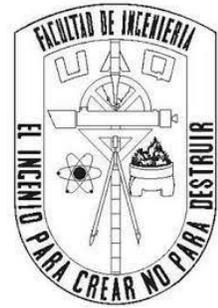


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
QUERÉTARO  
CAMPUS SAN JUAN DEL RÍO  
FACULTAD DE INGENIERÍA



INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA  
LÍNEA TERMINAL “ELÉCTRICA”

“SOFTWARE DE MONITOREO DE DAÑO DE CORTOCIRCUITO EN  
TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS CON DISTINTAS  
CONDICIONES DE CARGA”

PRESENTA:

OSCAR URIEL MENDOZA HERNÁNDEZ

DIRIGIDO POR:

DR. MARTÍN VALTIERRA RODRÍGUEZ

SAN JUAN DEL RÍO, QUERÉTARO, 2024

La presente obra está bajo la licencia:  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



**NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



**SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

### Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.

Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería

Software de monitoreo de daño de cortocircuito en transformadores  
monofásicos con distintas condiciones de carga

**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el título de ingeniero electromecánico con  
línea terminar en eléctrica

**Presenta:**

Oscar Uriel Mendoza Hernández

**Dirigido por:**

Dr. Martín Valtierra Rodríguez

Dr. Martín Valtierra Rodríguez

Presidente

\_\_\_\_\_

Firma

Dr. José Roberto Huerta Rosales

Secretario

\_\_\_\_\_

Firma

Dr. Juan Pablo Amézquita Sánchez

Vocal

\_\_\_\_\_

Firma

Dr. Emmanuel Reséndiz Ochoa

Sinodal

\_\_\_\_\_

Firma

San Juan del Río

Querétaro, Qro.

México

## Abstract

Currently, transformers have a significant impact on electrical systems due to the need to ensure efficient and reliable operation in the various environments where they are applied. They play a fundamental role by enabling the efficient transfer of electrical energy, making them essential elements in the electrical infrastructure. Therefore, the study highlights the critical importance of low-power dry-type transformers, which are widely used in a variety of industrial and commercial applications due to their efficiency and safety. These devices fulfill a vital role in the distribution of electrical energy and are crucial for the operation of numerous electrical systems. A detailed review of the theory and operation of electrical transformers is crucial to ensure their operational efficiency and reliability. However, the most fundamental aspect is having an effective diagnostic and monitoring system. In this regard, the review of specific installation and connection standards and regulations for transformers takes precedence. Therefore, this study examines the function and importance of electrical transformers in power systems. However, the main objective is to design an acquisition and diagnostic system that allows the detection and prevention of potential failures in transformers, thus ensuring optimal operation and prolonging their lifespan. This will be achieved through the development of software and the use of tests on a low-power dry-type transformer, which will be subjected to different electrical load conditions: no load, linear load, non-linear load, and both. For damage conditions, the transformer's state will be changed, classifying it as healthy, with light damage, and with severe damage, to characterize its behavior through electrical indices. The type of damage will be short-circuited turns. The generated current data will be collected using a National Instruments acquisition card controlled by MATLAB software, which will also perform the diagnosis by analyzing the current signal and signaling the physical condition of the transformer. In this way, this study contributes to research that, in the future, could be integrated into more robust systems for online and automatic monitoring and diagnosis.

**Keywords:** current signal, fault detection, short-circuited turns, transformer.

## RESUMEN

Actualmente, los transformadores tienen un gran impacto en los sistemas eléctricos debido a la necesidad de garantizar un funcionamiento eficiente y confiable en los diversos entornos en los que se aplican, lo que los convierte en elementos esenciales en la infraestructura eléctrica. Por ello, el estudio destaca la importancia crítica de los transformadores de tipo seco de baja potencia, los cuales son ampliamente utilizados en una variedad de aplicaciones industriales y comerciales debido a su eficiencia y seguridad. Estos dispositivos cumplen un papel vital en la distribución de energía eléctrica y son fundamentales para el funcionamiento de numerosos sistemas eléctricos. Una revisión detallada de la teoría y el funcionamiento de los transformadores eléctricos es crucial para garantizar la eficiencia operativa y la fiabilidad de estos. Sin embargo, lo más fundamental es contar con un sistema de diagnóstico y monitoreo efectivo. En este aspecto, la revisión de los estándares y normativas específicas de instalación y conexión de transformadores toma protagonismo. Por lo tanto, en el presente trabajo, se realiza un estudio sobre la función y la importancia de los transformadores eléctricos en los sistemas de energía. Sin embargo, el objetivo principal es diseñar un sistema de adquisición y diagnóstico que permita detectar y prevenir posibles fallas en los transformadores, garantizando así la operación óptima y prolongando la vida útil de estos. Esto se logrará mediante el desarrollo de un software y el uso de pruebas en un transformador tipo seco de baja potencia, al cual se le someterán distintas condiciones de carga eléctrica: sin carga, carga lineal, carga no lineal y ambas. Para las condiciones de daño, se cambiará el estado del transformador, clasificándolo como sano, con daño ligero, y con daño severo, para caracterizar su comportamiento mediante índices eléctricos. El tipo de daño será de espiras cortocircuitadas. Los datos de corriente generados se recopilarán mediante una tarjeta de adquisición de National Instruments controlada por el software MATLAB, que además realizará el diagnóstico mediante el análisis de la señal de corriente y una semaforización de la condición física del transformador. De esta manera, el presente trabajo contribuye en estudios que en un futuro se podrían integrar a sistemas más robustos que realicen el monitoreo y diagnóstico en línea y de forma automática.

**Palabras clave:** señal de corriente, detección de fallas, espiras cortocircuitadas, transformador.

## **DEDICATORIA**

*A mis padres:*

*Con profundo agradecimiento y amor, dedico esta tesis a ustedes, quienes han sido el pilar más fundamental en mi vida.*

*Gracias por su apoyo incondicional a lo largo de mis estudios, por enseñarme a asumir responsabilidades y por guiarme para ser un hombre de bien. Su ejemplo y enseñanza me han guiado a superarme en todos los ámbitos y a creer en mis capacidades.*

*A mi madre, en especial, gracias por tu confianza en mí, por ayudarme en cada paso del camino y por enseñarme que, con esfuerzo y dedicación, puedo alcanzar cualquier meta que me proponga.*

*Este logro es tanto mío como suyo y se los dedico con todo mi corazón.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a todas las personas que, de una u otra forma, hicieron posible la realización de esta tesis.*

*En primer lugar, a mis padres, por su amor apoyo incondicional y por enseñarme los valores del esfuerzo y la perseverancia. Su confianza en mí ha sido una fuente constante de motivación.*

*A mis profesores y tutores a lo largo de mi carrera, sobre todo al Dr. Martín Valtierra Rodríguez, por su guía experta, su gran paciencia y la dedicación que me dio para poder completar no solo este proyecto, si no para forjar en mí un gran apoyo y confianza. Sus valiosos consejos y enseñanzas fueron esenciales para este trabajo y para mí.*

*A mis compañeros de clase y amigos, por su camaradería, apoyo moral en los momentos difíciles. Sus palabras de aliento y colaboración hicieron que este camino fuera más llevadero. A todos ustedes, muchas gracias.*

## Índice general

Capítulo 1. Introducción .....	10
1.1 Introducción .....	11
1.2 Antecedentes .....	13
1.3 Justificación .....	14
1.4 Objetivo general y particulares .....	16
1.6 Planteamiento general.....	17
Capítulo 2 Fundamentación teórica y tecnológica .....	20
2.1 Transformadores .....	21
2.2 Funcionamiento en el transformador .....	22
2.3 Clasificación de los transformadores .....	23
2.4 Transformador tipo seco de baja potencia .....	24
2.5 Fallas en el transformador.....	25
2.6 Cortocircuito .....	27
2.7 Cargas y tipos de cargas.....	29
2.8 Transformada de Fourier .....	30
2.9 Distorsión armónica total (THD).....	32
2.10 Valor RMS .....	32
2.11 Árbol de decisiones.....	33
2.12 Características del transformador tipo seco de baja potencia .....	34
2.13 NI Tarjeta de Adquisición de Datos USB 6002.....	35
2.14 Pinza amperimétrica.....	35
2.15 Relé de estado sólido .....	36
2.16 Resistencias JRM 120.....	37
2.17 Puente rectificador IXYS .....	38
2.18 MATLAB.....	39
2.19 MATLAB GUIDE .....	39
2.20 Gráficas en MATLAB .....	40
2.21 EditText en MATLAB.....	40
2.22 PushButton en MATLAB .....	41
2.23 RadioButton en MATLAB .....	41
2.24 StaticText en MATLAB .....	42
2.25 Normatividad .....	42

2.26 Normativa y equipo de seguridad .....	43
Capítulo 3 Metodología .....	45
3.1 Descripción general de la metodología.....	46
3.1.1 Circuito de conexión experimental .....	47
3.2.1 Conexión de los 3 estados del transformador, sano, daño ligero y daño severo..	48
3.2.2 Conexión de la pinza amperimétrica y relevadores a la tarjeta de adquisición de datos .....	49
3.2.3 Creación de base de datos conforme a la señal de corriente del transformador...	51
Capítulo 4 Experimentación y resultados .....	59
4.1.1 Análisis de datos por medio de la transformada de Fourier y obtención de valores indicativos de RMS y THD .....	60
4.1.2 Aplicación del árbol de decisiones.....	66
4.1.3 Realización del diagnóstico del transformador .....	67
4.1.3 Resultados .....	68
5.1 Conclusiones y perspectivas .....	74
Bibliografía.....	76

### **Índice de figuras**

Fig. 1 Proceso del planeamiento del proyecto (autoría propia).....	17
Fig. 2 Descripción gráfica del funcionamiento del transformador y secciones principales del transformador (tecsa, 2021).....	22
Fig. 3 Composición del núcleo magnético del transformador por láminas de acero (tecsa, 2021).....	23
Fig. 4 Clasificación gráfica de los transformadores según su uso (autoría propia, adaptada de (martínez lópez, 2017).....	24
Fig. 5 Ejemplo de un transformador de tipo seco de baja potencia (sanergrid, 2022). .....	25
Fig. 6 Estadísticas de fallas en los transformadores, adaptada de (estadísticas de fallas en transformadores de potencia y mantenimiento predictivo   gebco sas, 2023).....	26
Fig. 7 Cortocircuito en transformador de baja potencia por sobrecarga (rodriguez, 2023). 28	
Fig. 8 Desgaste de conexión en transformador por cortocircuito (bruno, I. G., 2009).....	28
Fig. 9 Diferenciación gráfica de una carga lineal y una carga no lineal, adaptada de (quora, 2023).....	29
Fig. 10 Ejemplos de cargas lineales y cargas no lineales cotidianas (andres, 2022).....	30
Fig. 11 Demostración gráfica de una señal en el dominio del tiempo y otra en de la frecuencia (transformada de fourier, 2016).....	31
Fig. 12 Descripción gráfica del voltaje rms en una señal eléctrica, adaptada de administrador valor rms (2022).....	33
Fig. 13 Ejemplo de un árbol de decisiones, adaptada de (autoría propia).....	34

Fig. 14 Transformador tipo seco de baja potencia que se someterá al proyecto (autoría propia). .....	34
Fig. 15 Tarjeta de adquisición ni usb 6002 (model 6002, 2024). .....	35
Fig. 16 Pinza amperimétrica fluke i200s (i200s sonda amperimétrica ac, 2024). .....	36
Fig. 17 Relé de estado sólido gold sap4805d (relé ssr gold, 2022). .....	36
Fig. 18 Foto de resistencia jrm 120 (autoría propia). .....	37
Fig. 19 Puente rectificador, diagrama de conexión e imagen ilustrativa (digikey, 2024). ..	38
Fig. 20 Ejemplo de aplicación personalizada con una gui en matlab (gui de matlab, 2024). .....	39
Fig. 21 Ejemplo del uso de una gráfica en matlab (mathworks américa latina, 2024). .....	40
Fig. 22 Edittext en el entorno de gui de matlab. ....	40
Fig. 23 Pushbutton en el entorno de gui de matlab .....	41
Fig. 24 Radiobutton en el entorno de gui de matlab. ....	41
Fig. 25 Statictext en el entorno de gui de matlab .....	42
Fig. 26 Fases de la metodología del proyecto. ....	46
Fig. 27 Diseño de la conexión eléctrica del proyecto (autoría propia). .....	47
Fig. 28 División del proceso de conexión de control y de adquisición del esquema general del proyecto (autoría propia). .....	48
Fig. 29 Estados de conexión del transformador. ....	49
Fig. 30 Conexión de pinza amperimétrica y relés a la tarjeta de adquisición (autoría propia). .....	50
Fig. 31 Conexión eléctrica completa del proyecto (autoría propia). .....	51
Fig. 32 Conexión para la adquisición de datos del transformador por el cable de alimentación del transformador (autoría propia). .....	52
Fig. 33 Ejemplo gráfico de las pruebas realizadas al transformador y tiempos de activación de los relés para cambio de cargas (autoría propia). .....	53
Fig. 34 Base de datos recopilados de las pruebas del transformador (autoría propia). .....	54
Fig. 35 Estructura de la interfaz gráfica. ....	55
Fig. 36 Estructura de la sección de adquisición. ....	56
Fig. 37 Estructura de la sección de análisis individual de carga. ....	57
Fig. 38 Tercer estructura de la interfaz, sistema de diagnóstico. ....	58
Fig. 39 Gráfica de la transformada de fourier en estado sano .....	60
Fig. 40 Espectro promedio de la base de datos. ....	61
Fig. 41 Diferencia de magnitudes de los espectros de la base de datos de corriente. ....	62
Fig. 42 Obtención de los valores de thd y rms de la base de datos (autoría propia). .....	63
Fig. 43 Gráfica de promedio de thd por prueba en un borne (autoría propia). .....	64
Fig. 44 Grafica del comportamiento de la thd en los diferentes bornes del transformador (autoría propia). .....	64
Fig. 45 Comparativa de los valores de thd y rms de la corriente para catalogar los estados del transformador. ....	65
Fig. 46 Árbol de decisiones del proyecto. ....	67

Fig. 47 Resultado del funcionamiento de la interfaz. ....	69
Fig. 48 Resultados del diagnóstico del transformador con interfaz gráfica en estado sano. ....	70
Fig. 49 Resultados del diagnóstico del transformador con interfaz gráfica en condición de daño ligero. ....	71
Fig. 50 Resultados del diagnóstico del transformador con interfaz gráfica en condición con daño severo. ....	71

**Índice de tablas**

Tabla 1 Características de la resistencia jrm 120 jrm, adaptada de (jrm, 2021). ....	38
--	----

# **Capítulo 1.**

# **Introducción**

## 1.1 Introducción

En el ámbito de los sistemas eléctricos, uno de los principales dispositivos es el transformador, el cual desempeña un papel fundamental en la distribución y regulación de la energía eléctrica. Los transformadores son cruciales para la eficiencia y seguridad en los sistemas eléctricos, ya que permiten la transmisión de energía a grandes distancias y la adaptación de voltajes a las necesidades del usuario. Por lo tanto, resulta importante garantizar el funcionamiento óptimo de los transformadores, ya que cualquier fallo o desgaste en su estructura puede tener consecuencias significativas, tanto en términos de seguridad para el propio equipo y los usuarios, como en los costos operativos involucrados.

El presente trabajo se enfoca en el desarrollo de un software de análisis de señales de corriente que contribuye a la detección de daño de cortocircuito en transformadores monofásicos bajo distintas condiciones de carga eléctrica. Los cortocircuitos en transformadores de distribución monofásicos representan una de las principales causas de fallos en estos dispositivos. La detección de este daño ha atraído el interés de muchas investigaciones y desarrollos tecnológicos, ya que un daño incipiente (o pequeño) puede convertirse rápidamente en un daño mucho más complejo con consecuencias irreversibles (Mago, 2011).

En este contexto, el desarrollo y aplicación de un sistema de diagnóstico se presenta como una herramienta base para poder evaluar el estado de los transformadores y, de esta forma, prevenir posibles fallos o, al menos, reducir la severidad de estos. Así, se puede llevar a cabo una monitorización de diferentes parámetros eléctricos del transformador, identificando de manera temprana cualquier indicio de deterioro que pueda derivar en un cortocircuito. Sin embargo, esta tarea no es trivial, ya que la detección de cambios en la corriente eléctrica asociados al daño no es fácil, especialmente si se considera que al transformador pueden estar conectadas cargas lineales o no lineales que modifican la forma de onda de la corriente. El estudio de los cortocircuitos en transformadores de distribución monofásicos es de vital importancia debido a su impacto significativo en la fiabilidad y eficiencia del sistema eléctrico. Los cortocircuitos representan una de las principales causas de fallos en estos dispositivos, lo que puede resultar en interrupciones del suministro eléctrico, daños costosos y potenciales riesgos de seguridad. Las estadísticas indican que las

fallas en el aislamiento y los devanados son particularmente prevalentes, con porcentajes que pueden alcanzar hasta el 70% y el 30% respectivamente (Estadísticas de Fallas En Transformadores de Potencia y Mantenimiento Predictivo | GEBCO SAS, 2023).

Además, los problemas en el sistema de refrigeración, los bujes y el núcleo magnético también contribuyen al deterioro y fallo de los transformadores. La detección temprana de cortocircuitos puede prevenir la evolución de daños incipientes en fallos catastróficos, mejorando así la vida útil de los transformadores y garantizando un suministro eléctrico continuo y seguro. Por tanto, el desarrollo de tecnologías avanzadas para el análisis y monitoreo de señales de corriente se vuelve esencial para identificar y mitigar estos problemas de manera efectiva.

Es importante mencionar que, para el correcto desarrollo de este proyecto de software de monitoreo de daño de cortocircuito en transformadores monofásicos, se requiere la convergencia de diferentes campos disciplinares de la ingeniería electromecánica y eléctrica. Por ejemplo, materias como física, electromagnetismo y máquinas eléctricas permitirán entender los fundamentos del funcionamiento de los transformadores. Esto se complementa con otras materias como sistemas eléctricos de potencia y ahorro de energía, que permiten entender la interacción de dichas máquinas con todo el sistema eléctrico y su eficiencia energética. Asimismo, el estudio y puesta en práctica de conceptos revisados en instalaciones electromecánicas, electrónica y circuitos eléctricos permitirán realizar las conexiones del transformador bajo diferentes condiciones de carga, así como las conexiones de los sensores con los sistemas de adquisición de datos. También, particularmente en este trabajo, los conocimientos de programación de interfaces gráficas de usuario son cruciales para el diseño de la interfaz y el procesamiento de datos. Finalmente, las habilidades blandas como la adaptabilidad lógica y la ética son imprescindibles para conducir el correcto desarrollo de cualquier proyecto

## 1.2 Antecedentes

El desarrollo de sistemas de monitoreo y diagnóstico para transformadores eléctricos ha sido de gran interés tanto a nivel nacional como internacional. En este ámbito, la formación en ingeniería electromecánica proporciona una base sólida para abordar los desafíos relacionados con la operación y mantenimiento de estos dispositivos.

De forma internacional, diversos estudios han explorado técnicas de diagnóstico de transformadores y su aplicación en la práctica. Por ejemplo, Contreras et al. (1992) desarrollaron un software para calcular la corriente en transformadores, la cual puede ser usada para establecer patrones de operación. Posteriormente, hubo diferentes contribuciones de diagnóstico y su implementación, las cuales son revisadas y analizadas por Zorilla et al. (2019). También, Cifuentes et al. (2020) investigaron la implementación de sistemas de monitoreo en transformadores de potencia, ampliando más el avance en el campo a nivel global.

