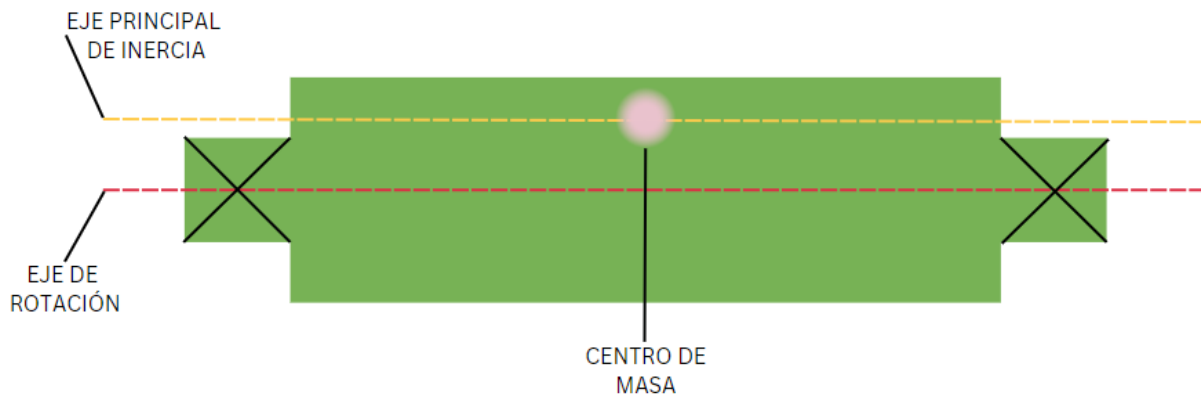


Figura 2.4: Representación gráfica del desbalance estático (autoría propia).

- Desbalance dinámico: se define como desbalance dinámico a la condición donde el eje principal de inercia del rotor no intercepta al eje de rotación (Figura 2.5).

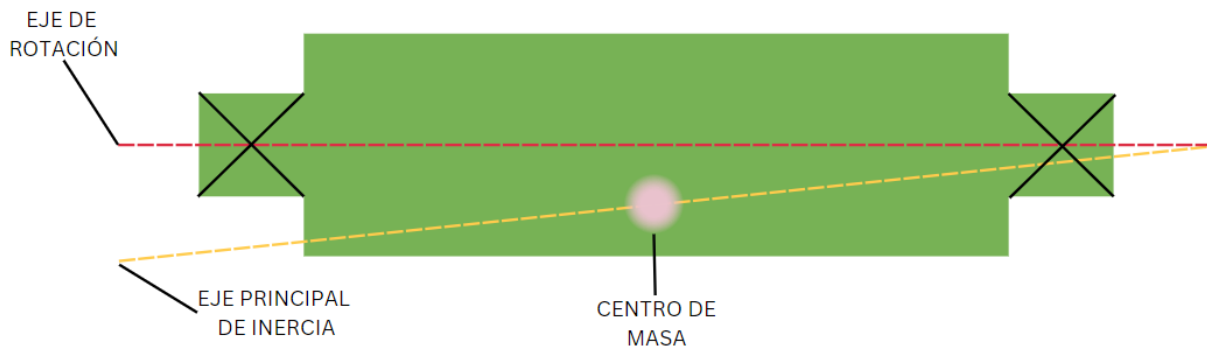


Figura 2.5: Representación gráfica del desbalance dinámico (autoría propia).

- Desbalance cuasi-estático: se define como desbalance cuasi-estático a la condición donde el eje principal de inercia del rotor intercepta al eje de rotación en un punto distinto a su centro de masa (Figura 2.6).

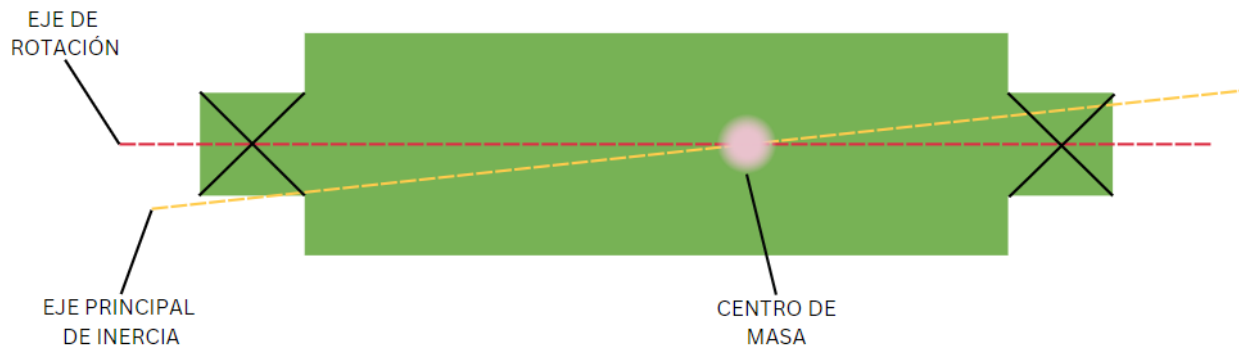


Figura 2.6: Representación gráfica del desbalance cuasi-estático (autoría propia).

- Desbalance de cupla o par: se define al desbalance de cupla a la condición donde el eje principal de inercia intercepta al eje de rotación en el centro de masa del rotor (Figura 2.7).

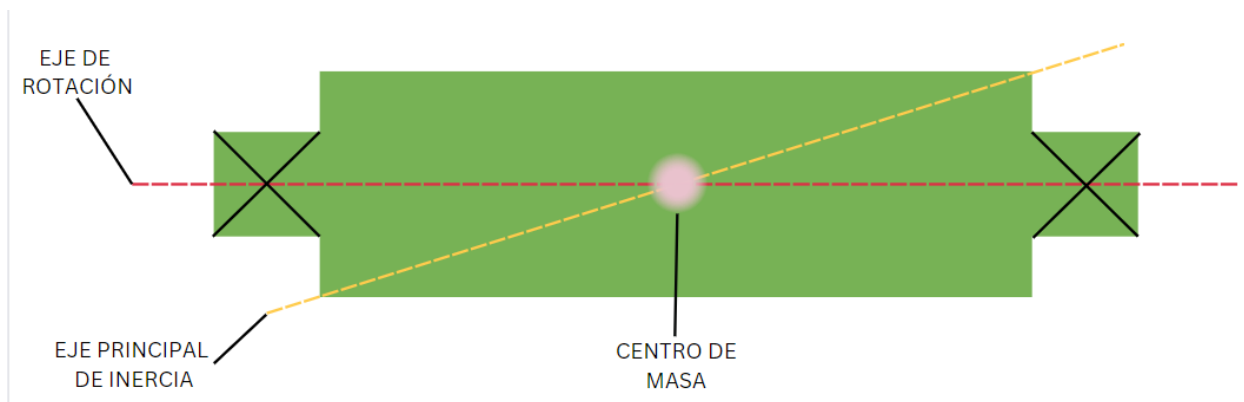


Figura 2.7: Representación gráfica del desbalance de cupla o par (autoría propia).

2.4 Desalineamiento mecánico

El desalineamiento es otra de las principales fallas en los motores de inducción, esta se da cuando dos ejes acoplados no son perfectamente colineales, lo que puede producir vibraciones

que a la postre, serán la principal causa de otro problema en el motor. Existen dos tipos de desalineaciones: las paralelas y las angulares (Tahir et al., 2016).

La empresa de software TRACTIAN proporciona la definición de ambos tipos de desalineaciones:

- La desalineación paralela ocurre cuando las líneas del centro del eje del motor y la de carga, no se encuentran alineadas de manera colineal (Figura 2.8).

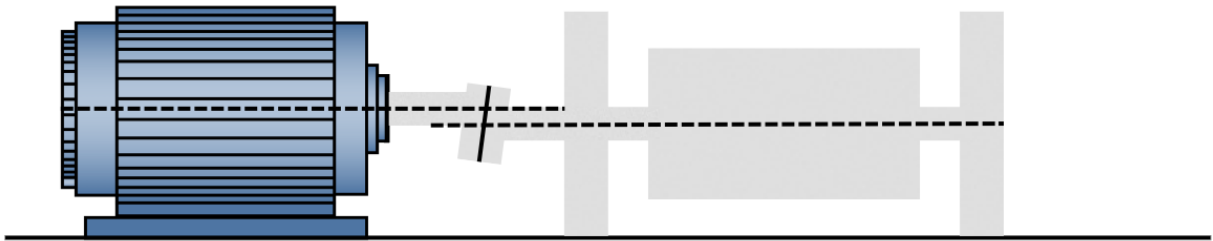


Figura 2.8: Representación gráfica de la desalineación paralela (autoría propia).

- La desalineación angular se da cuando existe un ángulo de inclinación entre las líneas de los centros de ambos ejes (Figura 2.9).

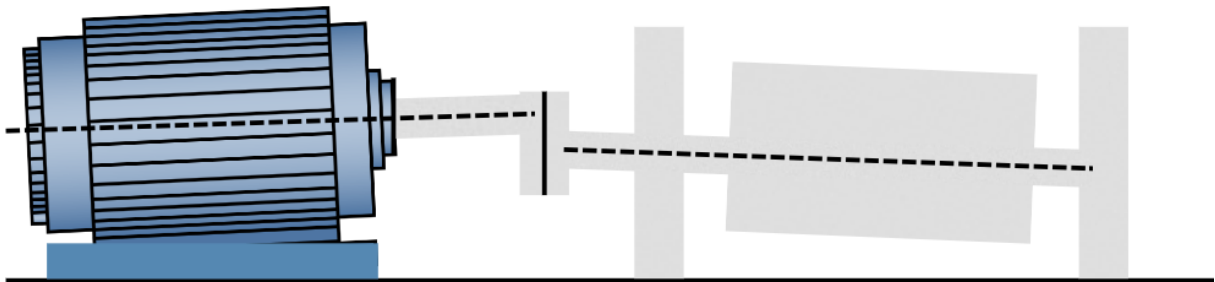


Figura 2.9: Representación gráfica de la desalineación angular (autoría propia).

2.5 Principales métodos de detección de fallos

A lo largo de los años se han propuesto múltiples métodos de detección de fallos por los investigadores debido a que los motores de inducción han sido muy utilizados históricamente en la industria, como se mencionó anteriormente, siendo las máquinas más utilizadas en ese rubro. El mantenimiento correctivo en los motores de inducción implica demasiados gastos económicos debido a los paros que se pueden dar en la producción y a que probablemente la falla que ocasionó ese paro, dañó componentes internos en el motor. Por ende, actualmente se ha vuelto necesario tener sistemas de detección y monitoreo de fallas en los motores de inducción para así evitar fallas catastróficas y paros en la producción. En la Figura 2.10 se muestra un diagrama clásico de como los sistemas de detección de fallos logran diagnosticar y detectar fallas en los motores de inducción.

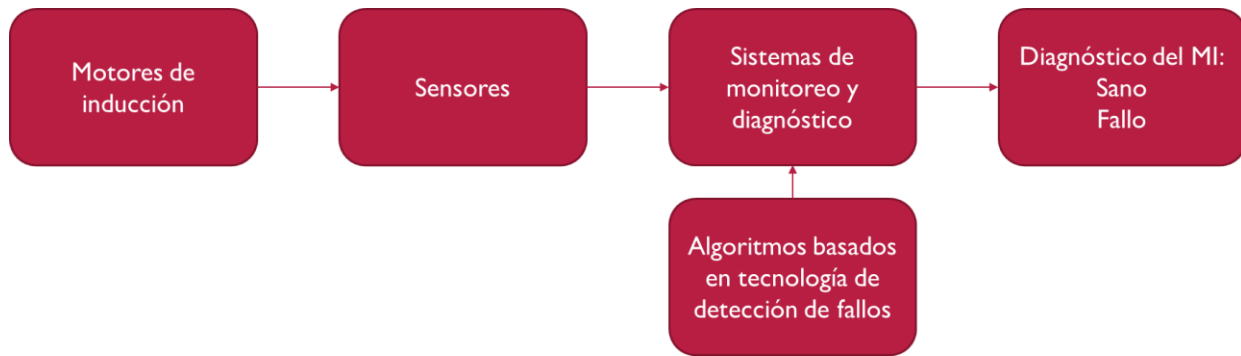


Figura 2.10: Diagrama característico de un sistema de detección de fallos en motores de inducción (autoría propia).

Primero, los motores de inducción son conectados a uno o más sensores, dependiendo la variable que se requiera medir, por ejemplo, corriente, flujo, vibraciones, etc. Los sistemas de monitoreo y diagnóstico se basan en tratamientos digitales de las señales y con ello, infieren la condición en la que se encuentra operando el motor de inducción, por ello se muestra que a los sistemas de monitoreo y diagnóstico entran las variables que adquieren los sensores y con ayuda de un algoritmo basado en tecnología de detección de fallos pueden presentar un diagnóstico del motor (si se encuentra en su estado de referencia, es decir, en un estado sano o si presenta alguna anomalía contra su estado de referencia, lo cual se traduce como un fallo y que puede ser clasificado en distintos niveles).

Existen diversos tipos de métodos de detección de fallos, donde se encuentran los métodos clásicos y las técnicas modernas de procesamiento de señales. Dentro de los métodos clásicos se encuentran los que se basan en el dominio de la frecuencia como la transformada rápida de Fourier (FFT) y la transformada de Fourier en tiempo corto (STFT), los cuales tienen como principales ventajas su simpleza al implementar y sus moderados recursos computacionales y tecnológicos que requieren.

Por otro lado, dentro de las técnicas modernas existen los métodos basados en la transformada de ondoletas (wavelet), la transformada de Hilbert-Huang, descomposición de modo empírico, etc. Estos métodos se basan en el dominio del tiempo-frecuencia y requieren altos recursos tecnológicos, por lo que su operación requiere de tiempo y esto no es factible para sistemas que requieran detección en tiempo real.

Por lo anterior mencionado, y debido a que el análisis del espectro de corriente es bastante utilizado por su capacidad de detección de múltiples fallas y por ser una técnica de bajo costo y efectiva, además, al consumir moderados recursos tecnológicos, se reduce el tiempo de mantenimiento y, por ende, el tiempo de inactividad de los motores de inducción. Por lo anterior mencionado, se decidió utilizar el análisis de la corriente del motor de inducción mediante el uso de la transformada rápida de Fourier (FFT) y analizando las bandas laterales a la frecuencia fundamental y que son asociadas a fallos. Claro ejemplo de las bandas laterales en el espectro de corriente se muestra en la Figura 2.11.