A nivel nacional, investigaciones como las de Parra et al. (2007) y Guerra et al. (2008) se han centrado en el estudio de los efectos dinámicos y los esfuerzos electromecánicos de cortocircuito en transformadores, siendo patrones de referencia para poder realizar tareas de clasificación y diagnóstico. Canseco et al. (2016) diseñaron un prototipo de adquisición de datos para la detección de fallas de cortocircuito, aportando soluciones tecnológicas específicas para el contexto nacional.

En el ámbito local, trabajos como el de Garfias (2020), desarrollado en la Universidad Autónoma de Querétaro, presentó un software de diagnóstico para la detección de cortocircuitos en motores, evidencian la relación y relevancia de las contribuciones hechas hacia las soluciones tecnológicas a nivel regional. También, de forma local, Huerta (2023) presentó la importancia de los transformadores y las causas que provocan las fallas que estos pueden generar, pero haciendo énfasis en el cortocircuito, así como el impacto del contenido armónico y del desbalance en la red eléctrica en su diagnóstico. Lo anterior es fundamental ya que varios métodos o sistemas de diagnóstico se basan en el análisis de contenido armónico o cambios en los valores nominales de amplitud (o RMS); por lo tanto, cuando la red eléctrica posee estos disturbios, el sistema o método de diagnóstico no sabe si es de la

red o del transformador, afectando negativamente el diagnóstico, y como se ha comentado, un mal diagnóstico genera pérdidas económicas y en algunos casos pérdidas humanas.

Los trabajos previamente revisados muestran de forma global como a lo largo de los años y, de alguna manera, en diferentes zonas geográficas se han venido desarrollando contribuciones al área de diagnóstico de transformadores. También se ha observado que las variables físicas más utilizadas son las corrientes y vibraciones ya que estas están directamente desarrolladas con su composición y funcionamiento estructural. Así, un cambio en estas variables físicas se puede asociar a un cambio en su composición física, por ejemplo, un daño. En este contexto, el presente trabajo se enmarca en la continuidad de estos esfuerzos de investigación, con el desarrollo de un software de monitoreo de daño por cortocircuito en transformadores monofásicos haciendo uso de señales de corriente, pero considerando los diferentes tipos de carga eléctrica a las que puede estar sujeto, tales como cargas lineales y cargas no lineales. Esto pone a la propuesta en un escenario que, aunque sigue siendo de laboratorio, está sujeto a condiciones reales de operación como lo es alimentar una carga eléctrica.

### **1.3 Justificación**

Este trabajo se justifica en tres aspectos fundamentales: económico, social y tecnológico.

#### Económico

- El software desarrollado contribuirá a la solución de sistemas para monitoreo y detección de manera oportuna de daños de cortocircuito en transformadores tipo seco, debido a que su uso general es del 58.67% (Díaz, 2022), lo cual resulta en la minimización de daños potenciales, la reducción de costos asociados al mantenimiento reactivo y la prolongación de la vida útil de los transformadores, mejorando así la confiabilidad y eficiencia de los sistemas de distribución eléctrica.

## Social

- Un equipo que puede funcionar correctamente durante su vida útil permite compensar, de alguna manera, el uso de los materiales y energía que se requirieron para su construcción. En este sentido, cualquier contribución tecnológica que permita detectar daños en los equipos y, consecuentemente, extender su vida útil, así como mantener su eficiencia nominal, permitirá reducir la cantidad de materiales utilizados en la fabricación de transformadores, generar menos residuos, consumir menos energía y así conservar los recursos naturales y minimizar la contaminación ambiental. También, el hecho de que un equipo opere en condiciones nominales minimiza riesgos al mismo equipo, a los operarios e incluso a la población a su alrededor.

## Tecnológico

- Este software de diagnóstico automático para detectar daños por cortocircuito en transformadores mediante un sistema de semaforización bajo diversas condiciones de carga radica en la ausencia de una solución existente en el ámbito local. Es decir, esta herramienta tecnológica, permitirá contribuir en el desarrollo de una solución más integral y robusta, la cual inicialmente, de forma particular en los laboratorios de ingeniería electromecánica de la FI-SJR, sentará las bases en el análisis de corrientes para diagnosticar el daño de cortocircuito en transformadores que alimentan distintas cargas eléctricas. Esta contribución también podrá tener impacto académico ya que podrá ser utilizado en la docencia para validar de forma experimental fenómenos y conceptos teóricos de las máquinas eléctricas.

## 1.4 Objetivo general y particulares

### Objetivo general

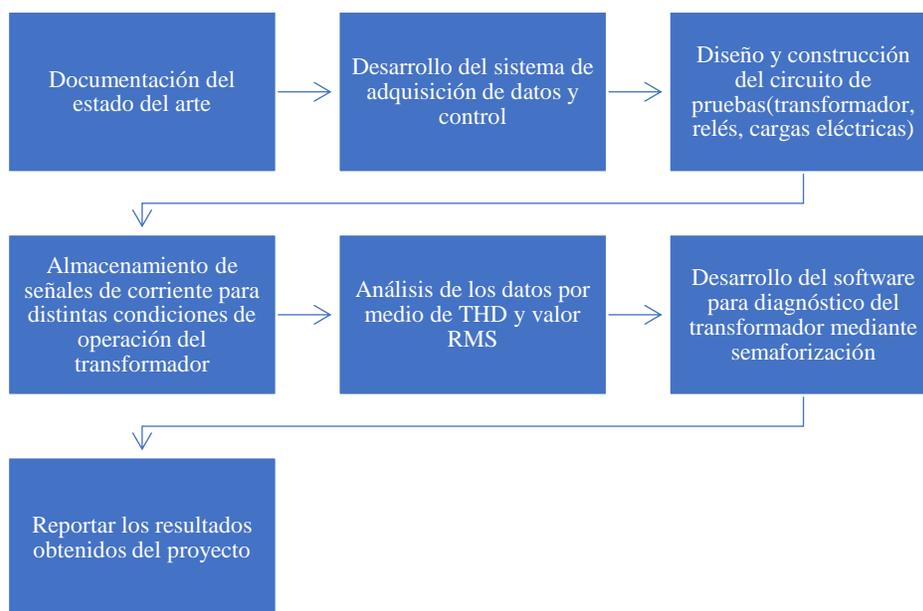
Desarrollar un software de monitoreo fuera de línea y análisis de señales de corriente fuera de línea para detección automática de daño de cortocircuito en transformadores bajo condiciones de carga eléctrica lineal y carga eléctrica no lineal.

### Objetivos particulares

- Diseñar y realizar la construcción de los circuitos de los distintos tipos de cargas para las pruebas del transformador, incluyendo la etapa de control de activación y desactivación de cargas lineales y no lineales, así como la condición de sin carga eléctrica.
- Generar una base de datos con las distintas condiciones del transformador (sano y con daño) y sus diferentes condiciones de carga eléctrica (sin carga, con carga lineal, con carga no lineal y con ambas cargas).
- Diseñar, construir y programar una interfaz gráfica de usuario (GUI, o *Graphical user interface*) que ayude a la lectura y análisis de las señales de corriente obtenidas en el objetivo anterior.
- Realizar el programa de conexión de la GUI en Matlab con la tarjeta NI-USB 6002 para habilitar de forma secuencial la activación y desactivación de los relevadores y la adquisición de datos.
- Analizar la base de datos por medio de la Transformada de Fourier y los índices eléctricos de RMS (*Root Mean Square, o valor eficaz*) y THD (*Total harmonic distortion, o Distorsión armónica total*) para establecer patrones que puedan servir para diferenciar entre las diferentes condiciones de operación del transformador.
- Realizar un árbol de decisiones basado en valores obtenidos anteriormente que logre el diagnóstico automático de la condición en la que se encuentra el transformador mediante una semaforización.

## 1.6 Planteamiento general

Como se ha mencionado, el presente trabajo consiste en desarrollar un sistema integral para el monitoreo, análisis y diagnóstico de transformadores eléctricos de baja potencia. Esto con el fin de mejorar la eficiencia operativa y prolongar la vida útil de estos dispositivos críticos en los sistemas eléctricos. Así, este proyecto, se estructura en siete etapas fundamentales de acuerdo con el diagrama de la Fig. 1.



*Fig. 1 Proceso del planeamiento del proyecto (autoría propia).*

- Documentación del estado del arte

En esta etapa se realizará una revisión de la literatura científica y tecnológica relacionada con el diagnóstico y monitoreo de transformadores eléctricos. Este proceso permitirá identificar las técnicas, metodologías y herramientas usadas para la evaluación del estado de estos dispositivos eléctricos.

- Desarrollo del sistema de adquisición de datos y control

La etapa de diseño y desarrollo del sistema de adquisición se basará en la recolección de datos con información relevante sobre el comportamiento eléctrico de corriente del transformador en tiempo real. Este sistema estará compuesto por sensor de corriente (i200s

FLUKE), relevadores de estado sólido para la activación de las cargas eléctricas y una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments (NI-USB-6002).

- Diseño y construcción del circuito de pruebas

El diseño y construcción de un circuito que simule condiciones reales de operación para el transformador será lo desarrollado en esta etapa. Este circuito incluirá elementos como el transformador, cargas eléctricas lineales y no lineales, así como el cableado de alimentación y conexión.

- Almacenamiento de señales de corriente para distintas condiciones de operación del transformador

En esta etapa se construirá la base de datos de las señales de corriente obtenidas durante las pruebas realizadas en el transformador. Estas señales se registrarán para diferentes condiciones de carga y operación, lo que permitirá realizar un análisis detallado del comportamiento del transformador en distintos escenarios, incluyendo sin carga, carga lineal, carga no lineal y ambas cargas.

- Análisis de los datos por medio de THD y valor RMS

Se llevará a cabo un análisis de los datos almacenados utilizando indicadores eléctricos como la Distorsión Armónica Total (THD del inglés *Total Harmonic Distortion*) y el Valor Eficaz (RMS). Estos indicadores proporcionarán información sobre la calidad de la señal eléctrica y la presencia de armónicos, lo que permitirá identificar posibles anomalías en el funcionamiento del transformador.

- Desarrollo del software para diagnóstico del transformador mediante semaforización

Se desarrollará un software de diagnóstico basado en el análisis de las señales de corriente obtenidas. Este software utilizará técnicas de semaforización para categorizar el estado del transformador en base a criterios predefinidos, permitiendo una rápida y precisa evaluación del estado de salud del dispositivo.

- Reporte de los resultados obtenidos del proyecto

Se elaborará un informe detallado que documente los resultados obtenidos durante todas las etapas del proyecto. Este informe incluirá análisis de datos, conclusiones, recomendaciones y posibles áreas de mejora para futuras investigaciones en el campo del diagnóstico y monitoreo de transformadores eléctricos.

# **Capítulo 2**

## **Fundamentación**

### **teórica y tecnológica**

Para poder entender y llevar a cabo de la mejor manera posible este proyecto, esta sección presenta el marco teórico de los conceptos más importantes, incluyendo la descripción de los transformadores y su funcionamiento, la descripción de las fallas por cortocircuito, los tipos y las características de las cargas eléctricas, así como las definiciones de los métodos de análisis de señales eléctricas como lo es la transformada de Fourier y los índices eléctricos de RMS y THD, cerrando con la descripción y funcionamiento de los árboles de decisión.

## **2.1 Transformadores**

Un transformador es una máquina eléctrica que mediante principios de inducción electromagnética transfiere energía de un circuito eléctrico a otros sin cambio en la frecuencia. La transferencia se lleva a cabo cambiando el voltaje o la corriente; por lo tanto, un transformador aumenta o disminuye la corriente alterna (o el voltaje) cuando es necesario. En algunos casos muy especiales, la relación de transformación es de 1 a 1, es decir que no se cambia el voltaje ni la corriente (Rodríguez, 2023).

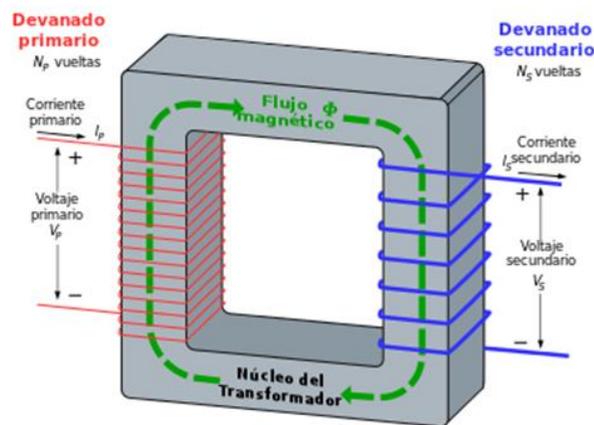
El uso de los transformadores cobra una gran importancia en los sistemas eléctricos, ya que con ellos se puede cambiar la amplitud del voltaje y, consecuentemente, reduciendo la amplitud de corriente, logrando así hacer más eficiente la transmisión y la distribución en términos de caídas de voltaje, calibre de conductores y seguridad de los equipos eléctricos y de los usuarios (Rodríguez, 2023).

Sabiendo que la corriente eléctrica está directamente relacionada con la operatividad del transformador (Tecsa, 2021), es factible que esta señal se vea afectada o presente cambios asociados a la constitución de sus componentes; es decir, la forma de onda de corriente cambiará si cambian las propiedades estructurales del transformador, incluyendo los daños. Sin embargo, la corriente también está directamente ligada con el tipo de carga que alimenta; por lo tanto, es fundamental estudiar y analizar dichos cambios para poder determinar si estos cambios son debidos a la carga o a, por ejemplo, un daño.

## 2.2 Funcionamiento en el transformador

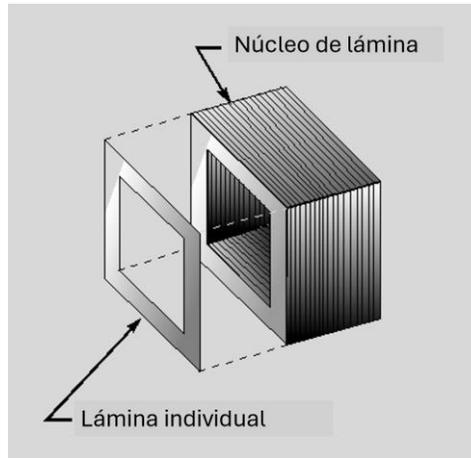
En un transformador, los 3 componentes más importantes son el núcleo, la bobina primaria (o devanado primario) y la bobina secundaria (o devanado secundario).

El devanado principal es la parte que está conectada a una fuente eléctrica y es donde se produce el flujo magnético inicialmente. Estas bobinas están aisladas una de otra. El flujo principal se induce en el devanado principal de donde pasa al núcleo y se enlaza al secundario. La Fig. 2 muestra de forma gráfica dicho comportamiento y sus elementos.



*Fig. 2 Descripción gráfica del funcionamiento del transformador y secciones principales del transformador (Tecsca, 2021).*

Particularmente, el núcleo permite que el flujo magnético llegue al devanado secundario para crear un circuito magnético cerrado. De la misma forma, el uso de los devanados cilíndricos/cerrados ayuda al movimiento de los campos magnéticos (Tecsca, 2021). Generalmente, en un transformador, el núcleo magnético se ensambla apilando láminas de acero y dejando un espacio mínimo de aire con el fin de asegurar la continuidad del campo magnético, tal como se puede ver en la Fig. 3.



*Fig. 3 Composición del núcleo magnético del transformador por láminas de acero (Tecsa, 2021).*

Por otro lado, los devanados tanto primario como secundario pueden ser conocidos como bobinas, las cuales se encuentran aisladas entre sí y del propio núcleo (Tecsa, 2021). El devanado primario o la bobina primaria, es la bobina que se conecta directamente a la fuente de alimentación y la bobina secundaria es la que permite la salida del voltaje/corriente transformada. Algunos otros elementos o componentes de un transformador pueden ser: tapas de conexión, interruptores de derivación y sistemas de refrigeración.

### **2.3 Clasificación de los transformadores**

Existen varios tipos de transformadores diseñados para adaptarse a diferentes aplicaciones y requerimientos específicos. El más común es el transformador de distribución, el cual es el que se utiliza para suministrar energía a hogares, edificios comerciales e industriales desde la red de distribución eléctrica. Otro son los transformadores de potencia, los cuales son utilizados en subestaciones eléctricas para elevar o disminuir el voltaje de la corriente alterna en sistemas de transmisión de alta tensión, facilitando la transferencia eficiente de energía a largas distancias. Además, existen transformadores especiales diseñados para aplicaciones específicas, como los transformadores de aislamiento, los transformadores de tipo seco y los transformadores de distribución subterránea cada uno adaptado a las necesidades particulares de instalación, seguridad y rendimiento del sistema eléctrico (Relsamex, 2020). De forma gráfica, los diferentes tipos y clasificaciones se pueden

observar en la Fig. 4. En este trabajo se estudia el transformador monofásico de tipo seco de baja potencia.

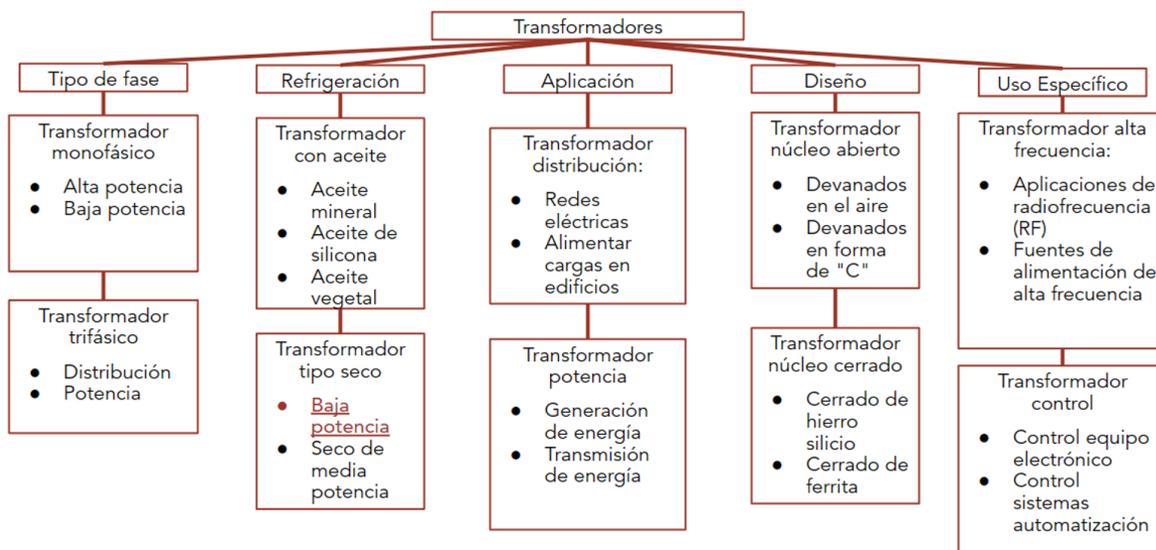


Fig. 4 Clasificación gráfica de los transformadores según su uso (autoría propia, adaptada de (Martínez López, 2017).

## 2.4 Transformador tipo seco de baja potencia

Los transformadores de tipo seco de baja potencia se denominan así porque estos no utilizan aceite u otro tipo de aislante como algunos otros transformadores, en cambio emplean materiales aislantes sólidos o resinas para proteger sus devanados. Estos transformadores son dispositivos utilizados para la distribución de energía, ya que pueden subir o reducir la tensión sin alterar la frecuencia. Son adecuados para manejar voltajes y potencias más bajas que aquellos transformadores con aceite. Sin embargo, estos también tienen una mayor pérdida de energía y un costo de operación más elevado que los transformadores con aceite, además suelen tener un ruido de funcionamiento más alto. Por lo tanto, si se pretende garantizar su eficiencia y vida útil, es muy importante seguir un programa de mantenimiento preventivo cuidadoso, que incluya la limpieza de devanados, conexiones y verificar regularmente su integridad general (SANERGRID, 2022). La Fig. 5 muestra un ejemplo de estos transformadores.



*Fig. 5 Ejemplo de un transformador de tipo seco de baja potencia (SANERGRID, 2022).*

## **2.5 Fallas en el transformador**

Aunque los transformadores son máquinas robustas, son susceptibles a presentar diferentes fallas, ya sean mecánicas o eléctricas, siendo de las más comunes las asociadas a los embobinados debido a que ahí es donde se presentan los mayores estreses mecánicos, eléctricos y térmicos, adicional a los factores de suciedad, humedad y otros inherentes a los ambientes de trabajo.

Algunas de las causas de las fallas más comunes en los transformadores de tipo seco son las siguientes:

- Baja resistencia de aislamiento del núcleo de hierro a tierra

Esta falla se causa por la disminución de aislamiento debido a la alta humedad ambiental.

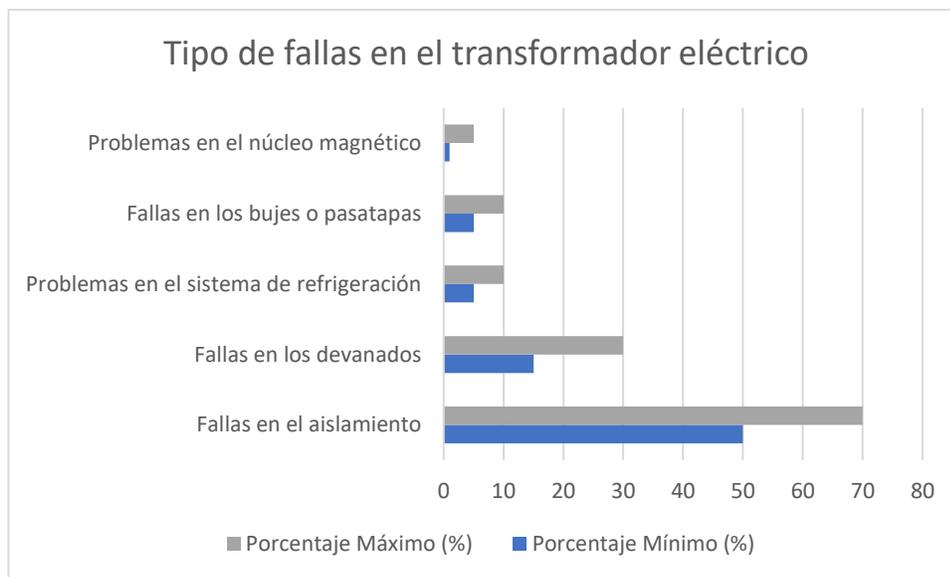
- Envejecimiento del aislamiento

El deterioro de los materiales de aislamiento debido al tiempo provoca una reducción en el rendimiento, lo que puede causar la ruptura y daños críticos en el aislamiento.

- Sobrecarga

Al tener una sobrecarga constate y prolongada en el transformador, es decir una excesiva demanda de corriente, se puede afectar su funcionamiento y composición estructural al generar calentamientos en sus diferentes partes.

Sin embargo, los transformadores de manera general, esenciales en la transmisión y distribución de energía eléctrica, pueden sufrir diversas fallas. Las principales fallas y sus porcentajes aproximados son las siguientes (Fig.6):



*Fig. 6 Estadísticas de fallas en los transformadores, adaptada de (Estadísticas de Fallas En Transformadores de Potencia y Mantenimiento Predictivo / GEBCO SAS, 2023).*

Fallas en el aislamiento (50-70%), causadas por degradación del aceite aislante, envejecimiento del aislamiento de papel, humedad y sobrecalentamiento, lo que puede resultar en cortocircuitos internos y reducción de la vida útil del transformador.

Fallas en los devanados (15-30%), debidas a sobrecargas, cortocircuitos, vibraciones mecánicas y defectos de fabricación, que pueden causar cortocircuitos, daños en el aislamiento y deformación de los devanados.

Problemas en el sistema de refrigeración (5-10%), causados por fallos en los ventiladores o bombas de refrigeración, obstrucciones en el sistema de refrigeración y degradación del aceite, que llevan al sobrecalentamiento y fallo del aislamiento.

Fallas en los bujes (5-10%), provocadas por contaminación, envejecimiento y defectos de fabricación, resultando en descargas parciales y fallos de aislamiento.

Problemas en el núcleo magnético (1-5%), debido a desalineación, corrosión y vibraciones excesivas, que ocasionan pérdidas adicionales, sobrecalentamiento y ruido (Estadísticas de Fallas En Transformadores de Potencia y Mantenimiento Predictivo | GEBCO SAS, 2023).

Estas fallas pueden ser detectadas y prevenidas mediante mantenimientos e inspecciones regulares y adecuadas, además de realizar un seguimiento de las condiciones ambientales para poder garantizar un funcionamiento nominal (Electric, O. ,2021).

## **2.6 Cortocircuito**

Un cortocircuito es un fenómeno que ocurre en un circuito eléctrico, permitiendo que una corriente se conduzca por una ruta no deseada con una impedancia eléctrica nula o muy baja.

Un cortocircuito en un transformador ocurre cuando el aislamiento de las espiras de un devanado se ha degradado y el conductor hace contacto con otras espiras, otro devanado, el núcleo o tierra. En el caso de los transformadores, los cortocircuitos representan eventos críticos que pueden resultar en sobrecalentamientos y daños significativos en los embobinados o en el transformador en sí, si no se detectan y manejan rápidamente.

Los daños por cortocircuito en transformadores monofásicos de tipo seco pueden ser causados por varias razones y pueden tener consecuencias significativas si no se manejan adecuadamente. Particularmente se tienen:

- Sobrecalentamiento del devanado: La corriente excesiva durante un cortocircuito puede provocar el sobrecalentamiento de los devanados del transformador, representando un grave riesgo para su integridad siendo un ejemplo de un sobrecalentamiento crítico la Fig. 7.
- Daño al aislamiento/pérdida de aislamiento: Los cortocircuitos pueden comprometer el aislamiento del transformador, lo que resulta en pérdida de aislamiento y posibles fallos.

- Daño mecánico: La fuerza generada por un cortocircuito puede causar daños mecánicos a los componentes del transformador, aumentando el riesgo de falla, un caso común de este tipo de daño es la Fig.8.
- Interrupción del suministro eléctrico: Los cortocircuitos pueden provocar interrupciones en el suministro eléctrico, afectando la confiabilidad general del sistema eléctrico.



*Fig. 7 Cortocircuito en transformador de baja potencia por sobrecarga (Rodríguez, 2023).*



*Fig. 8 Desgaste de conexión en transformador por cortocircuito (Bruno, L. G., 2009).*

Comprender y gestionar eficazmente estas fallas es crucial para mantener la confiabilidad operativa de la infraestructura eléctrica conectada (Rodríguez, 2023).

## 2.7 Cargas y tipos de cargas

De forma simplificada, lo que se tiene en una conexión directa a los transformadores corresponde con 2 tipos: cargas lineales y cargas no lineales, incluyendo escenarios donde se conectan ambos tipos de cargas o donde no hay carga.

La carga lineal es la que tiene una relación estrecha y proporcional entre la señal de voltaje y la de corriente. En otras palabras, tanto la señal de voltaje como la de corriente son senoidales, presentando comúnmente un contenido armónico muy bajo o nulo (ver Fig. 9a). Algunos ejemplos de cargas lineales pueden ser las resistencias, inductores, capacitores, etc.

Por otro lado, una carga no lineal es aquella que no tiene una relación constante entre la señal de voltaje y corriente (ver Fig. 9b). Estas cargas generan armónicos de corriente que regresan a otras partes del sistema eléctrico formando ondas no sinusoidales (Quora, 2023).

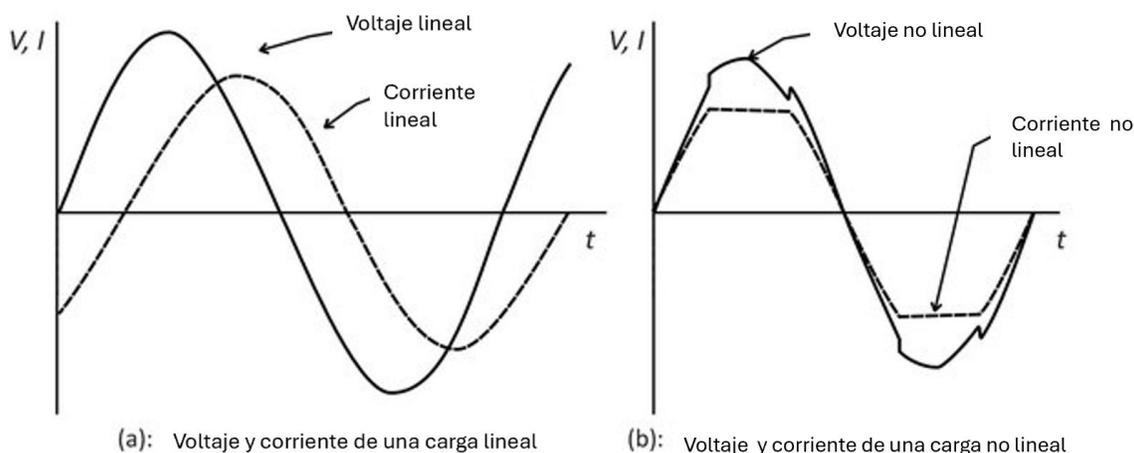


Fig. 9 Diferenciación gráfica de una carga lineal y una carga no lineal, adaptada de (Quora, 2023).

Algunos ejemplos de cargas no lineales incluyen equipos como computadoras, controles electrónicos, unidades de velocidad variable, iluminación de bajo consumo y sistemas de aire acondicionado que consumen corriente en pulsos cortos en lugar de una onda sinusoidal (Andres, 2022).

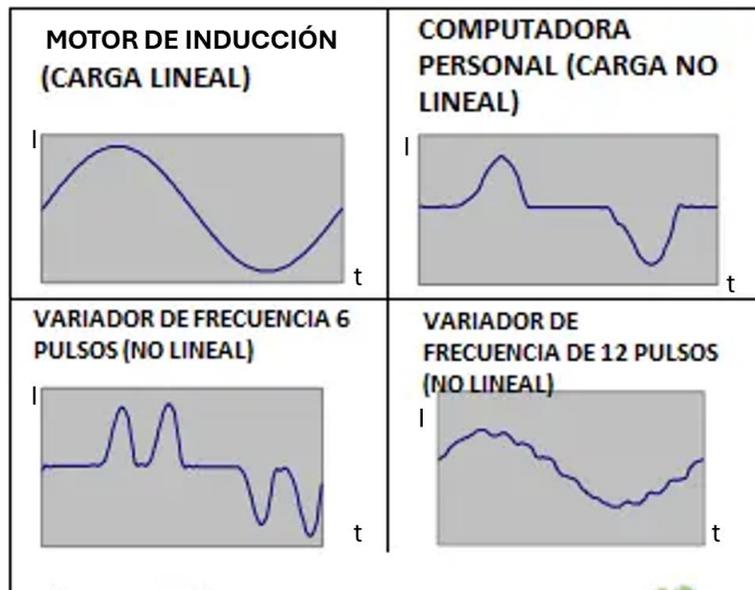


Fig. 10 Ejemplos de cargas lineales y cargas no lineales cotidianas (Andres, 2022).

Las cargas no lineales pueden tener un impacto negativo en las instalaciones eléctricas, como corrientes neutras elevadas, caídas de voltaje y problemas de calidad de energía, incluyendo principalmente contenido armónico.

## 2.8 Transformada de Fourier

La transformada en Fourier es una herramienta matemática que se utiliza para transformar señales del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. En general, es una herramienta muy utilizada en aplicaciones de la ingeniería, siendo fundamental en muchas de las aplicaciones de la rama en eléctrica. Esta herramienta es reversible, por lo que puede pasarse de un dominio a otro (Transformada de Fourier, 2016). La ecuación 1 muestra como es la formulación matemática para dicha transformación.

$$F(w) = \int f(t)e^{-iwt} dt \quad (1)$$

Donde:

- $F(w)$  es la función de salida o transformada de Fourier de la función  $f(t)$ . Esta representa la frecuencia de la señal.
- $f(t)$  es la función en el dominio del tiempo, o función original.

- $w$  es la frecuencia de la señal
- $t$  es la representación del tiempo
- $e^{(-iwt)}$  es la representación de una frecuencia específica  $w$  a la transformada de Fourier. La parte exponencial  $e^{-iwt}$  tiene dos componentes:  $e$  es la base del logaritmo natural,  $i$  es la unidad imaginaria,  $w$  es la frecuencia angular, y  $t$  es la variable de integración.
- $dt$  es el elemento diferencial de la variable de integración. En este caso,  $t$  representa el tiempo, por lo que  $dt$  indica que estamos integrando con respecto al tiempo.

Esta transformación se usa para observar claramente el contenido frecuencial en magnitud y fase, lo cual no puede hacerse en el dominio del tiempo cuando se tiene contenido armónico o más de una componente frecuencial (ver Fig. 11). En este trabajo, esta herramienta se usará para obtener las componentes frecuenciales o cambios de contenido frecuencial que puedan asociarse a las distintas condiciones de operación del transformador, las cuales además puedan cuantificarse a través del indicador de la distorsión armónica total o THD del inglés total harmonic distortion.

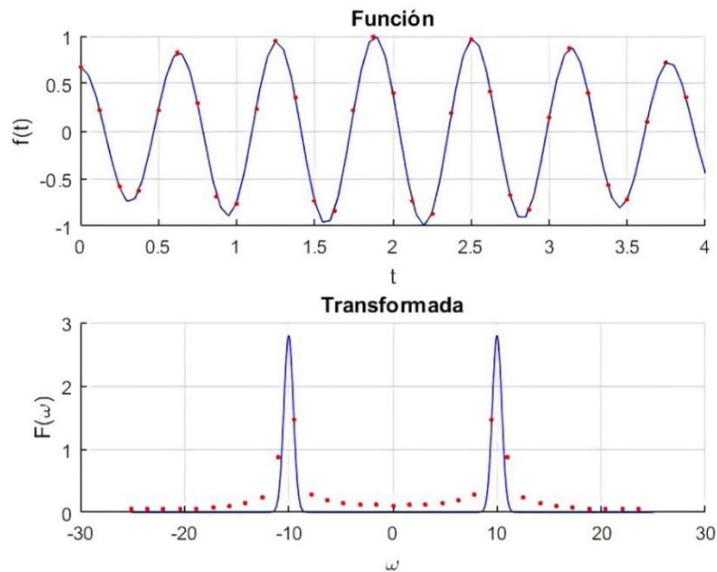


Fig. 11 Demostración gráfica de una señal en el dominio del tiempo y otra en de la frecuencia (Transformada de Fourier, 2016).

## 2.9 Distorsión armónica total (THD)

THD es la abreviatura de Total Harmonic Distortion o distorsión armónica total. Esta es la medida de la cantidad de distorsión que hay en una señal eléctrica debido a la presencia armónicos. Estos armónicos son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de la señal y generalmente son causados por una carga no lineal.

De forma matemática se implementa con la siguiente fórmula:

$$THD = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \quad (2)$$

Donde  $I_1$ , es el valor de la corriente del armónico fundamental, mientras que las demás corrientes, como se menciona, son corrientes múltiplos creados por los armónicos.

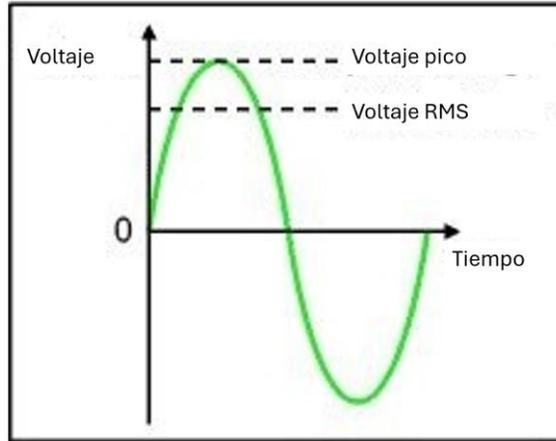
## 2.10 Valor RMS

El valor RMS (del inglés, Root Mean Square o Raíz Media Cuadrática) es el valor efectivo de un voltaje de corriente alterna. El valor RMS es muy importante ya que este es la cantidad de energía que se entrega a una carga resistiva en un circuito de corriente alterna (Administrador Valor RMS, 2022).

Este se ve representado por la siguiente ecuación:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} * \int_T^0 Vm^2 \cos^2(\omega t) dt} \quad (3)$$

Donde se tiene un valor  $T$  como periodo de la onda de voltaje,  $\omega$  como la frecuencia angular y  $V_m$  como el valor máximo del voltaje. La Fig. 12 muestra un ejemplo de la posición del valor RMS en una señal senoidal, donde se aprecia que será menor al valor pico. En una señal senoidal pura, el valor RMS está relacionado con el valor pico por un factor de la raíz cuadrada de 2; es decir, valor RMS es igual al valor pico entre la raíz cuadrada de 2.

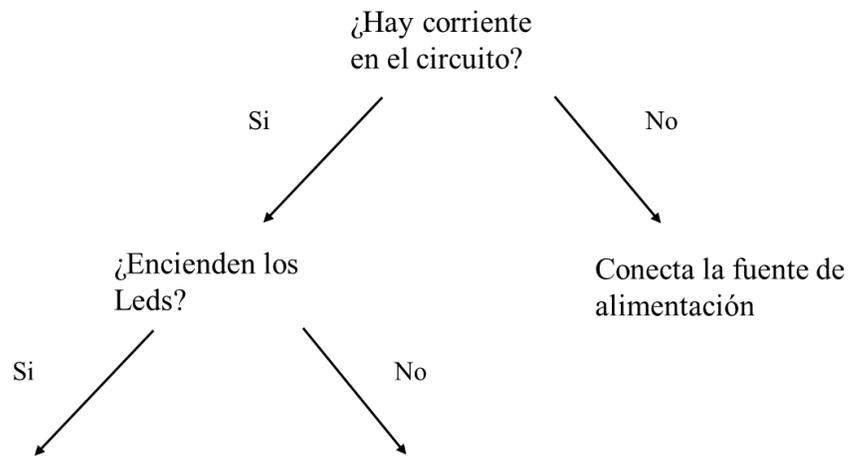


*Fig. 12 Descripción gráfica del voltaje RMS en una señal eléctrica, adaptada de Administrador Valor RMS (2022).*

## 2.11 Árbol de decisiones

Un árbol de decisiones es una representación estructurada y gráfica de un problema de decisión en el que el análisis de la toma de decisiones es importante ya que conduce a una conclusión. Generalmente se compone de nodos que representan las decisiones, probabilidades y resultados. Las ramas que conectan estos nodos muestran las posibles opciones y resultados de cada decisión. Son una herramienta muy útil para visualizar y analizar los escenarios complejos, ya que permite evaluar alternativas y las consecuencias que puedan tener. Estos son ampliamente usados en campos de ingeniería, economía, medicina, y gestión empresarial (Árbol de Decisiones | Miro, 2024).