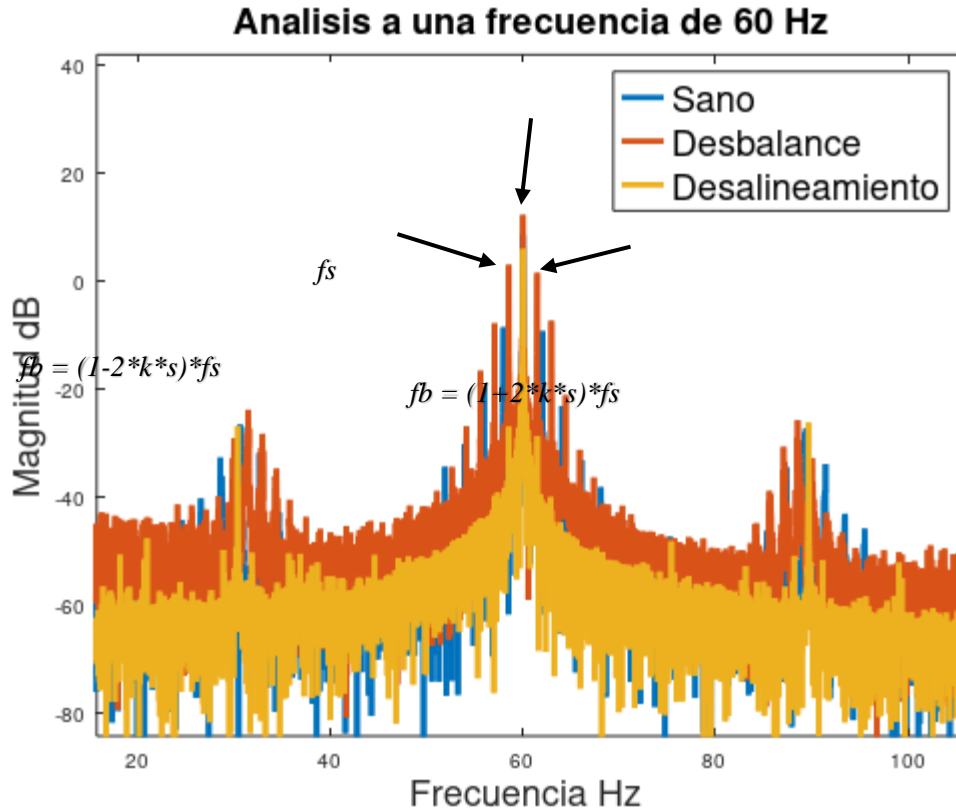


Figura 2.11: Análisis FFT de la señal de corriente dadas las bandas laterales asociadas a fallos (autoría propia).

2.6 Transformada de Fourier

Se sabe por definición que las series de Fourier son una forma de representar las señales como una combinación lineal de exponenciales armónicamente relacionadas, mientras que la Transformada de Fourier es una herramienta que permite transformar una señal muestreada en el dominio del tiempo en una señal muestreada en el dominio de la frecuencia y con ello, se pueden revelar características importantes de una señal.

2.6.1 Transformada rápida de Fourier

Dentro del análisis y procesamiento de señales, la transformada rápida de Fourier consiste en métodos que ayudan a calcular la transformada discreta de Fourier, esta última es una herramienta capaz de transportar datos del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia y

viceversa. Ahora bien, la transformada rápida de Fourier es una implementación bastante eficiente de la transformada discreta de Fourier debido a la amplia confiabilidad e importancia a la hora de trabajar con el tratamiento digital de las señales, como el filtrado y análisis espectral de estas (Chamba & Jiménez, 2022).

Para realizar el análisis de la señal de corriente a través de la transformada rápida de Fourier, esta se calcula a través de la Ecuación 1, donde $f(k)$ es la señal de corriente, N es la secuencia de datos, $F[n]$ es la función FFT, n y k forman los armónicos que la función presentará y ω_N^{nk} es la matriz transformada simétrica.

$$F[n] = \sum_{k=0}^{N-1} (\omega_N^{nk} * f(k)) \quad [1]$$

Ahora bien, dando una interpretación desde el punto de vista de la ingeniería, si se tiene una señal de corriente, voltaje o cualquier señal de energía en el dominio del tiempo y se desea aplicar una transformada de Fourier, se va a obtener una respuesta frecuencial y en función de esta, se obtendrá un mapa de cómo se distribuye la energía a lo largo de estas frecuencias. Particularmente en este proyecto, la transformada de Fourier brinda un mapa de cómo se distribuye la corriente a lo largo de las diferentes frecuencias y con ello, se podrá observar un panorama más amplio de cómo es que ante las fallas que se presentan en los motores, el consumo de energía se incrementa y, por ende, también la facturación.

2.7 Bandas laterales

Una vez presentada la definición de la Transformada Rápida de Fourier, cuando a una señal en función del tiempo se le es aplicada la FFT, es necesario estudiar algunos parámetros característicos de la señal y, es por ello que se estudian las bandas laterales a la frecuencia fundamental, que es un método que se basa en el análisis del espectro de cada una de las corrientes que alimentan el motor. El análisis se lleva a cabo para detectar componentes cercanos a los armónicos de la señal que se atribuyen directamente a criterios de falla. Entonces, el espectro de

frecuencias de la corriente presenta la fundamental y una serie de armónicos, y alrededor de cada uno de estos armónicos existen bandas laterales desplazadas alrededor de la fundamental por múltiplos del deslizamiento unitario como se muestra en la Ecuación 2 (Navarro, 2022).

$$fb = (1 \pm ks)fs \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad [2]$$

Donde fb es la componente de frecuencia característico relacionado con la falla, fs es la frecuencia de alimentación, k es un número entero que puede tomar valores enteros positivos y s es el deslizamiento unitario que es función de la velocidad sincrónica y la velocidad del rotor. Con la ayuda de la variable k se puede tener una serie de armónicos de las bandas laterales, pero se espera que en $k = 1$ haya una mayor concentración de energía o una mayor amplitud y, por tanto, donde se podrá observar y discriminar la falla en el motor de inducción. Otra forma de representar el deslizamiento unitario y la velocidad síncrona se observan en la Ecuación 3 y 4 respectivamente.

$$\text{deslizamiento unitario} = s = \frac{\text{velocidad sincrona} - \text{velocidad del rotor}}{\text{velocidad sincrona}} \quad [3]$$

$$\text{Velocidad sincrona} = \frac{60 * \text{frecuencia de suministro}}{\text{número de pares de polos del motor (hoja de datos)}} \quad [4]$$

2.8 Normativas para desbalance y desalineamiento

Se sabe que se debe tener una serie de normativas que regulen el desbalance y desalineamiento en los motores eléctricos de inducción, sin embargo, las normativas existentes se centran en la detección de estas fallas con otra variable como lo son las vibraciones, además de que una de ellas muestra y establece pautas para criterios de balanceo, por lo que se recomienda seguir este estándar cuando se presente una falla de este tipo en los motores eléctricos.

El estándar ISO 21940 presenta configuraciones típicas de rotores con comportamiento flexible de acuerdo con sus características y requisitos de balanceo, describe procedimientos de

balanceo, especifica métodos de evaluación del estado final de balanceo y establece pautas para criterios de calidad de balanceo. Utiliza un análisis de vibraciones mecánicas para cumplir su objetivo (Kuemlee & Kolerus, 2013).

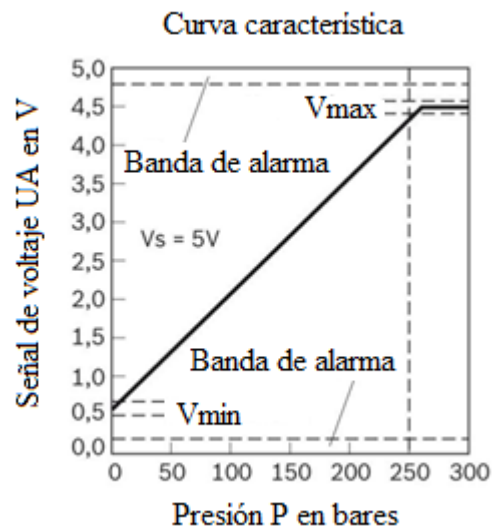
Por otro lado, el estándar ISO 20816: establece condiciones y procedimientos generales para la medición y evaluación de vibraciones utilizando mediciones realizadas en piezas giratorias, no giratorias y no reciprocas de máquinas completas. Con ayuda de este estándar se puede hacer la detección de desbalanceo y desalineamiento (España 2020).

2.9 Sensor para detectar carga oscilante (Sensor de alta presión Bosch 0 265 005 303)

Para detectar la carga oscilante, se utiliza el sensor mostrado en la Figura 2.12a, el cual es usado en vehículos automóviles para medir la presión en un sistema de frenado y opera con salida lineal en un rango de voltaje V de 0 a 5 volts para una presión P de 0 a 250 bares como se muestra en la Figura 2.12b. Cuando el sensor se encuentra en el voltaje mínimo, la presión será de 0 bares, sin embargo, cuando se encuentra en el nivel de voltaje más alto permitido, el sensor genera una presión de 250 bares.



a)



b)

Figura 2.12: Características principales del sensor Bosch 0 265 005 303 a) Sensor de alta presión Bosch b) Curva característica del sensor V vs P (Sensores Bosch, 2023).

2.10 Sistema de control para generar carga oscilante y características del motor utilizado

Se utilizará un manillar de motocicleta con palanca de frenado acoplados a un motor lineal de DC que funciona con una señal de voltaje. Es decir, el motor lineal hará que se presione o libere la palanca de freno, causando a su vez que el sistema frene con mayor y menor intensidad dependiendo de la señal de voltaje que se le ingrese y, para generar y simular una carga oscilante, la señal eléctrica que excita al motor deberá ser sinusoidal como se muestra en la Figura 2.13. Entonces, la señal de voltaje será tomada como referencia en el motor lineal para generar una fuerza de presión, que es transmitida por la palanca de freno al sistema de disco y caliper. De esta manera, la cantidad de presión de frenado ejercida en la flecha del motor de inducción es medida a través del sensor de presión, que la convierte en una señal eléctrica, y que es retroalimentada a un controlador asegurando el comportamiento oscilante del sistema mediante una estructura de lazo cerrado. Así, se logrará crear un sistema de frenado que simule la carga oscilante que se propone en este proyecto.

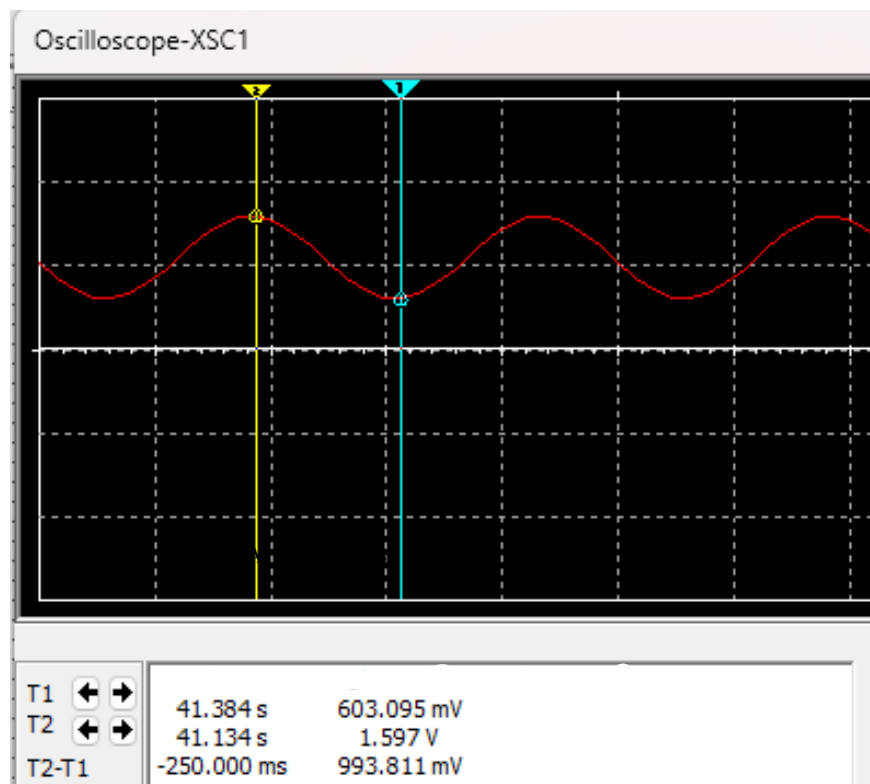


Figura 2.13: Señal sinusoidal para generar carga oscilante en motor de inducción (autoría propia).

La señal de la Figura 2.13 tiene una frecuencia de 2 Hz y presentará una amplitud de 1 V pico a pico aproximadamente. Por otro lado, para la inducción de carga oscilante se utilizará un motor eléctrico de inducción de tipo jaula de ardilla (SCIM, por sus siglas en inglés) de 1,5 kW de potencia, con un voltaje de operación de 220 V, con una frecuencia de 60 Hz, y según la hoja de datos, presenta 2 pares de polos.

2.11 Tratamiento digital de señales

Proakis et al. (1998) definen al tratamiento digital de señales en su libro tratamiento digital de señales, primero abordando el término de una señal como una magnitud física que se mantiene con una variación en el tiempo, espacio u otras variables independientes. Existen señales que parecen seguir una tendencia específica, por ejemplo, una señal senoidal, una señal lineal o cuadrática, entre otras. Ahora bien, muchas señales no pueden ser descritas de esta manera y la relación funcional será desconocida o muy completa. Un ejemplo de esto es una señal de audio, la cual no puede ser descrita como una función, sino que debe ser descrita como una función producto de la suma de varias señales senoidales con diferentes frecuencias y amplitudes. Por otro lado, también define a un sistema como un dispositivo físico que realiza operaciones sobre una señal, como lo puede ser un filtro digital para reducir ruidos o perturbaciones no deseadas y que son las que ocasionan interferencias o pueden distorsionar la señal original. A este proceso se le llama tratamiento digital de la señal, en ese caso, se realizó un filtrado a la señal para eliminar el ruido, pero se pueden aplicar una serie de operaciones a la señal para poder conseguir una señal más “limpia”. Entonces, para este trabajo, el tratamiento digital de señales proporciona un método alternativo para procesar y así poder analizar una señal de tipo analógica.

2.12 Filtrado

El término del filtrado se usa comúnmente para describir un algoritmo que es capaz de discriminar, de acuerdo con atributos de los objetos que se aplican en su entrada, lo que pasa a través de estos. Por ejemplo, físicamente, un filtro de aire es capaz de eliminar del entorno a pequeñas partículas que están volando en el aire. Por lo anterior mencionado, el filtrado se utiliza para eliminar ruidos indeseados que puede existir en las señales, para realizar análisis espectrales

de señales, para eliminar ciertos componentes frecuenciales de una señal que pueden ser causantes de un análisis incorrecto en una señal (Proakis et al., 1998).

2.13 Diezmado

El concepto de diezmado se refiere a una reducción en un factor de diez, se aplica de manera genérica en el muestreo de señales discretas por un factor entero, y con ello, se puede lograr preservar una de cada M muestras de una señal discreta. La Ecuación 5 describe al diezmado y se puede representar de la siguiente manera:

$$X_d[n] = x[nM] \quad [5]$$

La ecuación es un indicador de las muestras que se encuentran presentes en la señal diezmada y que se obtienen de las muestras de la señal original en los instantes nM , donde $X_d[N]$ es la secuencia resultante del diezmado, $x[n]$ es la secuencia original, además de que se toma una muestra cada M muestras de la secuencia original (Morineaud, 2004).