## Árbol de decisiones ejemplo



*Fig. 13 Ejemplo de un árbol de decisiones, adaptada de (autoría propia).*

### 2.12 Características del transformador tipo seco de baja potencia

Estos transformadores son dispositivos utilizados para la distribución de energía, ya que pueden subir o reducir la tensión sin alterar la frecuencia. Este transformador tiene una capacidad de potencia máxima de 1.5kVA, conexión 220V, y distintas conexiones para su manipulación, como se observa en la Fig. 14.



*Fig. 14 Transformador tipo seco de baja potencia que se someterá al proyecto (autoría propia).*

## 2.13 NI Tarjeta de Adquisición de Datos USB 6002

El USB-6002 es un dispositivo DAQ multifunción de bajo costo. Ofrece E/S analógicas, E/S digitales y un contador de 32 bits. El USB-6002 proporciona una funcionalidad básica para aplicaciones como el registro sencillo de datos, mediciones portátiles y experimentos académicos de laboratorio (Model 6002, 2024). La Fig. 15 muestra la tarjeta. La velocidad de adquisición de 50ks/s (muestras/segundo) y el ADC de 16 bits es suficiente para este proyecto.

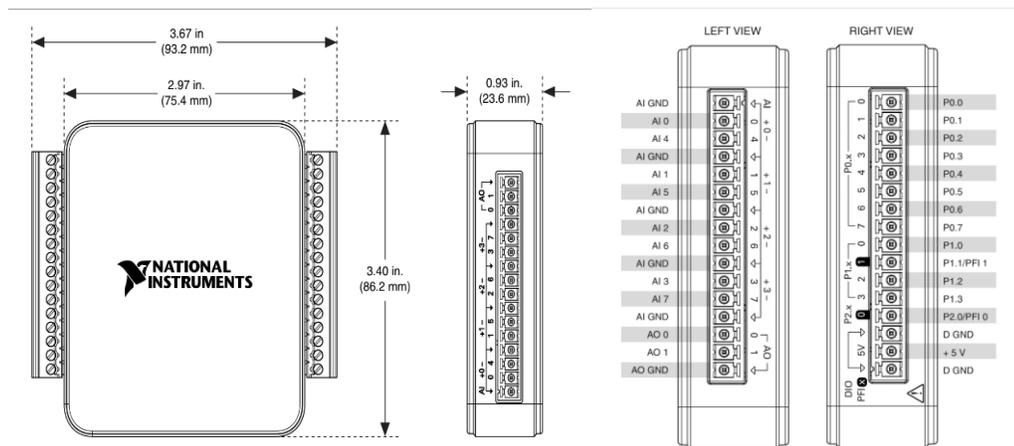


Fig. 15 Tarjeta de adquisición NI USB 6002 (Model 6002, 2024).

## 2.14 Pinza amperimétrica

Las sondas de corriente Fluke son herramientas ideales para sensar diferentes rangos de corriente en los instrumentos Fluke o en otros sistemas de adquisición. La i200s es una sonda de corriente alterna de doble rango: 20 A y 200 A, con salida de tensión a través de un conector BNC aislado de seguridad (ver Fig. 16). Se incluye un adaptador de conector banana a BNC doble que permite conectar el i200s a multímetros con entradas de conector banana (I200S, 2024). El factor de conversión es 100 mV/A o 10 mV/A, dependiendo del rango seleccionado.



*Fig. 16 Pinza amperimétrica Fluke i200s (I200S Sonda amperimétrica AC, 2024).*

### **2.15 Relé de estado sólido**

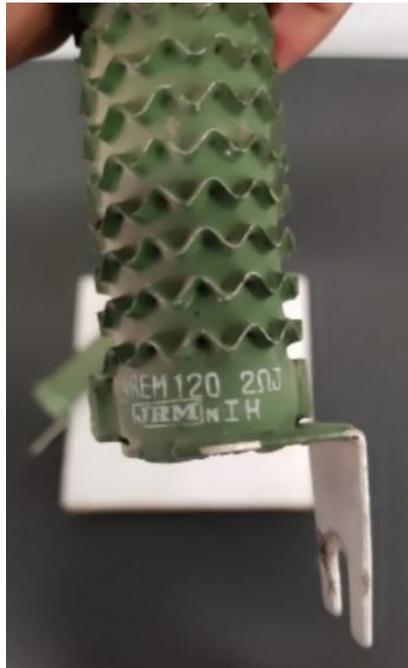
El relé de estado sólido (SSR) es un componente que integra diferentes circuitos totalmente electrónicos, empleando las características eléctricas, magnéticas y ópticas de los dispositivos semiconductores y los componentes electrónicos para complementar sus funciones de conmutación y aislamiento del relé (Relé SSR GOLD, 2022). Este dispositivo puede activarse con 5V y conmutar voltajes de 40-480V en AC y con una capacidad en corriente de 10-90A (ver Fig. 17).



*Fig. 17 Relé de estado sólido GOLD SAP4805D (Relé SSR GOLD, 2022).*

## 2.16 Resistencias JRM 120

Las resistencias de potencia están diseñadas para soportar y disipar grandes cantidades de energía, manteniendo su tamaño lo menor posible. Las resistencias JRM 120 que se usarán están diseñadas bajo las características mostradas en la Tabla 1 (JRM, 2021).



*Fig. 18 Foto de resistencia JRM 120 (autoría propia).*

Tabla 1 Características de la resistencia JRM 120 JRM, adaptada de (JRM, 2021).

Características eléctricas y mecánicas		
Características	Estándares	Métodos de ensayo
Resistencia de Tolerancia	$\pm 10\%$ (K)	
Coefficiente de resistencia de temperatura	$\pm 400\text{ppm}/^\circ\text{C}$ max	
Potencial nominal de carga	$\Delta R/R \leq \pm 1\%$	
Sobre carga breve	$\Delta R/R \leq \pm 2\%$ , sin evidencia de daño por arco	
Resistencia de aislamiento	100M $\Omega$ min.	DC 500V
Resistencia dieléctrica de voltaje	sin evidencia de daño mecánico	
Fuerza de resistencia	sin evidencia de daño mecánico	294N por 30 segundos
Vibración	sin evidencia de daño mecánico	

## 2.17 Puente rectificador IXYS

El puente rectificador de IXYS es un diodo utilizado habitualmente para convertir una entrada de corriente alterna (CA) en una salida de corriente continua (CC). En los rectificadores de potencia trifásicos, la conducción se produce siempre en el diodo positivo y en el correspondiente diodo negativo (Digikey, 2024). Esta rectificación genera una señal de corriente no lineal.

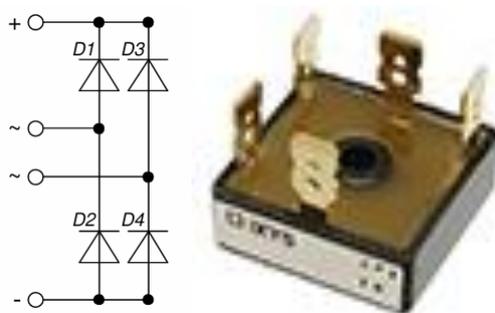


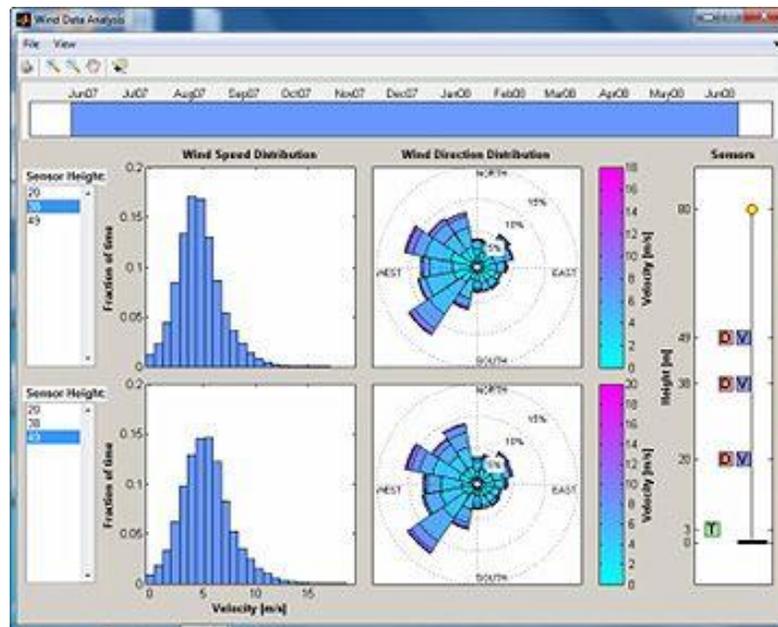
Fig. 19 Puente rectificador, diagrama de conexión e imagen ilustrativa (Digikey, 2024).

## 2.18 MATLAB

MATLAB es una plataforma de programación y cálculo numérico utilizada por millones de ingenieros y científicos para analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos. Para el desarrollo de este proyecto se utilizó una versión para estudiantes, por lo que algunas funciones estaban restringidas (MATLAB, 2024).

## 2.19 MATLAB GUIDE

Las GUI (también conocidas como interfaces gráficas de usuario o interfaces de usuario) permiten un control sencillo (con uso de ratón) de las aplicaciones de software, lo cual elimina la necesidad de aprender un lenguaje y escribir comandos a fin de ejecutar una aplicación. Estas incluyen controles tales como menús, barras herramientas, botones y controles deslizantes (GUI de MATLAB, 2024).



*Fig. 20 Ejemplo de aplicación personalizada con una GUI en MATLAB (GUI de MATLAB, 2024).*

Algunos de los elementos que pueden componer a una GUI se muestran y describen a continuación.

## 2.20 Gráficas en MATLAB

Las gráficas de líneas, basadas en la función plot, son una forma útil de comparar conjuntos de datos o rastrear cambios a través del tiempo. Personalizar las etiquetas y los valores de marca a lo largo de un eje puede ayudar a resaltar aspectos particulares de sus datos, como ejemplo de la función coseno de la Fig. 22, donde se grafica en función a valores de -10 a 10 en el eje x (MathWorks América Latina, 2024).

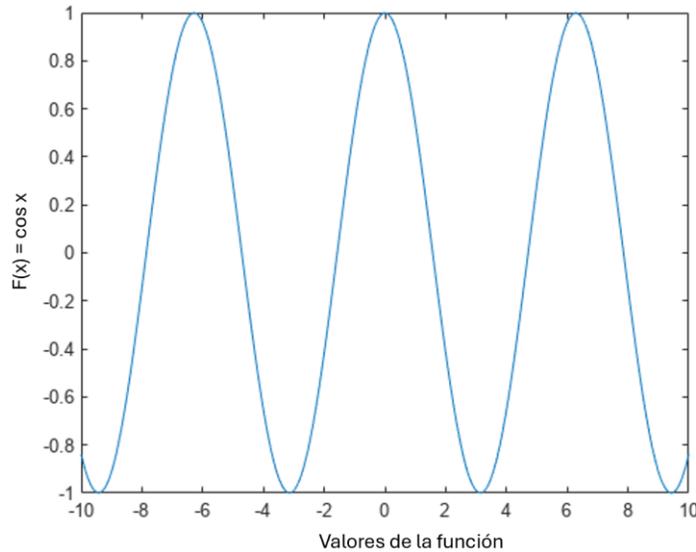


Fig. 21 Ejemplo del uso de una gráfica en MATLAB (MathWorks América Latina, 2024).

## 2.21 EditText en MATLAB

EditText es uno de los muchos widgets que se pueden usar para recuperar datos de texto del usuario. EditText se refiere al widget que muestra un campo de texto vacío en el que un usuario puede ingresar el texto requerido (Greyrat, R., 2022).



Fig. 22 EditText en el entorno de GUI de MATLAB

## 2.22 PushButton en MATLAB

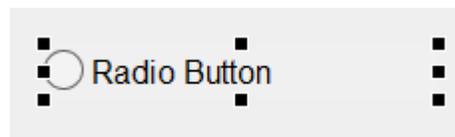
El PushButton es un elemento de las GUIDE de MATLAB que es utilizado para realizar una acción cuando el usuario lo presiona, generalmente se usa para activar o iniciar procesos en la interfaz. Adicionalmente, con la configuración correcta, se puede utilizar para poder simbolizar una semaforización usando la propiedad set y backgroundcolor (Cambiar los Colores del Escritorio - MATLAB & Simulink - MathWorks América Latina, 2023).



*Fig. 23 PushButton en el entorno de GUI de MATLAB*

## 2.23 RadioButton en MATLAB

Un RadioButton es un elemento similar al PushButton, solo que es usado para seleccionar una opción de entre varias opciones mutuamente excluyentes (Create Radio Button Component - MATLAB Uiradiobutton - MathWorks América Latina, 2023).



*Fig. 24 RadioButton en el entorno de GUI de MATLAB*

## 2.24 StaticText en MATLAB

Un StaticText, o etiqueta, es un elemento de interfaz de usuario utilizado para mostrar texto descriptivo o información. Estos son estáticos y no se pueden modificar por el usuario. Comúnmente proporcionan instrucciones, ya que son útiles para mejorar la comprensión y la usabilidad de la interfaz de usuario (Etiquetas y Anotaciones - MATLAB & Simulink - MathWorks América Latina, 2023).



*Fig. 25 StaticText en el entorno de GUI de MATLAB*

## 2.25 Normatividad

Las normas nacionales e internacionales juegan un papel crucial en el ámbito de los transformadores ya que establecen los lineamientos que se deben seguir para la conexión, instalación y operación de estos equipos, asegurando un funcionamiento seguro y eficiente.

En México, las normas de conexión para transformaciones de tipo seco de baja potencia están registradas bajo la Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEDE-2010, que establece requisitos de seguridad y eficiencia energética para transformadores de distribución. Esta norma garantiza que los transformadores cumplan con los estándares necesarios para su correcto funcionamiento y seguridad en el país (NOM-002-SEDE-2010).

Las normas de conexión para transformadores de tipo seco de baja potencia suelen regirse por estándares específicos como, por ejemplo, en el documento de la EPM, o energías públicas de Medellín, se menciona que tienen que estar normalizados los valores de potencia nominal de los transformadores trifásicos de distribución que serán instalados en sus sistemas. Además, es importante asegurar una buena conexión entre las borneras y puentes, así como una buena sugestión de cualquier parte móvil del transformador como se indica en el manual de instrucciones para transformadores de distribución (Selección e instalación de transformadores secos, 2017). También es fundamental seguir las normas y estándares aplicables como los establecidos por la American National Standards

Institute (ANSI) para garantizar la correcta instalación operación y mantenimiento de los transformadores de tipo seco (Instrucciones para Transformadores de Distribución Tipo Seco, 1999).

Por otro lado, considerando que una sección importante de este proyecto es el desarrollo de software, se deben considerar también las normas de estructuración de software como en este caso la norma SO/IEC 25000, también conocida como "SQuaRE" (*Software Product Quality Requirements and Evaluation*), o la ISO/IEC 12207. Esta es un estándar internacional que se centra en la calidad del producto de software. Esta norma proporciona un marco de trabajo para la evaluación sistemática de la calidad del software y establece una serie de características de calidad que pueden ser evaluadas (Martínez, 2023). De igual manera, las normas ISO 90003 se centran en asegurar la calidad del software a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la concepción y el diseño hasta la entrega y el soporte al cliente. Esto implica la identificación y gestión de riesgos específicos del desarrollo de software, la documentación adecuada y la mejora continua de los procesos (Martínez, 2023).

## **2.26 Normativa y equipo de seguridad**

La normativa vigente relacionada con la seguridad en el entorno laboral y educativo, así como las medidas y equipos necesarios para garantizar un ambiente de trabajo seguro y protegido.

Abordando las regulaciones pertinentes que deben cumplirse en el lugar de trabajo, junto con las directrices establecidas para el uso adecuado de los equipos de protección personal y colectiva. Además, se proporciona información detallada sobre el equipo de seguridad requerido. La comprensión y aplicación de estas normativas y el uso adecuado del equipo de seguridad son fundamentales para mitigar riesgos.

Por ello basándose en el reglamento general de laboratorios de ingeniería electromecánica (M. en C. Manuel García Quijada [jefe de laboratorios] & Dr. Luis Alberto Morales Hernández [Coordinador de Ingeniería Electromecánica], 2021), que es aplicable para alumnos, docentes y visitantes en general, se toman las siguientes normas:

1. Los usuarios podrán usar solamente la maquinaria siempre bajo la vigilancia de los laboratoristas y/o profesores. Otro tipo de uso requerirá de previa autorización del jefe de laboratorios siempre y cuando se haya recibido cursos de capacitación específicos.

2. Como requisitos de acceso en las áreas de Máquinas – Herramienta, CNC y Robótica, Metalografía, Soldadura, Mecánica Automotriz y Carpintería, se deberán observar las siguientes medidas:

- Sujetar el cabello largo.
- Vestir camisola, bata u overol, preferentemente en mezclilla, dependiendo la actividad.
- Vestir pantalón largo, preferentemente mezclilla.
- Usar exclusivamente zapatos cerrados de piel.
- Guardar pulseras, anillos, collares, aretes largos, y demás objetos que puedan causar riesgo de lesiones.
- No jugar ni correr por los pasillos de los laboratorios.

3. El acceso a los laboratorios será exclusivamente para realizar actividades académicas, por lo que está prohibido realizar cualquier otra actividad.

7. El uso de la maquinaria y equipo es exclusivo para actividades académicas; es indispensable acatar las indicaciones y restricciones de uso y seguridad correspondientes.

8. Para hacer uso de la maquinaria y equipo, cada usuario deberá usar equipo de seguridad personal obligatoria, el cual se compone de guantes, peto, gafas y/o mascarilla dependiendo la actividad a realizar. Además, en el caso de los alumnos, es obligatorio tener vigente su seguro social facultativo.

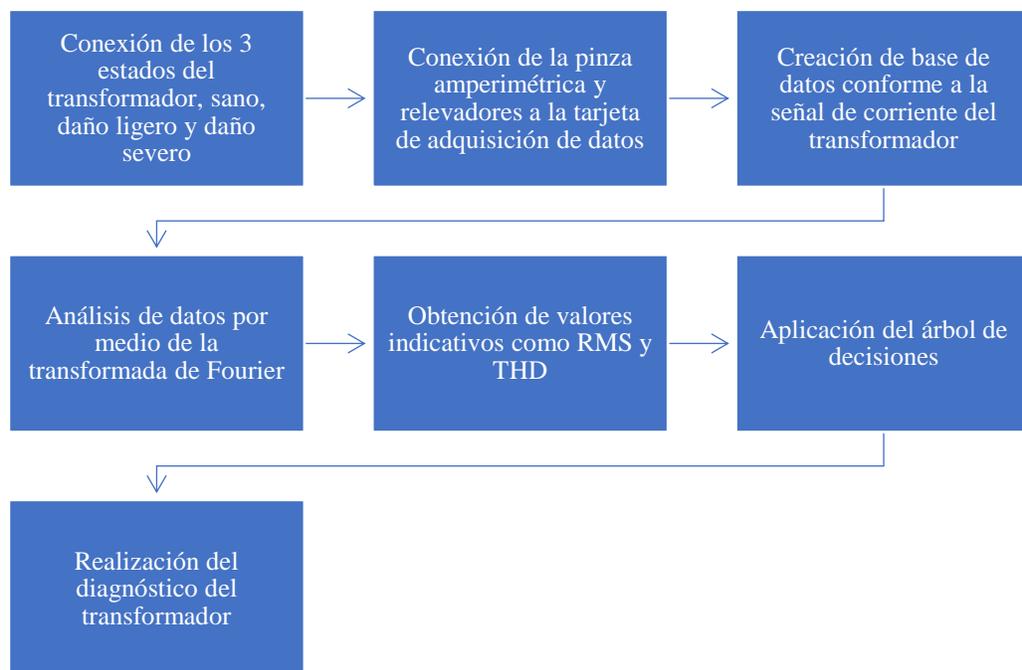
9. Cada usuario será responsable del uso de la maquinaria y equipo que está utilizando en su funcionamiento y limpieza. En caso de detectar anomalías en el funcionamiento de estas, se deberá dar aviso inmediatamente al laboratorista en turno.

# Capítulo 3

# Metodología

### 3.1 Descripción general de la metodología

La detección y el diagnóstico en las fallas de transformadores monofásicos requiere de un enfoque sistemático y preciso para poder monitorear en línea al transformador bajo diferentes condiciones de carga eléctrica. En esta sección se presenta el diagrama metodológico (Fig. 27) y experimental (Fig. 28) propuestos para llevar a cabo el presente proyecto.



*Fig. 26 Fases de la metodología del proyecto.*

La metodología se divide en siete pasos claramente definidos. Se comienza con la configuración de los 3 estados del transformador: estado sano, daño ligero y daño severo. Posteriormente se realiza la conexión de una pinza perimétrica y los relevadores de estado sólido junto a la tarjeta de adquisición de datos, la NI USB 6002, para recopilar mediciones de corriente en tiempo real. Aquí se usará software Matlab para el control, adquisición y análisis de los datos. Teniendo esta instrumentación, se continúa con la creación de una base de datos estructurada que almacene los datos de corriente recopilados y etiquetados según el estado del transformador en el momento de la medición, recordando que se tendrán 3 estados para el transformador y cuatro condiciones de carga, así como 20 mediciones diferentes por configuración.

Una vez creada la base de datos, se procederá con un análisis de datos utilizando la transformada de Fourier para así obtener las componentes de frecuencia de las señales de corriente; además, se calculan los indicadores de valor eficaz RMS y la distorsión armónica total THD con el objetivo de poder caracterizar la forma de onda de corriente según el estado y la condición de carga del transformador, teniendo como resultado el diagnóstico del transformador de forma automática mediante un árbol de decisiones.

### 3.1.1 Circuito de conexión experimental

Para el proceso experimental que se llevará a cabo, se planea el circuito mostrado en la Fig. 28:

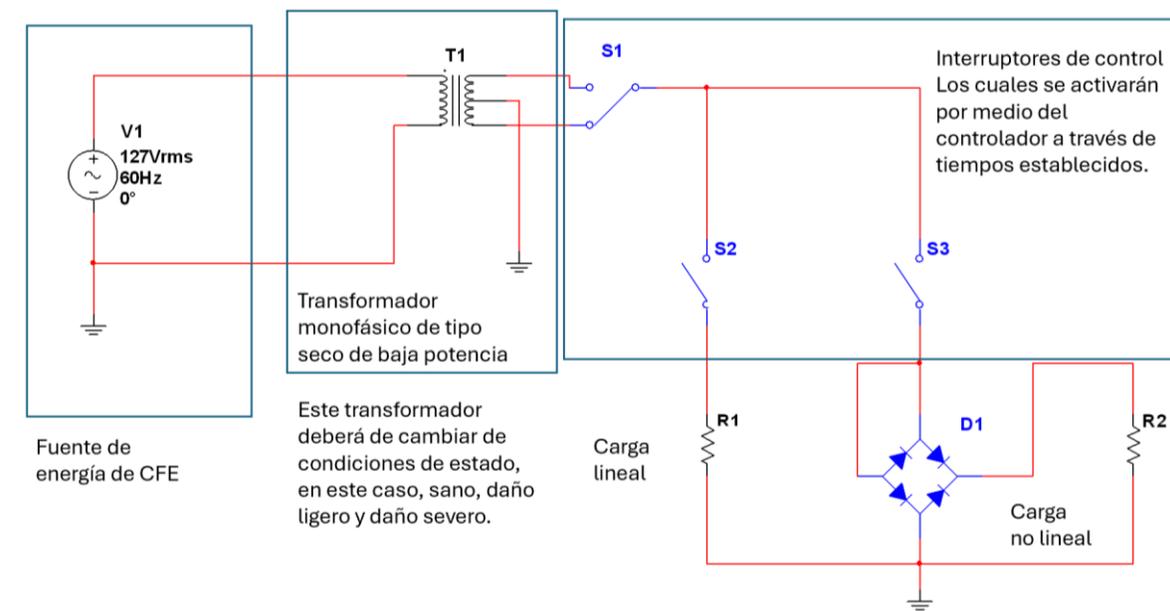


Fig. 27 Diseño de la conexión eléctrica del proyecto (autoría propia).

Una vez que se haya validado la conexión previa en simulación, observando el diagrama de conexión, se nota el uso de un transformador, el cual este tiene varias salidas, lo que hace referencia a los bornes que se usaran posteriormente para el cambio de estados del transformador por lo que se pasará a la integración de los elementos reales tal y como se muestra en el diagrama de la Fig. 29. Ahí se observan dos partes principales: la adquisición y el control, así como la alimentación principal proveniente de CFE.

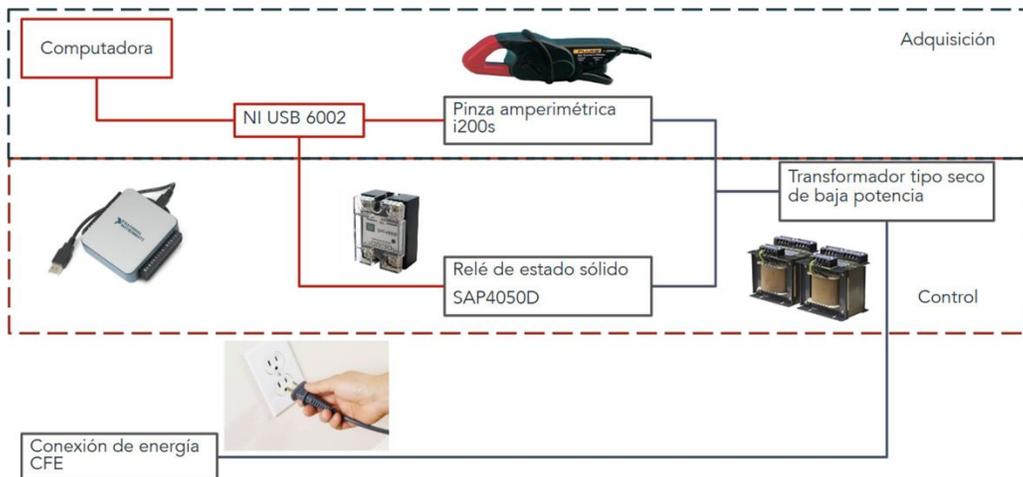


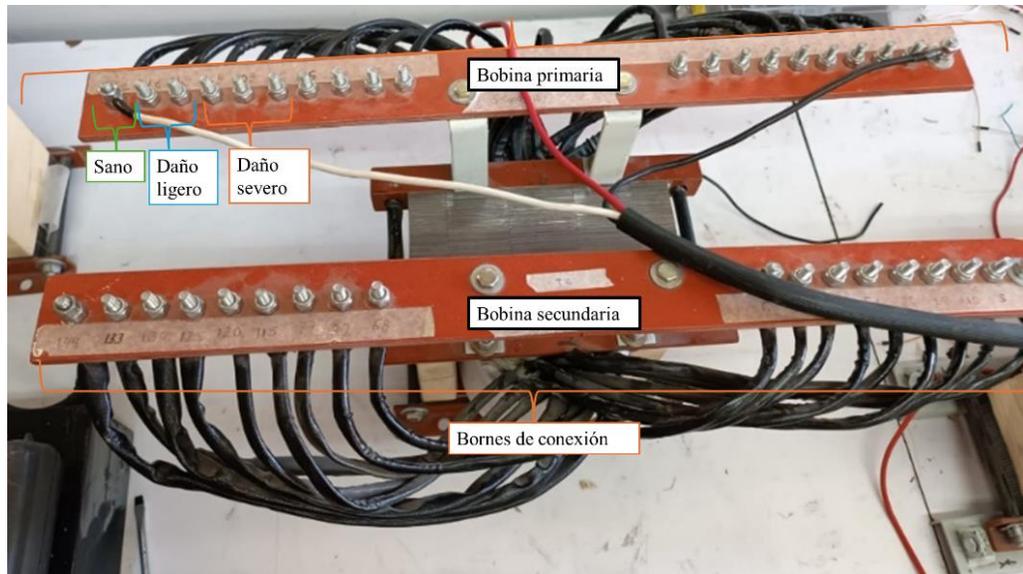
Fig. 28 División del proceso de conexión de control y de adquisición del esquema general del proyecto (autoría propia).

### 3.2.1 Conexión de los 3 estados del transformador, sano, daño ligero y daño severo

La conexión del transformador se realiza a través de un receptáculo sencillo, lo que implica un cable de alimentación para la interconexión de los bornes, haciendo uso de terminales eléctricas apropiadas. Durante este proceso, se seleccionan cuidadosamente los bornes de conexión de acuerdo con los criterios establecidos por los límites de la conexión eléctrica (Fig. 30).

Donde establecemos que los bornes de conexión, esto siendo que el estado sano es cuando no se encuentra un problema de funcionamiento, y que no presenta un estado de sobre corriente. El estado de daño ligero se establece cuando se tiene un consumo de corriente mayor debido al tipo de conexión, y cuando puede presentar un problema de funcionamiento no tan grave. El estado de daño severo se establece cuando el consumo de corriente es mucho mayor al uso de algún tipo de carga y este pueda presentar un problema de funcionamiento mayor, que pueda presentar una catástrofe en el sistema eléctrico.

Esta metodología garantiza una conexión segura y eficiente del transformador, asegurando su correcto funcionamiento dentro del sistema eléctrico.

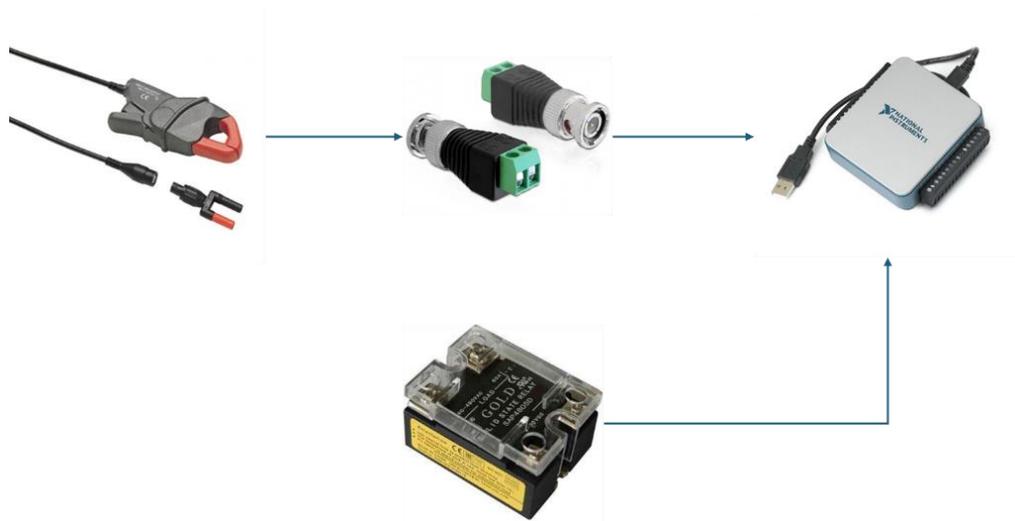


*Fig. 29 Estados de conexión del transformador.*

### **3.2.2 Conexión de la pinza amperimétrica y relevadores a la tarjeta de adquisición de datos**

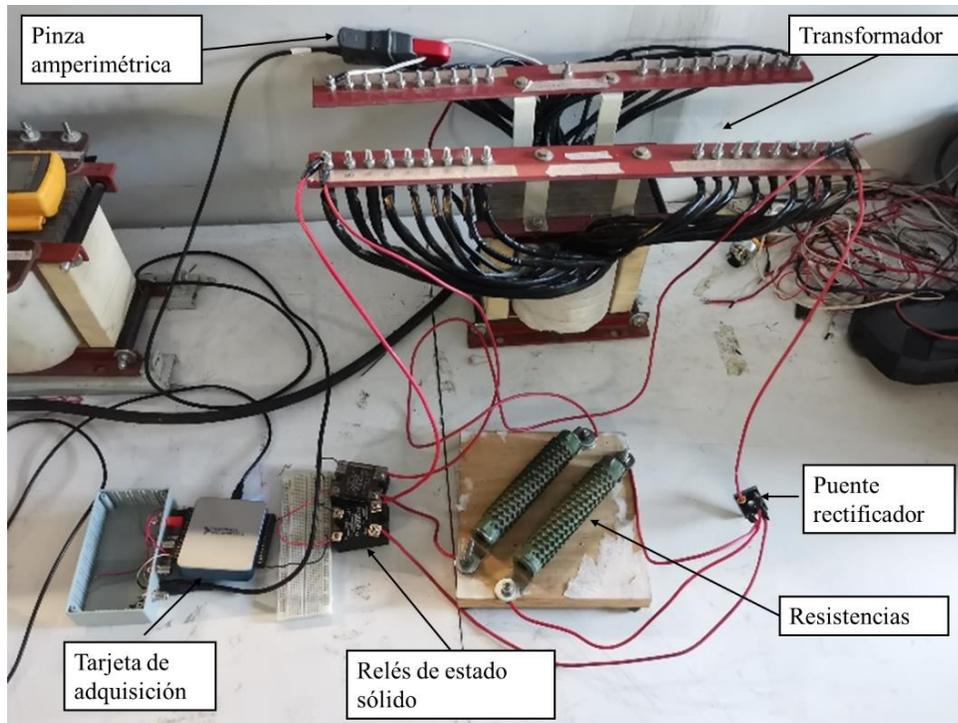
La conexión de la pinza amperimétrica se lleva a cabo mediante un conector BNC y un adaptador BNC hembra con salida de 2 cables, los cuales son las salidas de voltaje de la lectura de la pinza. Estos cables con los encargados de conectar la pinza amperimétrica a la sección de entradas analógicas de la tarjeta de adquisición NI USB 6002, asegurando la captura correcta de datos. Por otro lado, los relés de estado sólido se conectan en la sección de salidas digitales de la tarjeta, lo que permite un control preciso del sistema de activación

(Fig. 31). Por lo que estas conexiones se deben de realizar en las entradas y salidas designadas de la tarjeta para garantizar un funcionamiento óptimo del sistema.



*Fig. 30 Conexión de pinza amperimétrica y relés a la tarjeta de adquisición (autoría propia).*

Lo anterior implica que la conexión completa del diseño previo de la conexión eléctrica del proyecto (Fig. 32) sea tal que los elementos restantes sean: las cargas, siendo una carga lineal y una carga no lineal. Estas cargas serán resistencias eléctricas de alta potencia y un puente rectificador. Toda esta operación de conexión se hizo implementando las normas del reglamento general de los laboratorios de ingeniería electromecánica y automotriz (M. en C. Manuel García Quijada [jefe de laboratorios] & Dr. Luis Alberto Morales Hernández [Coordinador de Ingeniería Electromecánica], 2021), como el uso de la vestimenta adecuada y equipo de seguridad, como el calzado de seguridad y guantes de trabajo.

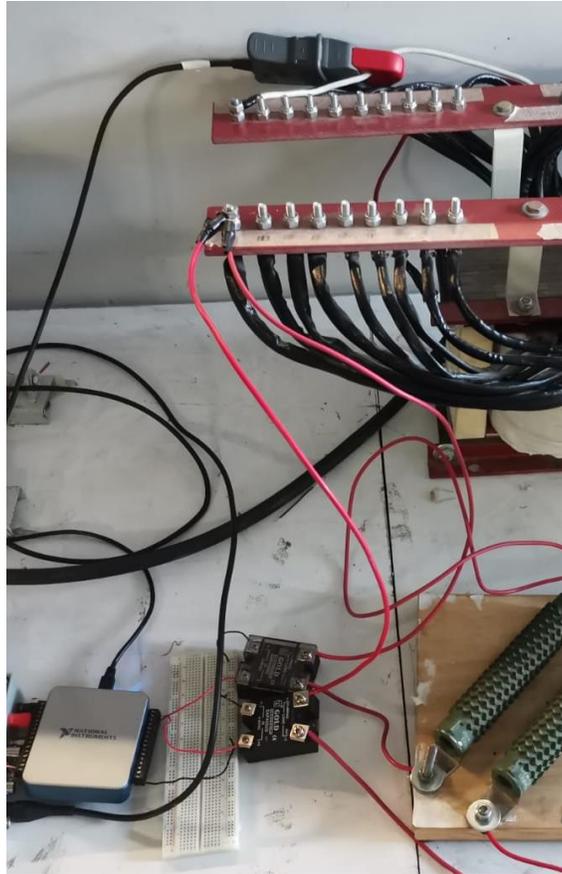


*Fig. 31 Conexión eléctrica completa del proyecto (autoría propia).*

Estas cargas van a ayudar a observar los fenómenos de corriente que sufre el transformador durante su proceso de funcionamiento en un escenario real.

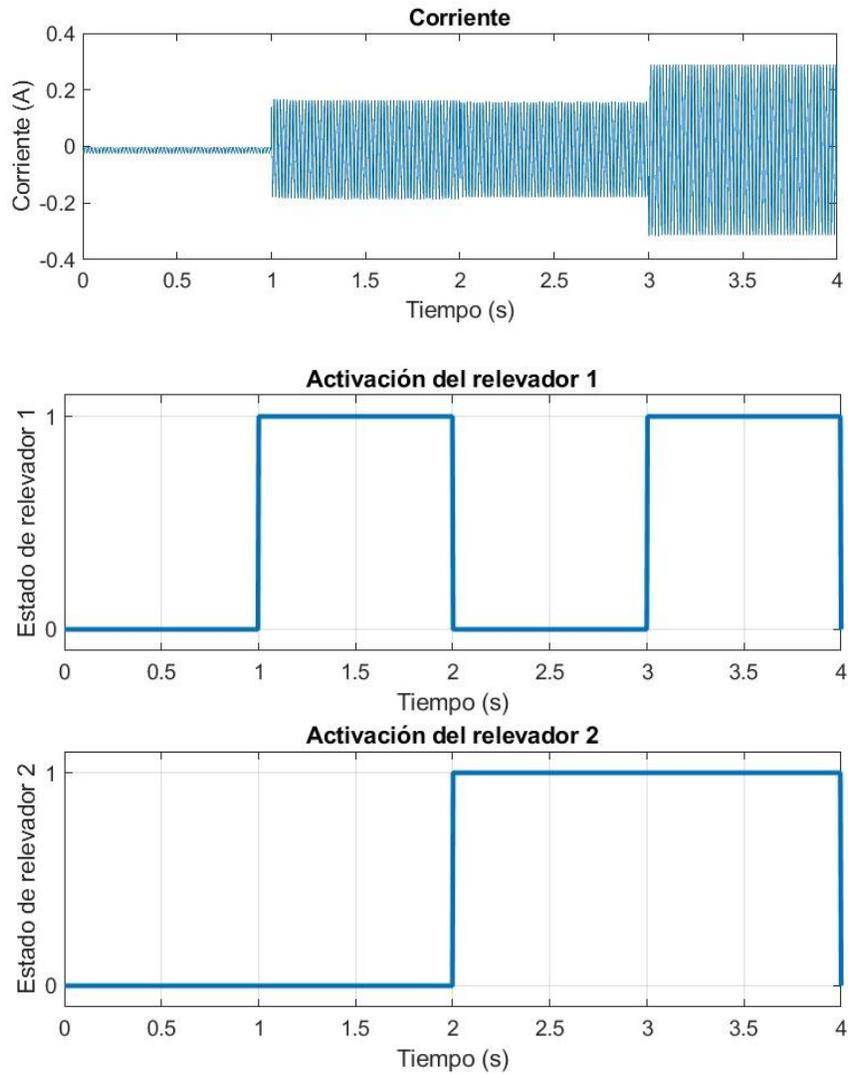
### **3.2.3 Creación de base de datos conforme a la señal de corriente del transformador**

La creación de la base de datos se llevó a cabo en concordancia con las señales de corriente del transformador, utilizando para ello la pinza amperimétrica conectada al sistema de adquisición de datos (Fig. 33). Este proceso implicó la captura y registro continuo de las variaciones de corriente a lo largo del tiempo, mediante la pinza amperimétrica configurada para medir la corriente en el devanado del transformador.