2.14 GNU Octave, una herramienta con licenciamiento libre

La Universidad Complutense, una importante universidad de Madrid, menciona que GNU Octave es un lenguaje interpretado de alto nivel orientado a la computación numérica. Puede usarse para resolver problemas lineales y no lineales, o como lenguaje de programación de propósito general. Octave es probablemente el clon de código abierto de Matlab más conocido, de uso completamente gratuito. Es tan parecido a Matlab, tanto en código como en capacidades, que muchos de los programas elaborados en Matlab son fácilmente portables a Octave (GNU Octave, 2023).

2.15 GNU Octave vs Softwares con licenciamiento

A continuación, en la Tabla 1 se muestran las principales diferencias entre el software de licenciamiento libre GNU Octave y otro software con un costo para adquirir la licencia como Matlab.

Tabla 1: Matlab vs GNU Octave.

Comparación	Matlab	GNU Octave
Definición	Laboratorio de matrices; es un lenguaje utilizado para la computación técnica	Es un lenguaje usado para la computación numérica
Lenguaje en que fue programado	C, C++ y Java	C, C++ y Fortran
Recursos	Consume más RAM	Consume menos RAM
Costo	Depende del precio de licencia de gnu.org	Es libre de licenciamiento

2.16 GuiEditor: Una herramienta para crear interfaces gráficas con GNU Octave

Según Gitlab, la página oficial para descargar el software de GuiEditor, este es una interfaz gráfica de usuario visual para GNU Octave, ya que este último no cuenta con una herramienta para crear interfaces. GuiEditor permite la edición gráfica visual de interfaces con ayuda de scripts y que pueden reproducir invocaciones y funciones nativas de GNU Octave. Dentro de las características principales que se describen en la página oficial se encuentran que guiEditor permite la gestión de proyectos que pueden incorporar múltiples ventanas de diálogo, imágenes, etc. Por otro lado, permite la generación de paquetes para poder distribuir aplicaciones en forma sencilla. También integra GNU Octave para simplificar procesos de depuración (GuiEditor, 2023).

CAPÍTULO 3

3 METODOLOGÍA

Con el desarrollo de este proyecto es posible obtener la detección de las fallas de desbalance y desalineamiento ante una condición de carga oscilante, con la que, posteriormente se desarrollaron dos interfaces de usuario, una interfaz técnica que permite ayudar a un operador de manera sencilla a detectar fallas por desbalance y desalineamiento en motores de inducción de forma visual, utilizando un semáforo donde el color verde es un estado saludable y el color rojo es la presencia de una falla. La otra interfaz es de carácter científico y proporciona al usuario datos relevantes obtenidos de la transformada rápida de Fourier que se utilizan para discriminar el estado del motor. Por tanto, la Figura 3.1 muestra un diagrama del proceso que se siguió para el desarrollo de este proyecto y en las distintas secciones de este capítulo se detalla cada parte.

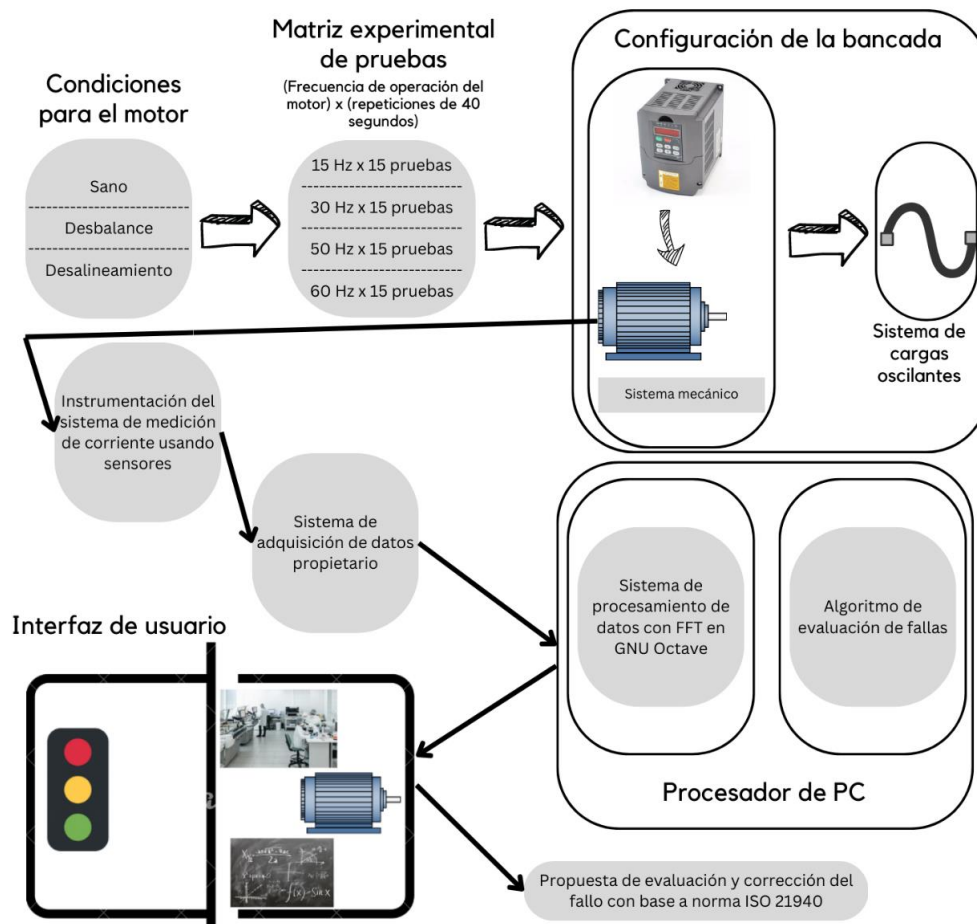


Figura 3.1: Metodología propuesta (autoría propia).

3.1 Condiciones para el motor

La Figura 3.1 consta de 8 pasos, los cuales comienzan con las condiciones que se experimentaron en el motor. Se trabajó con 3 distintos estados del motor, los cuales fueron:

- Motor sano o en estado de referencia
- Motor con fallo por desbalance
- Motor con fallo por desalineamiento

Ante cada una de estas condiciones se realizaron una serie de pruebas que se describirán en la sección 3.2.

3.2 Matriz experimental de pruebas

Teniendo en cuenta las tres condiciones que se aplicaron al motor, ahora fue necesario saber cuáles eran las características de operación con las que este trabajaría, estas características se describen en la Tabla 2 que se muestra a continuación:

Tabla 2: Matriz experimental.

Condiciones del motor ante cargas oscilantes	15 Hz	30 Hz	50 Hz	60 Hz
Sano	15 pruebas	15 pruebas	15 pruebas	15 pruebas
Desbalance	15 pruebas	15 pruebas	15 pruebas	15 pruebas
Desalineamiento	15 pruebas	15 pruebas	15 pruebas	15 pruebas

La Tabla 2 muestra la matriz de pruebas experimental que consta de 4 frecuencias de operación que serán configuradas en un variador de frecuencias que alimentará al motor de inducción, estas son 15, 30, 50 y 60 Hz. Para cada una de estas frecuencias se realizaron 15 repeticiones ante las 3 condiciones del motor propuestas: sano, desbalance y desalineamiento. Por

otro lado, la Tabla 3 muestra los parámetros de tiempo en que la señal de operación del variador de frecuencia pasa del estado transitorio al estado estable, a través de la señal rampa de arranque, además del tiempo de operación para cada una de las 15 pruebas que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 3: Parámetros característicos de operación del motor.

Parámetros característicos de operación del motor	15 Hz	30 Hz	50 Hz	60 Hz
Tiempo total del estado transitorio (s)	12	6	3.6	3.0
Tiempo de operación (s)	40	40	40	40

3.3 Configuración de la bancada

Posteriormente, como se puede observar en la Figura 3.2 se realizó la configuración de la bancada mediante el uso de un sistema mecánico-eléctrico. Dicho sistema se basa en un motor de inducción trifásico de tipo jaula de ardilla SCIM, que funciona con un voltaje de 220VAC y puede operar a una potencia de 1.492 kW, además de presentar dos pares de polos, según lo establecido en la información proporcionada por el fabricante. El motor fue conectado a una caja de engranes y a su vez, a un eje rígido mediante un cople.

Luego, se acoplaron dos masas inerciales a un eje sostenido por dos bases con rodamientos. Después, el eje es conectado a un sistema de frenado de tipo automotriz mediante un sistema de engranes, por un mecanismo de polea-correa dentada. Asimismo, el sistema de frenado automotriz se compone de un disco de freno y caliper instalado en otro eje, el cual también se sostiene mediante dos bases con rodamientos. La simulación de la carga oscilante se logra mediante un actuador, que, basándose en una señal de tipo senoidal, implementada mediante un

generador de funciones propietario, genera una presión de tipo senoidal transmitida al disco y caliper, logrando así la carga oscilante deseada gracias a un sistema de control en lazo cerrado.

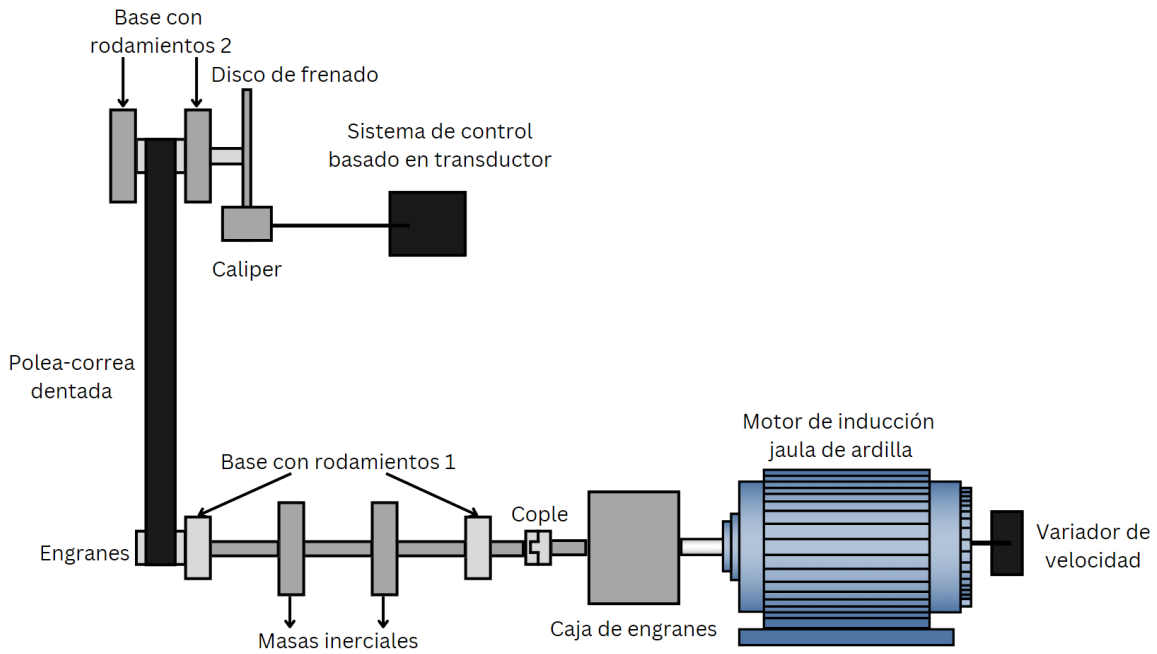


Figura 3.2: Sistema mecánico desarrollado para fallas bajo cargas oscilantes (autoría propia).

Las condiciones de falla se generan como se muestra a continuación:

El desbalance es de tipo estático y se produce gracias a la unión de una masa excéntrica en el cople que une a la caja de engranes con el eje que contiene a las masas inerciales como se muestra en la Figura 3.3. Este sistema logra hacer que el centro de masa del eje o cople no coincida con el eje de rotación.

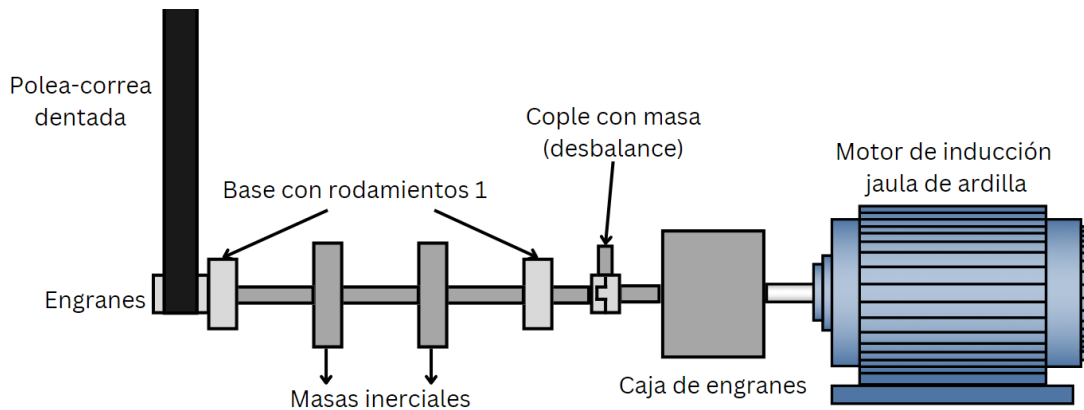


Figura 3.3: Desbalance estático (autoría propia).

En la Figura 3.4 se observa el desalineamiento que es de tipo angular, ya que el eje giratorio de la caja de engranes acoplada al motor de inducción y el eje donde se encuentran las masas inerciales y las bases con rodamientos presentan un ángulo de inclinación señalado con el nombre de desalineamiento angular.

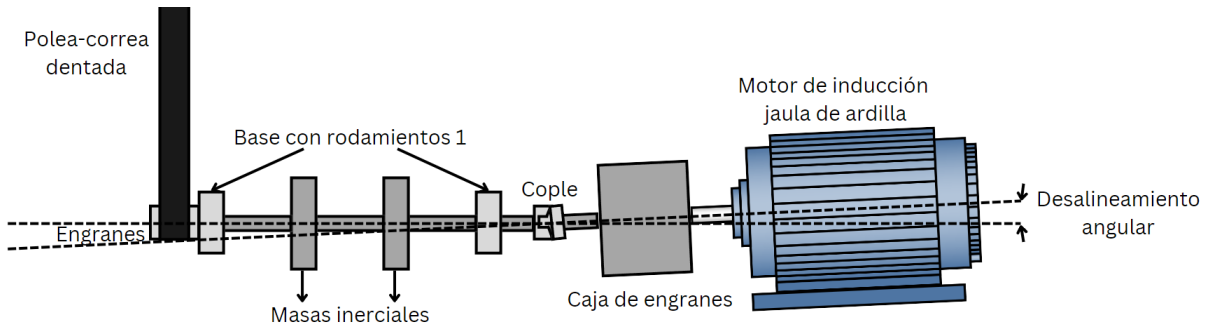


Figura 3.4: Desalineamiento angular (autoría propia).