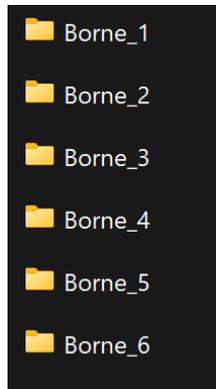
*Fig. 32 Conexión para la adquisición de datos del transformador por el cable de alimentación del transformador (autoría propia).*

Los datos se adquieren a partir del software de MATLAB, usando un código de adquisición. Además de que se establece un rango de tiempo de 4 segundos por cada prueba; sin embargo, esta prueba se divide en secciones de 1 segundo, esto para cambiar el estado de carga en el que se encuentra el transformador por medio del control de los relés. Al hacer esto, la corriente que se obtiene de la pinza amperimétrica se puede observar de forma gráfica en la Fig. 34. Es importante mencionar que la adquisición solo se hace de un 1 segundo por estado ya que son datos suficientes para el cálculo de los indicadores y también se busca no dañar el transformador.



*Fig. 33 Ejemplo gráfico de las pruebas realizadas al transformador y tiempos de activación de los relés para cambio de cargas (autoría propia).*

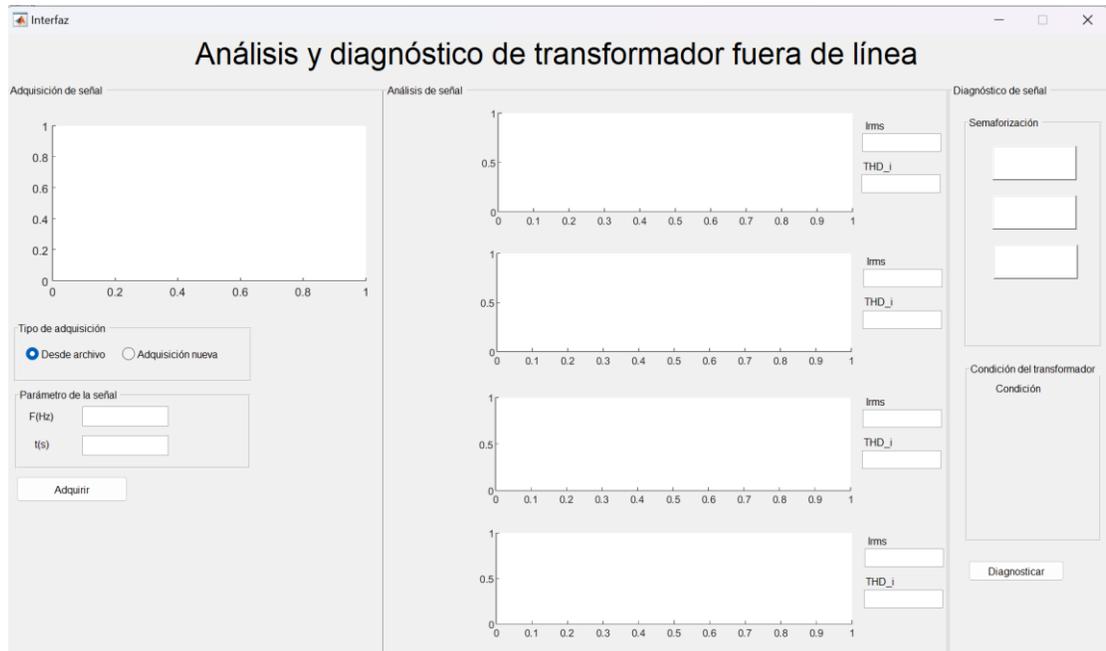
Los datos obtenidos se procesaron y almacenaron en una base de datos diseñada específicamente para este propósito. Cada lectura de corriente fue registrada con su respectivo tiempo, permitiendo así una secuenciación temporal precisa de los registros (Fig. 35). Esta base de datos proporciona un conjunto completo y detallado de información sobre la corriente del transformador, facilitando así el análisis posterior y la identificación de patrones o anomalías en su funcionamiento.



*Fig. 34 Base de datos recopilados de las pruebas del transformador (autoría propia).*

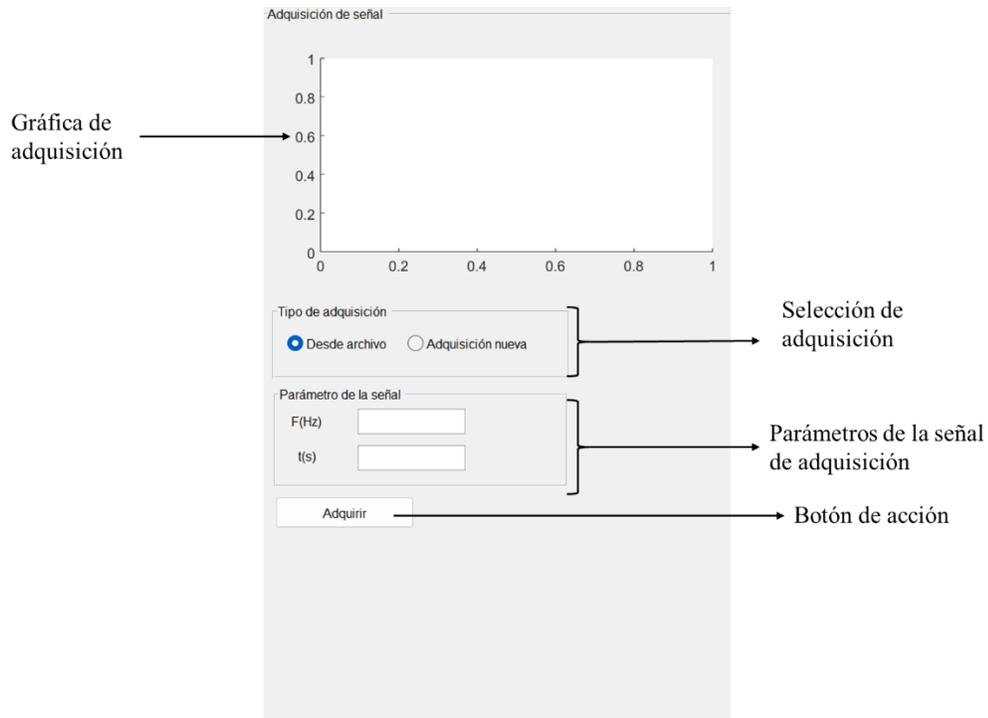
La creación de la interfaz gráfica al igual que la base de datos constituyen en un componente fundamental del proyecto, sirviendo como su exposición principal. Desarrollada mediante el entorno de MATLAB y construida en una interfaz gráfica de usuario (GUI), esta herramienta integra la adquisición y análisis de datos, permitiendo el diagnóstico, de las condiciones del transformador.

La interfaz ofrecerá una presentación visual precisa y detallada de los resultados obtenidos del proceso de análisis de la señal eléctrica, facilitando así una comprensión exhaustiva de su estado de operación. Este análisis se basará en una base de datos previamente creada, proporcionando un sólido fundamentado para la evaluación de la información recopilada.



*Fig. 35 Estructura de la interfaz gráfica.*

La estructura de la interfaz gráfica se fundamenta en tres secciones principales. La primera sección consiste en la selección del “tipo de adquisición” (Fig. 37), donde se prioriza la realización de un análisis desde cero o la revisión de un archivo con el formato adecuado previamente generado por el programa. Además, se permite la selección de la frecuencia y el tiempo de adquisición deseados.



*Fig. 36 Estructura de la sección de adquisición.*

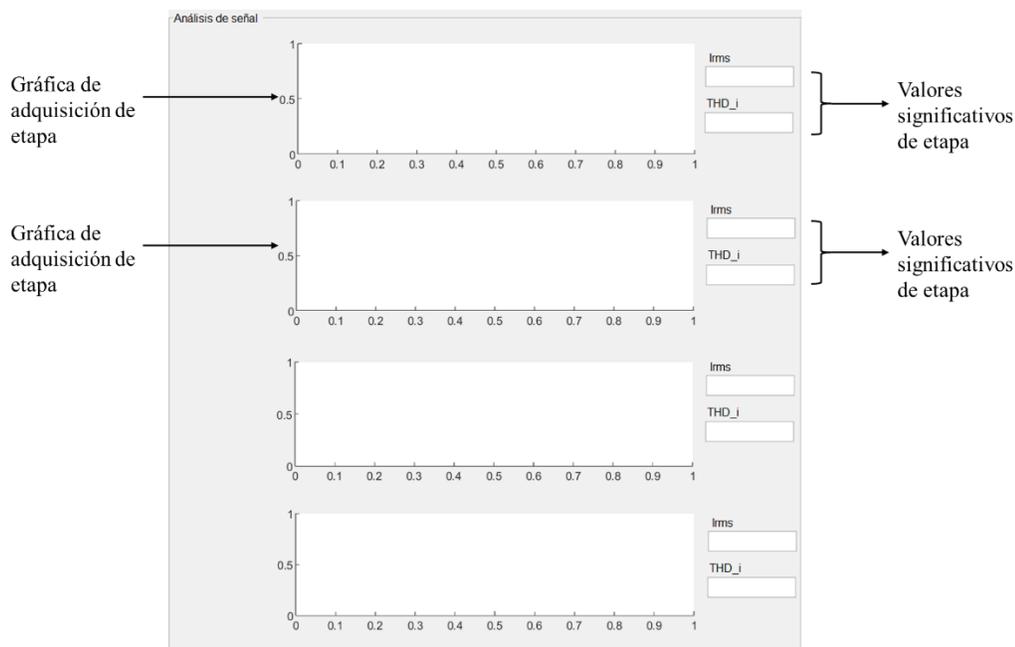
La posibilidad de ajustar tanto la frecuencia de muestreo como el intervalo de tiempo para el control brinda al usuario una flexibilidad significativa, permitiendo la adaptación del proceso de adquisición de datos a diversas situaciones y necesidades específicas. Esta capacidad de personalización garantiza que los resultados obtenidos sean adecuados, independientemente de las condiciones particulares del entorno o del sistema bajo análisis.

Cada prueba realizada con la interfaz genera un archivo en formato CSV, el cual es ampliamente compatible con una variedad de programa de análisis de datos. Esta versatilidad asegura que los registros de cada prueba puedan ser fácilmente accesibles y manipulables en diferentes entornos de análisis. Además, el mismo formato de archivo se utiliza para cargar datos a la interfaz, garantizando una integración fluida y coherente entre la adquisición y el análisis de datos en el proceso de evaluación del transformador.

Adicionalmente, la inclusión de una representación gráfica de la señal de corriente adquirida resulta fundamental, ya que proporciona una visualización clara y concisa de los resultados de la prueba. Esta representación gráfica facilita la interpretación de los datos

obtenidos, permitiendo una rápida identificación de patrones, tendencias o anomalías en la señal eléctrica analizada.

Por otro lado, la segunda estructura del proceso es en torno a la generación de cuatro gráficos, los cuales examinan minuciosamente la respuesta del transformador ante diferentes condiciones de carga durante la prueba. Estas condiciones incluyen "sin carga", "carga lineal", "carga no lineal" y una combinación de ambas. Cada gráfico proporciona una representación visual detallada de la corriente eléctrica experimental por el transformador en cada una de estas situaciones, permitiendo una observación clara de los cambios en la señal eléctrica. Posteriormente, se realizarán cálculos basados en los datos recopilados para determinar valores significativos, como el valor eficaz (RMS) de la corriente y el valor de la distorsión armónica total (THD). Estos valores proporcionarán información crucial sobre la calidad y estabilidad del suministro eléctrico durante cada etapa de carga, lo que contribuirá a una evaluación completa y precisa del rendimiento del transformador.

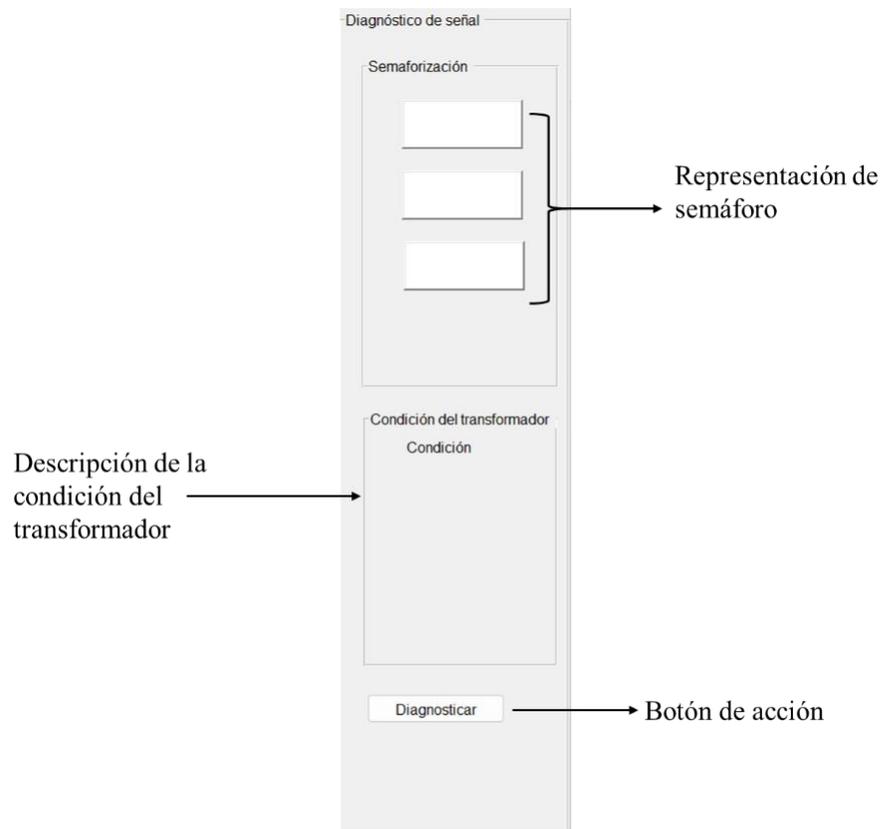


*Fig. 37 Estructura de la sección de análisis individual de carga.*

En la tercera estructura de interfaz, se implementa un método de señalización visual mediante "PushButtons". Estos botones cambian de color y se asignan dinámicamente en función de las condiciones encontradas durante el diagnóstico del transformador. El semáforo resultante proporciona una representación visual instantánea del estado del transformador,

permitiendo al usuario interpretar fácilmente la situación actual. Los colores asignados a los botones indican de forma clara y comprensible si el transformador se encuentra en condiciones óptimas, necesita una atención especial o presenta un fallo que requiere atención. Esta función de señalización visual no sólo agiliza el proceso de diagnóstico, sino que también facilita la comprensión del estado del transformador de una forma más intuitiva y directa que mediante la comprobación de datos numéricos o gráficos complejos.

Al final de esta estructura hay un botón de acción que controla todos los aspectos de la segunda y tercera estructuras de interfaz. Este botón permite una gestión completa y eficaz del proceso de adquisición, análisis y diagnóstico de las pruebas del transformador, proporcionando al usuario una herramienta completa y funcional para evaluar los equipos eléctricos.



*Fig. 38 Tercer estructura de la interfaz, sistema de diagnóstico.*

# **Capítulo 4**

# **Experimentación y**

# **resultados**

#### 4.1.1 Análisis de datos por medio de la transformada de Fourier y obtención de valores indicativos de RMS y THD

El uso de indicadores eléctricos como el valor RMS y la THD ayudan a caracterizar una señal eléctrica, ya sea en amplitud o contenido armónico.

Antes de pasar a la THD es necesario convertir la señal de corriente del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, así se podrá observar el espectro de frecuencia, su contenido armónico y, con este, se podrá calcular la THD. En este sentido, el análisis de datos mediante la transformada de Fourier desempeña un papel crucial en la evaluación de señales eléctricas, incluida la corriente suministrada por un transformador. Esta técnica resulta fundamental para comprender la calidad de la señal, el contenido armónico y, principalmente, la firma espectral característica. Esta firma será diferente si las condiciones de operación del transformador cambian; por lo tanto, se podrán detectar posibles irregularidades o anomalías. Primeramente, para la puesta experimental mostrada en el capítulo anterior, la Fig. 40 muestra el espectro promedio de las señales de corriente en condición sano. En esta figura, solo es importante corroborar que la componente fundamental aparece en los 60 Hz, tal y como se aprecia por el pico en azul, el cual tiene aproximadamente una amplitud de 0.085.