3.4 Instrumentación del sistema de medición de corriente usando sensores

Ahora bien, la adquisición de los datos se basa en un sistema que monitorea las tres señales de corriente del estator que presenta el motor de inducción, dicho sistema se basa en tres sensores de corriente de efecto hall (modelo L08P050D15) como el que se muestra en la Figura 3.5. Estos tres sensores se encuentran montados en una placa que contiene un filtro *antialiasing* y un acondicionador de señal.



Figura 3.5: Sensor de corriente modelo L08P050D15 (DigiKey.com, 2023).

3.5 Sistema de adquisición de datos propietario

Luego del sistema de acondicionamiento de señal y filtro *antialiasing*, las variables de corriente son detectadas por dos convertidores de tipo analógico-digital de muestreo de salida en serie de 4 canales y 12 bits (ADS7841) que se utilizaron en la placa del sistema de adquisición de datos propietario y que tuvo su base en tecnología FPGA (FPGA Spartan 3E de 1600 compuertas lógicas) como se observa en la Figura 3.6. La frecuencia de muestreo utilizada para adquirir las señales de corriente del estator se adquiere a 6 kHz.

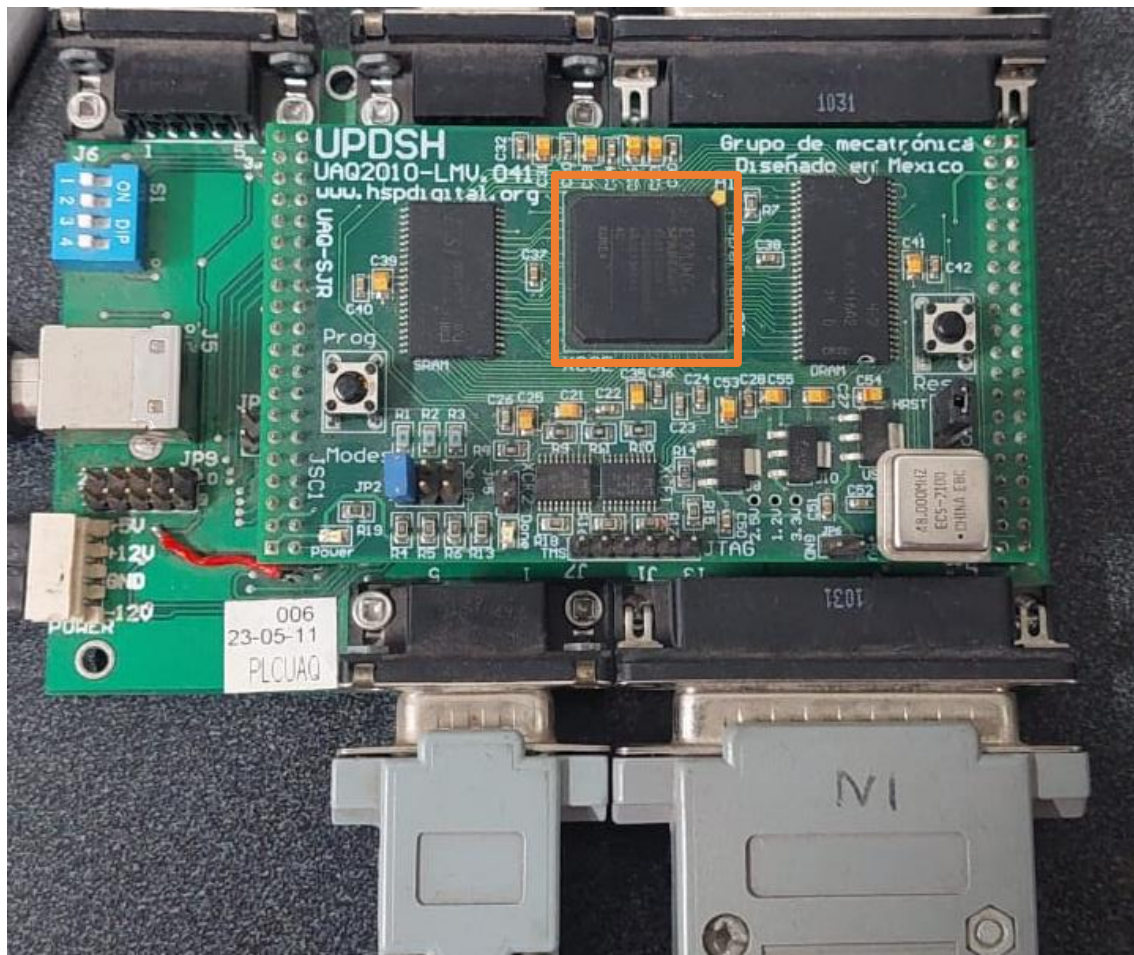


Figura 3.6: FPGA Spartan 3E de 1600 compuertas lógicas (autoría propia).

3.6 Procesamiento en PC

El proceso que sigue una vez teniendo las señales de corriente del estator que el sensor ha adquirido, es el procesamiento mediante GNU Octave, consiste en leer los archivos generados por cada prueba (cada archivo generado se compone de 3 columnas, las cuales corresponden al valor de corriente de cada fase del estator). Luego de las lecturas, de corriente, se procede a realizar un acortamiento de la señal generada, es decir, se sabe que cada prueba dura 40 segundos, sin embargo, solo se toma en cuenta el tiempo en que la señal permanece en estado estable, por lo que se elimina el estado transitorio que se muestra en la Tabla 3. A esta nueva variable se le aplica la transformada rápida de Fourier, lo cual proporciona valores de amplitud vs frecuencia, pero, estos valores de amplitud serán convertidos a un espectro en corriente basado en frecuencia vs amplitud en decibeles. Posteriormente, se realiza el cálculo de las bandas laterales derecha e izquierda como se mencionó anteriormente y con esas frecuencias, se calculó la amplitud en decibeles del espectro de corriente como se muestra en la Figura 3.7 (ver código en Apéndice B). Dicha figura muestra el comienzo del proceso, posteriormente se realiza la lectura de las señales de corriente del estator obtenidas, estas señales al ser de un motor trifásico se guardan en tres variables (C1, C2 y C3) para después recortarlas, analizando solamente estado de interés (estado estacionario). A estas señales se les aplica la transformada rápida de Fourier y la magnitud se convierte a magnitud en dB para finalmente calcular las frecuencias de las bandas laterales de este espectro de frecuencias para su posterior análisis.

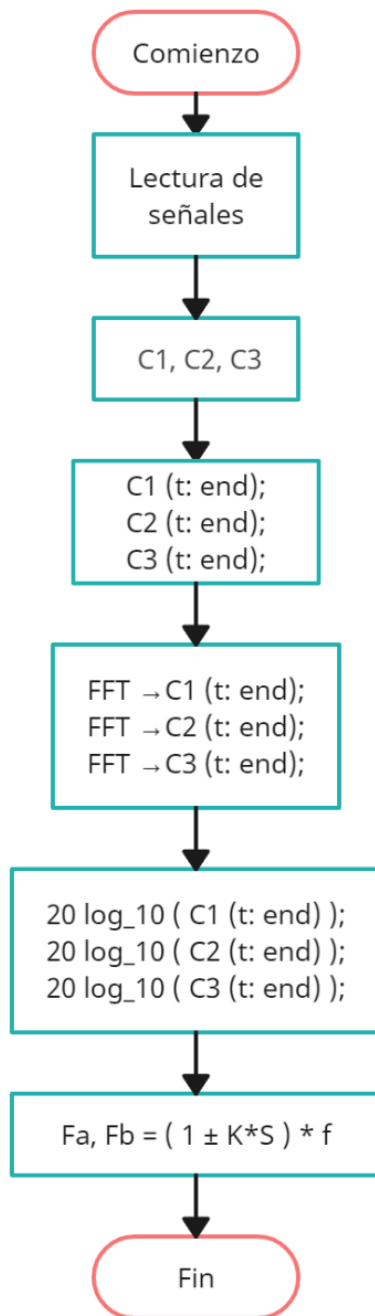


Figura 3.7: Diagrama de flujo lógico para detección de bandas laterales (autoría propia).

Los valores obtenidos de la amplitud de las bandas laterales en decibeles se imprimen en una interfaz de usuario, además de que se realiza una comparación entre los valores de amplitudes en decibeles del espectro para el motor sano, desbalanceado y desalineado, para finalmente brindar un reporte de resultados sobre si el motor presenta un fallo, una interfaz muestra los resultados

matemáticos y otra presentará un semáforo sobre si el motor presenta un fallo o no. La lógica de esto se muestra en la Figura 3.8. Con las frecuencias de las bandas laterales asociadas a los fallos en los motores de inducción, el algoritmo seguido comienza con el análisis de estas frecuencias de fallo para las 3 condiciones (sano, desbalance y desalineamiento), se analiza si la amplitud de las bandas del motor sano es menor a las amplitudes de las bandas laterales tanto para desbalance como para desalineamiento, si esto se cumple, se muestra un resultado sano para el motor, si esta condición es falsa, retorna el tipo de falla presentada, además de brindar una solución basada en el estándar internacional ISO 21940.

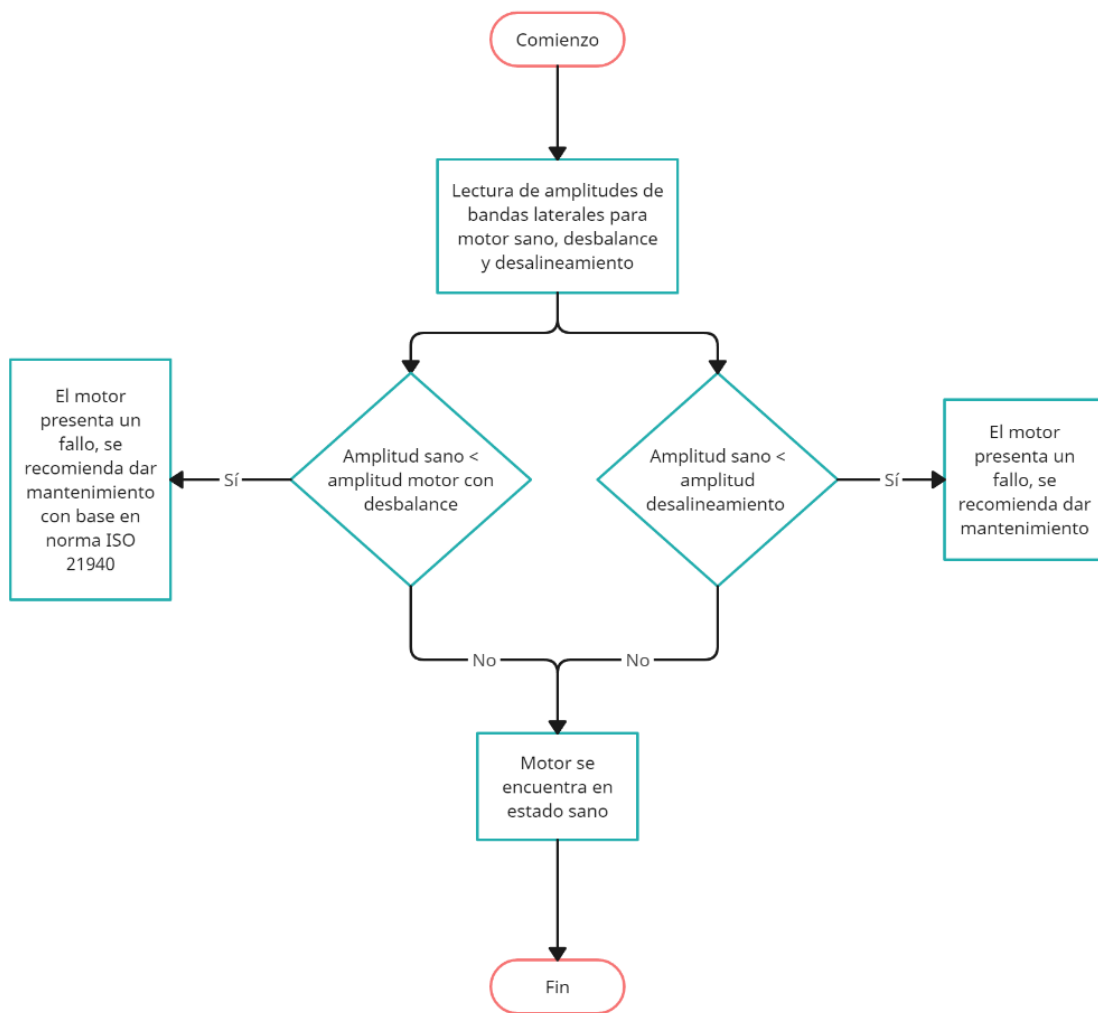


Figura 3.8: Diagrama lógico para detección de fallas con base en bandas laterales (autoría propia).

3.7 Interfaz de usuario

Se crearon dos interfaces de usuario en el programa de guiEditor, el cual, como se mencionó anteriormente, es un programa que permite crear interfaces gráficas con el código desarrollado en GNU Octave, la Figura 3.9 muestra la interfaz creada en GNU Octave para desarrollar el procesamiento de los datos.

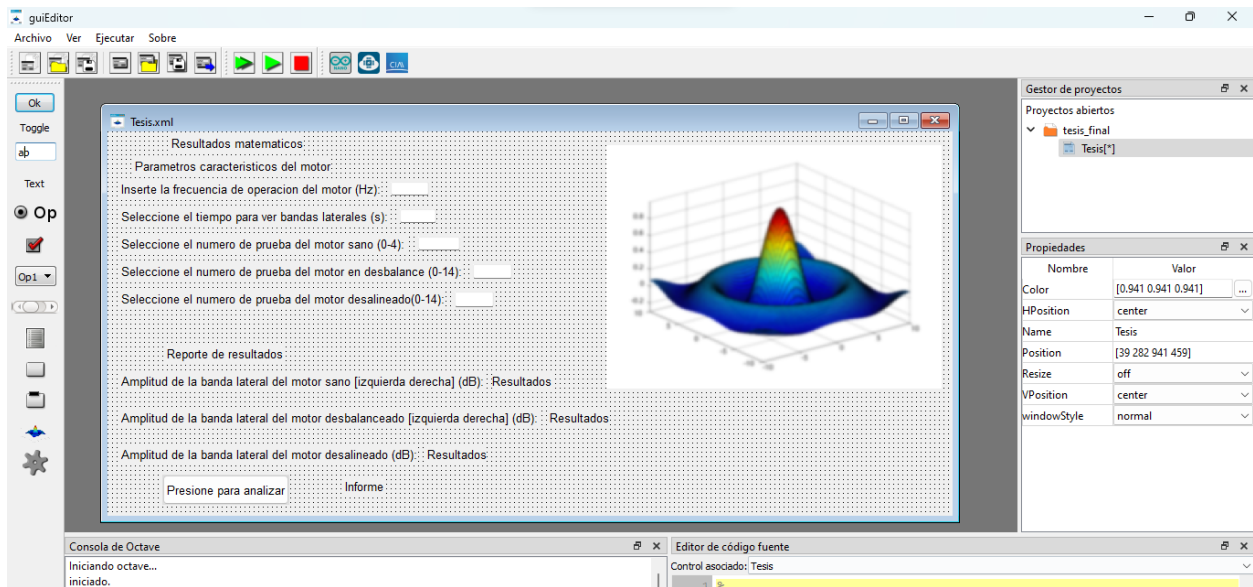
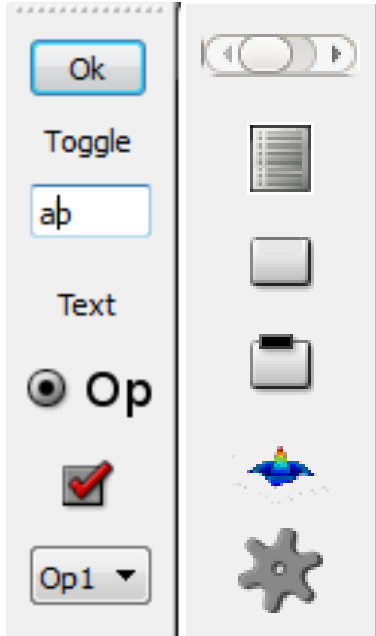


Figura 3.9: Interfaz de usuario creada en guiEditor (autoría propia).

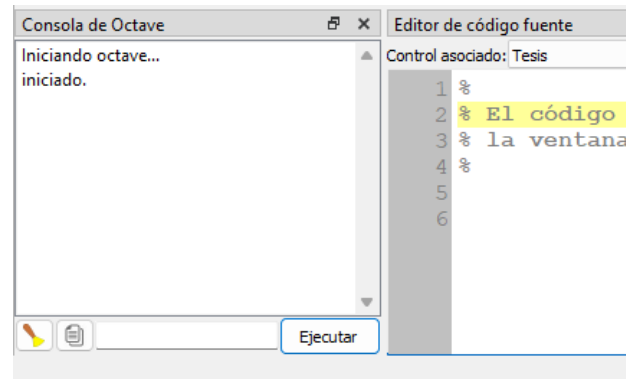
De la Figura 3.9 se pueden resaltar algunos aspectos importantes, en la parte izquierda se muestran todas las opciones que se pueden desarrollar, para el caso de este proyecto se utilizaron cuadros de texto, cuadros de edición, un botón interactivo y un cuadro de gráficos (Figura 3.9.1a). Por otro lado, en la parte inferior se encuentran las opciones que conjuntan el programa GNU Octave con el guiEditor, como la consola de Octave (la cual permite identificar errores e imprimir datos) y el editor de código fuente, este último es el medio por el cual se programará el botón y realizará el procesamiento de los datos (Figura 3.9.1b).

Por otro lado, la interfaz de usuario que se desarrolló requiere de una serie de parámetros que proporcionará el usuario, como lo es la frecuencia de operación del motor (15, 30, 50 o 60 Hz para el caso de las pruebas que se realizaron). También se pide el tiempo para ver las bandas laterales, este tiempo será de gran ayuda para limitar el gráfico en el eje x. Se requiere que el usuario ingrese los parámetros característicos del nombre con el que se guardaron las pruebas, las cuales pueden ir de 0 a 14 para el caso de este proyecto (Figura 3.9.1c). Finalmente, la interfaz

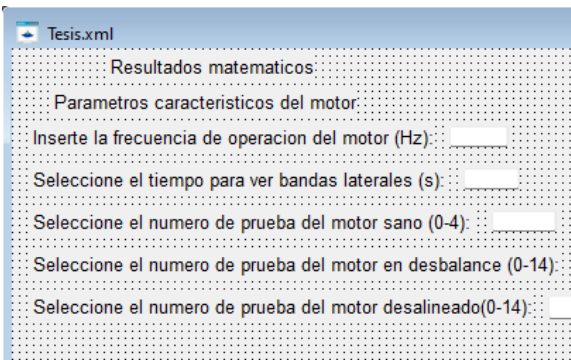
brinda un reporte de resultados con las amplitudes de las bandas laterales para las pruebas del motor en estado sano, desbalance y desalineamiento y muestra el espectro de frecuencias de las bandas laterales a la frecuencia fundamental (Figura 3.9.1d).



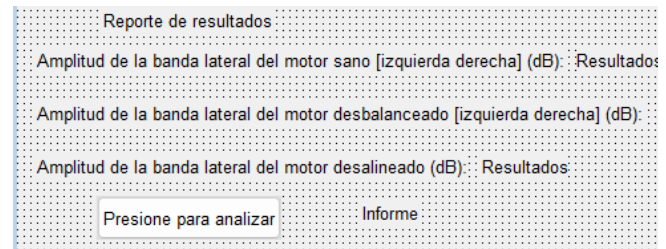
a)



b)



c)



d)

Figura 3.9.1: Interfaz de usuario creada en guiEditor con a) funciones interactivas de guiEditor b) consola y editor de código fuente de Octave en guiEditor c) datos a insertar por el usuario y d) reporte de resultados (autoría propia).

3.8 Propuesta de evaluación y corrección del fallo con base en normas

Una vez realizado el análisis de los datos de corriente del motor y creada la interfaz de usuario y si el motor presenta un estado de desbalance, se propone al usuario realizar el mantenimiento basándose en el estándar internacional ISO 21940, el cuál como se mencionó anteriormente, provee al usuario de una serie de pasos para balancear nuevamente el motor. En el caso de la desalineación, no se reportó alguna norma internacional o nacional que muestre una secuencia para corregir y dar mantenimiento de este error, por lo que se sugiere seguir algún estándar conocido o las normas que dicta el establecimiento donde opera el motor.

3.9 Restricciones para el desarrollo del proyecto

Para poder llevar a cabo las conexiones eléctricas del motor con su respectiva alimentación trifásica, se deben tener en cuenta algunas restricciones bastante importantes y que menciona la NOM-001-SEDE-2018 (2018), como lo es el calibre del cable que se va a utilizar, para así evitar posibles accidentes que pudieran ocurrir a causa de esto. Para poder calcular la corriente I que el motor demanda y por lo tanto con esta corriente se puede determinar el calibre del cable conductor que se requiere, se requiere de la Ecuación 6 mostrada a continuación:

$$I = \frac{1.25 * P(w)}{\sqrt{3} * V * FP} \quad [6]$$

Donde $P(w)$ es la potencia de carga, en este caso, la del motor de inducción de tipo jaula de ardilla trifásico en Watts, V es el voltaje de alimentación y FP es el factor de potencia de este. Para poder calcular estos parámetros, es necesario tener la placa de datos del motor, la cual se muestra en la Figura 3.10.



Figura 3.10: Placa de datos del motor usado (autoría propia).

De la placa de datos se destacan los siguientes datos:

- Potencia del motor = 1492 W
- Voltaje de alimentación = 220 V
- Factor de potencia del motor = 0.87

Sustituyendo los datos anteriores en la Ecuación 6, se obtiene lo siguiente:

$$I = \frac{1.25 * 1492W}{\sqrt{3} * 220V * 0.87} = 5.63 A$$

Se tiene que la corriente máxima que alcanzará el motor es de 5.63 amperes para cada uno de los cables del motor (3 al ser de tres fases). El conductor adecuado para la corriente que se está manejando es un calibre menor al 14 AWG, sin embargo, la NOM-001-SEDE-2018 (2018) menciona en el artículo 430-11 en el inciso g que, para este tipo de motores, el calibre de los conductores no debe ser menos a 14 AWG, por lo que se seleccionó este calibre para el conductor del motor de inducción.

Otra de las condiciones importantes es el código de colores que proporciona la NOM-001-SEDE-2018 la cual menciona que el color del conductor de fase deberá ser diferente al

conductor de puesto a tierra que será de color verde y del neutro que será de color blanco, por lo que los más comunes son el negro y el rojo. Dadas las consideraciones anteriores, se hizo una conexión siguiendo las especificaciones que dicta esta normativa.

De igual manera, la NOM menciona que se deberá conectar un dispositivo protector de sobrecargas a cada una de las fases del motor de inducción, por ejemplo, menciona que deberán ser fusibles, en caso de que se requiera utilizar otro aparato protector, de igual manera se va a requerir conectar un aparato protector por cada fase (artículos 430-36 y 430-47 de la NOM-001-SEDE-2018). Estos dispositivos automáticos ayudan a proteger los conductores eléctricos de sobrecargas y cortocircuitos. Por lo anterior mencionado, se añadió un sistema de protección para cada fase del motor de inducción. Finalmente, se utilizará un variador de velocidad para generar cada una de las frecuencias propuestas, este variador deberá cumplir el poder ser capaz de satisfacer la potencia del motor, se utilizó el variador de velocidad WEG CFW 08 ya que la hoja de datos proporcionada por el fabricante menciona que estos dispositivos pueden satisfacer corrientes desde 186 hasta 14920 W, por lo que el variador cumple con los requerimientos del motor.



Figura 3.11: Variador de frecuencia utilizada (autoría propia).

3.10 Descripción del lugar de trabajo

Finalmente, se muestra el lugar de trabajo en la Figura 3.12 a continuación:

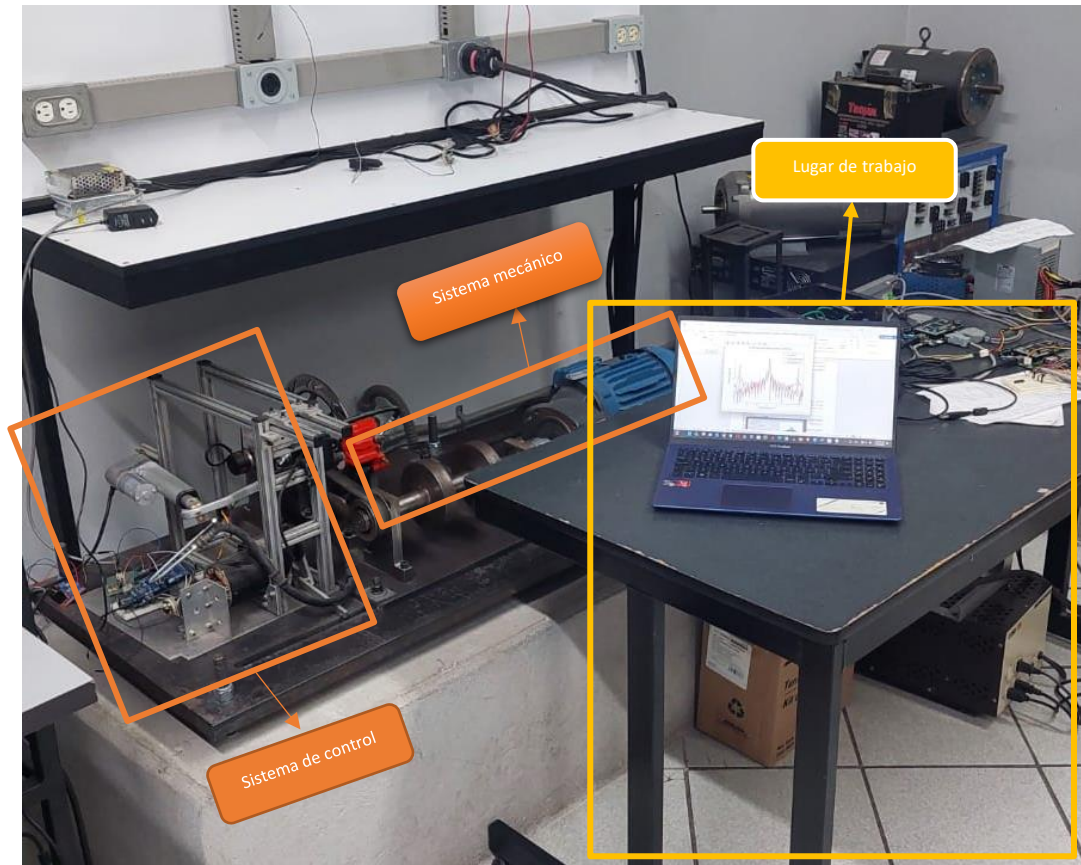


Figura 3.12: Lugar de trabajo (autoría propia).

En la Figura 3.12, se muestra el lugar de trabajo en el Laboratorio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, en donde se pueden destacar 3 principales aspectos: el lugar donde se encuentra el sistema de control compuesto por el microcontrolador, sensores y el sistema de frenado para generar la carga oscilante, por otro lado, se encuentra el lugar del sistema mecánico con todos sus elementos descritos anteriormente y el motor. Finalmente, se marca el área del lugar de trabajo, donde se monitorearon las señales obtenidas y donde el alumno deberá de trabajar siguiendo las reglas del Laboratorio descritas en el Apéndice A.

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados que se obtuvieron al seguir la metodología propuesta en el capítulo 4.

4.1 Configuración de la bancada y sistema de cargas oscilantes

Se estableció un sistema mecánico compuesto por el motor de inducción descrito anteriormente, el cuál es alimentado por corriente alterna de 220 V y cuyos conductores eléctricos fueron calculados con base a la norma NOM-001-SEDE-2018 y la tabla de datos del motor, esto se conecta a un sistema mecánico compuesto por masas inerciales, coples, etc., además de estar compuesto por un sistema de frenado de disco y caliper para generar la carga oscilante con un sistema de control. Lo anterior se puede ver plasmado en la Figura 4.1. El sistema fue desarrollado por el Ing. Alan Ranferi Cervantes Hernández en su trabajo “Reconfiguración mecánica y de control de cadena cinemática para análisis de cargas oscilantes” y para el presente trabajo se realizaron algunas adecuaciones.

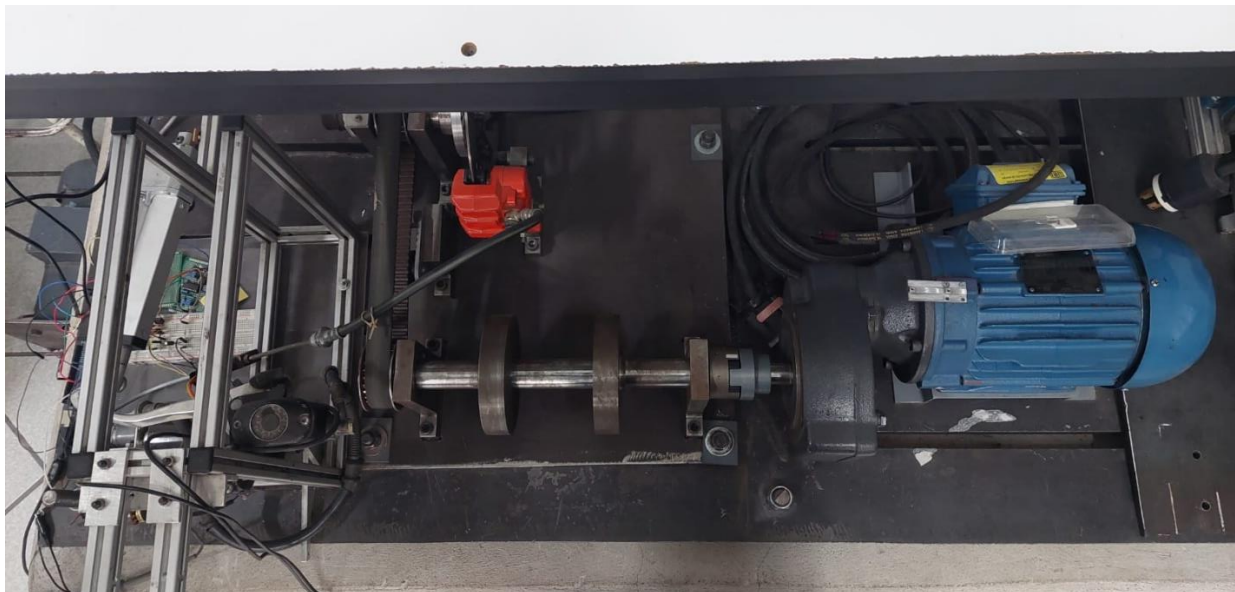


Figura 4.1: Sistema mecánico desarrollado (autoría propia).