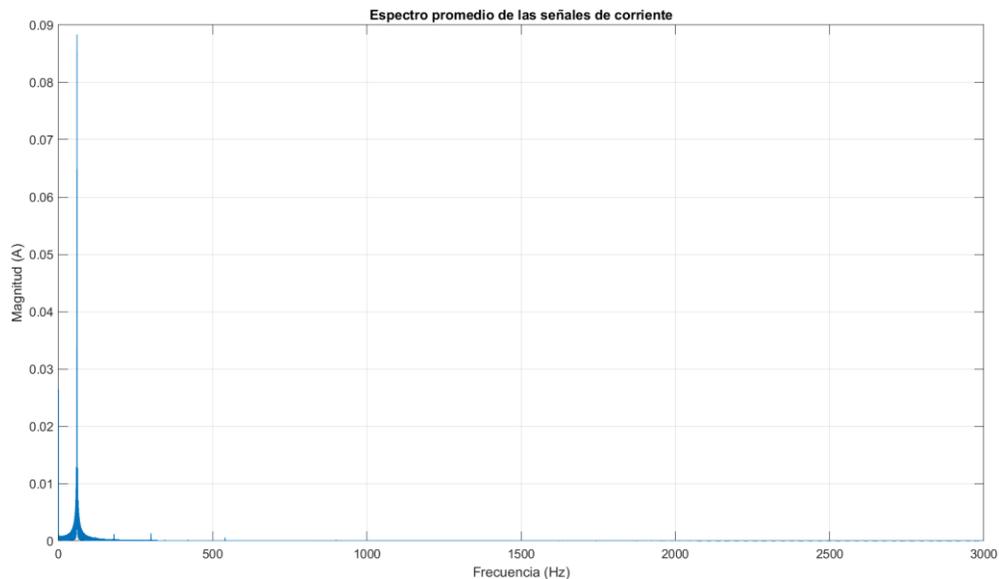
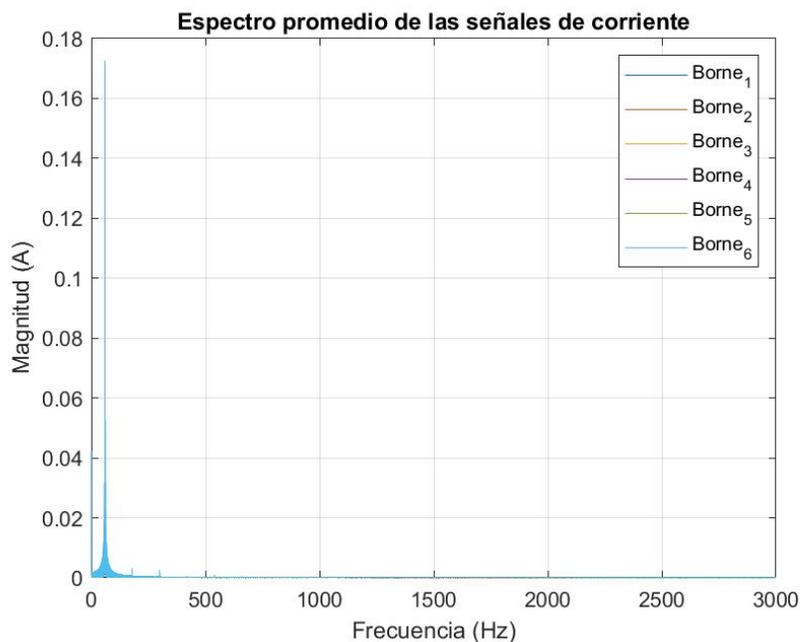
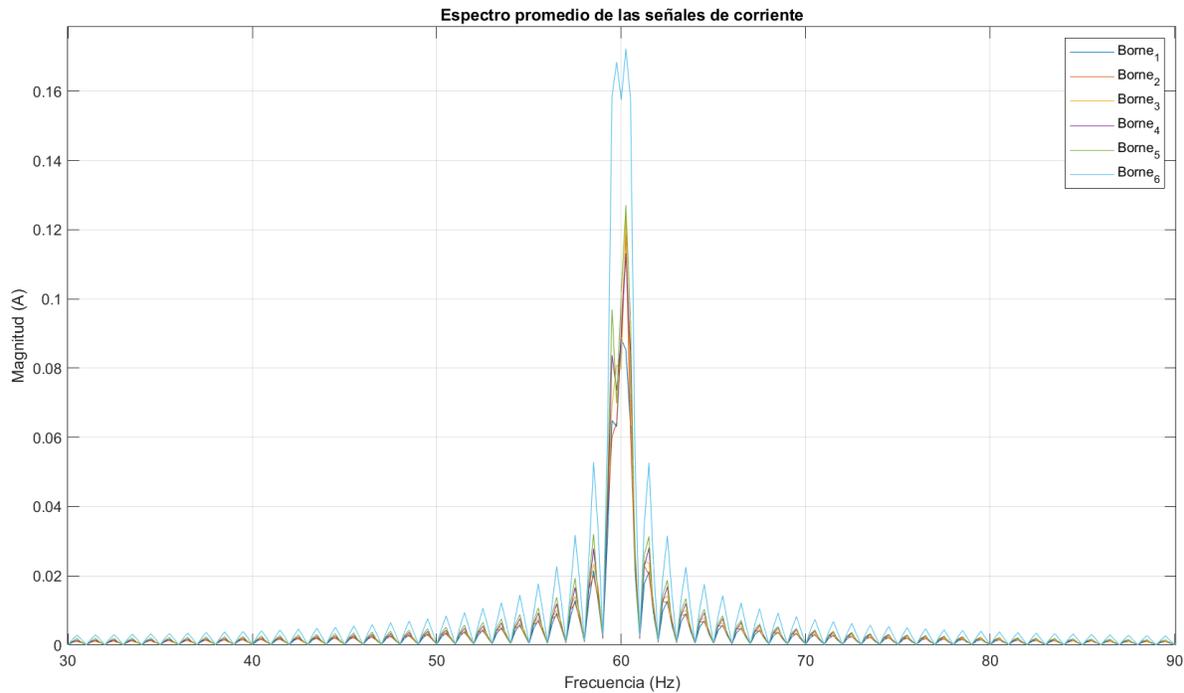


Fig. 39 Gráfica de la transformada de Fourier en estado sano

Ahora, la Fig. 41 muestra un gráfico de los diferentes espectros para los diferentes bornes, recordando que un borne mayor representa una severidad mayor. A simple vista, parece que los espectros no cambian. Sin embargo, como se puede apreciar en un zoom de la componente fundamental en la Fig. 42, sí se alcanzan a percibir ligeros cambios, los cuales pueden ser asociados a la severidad de falla en el transformador.



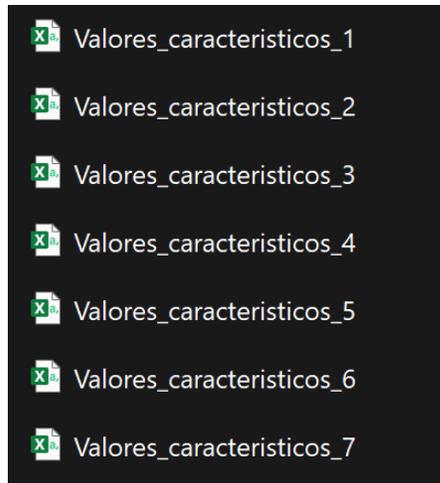
*Fig. 40 Espectro promedio de la base de datos.*



*Fig. 41 Diferencia de magnitudes de los espectros de la base de datos de corriente.*

En este contexto, el uso de herramientas como el valor eficaz (RMS) y la distorsión armónica total (THD) resulta invaluable, ya que podrán cuantificar estos cambios y así diferenciar de forma automática las diferentes condiciones de operación del transformador.

Por consiguiente, durante las experimentaciones, se aplica el cálculo de THD y RMS a los valores de corriente obtenidos. Estos datos, junto con los valores previamente mencionados, se registran y almacenan para enriquecer la base de datos, permitiendo un análisis exhaustivo de la señal y una evaluación más precisa del rendimiento del transformador.



*Fig. 42 Obtención de los valores de THD y RMS de la base de datos (autoría propia).*

No obstante, la lectura de datos de todas las pruebas almacenadas en formato tabular puede complicar el proceso de análisis. Por ello, se implementa la creación de gráficos que representan estos valores característicos para cada prueba realizada, seguido de un cálculo del promedio de los datos registrados y mostrados en la Fig. 43. Esta visualización permite una comprensión más clara de las tendencias y variaciones en los resultados, facilitando así la interpretación y la toma de decisiones informadas en cuanto al estado y rendimiento del transformador.

La Fig. 44 muestra los resultados de THD considerando el primer borne (sano), pero haciendo énfasis en que son los resultados de las 20 pruebas que se realizaron por condición; es decir, la gráfica corresponde al valor promedio. Aquí también es importante mencionar que la desviación estándar es baja. Como se observa en la gráfica, los valores de THD son mayores para la condición sin carga y de valores bajos y similares en el resto de las condiciones. Por lo tanto, la gráfica exhibe un comportamiento que, a simple vista, puede parecer inusual. Sin embargo, este comportamiento puede entenderse mejor al considerar el cálculo de la THD depende en el denominador del valor de la componente fundamental. Por lo tanto, en la condición sin carga, la componente fundamental es muy pequeña, haciendo que el resultado de la división implícita en la THD aumente; caso contrario, cuando ya se tiene una condición de carga, la componente fundamental aumenta, haciendo que su relación con respecto al contenido armónico disminuya.

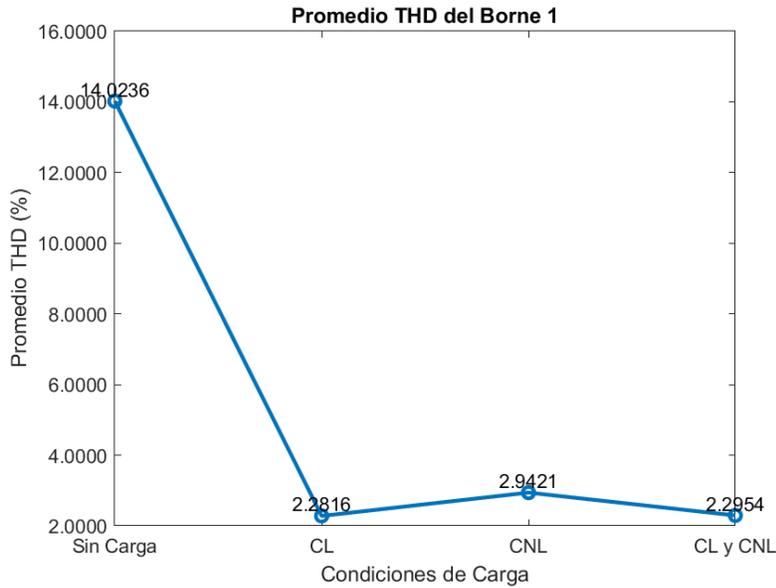


Fig. 43 Gráfica de promedio de THD por prueba en un borne (autoría propia).

Para poder comparar el comportamiento de los valores de THD para diferentes severidades, se presenta la Fig. 45. En ella, se muestran los valores para los 6 bornes. Como se observa, hay ligeras variaciones entre condiciones, las cuales podrían permitir realizar un esquema de diferenciación basados en sus valores numéricos.

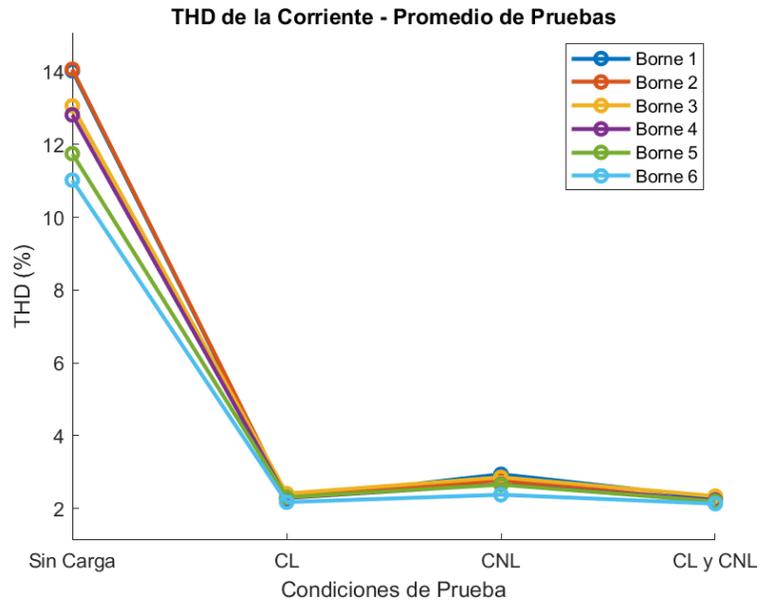


Fig. 44 Gráfica del comportamiento de la THD en los diferentes bornes del transformador (autoría propia).

La Fig. 46 muestra en comparativa los resultados de THD y de RMS. Como se puede apreciar, aunque la THD cambia, la mayor variabilidad se observa en los valores de RMS, implicando que los valores RMS pueden ser una mejor herramienta para la determinación de la severidad del daño.

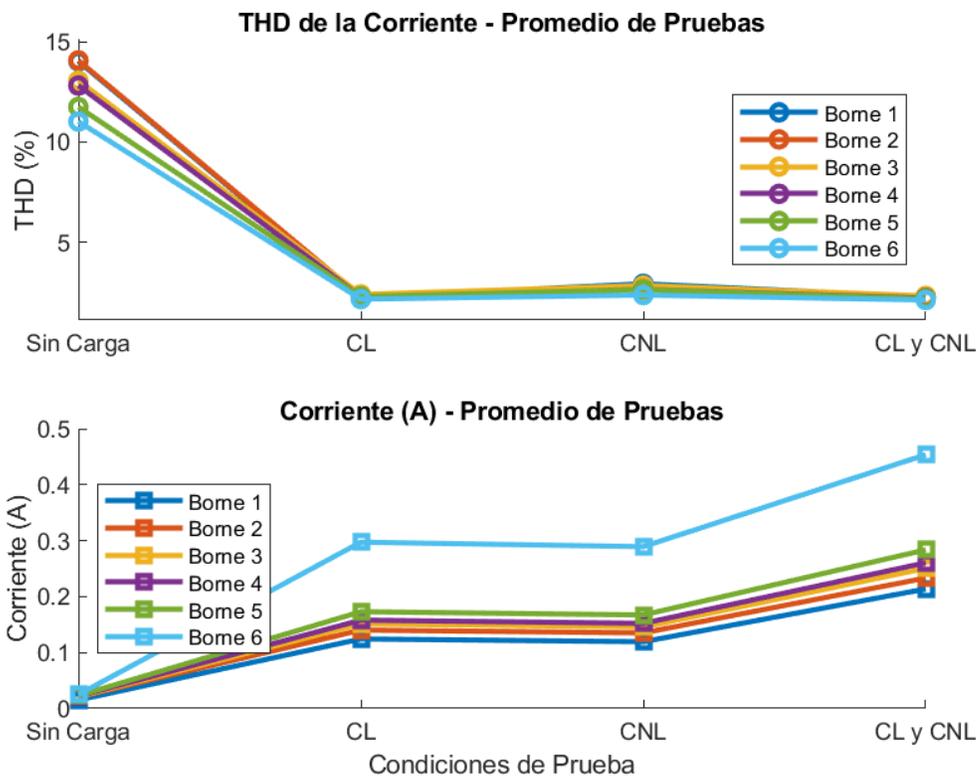


Fig. 45 Comparativa de los valores de THD y RMS de la corriente para catalogar los estados del transformador.

Para poder establecer la severidad del daño, en este trabajo se ha propuesto agrupar algunas condiciones de bornes, de tal manera que:

- El transformador en estado sano será únicamente cuando el transformador se conecta al primer borne del bobinado, significando que no tiene ningún tipo de problema ya que la bobina primaria no es afectada.

- Por otro lado, las conexiones en los bornes 2 y 3 se catalogan como el estado de daño ligero, donde no hay un problema severo, sin embargo, los consumos de corriente son más altos.
- Por último, las conexiones en los bornes 4, 5 y 6 se catalogan como los bornes del estado de daño severo, ya que representan una condición mayor de reducción de bobina, implicando un cortocircuito mayor.

A partir de esta clasificación y de los datos obtenidos en las gráficas, se busca proponer un método que pueda diferenciar entre condiciones de operación del transformador. Es decir, un método que indique si el transformador está sano, con daño ligero o con daño severo.

#### **4.1.2 Aplicación del árbol de decisiones**

La implementación de un árbol de decisiones se convierte en un paso fundamental para interpretar los datos recopilados durante las pruebas experimentales. Observando detenidamente los valores obtenidos de la THD y RMS de la corriente de los diferentes bornes del transformador, es posible establecer una diferenciación de las condiciones del transformador a partir de un conjunto de reglas if-else.

Es importante mencionar que ambos indicadores se analizaron para ver cual de ellos podría ser mas efectivo en la clasificación, resultando que el índice de RMS es el que permite una mayor capacidad de diferenciación, lo cual es congruente con los resultados mostrados en la Fig. 46. Por lo tanto, la THD se descarta para el árbol de decisiones, sin dejar de resaltar la importancia del indicador, el entendimiento que da sobre la operación del transformador y sobre todo que, aunque con una menor eficiencia también sería posible una diferenciación automática.

Al observar los criterios establecidos, específicamente al valor RMS de la corriente, se ha definido que un valor por debajo del 0.13A indica un estado de salud sano. Si el RMS de la corriente supera este umbral, pero permanece por debajo del 0.16A, se considera que existe una afectación leve, es decir daño ligero. Sin embargo, cuando los valores de RMS exceden el 0.16A, se determina que hay un daño severo. La Fig. 47 muestra el árbol resultante.

Este enfoque de clasificación se fundamenta en la evaluación del valor de RMS de corriente y la detección de armónicos en cada terminal del transformador, lo que permite evaluar el estado general del equipo y adoptar medidas correctivas apropiadas en consecuencia.

### Árbol de decisiones del proyecto

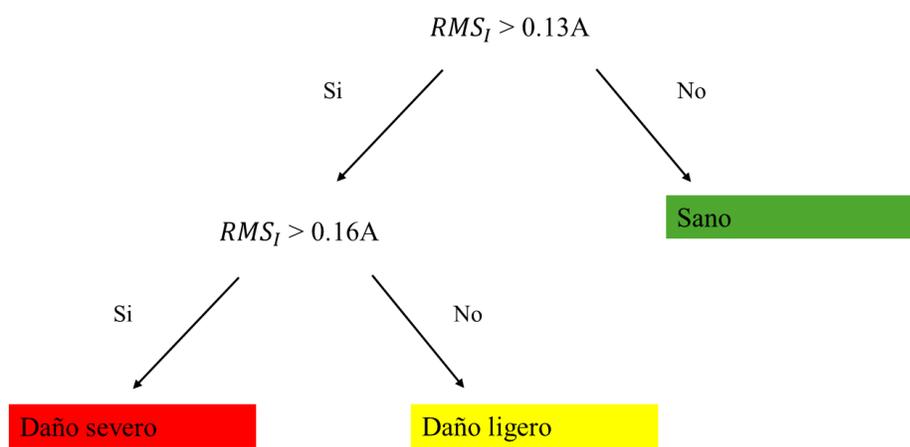


Fig. 46 Árbol de decisiones del proyecto.

#### 4.1.3 Realización del diagnóstico del transformador

La realización de un diagnóstico del transformador implica la interpretación de los datos recopilados durante las pruebas realizadas y su análisis para determinar el estado del transformador.

Este proceso se lleva a cabo mediante la comparación de los valores obtenidos con criterios predefinidos que indican el funcionamiento del equipo bajo diferentes condiciones

de operación. Dado que, en primer lugar, se evalúan los valores de corriente a través de sus valores RMS, estos datos se comparan con los umbrales de referencia establecidos para determinar la condición de operación. Es importante mencionar que estos valores son determinados experimentalmente en un laboratorio de forma controlada, sin embargo, estos datos podrían venir de condiciones reales de operación través de la recopilación y análisis de datos históricos del transformador.

Posteriormente, el uso del árbol de decisiones diseñado previamente ayuda a determinar el estado del transformador de forma automática en función de los resultados obtenidos. El árbol proporciona un marco estructurado para la interpretación de los datos, permitiendo clasificar el estado del transformador en categorías como sano, daño ligero, daño severo, según los criterios establecidos.

Aunque ya no forma parte de los alcances de este trabajo, una vez determinado el estado del transformador, se deberá identificar las posibles causas de los problemas detectados. Esto puede implicar la realización de pruebas adicionales o el análisis de otros factores, como el historial de mantenimiento del equipo o las condiciones operativas a las que se ha sometido.