Una vez teniendo listo el sistema mecánico, se indujeron las fallas por desbalance y desalineamiento en el cople del sistema mecánico usando la metodología propuesta. A continuación, se muestra en la Figura 4.2 la falla por desalineamiento inducido en el motor de inducción:

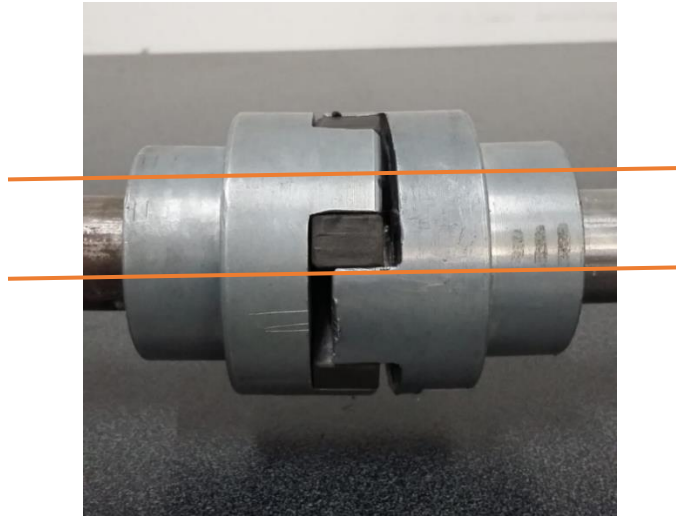


Figura 4.2: Cople con falla por desalineamiento (autoría propia).

De igual manera, la Figura 4.3 muestra la falla por desbalance en el recuadro amarillo, donde se puede observar una masa independiente al sistema montada en el cople del sistema mecánico.



Figura 4.3: Cople con masa independiente para generar falla por desbalance (autoría propia).

Una vez teniendo el sistema mecánico y las condiciones de fallo por desbalance, desalineamiento y el motor en su estado de referencia (sano), se procede a generar el sistema de cargas oscilantes, recordando que se genera con una onda de voltaje, se hace uso de un generador de funciones al cuál se ingresan los parámetros vistos en la metodología, obteniendo la señal que se muestra en la Figura 4.4.

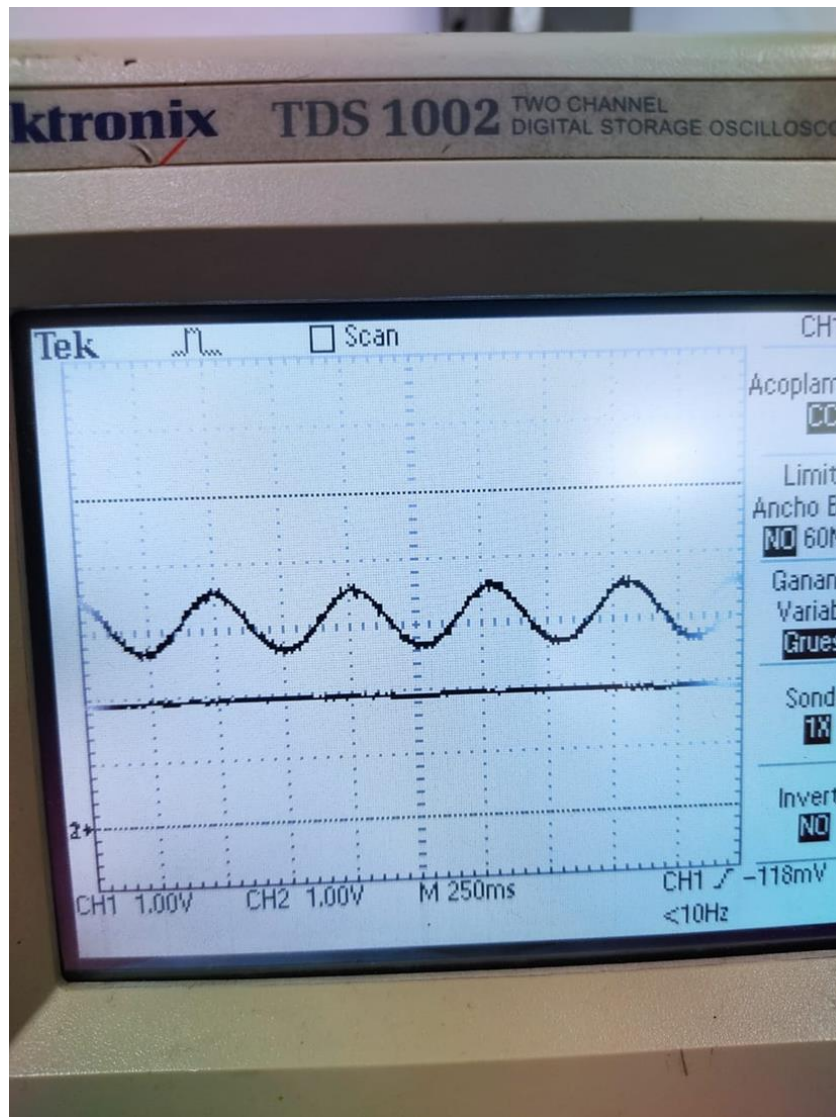


Figura 4.4: Señal de voltaje para generar carga oscilante (autoría propia).

4.2 Adquisición y acondicionamiento de señales

Una vez realizada la adquisición de las señales de corriente de todas las frecuencias y sus repeticiones para cada condición de acuerdo con lo planteado en la Tabla 2, se procede a realizar el análisis y adecuación de las señales. A continuación, la Figura 4.5 muestra el comportamiento de la corriente a 15, 30, 50 y 60 Hz para diferentes condiciones del motor (sano, desbalance y desalineamiento) y con distintos números de pruebas.

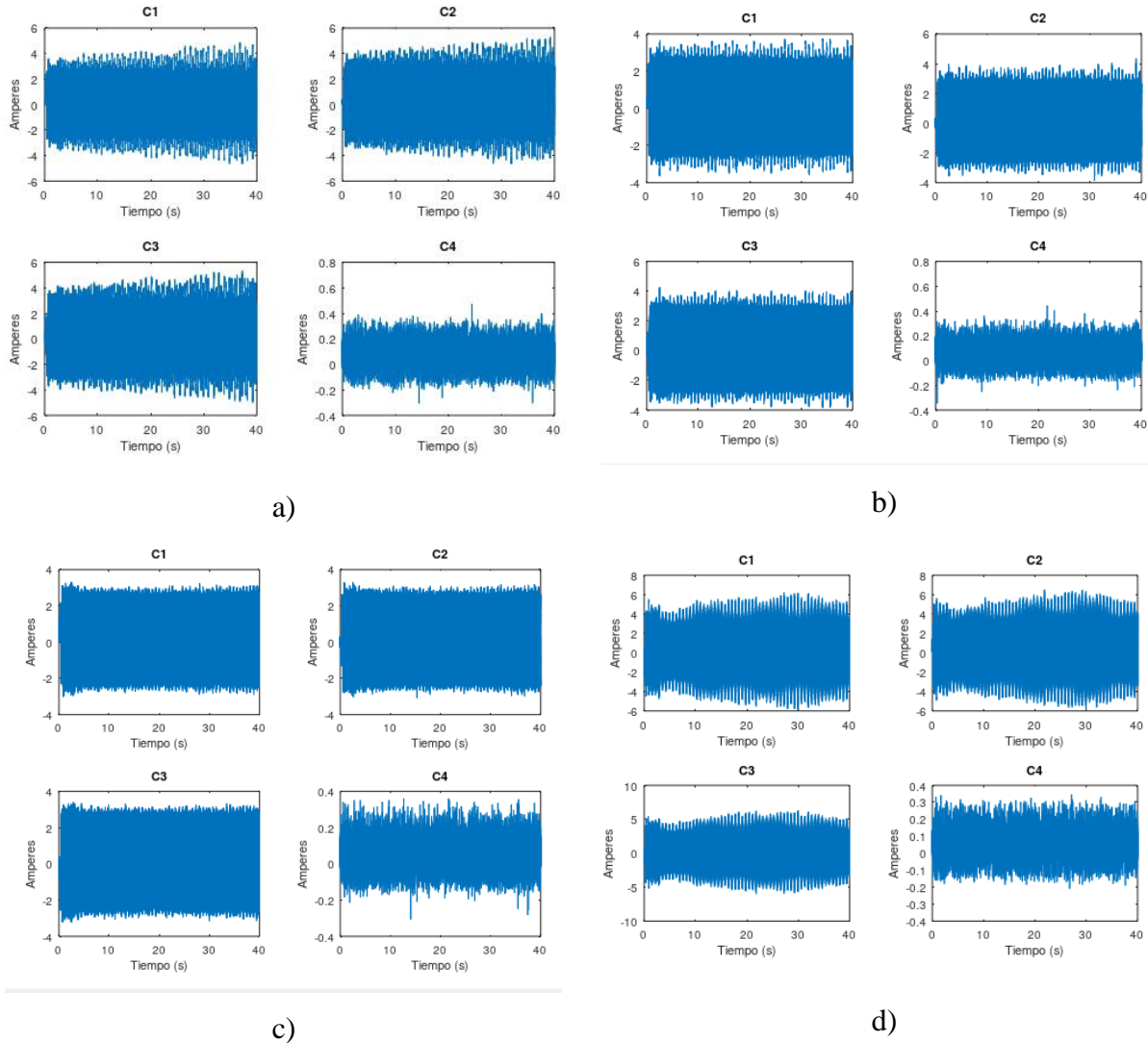


Figura 4.5: Señal de corriente para cada fase ante frecuencias de: a) 15 Hz con motor sano, b) 30 Hz con motor desbalanceado, c) 50 Hz con motor desalineado y d) 60 Hz con motor desbalanceado (autoría propia).

Otra característica importante de la Figura 4.5 es que, ante todas las condiciones y frecuencias del motor, la corriente se mantiene estable y menor a 5 A, por lo que se demuestra que el motor opera a esa corriente en sus conductores. También se puede apreciar el tiempo de arranque del motor de inducción, el cual incrementa cuando se aumenta la frecuencia.

4.2.1 Algoritmo FFT para evaluación de fallos

La señal de corriente obtenida en el paso anterior es convertida al dominio de la frecuencia mediante la transformada rápida de Fourier, obteniendo gráficas como la que se muestra a continuación en la Figura 4.6:

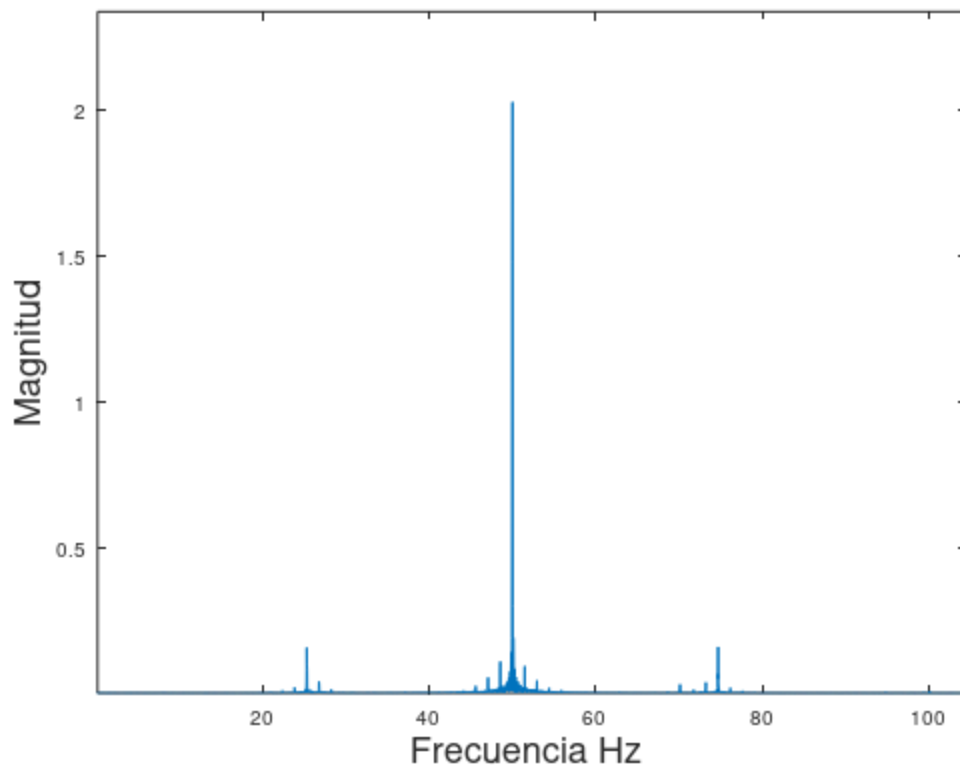


Figura 4.6: Gráfico de la FFT de la corriente del estator a una frecuencia de 50 Hz (autoría propia).

Posteriormente, esta señal de corriente que ya se encuentra en el dominio de la frecuencia, es procesada para que la amplitud sea en decibelios y se obtiene una gráfica como la mostrada a continuación en la Figura 4.7:

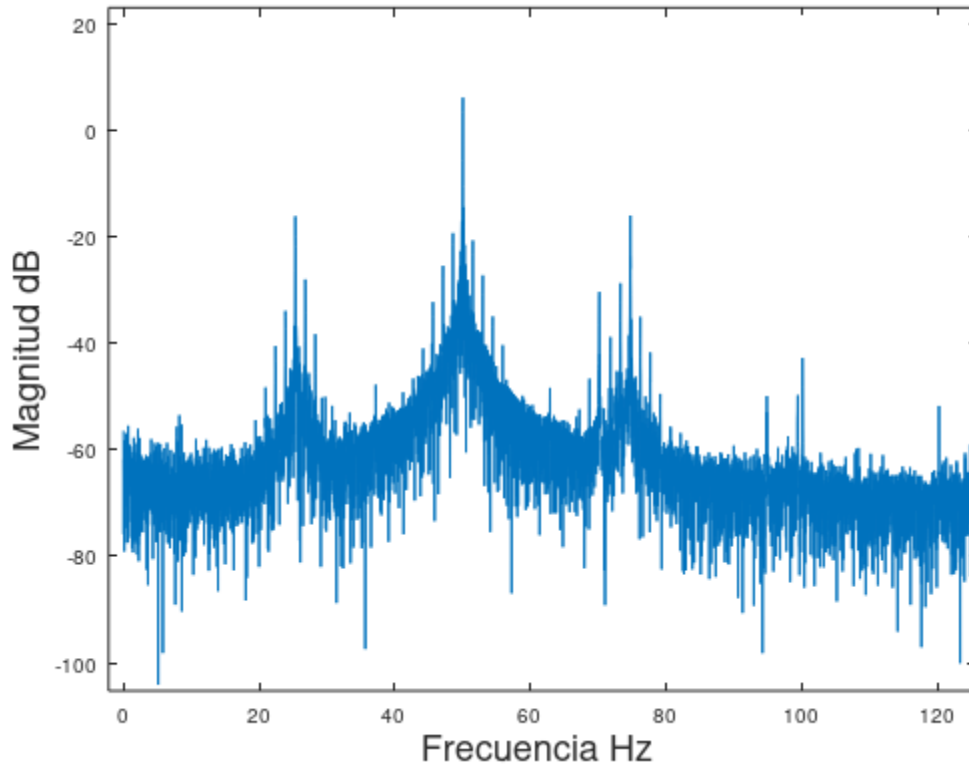


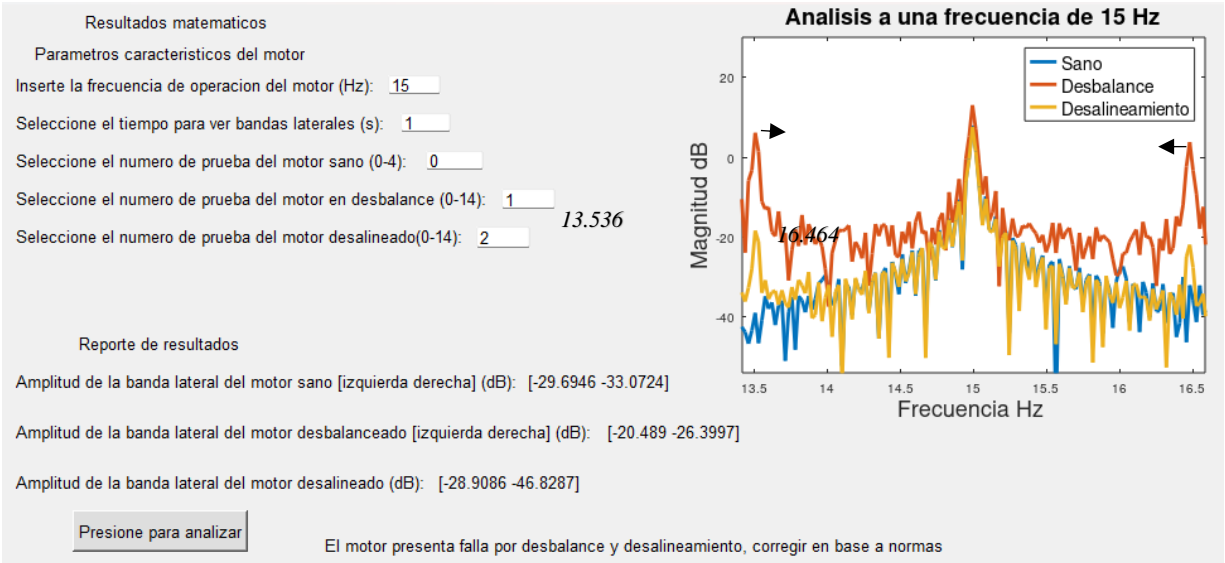
Figura 4.7: Gráfico de la FFT en decibelios de la corriente del estator a una frecuencia de 50 Hz (autoría propia).

Finalmente, se grafican las 3 señales (motor sano, desbalanceado y desalineado) montadas en una misma figura para hacer una comparación en las frecuencias de las bandas laterales que son asociadas a fallas y se realiza la interfaz de usuario.

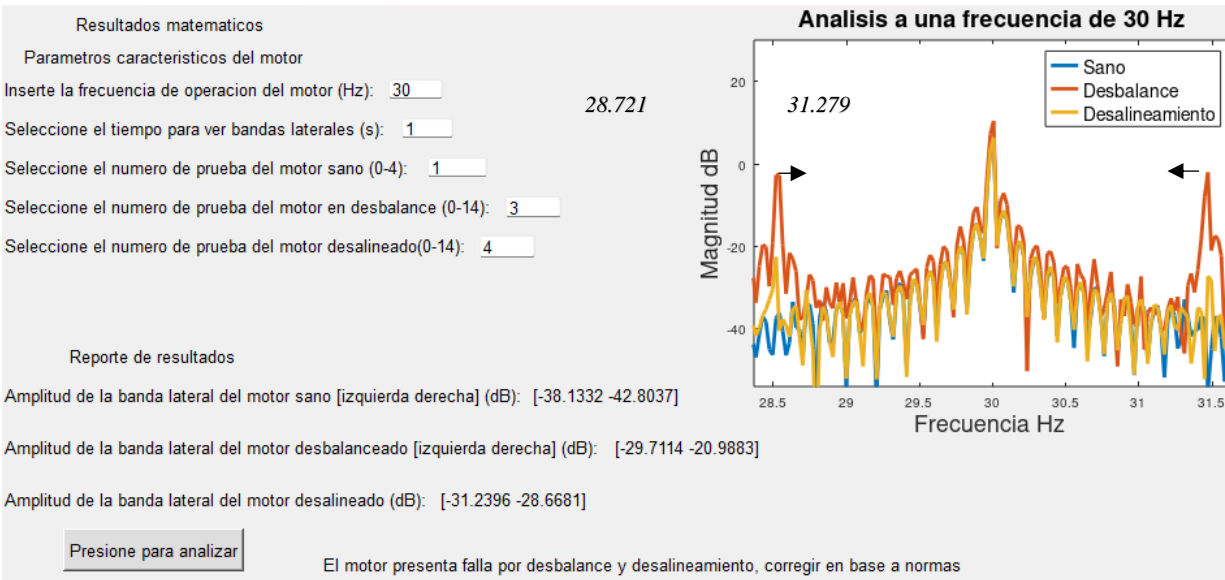
4.3 Interfaz de usuario desarrollada

La Figura 4.8 muestra los resultados obtenidos para cada frecuencia, dada la respuesta proporcionada por la transformada rápida de Fourier. Como se puede observar, se logró discriminar la condición del motor cuando se presenta en estado sano, desbalanceado y desalineado, en la gráfica de la Figura 4.8a se tiene una frecuencia fundamental de 15 Hz, y se observa que ante las bandas laterales en [13.536 16.464] Hz hay un aumento de corriente para la señal que presenta la falla de desbalance y lo mismo ocurre con la señal con desalineamiento, ambas ante la señal del motor en estado sano. Esta misma tendencia se observa para la Figura 4.8b con una frecuencia fundamental de 30 Hz en sus bandas laterales [28.721 31.279] Hz, en la Figura

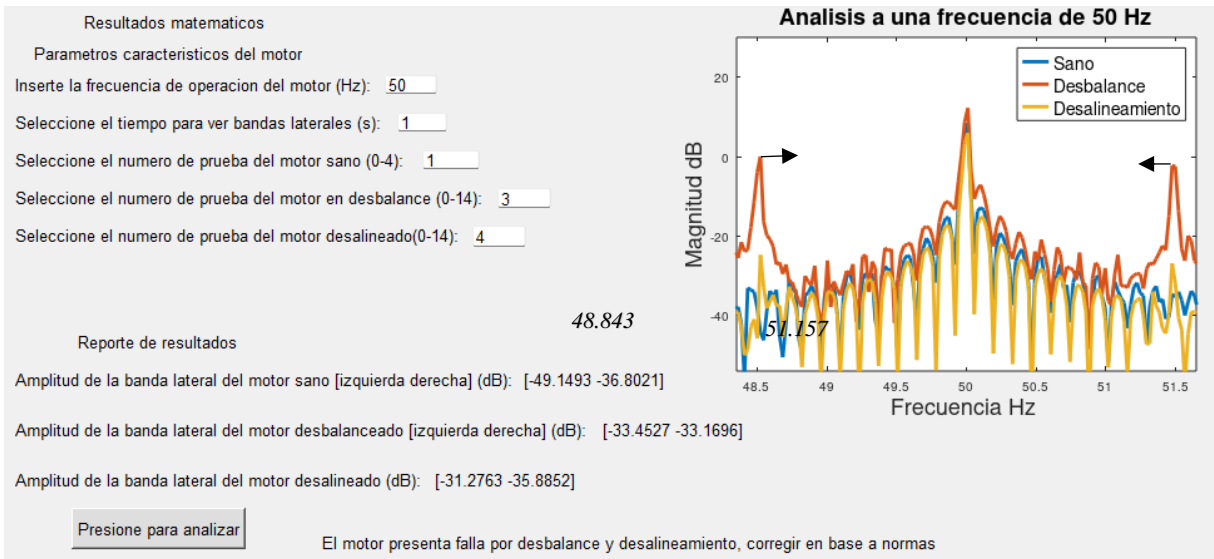
4.8c con su frecuencia fundamental de 50 Hz en sus bandas laterales [48.843 51.157] Hz y en la Figura 4.8D con su frecuencia fundamental de 60 Hz. con sus bandas laterales [58.744 61.256] Hz. Las bandas laterales se calcularon con $k = 1$ en la Ecuación 2. Además, se observa que en todas las pruebas mostradas en la Figura 4.8, el fallo por desbalance repercute más negativamente en la distribución de energía en el espectro de frecuencias con respecto al fallo por desalineamiento.



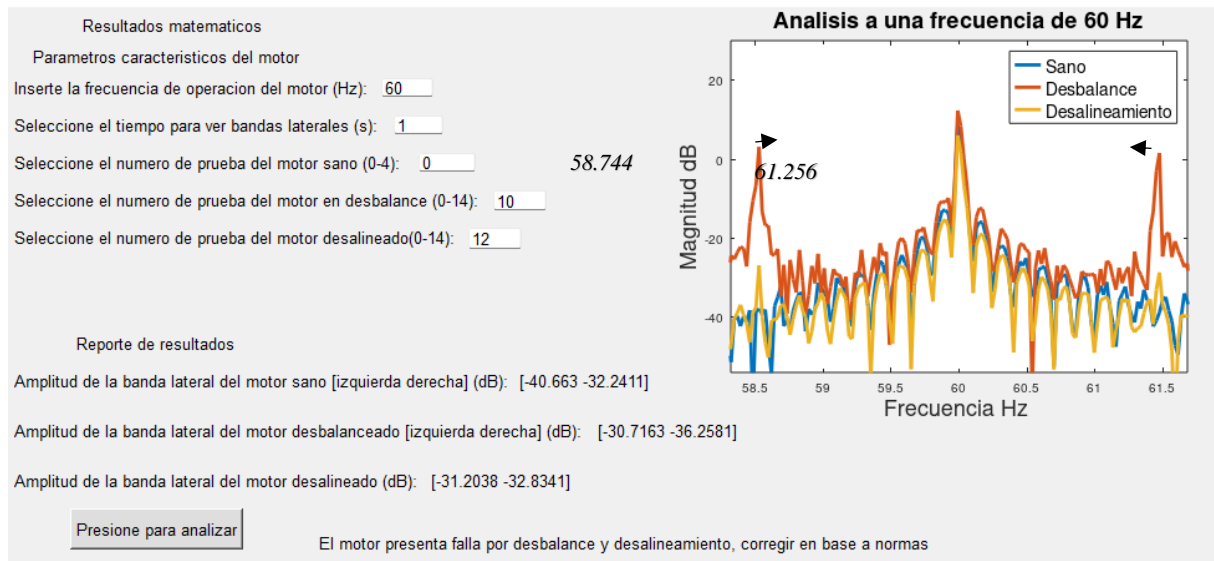
a)



b)



c)



d)

Figura 4.8: Resultados obtenidos para a) $f = 15$ Hz, b) $f = 30$ Hz, c) $f = 50$ Hz y d) $f = 60$ Hz (autoría propia).

La Figura 4.8, entonces, muestra la interfaz de usuario que detalla los valores de amplitud en dB para las bandas laterales, además se agrega una etiqueta para mostrar los valores de las frecuencias en las que se encuentran estas bandas laterales. Posteriormente, la Figura 4.9 muestra la interfaz de usuario que devuelve un semáforo sobre el estado del motor con 2 resultados

posibles: el motor está fallando debido a un desbalance o desalineamiento o el motor está en un estado saludable.

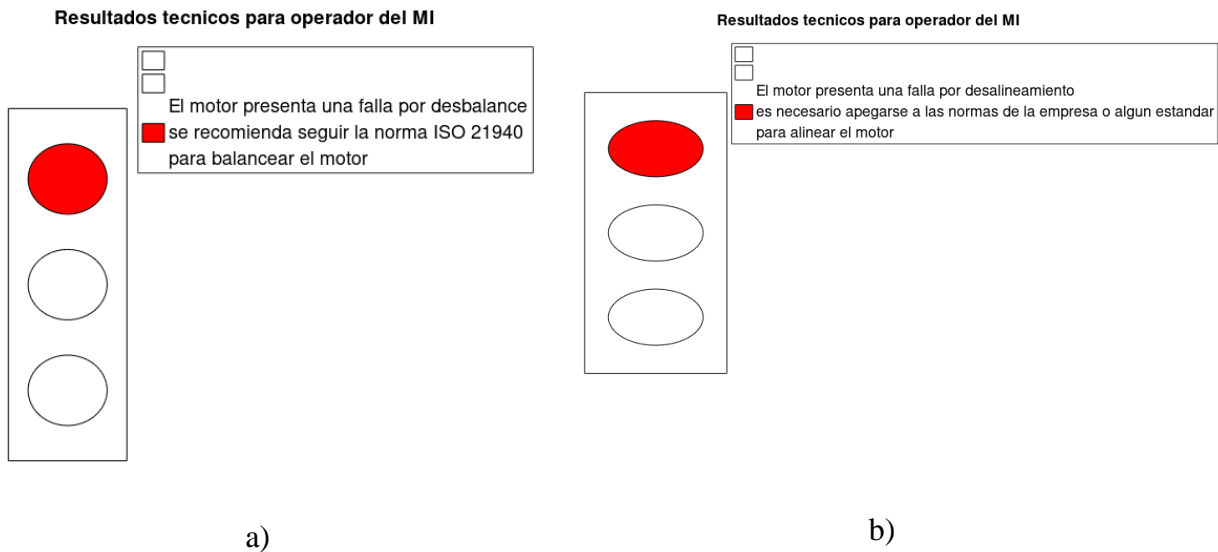


Figure 4.9 Resultados técnicos con a) desbalance y b) desalineamiento (autoría propia).

Los resultados mostrados en la Figura 4.9 corresponden a la prueba mostrada en la Figura 4.8d, es decir, para una frecuencia fundamental de 60 Hz. En la figura 4.9A se observa que el motor presenta un desbalance, y se propone corregirlo bajo la norma ISO 21940 con los criterios de calidad correspondientes. Por su parte, la Figura 4.9B muestra que el motor está desalineado, y se sugiere utilizar un estándar para corregirlo.

Ante los resultados propuestos anteriormente, se encontró asociación en el espectro de frecuencias (bandas laterales) con fallas de desbalance y desalineamiento, se demuestra que la magnitud ha aumentado en estas bandas laterales con la ayuda del cálculo del procesamiento. Cabe señalar que se logró detectar las fallas para las dos condiciones ante cargas oscilantes a pesar de los errores que puede tener al analizar el espectro de corriente con la FFT, además de que se creó una interfaz de carácter científico y otra de carácter informativo que ayuda a un operador a saber si el motor tiene fallas o no.

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSIONES

Se desarrolló un análisis de datos de corriente usando transformada rápida de Fourier utilizando Octave para encontrar fallas ante cargas oscilantes y se programó una interfaz de usuario con los resultados del procesamiento. Con ello se consiguió hacer la detección de los fallos por desbalance y desalineamiento ante cargas oscilantes, estas cargas toman gran importancia debido a que gran parte de los motores de inducción operaran bajo esta condición (equipos de bombeo, compresores, etc.), además, estas cargas tienen un gran impacto en los motores de inducción y que pueden llegar a empeorar ambos fallos. Como se mencionó a lo largo de este trabajo, el desbalance y desalineamiento son dos de los fallos que más generan vibraciones mecánicas, y que, aunado a las vibraciones que generan las cargas oscilantes, puede hacer difícil la interpretación de ambos tipos de fallos usando el espectro de frecuencias, por ejemplo, con la aparición de componentes armónicos adicionales fuera de la frecuencia fundamental, por lo que se optó por realizar un análisis basado en la corriente eléctrica con la transformada rápida de Fourier y analizando las frecuencias de las bandas laterales que se asocian a fallos y tomando como estado de referencia o estado sano al motor de inducción sometido ante las mismas cargas oscilantes, además se lograron validar los resultados con las múltiples pruebas tomadas de la matriz experimental propuesta, teniendo resultados favorables para todas las frecuencias trabajadas.

Por otro lado, se encontró asociación en el espectro de frecuencias (bandas laterales) con las fallas por desbalance y desalineamiento, se mostró que la magnitud se ha incrementado en estas bandas laterales con ayuda del cálculo mediante el procesamiento, por lo que se concluye que existe un aumento en el consumo de corriente y en la distribución de ésta a lo largo del espectro de frecuencias. Todo esto se realizó gracias a un sistema libre de licenciamiento como lo es GNU Octave, el cual es capaz de detectar las fallas en los motores eléctricos de inducción.

Se logró realizar un trabajo basado en normativas mexicanas para el caso de las conexiones eléctricas del motor de inducción ante la NOM-001-SEDE-2018 y equipos comerciales de detección de desbalance y desalineamiento, además de que se utilizaron estándares internacionales para proporcionar al operador del motor de inducción un método para corregir los errores presentados en este (ISO 21940 para desbalance). Por otro lado, no se encontraron

estándares mexicanos o internacionales para corregir el desalineamiento, por lo que se recomendó seguir las reglas de cada establecimiento dueño de los motores de inducción o seguir algún estándar conocido.

Con base a los resultados obtenidos, se encontró que, si existe un aumento en el consumo de corriente del motor eléctrico de inducción utilizado ante las fallas por desbalance y desalineamiento, por lo que esto conllevaría a la larga si se continúan utilizando sin corregirse estas fallas a aumentos en la facturación, además de que pueden presentarse otras fallas a causa de las ya presentes, como se observó en el capítulo 2. Por ello es por lo que se concluye que este trabajo presenta un aporte en lo económico-comercial, ya que, si se evalúan los motores periódicamente con este método, se logrará reducir el consumo de corriente, además de que se puede realizar con un software libre de licenciamiento. Como ya se observó anteriormente, los motores de inducción presentan un aporte en el consumo de dióxido de carbono, por lo que, si se reduce el consumo de corriente en estos, se puede reducir de igual manera el aporte de este contaminante, por lo que el presente trabajo aporta de igual manera en la parte ecológica.

Para lograr desarrollar este trabajo, se tuvieron que utilizar gran parte de los conocimientos adquiridos durante la trayectoria en la universidad, ya que el sistema acondicionado constaba de elementos electromecánicos y mecatrónicos, necesitando los conocimientos adquiridos en circuitos eléctricos, mecánica, control, respuesta en frecuencia, etc.

Finalmente, se logró crear una interfaz de carácter científico, proporcionando datos a un investigador de las bandas laterales asociadas a fallos del espectro de frecuencias ante cada condición y otra de carácter informativo que ayude a un operador a saber si el motor presenta o no presenta fallas y con ello, se presenten dos tipos de alternativas para distintas situaciones cotidianas.

REFERENCIAS

Bedoya Arango, J. M., & López Tello, J. (1997). Fallas en el rotor del motor de inducción tipo jaula de ardilla: Causas, análisis y métodos de detección.

Bossio, J. M., & Bossio, G. R. Determinación del rango de aplicación del método MCSA-RA. In *25° Congreso Argentino de Control Automático AADECA '16*.

Bossio, J. M., Bossio, G. R., & De Angelo, C. H. (2017). Diagnóstico de Fallas en Motores de Inducción Utilizando Redes Neuronales Autoorganizadas y Error de Cuantificación. *XVII Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control, Buenos Aires, Argentina*, 1-6.

Burgueño, A., Mercadante, C., & Núñez, B. (2017). DEMI: Detección de excentricidad de motores de inducción.

Calzada-Lara, G., & Pazos-Flores, E. (2009). Modificación del Control Directo del Par para un Mejor Aprovechamiento de la Energía en Motores de Inducción. In *Congreso Anual 2009 de la Asociación de México de Control Automático. Zacatecas, México*.

Castelli, M., & Andrade, M. (2007). Metodología de monitoreo, detección y diagnóstico de fallos en motores asíncronos de inducción. *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, (5), 65-76.

Chamba, D. A. J., & Jiménez, L. C. (2022). Estudio comprensivo de la Transformada de Fourier Discreta para el análisis de señales digitales. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 9(1), 75-84.

Chapman, S. J. (2005). *Máquinas Eléctricas* (4a. ed.). México: MACGRAW-HILL.

Chen, P. Y., Chao, K. H., & Tseng, Y. C. (2019). A motor fault diagnosis system based on cerebellar model articulation controller. *IEEE Access*, 7, 120326-120336.

Choudhary, A., Goyal, D., Shimi, S. L., & Akula, A. (2019). Condition monitoring and fault diagnosis of induction motors: A review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 26, 1221-1238.

Dorrbercker, S. A., Fernández, S. J., Barreiro, E. R., Álvarez, L. M., Arce, J. C., Zurita, Y., & Palmero, J. M. (2007). Matriz de falla de los motores de inducción. *Ingeniería Energética*, 28(1), 53-59.

España Barreiro, A. (2020). Análisis de vibraciones para prevención de fallas en rodamientos.

Estupiñán, E., San Martín, C., & Canales, L. (2006). Desarrollo de un instrumento virtual para el balanceamiento dinámico de rotores. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 14(2), 146-152.

Flores Ibarra, J. E., & Silva Pineda, F. V. (2017). *Modelo empírico de influencia de la desalineación en el consumo energético en un motor eléctrico trifásico asíncrono jaula de ardilla de 5 Hp* (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).

García, J. R., García, E. E. R., & Romeral, J. L. (2011). Detección de fallas en máquinas de inducción basada en STFT y transformada wavelet. *Visión electrónica*, 5(1), 38-47.

GNU Octave. (2023). Octave.org. Obtenido de <https://octave.org/>.

GuiEditor. (2023). GitLab. Recuperado el 18 de abril de 2023, de <https://gitlab.com/labinformatica/guieditor>.

Hernández, A. R. C. (2020). Reconfiguración mecánica y de control de cadena cinemática para análisis de cargas oscilantes.

Hernández, J. U. V. (2017). Detección de barras rotas en motores de inducción utilizando la STFT.

ISO 1925:2001. (2017). Recuperado el 14 de abril de 2023, de ISO website: <https://www.iso.org/standard/34107.html>.

ISO 20816-3:2022 Mechanical vibration — Measurement and eval. (2022). Www.une.org. Retrieved March 23, 2023, obtenido de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/iso?c=078311>.

ISO 21940-1:2019 *Mechanical vibration — Rotor balancing — Part...* (2019). Www.une.org. Retrieved March 23, 2023, from <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/iso?c=073726>.

Kuemlee, H., Gross, T., & Kolerus, J. (2013, September). Machine vibrations and diagnostics the world of ISO. In *Industry Applications Society 60th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference* (pp. 1-13). IEEE.

Londoño-Parra, C. M., & Ramírez-Echavarría, J. L. (2013). Normas de eficiencia energética de motores de inducción, ¿está preparada Latinoamérica? *TecnoLógicas*, (30), 117-147.

L08P050D15. (2023). Digikey.com. Recuperado el 24 de abril de 2023, de <https://www.digikey.com/es/products/detail/tamura/L08P050D15/529420>.

Marín, E. P. (1997). La medición y el análisis de vibraciones en el diagnóstico de máquinas rotatorias. *CEIM-Innovación y Mantenimiento, Cuba*.

Morineaud, S. N. F. (2004). *Entorno integrado para la docencia en tratamiento digital de señales* (Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE).

Navarro-Navarro, A., Zamudio-Ramírez, I., Biot-Monterde, V., Osornio-Ríos, R. A., & Antonino-Daviu, J. A. (2022). Current and Stray Flux Combined Analysis for the Automatic Detection of Rotor Faults in Soft-Started Induction Motors. *Energies*, 15(7), 2511.

NOM-001-SEDE-2018. (2018). NORMA Oficial Mexicana NOM-001-STPS-2008, Motores, circuitos de motores y controladores. Diario Oficial, Secretaría de Trabajo y Previsión Social.

Norton, M. P., & Karczub, D. G. (2003). *Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers*. Cambridge university press.

Proakis, J. G., Manolakis, D. S. G., Santalla del Río, V., & Alba Castro, J. L. (1998). *Tratamiento digital de señales*.

Ramírez-Álvarez, L. B. (2022). Detección de barras rotas y desbalance mecánico en motores de inducción utilizando los momentos centrales de la señal de corriente.

Sensores Bosch. (2023). Bosch I-Business. Recuperado el 15 de abril de 2023, de <https://www.bosch-ibusiness.com/es/productos/sensores/>.

Skowron, M., Wolkiewicz, M., Orłowska-Kowalska, T., & Kowalski, C. T. (2019). Application of self-organizing neural networks to electrical fault classification in induction motors. *Applied Sciences*, 9(4), 616.

Taborda, L. L., Pacheco, J., & Muñoz, V. (2014). Modelo teórico experimental para correlacionar el desalineamiento y desbalance de una máquina rotativa con el comportamiento vibro-acústico y el consumo de energía eléctrica en estado estable. *Revista Iberoamericana de ingeniería mecánica*, 18(2), 35-53.

Tahir, M. M., Hussain, A., Badshah, S., Khan, A. Q., & Iqbal, N. (2016, October). Classification of unbalance and misalignment faults in rotor using multi-axis time domain features. In *2016 International Conference on Emerging Technologies (ICET)* (pp. 1-4). IEEE.

TRACTIAN. (2023). Tractian.com. Recuperado el 11 de abril de 2023, de <https://tractian.com/es>.

Valdez, V. C., Baez, S. T., Diaz, B. K. A., Lopez, P. M. C., & Yopez, E. C. (2021). Detección de barras rotas en motores de inducción utilizando análisis de entropía de la Información en señales de corriente. *JÓVENES EN LA CIENCIA*, 10.

Villada, F., & Cadavid, D. R. (2007). Diagnóstico de fallas en motores de inducción mediante la aplicación de redes neuronales artificiales. *Información tecnológica*, 18(2), 105-112.

WEG Motor Scan - Sensor | WEG Motor Scan - Sensor | Sensores de Monitoreo de Condición | Dispositivos de Conectividad y Monitoreo | WEG - Productos. (2023). WEG. Obtenido de <https://n9.cl/motorscan>.

APÉNDICE A: REGLAS DE LABORATORIO SEGUIDAS

Para realizar las pruebas en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería del Campus San Juan del Río, se deberá seguir el siguiente reglamento:

1. Los usuarios podrán usar solamente la máquina siempre bajo la vigilancia de los laboratoristas y profesores. Otro tipo de uso requerirá revisión del jefe de laboratorio.
2. Como requisito de acceso en las áreas de Máquinas-Herramientas, metalografía, soldadura, se deberán observar las siguientes medidas:
 - a. Sujetar cabello.
 - b. Vestir bata u overol.
 - c. Vestir pantalón largo, preferentemente de mezclilla.
 - d. Usar zapatos cerrados, preferentemente de piel.
 - e. Guardar objetos que puedan causar riesgo como pulseras, anillos, collares.
 - f. No jugar ni correr en el laboratorio.
3. Queda prohibido consumir alimentos y bebidas dentro del laboratorio.
4. Queda prohibido fumar dentro del laboratorio.
5. El acceso al área de control numérico es exclusivo para clases o actividades programadas.
6. Cada usuario deberá usar equipo de seguridad personal obligatoriamente.
7. Cada usuario será responsable del equipo utilizado en funcionamiento y limpieza.
8. No se podrá pintar ni barnizar muros o pisos.
9. Depositar el desperdicio en los contenedores.
10. Colocar mochilas y material que no se esté utilizando en las gavetas.

11. Si se requiere uso de laboratorio fuera del horario establecido se deberá consultar con el jefe de laboratorio.
12. Todo material olvidado será depositado en el estante de materia prima y podrá ser usado como reciclaje.
13. La UAQ no se hace responsable del material del área de materia prima.

APÉNDICE B: CÓDIGO PARA PROGRAMA DETECTOR DE FALLOS POR DESBALANCE Y DESALINEAMIENTO

```
1 %Tranformada de Fourier
2 lim1 = (FsC*t)+1;
3 nn=length(C1(lim1:end) - mean(C1(lim1:end)));
4 NFFT = 2^nextpow2(nn);
5 F = FsC/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
6 xx = fft(C1(lim1:end) - mean(C1(lim1:end)),NFFT)/nn;
7 Amp=2*abs(xx(1:NFFT/2+1));Amp(1)=0;
8
9 %Conversion a dB de la magnitud
10 AmpdB = 20*log10(Amp);
11
12 % Fb y Fa (limites o frecuencia de falla)
13 qq = find(eje>t,1);
14 md = mean(abs(vel(qq:end,1)));
15 SS = ((Wsinc-(md/10))/Wsinc);
16 kk = 1;
17 Fa = (1-(kk*SS))*Fref;
18 Fb = (1+(kk*SS))*Fref;
19 limites(k)=Fa;
20 limites(k+3)=Fb;
21 F_V(:,k) = F;
22 Ampdb_V(:,k) = AmpdB;
```