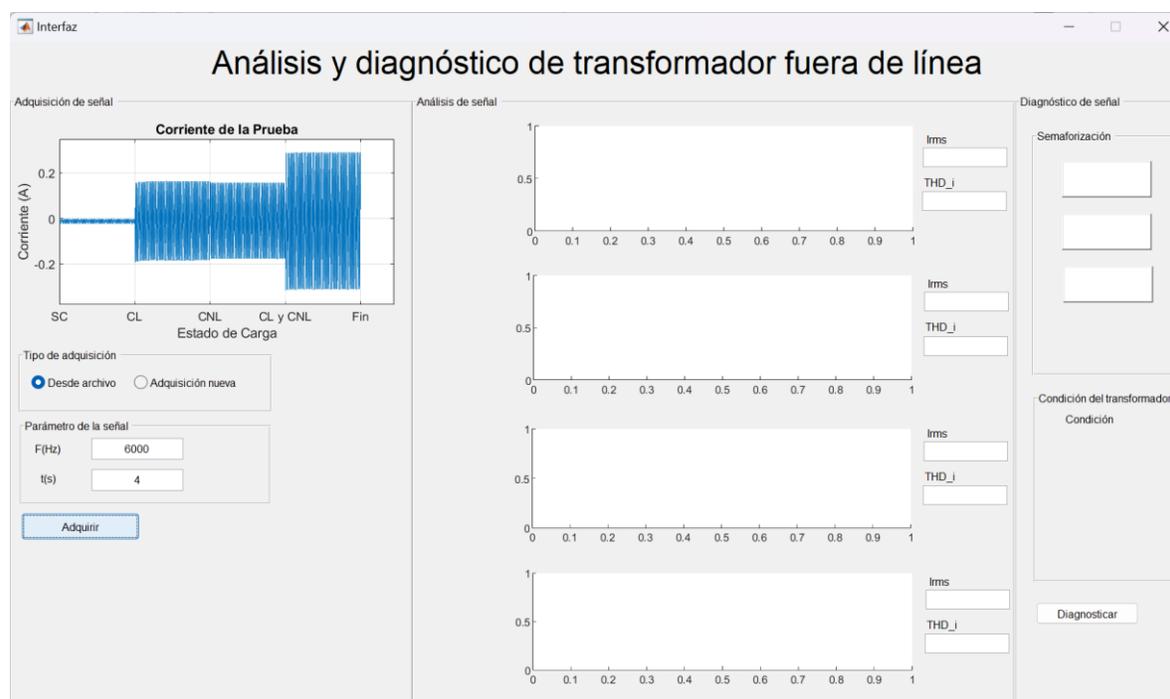
Finalmente elaborar un informe de diagnóstico que resuma los resultados obtenidos, ya que el proceso de diagnóstico del transformador es fundamental para asegurar su operación segura y eficiente, así como para prevenir posibles fallos que puedan afectar a la continuidad del suministro eléctrico y la integridad de los equipos conectados al sistema.

### **4.1.3 Resultados**

La sección de resultados presenta los hallazgos obtenidos tras la ejecución de las pruebas y experimentación relacionadas con el transformador. Los datos recopilados y analizados ofrecen un panorama general del desempeño y comportamiento del sistema en diversas condiciones de operación. Al término de la fase experimental con el transformador, se procedió a realizar una serie de pruebas específicas para evaluar el funcionamiento de la interfaz gráfica desarrollada con fines de monitoreo y control automático del sistema. Se constató que la interfaz gráfica opera de manera correcta y eficiente, proporcionando una

herramienta intuitiva y de fácil manejo para la visualización, análisis y registro de los datos generados durante las pruebas.

Al realizar una prueba en un transformador eléctrico de baja potencia de tipo seco, con las conexiones de prueba establecidas (Fig. 32) y utilizando la interfaz gráfica de usuario desarrollada (Fig. 36), se llevó a cabo la lectura de datos con valores de frecuencia de 6000 Hz y un tiempo de prueba de 4 segundos. Como resultado, se obtuvo la gráfica de la corriente del transformador durante la prueba (Fig. 48).



*Fig. 47 Resultado del funcionamiento de la interfaz.*

El análisis de la corriente proporciona una mejor observación sobre los distintos estados de carga a los que se somete el transformador. Cuando el transformador se encuentra sin carga, se observa una señal que se asemeja a ruido blanco, indicando una corriente mínima en el circuito. Por otro lado, al aplicar una carga lineal al transformador, se registra un aumento significativo en la corriente, como era de esperarse conforme a los principios de la teoría eléctrica. Sin embargo, resulta notable el hecho de que, al cambiar de una carga lineal a una carga no lineal, se observe una disminución en la magnitud de la corriente. Esta

variación podría ser atribuida a factores tales como cambios en la impedancia de la carga o alteraciones en el factor de potencia del sistema.

No obstante, al someter el transformador a la combinación simultánea de ambas cargas, lineal y no lineal, se aprecia un incremento drástico en la corriente, ya que forma directa representa la suma de ambos consumos. El estudio de estas corrientes permitirá identificar los cambios de consumo de corriente asociados a la carga y su interacción con la condición de corto circuito del transformador.

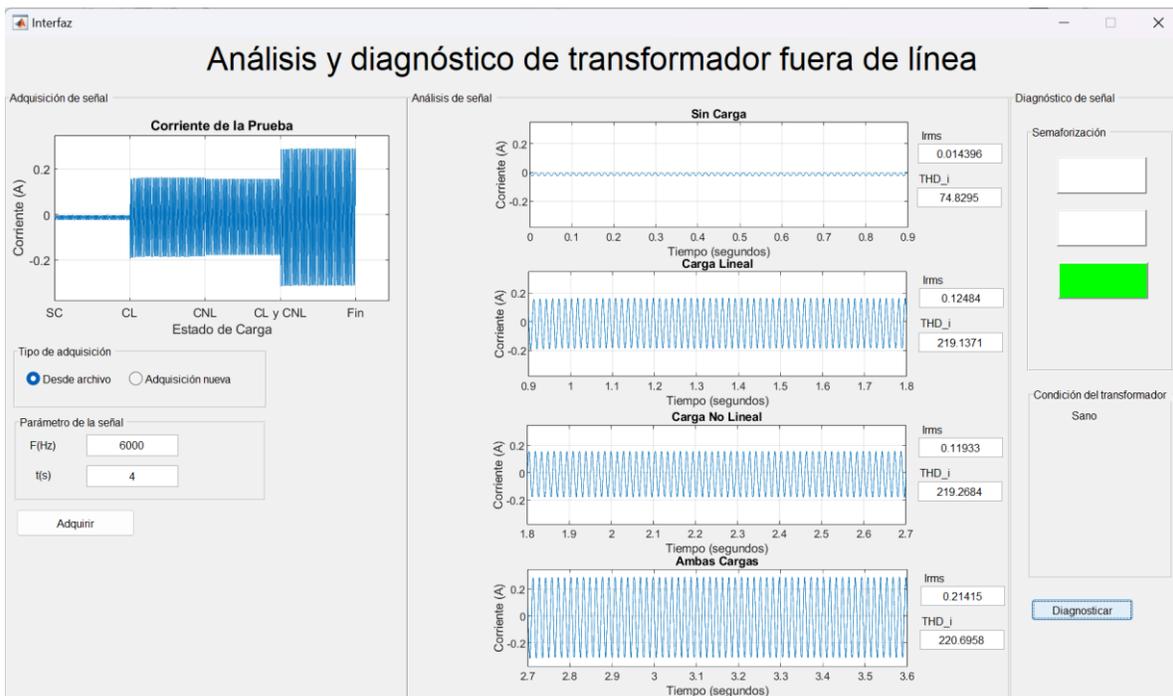


Fig. 48 Resultados del diagnóstico del transformador con interfaz gráfica en estado sano.

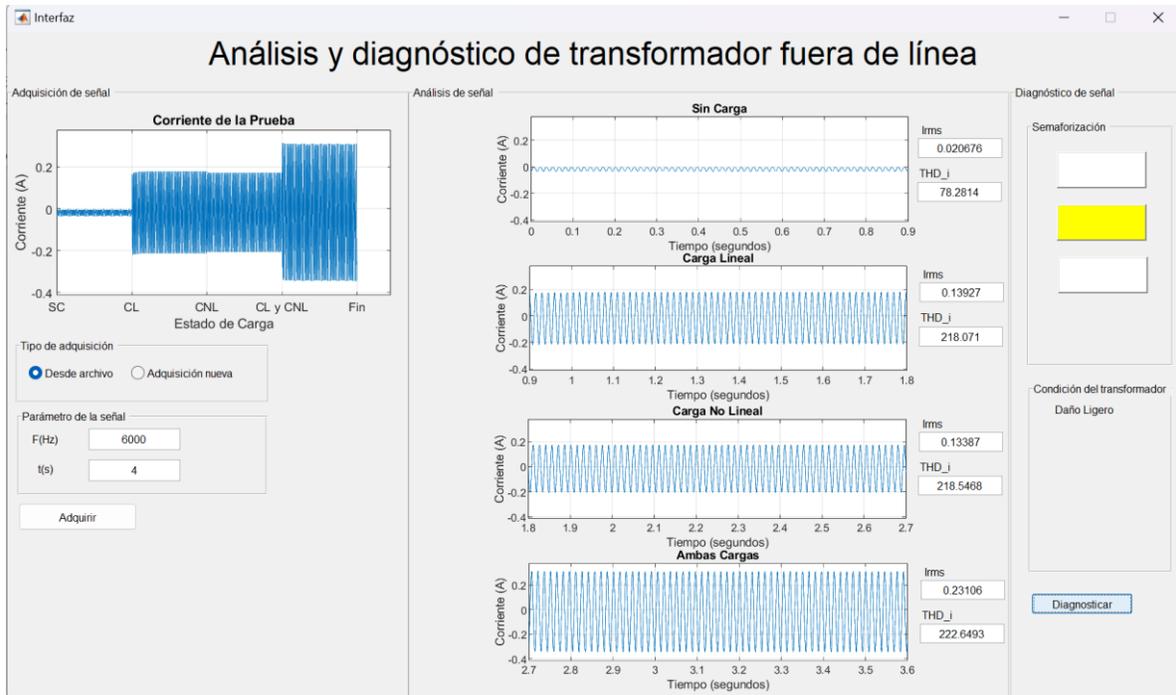


Fig. 49 Resultados del diagnóstico del transformador con interfaz gráfica en condición de daño ligero.

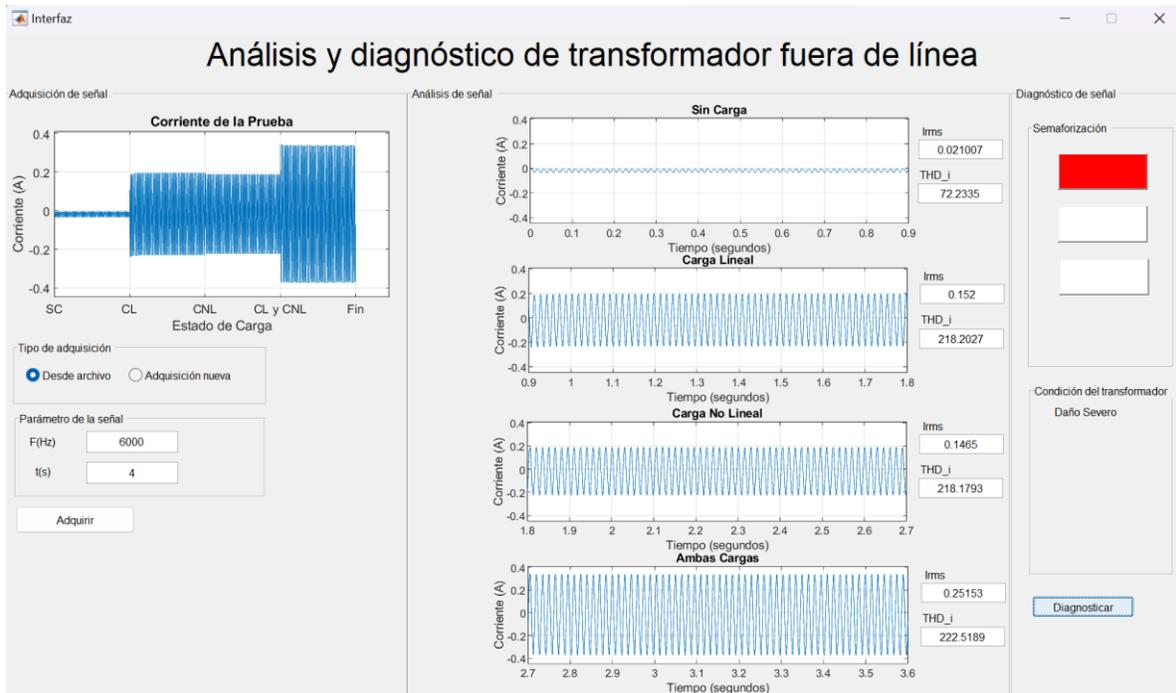


Fig. 50 Resultados del diagnóstico del transformador con interfaz gráfica en condición con daño severo.

Una vez adquirida o leída la señal, se conduce al análisis realizado por la siguiente sección de la interfaz, cuyo propósito radica en diagnosticar y profundizar en la observación de la corriente en las distintas etapas del proceso. Esta sección se encarga de segmentar y presentar de manera individualizada las señales de corriente, proporcionando valores característicos como el THD y el RMS, los cuales son indicadores de la señal eléctrica. Asimismo, se utiliza un sistema de semaforización (verde, amarillo y rojo) para representar el estado del transformador durante la prueba, ofreciendo una visualización clara de la condición del transformador. La Fig. 48 muestra una señal de corriente para un transformador sano, indicado por un rectángulo verde. La Fig. 49 muestra una señal de corriente para un transformador con daño ligero, indicado por un rectángulo amarillo. La Fig. 50 muestra una señal de corriente para un transformador con daño severo, indicado por un rectángulo rojo. Después de recabar los datos para todas las pruebas, el 100% de las señales fueron clasificadas correctamente.

Al concluir el proceso de análisis, la interfaz procede a almacenar todos los resultados obtenidos de las pruebas en archivos CSV. Estos archivos contienen los datos de corriente registrados durante la experimentación, así como los valores característicos de cada etapa del proceso. Esta estrategia de almacenamiento garantiza la preservación y accesibilidad de los datos para futuros análisis y referencia, asegurando la integridad y trazabilidad de los resultados obtenidos durante el estudio.

Para finalizar, es importante mencionar que los datos de THD, aunque no son usados propiamente en la clasificación de la condición del transformador, se dejaron ya que, por un lado, permite inferir algunas características de la señal eléctrica como lo es su contenido armónico y, por otro lado, se pretende usar la interfaz en el análisis de otras condiciones de operación, incluyendo diferentes magnitudes de cargas.

# Capítulo 5.

# Conclusión

## 5.1 Conclusiones y prospectivas

La implementación de una serie exhaustiva de pruebas en el transformador bajo diversas condiciones de carga (sin carga, lineal, no lineal y combinadas) y niveles de severidad de daño (sano, ligero y severo) ha permitido la constitución de una base de datos sólida para la evaluación y el análisis presentado en este trabajo, pero también para trabajos futuros. El hecho de incluir diferentes tipos o condiciones de carga permite, de alguna manera, ver si estas influyen drásticamente o no en la variabilidad de los datos. En este trabajo se encontró que, si se presentan cambios, lo cual es congruente con el cambio de amplitud y contenido armónico, pero es necesario experimentar mucho más, considerando una mayor diversidad de cargas en térmicos de consumo de corriente; es decir, cargas de diversos valores de potencia.

El cálculo de valores como la THD y RMS de la corriente ha proporcionado una evaluación cuantitativa del estado del transformador. Estos parámetros son indicadores de la forma de onda de corriente, ya sea en términos de amplitud o contenido armónico. Aunque ambos indicadores fueron evaluados, particularmente, el RMS permitió alcanzar un 100% de clasificación correcta en las diferentes condiciones de operación, siendo la más complicada la de sin carga eléctrica. Es importante mencionar que esta exactitud también se asocia a las condiciones controladas de trabajo en laboratorio, ya que se extremaron precauciones en la repetibilidad de las pruebas. Estas condiciones de control serían prácticamente imposibles en un entorno real de operación, incluyendo cuestiones de calidad de la fuente de alimentación, cuestiones ambientales de suciedad, humedad, temperatura, así como desgaste por otros tipos de daño o simplemente por el tiempo de envejecimiento.

Por otro lado, la interfaz gráfica desarrollada para la visualización de los resultados se diseñó con un enfoque centrado en el usuario, incorporando un sistema de botones y semáforos intuitivos que permite un rápido control e interpretación de los datos. Esta interfaz proporciona una representación visual clara y concisa de los resultados de las pruebas, facilitando así la identificación de la condición del transformador. Además, su diseño modular y adaptable permite una fácil personalización y ampliación de las funcionalidades, lo que la convierte en una herramienta versátil y adaptable a las necesidades específicas de cada usuario, ya sea para lectura y almacenaje de archivos, adquisiciones en línea,

parametrización y segmentación de valores RMS y THD. Adicionalmente, es importante mencionar que la interfaz también se encarga del control de los relevadores que conectan o desconectan al transformador de las diferentes condiciones de carga eléctrica.

Aunque se han obtenido resultados interesantes en términos de entendimiento de indicadores eléctricos y su relación con la operación del transformador, así como avances en infraestructura con el software de monitoreo, análisis y control, el proyecto puede mejorar significativamente con el desarrollo de un software mucho más robusto e interactivo con el usuario. Por ejemplo, agregando funcionalidades de poder variar los tiempos de cada adquisición de cada condición de carga, que los indicadores eléctricos se puedan calcular con anchos de ventana variables, que también muestren el espectro como una opción, que la semaforización tenga una mayor resolución y sensibilidad. También es deseable que el software pueda migrarse a otra plataforma que sea acceso abierto. Actualmente, la versión del software usado es estudiantil.

De igual manera, es necesario contar con una base de datos más amplia para mejorar el análisis y la toma de decisiones, ampliando la recopilación de datos históricos y operativos de una mayor cantidad de transformadores, incluyendo diferentes tipos, potencias y modelos, así como ampliar la diversidad de cargas eléctricas, proporcionando un marco de referencia más robusto, lo que podría permitir comparativas más detalladas y el desarrollo de modelos preventivos más precisos, esto no solo ayudaría a mejorar la fiabilidad y eficiencias de las estrategias de mantenimiento.

En resumen, este proyecto, incluyendo tanto la puesta experimental base, la base de datos y el software realizado, se coloca como un proyecto de referencia y pionero en el análisis de señales de corriente para diagnóstico de transformadores en la institución donde se ha realizado. De igual manera, estos desarrollos podrán ser utilizados en algunas de las materias de la línea terminal en eléctrica con propósitos didácticos y académicos.

## Bibliografía

Administrador. (2022, 17 marzo). Valor RMS - valor pico - valor promedio - Electrónica Unicrom. Electrónica Unicrom. Recuperado 4 de febrero de 2024 de <https://unicrom.com/valor-rms-promedio-pico/>

Andres. (2022). ¿Qué son cargas no lineales, qué problemas generan y que dice la norma? Electricaplicada. Recuperado 22 de enero de 2024 de <https://www.electricaplicada.com/cargas-no-lineales/>

Árbol de decisiones: Qué es, cómo hacerlo y ejemplos | Miro. (2024). Recuperado 17 de marzo de 2024, de <https://miro.com/es/diagrama/que-es-arbol-decisiones/>

Bruno, L. G. (2009). Imágenes de fallas en transformadores. Recuperado 22 de enero de 2024 <http://ingenieriaelectricaexplicada.blogspot.com/2009/11/imagenes-de-fallas-en-transformadores.html>

Cambiar los colores del escritorio - MATLAB & Simulink - MathWorks América Latina. (2023). Recuperado 12 de marzo de 2024 de [https://la.mathworks.com/help/matlab/matlab\\_env/change-desktop-colors-and-select-dark-theme.html](https://la.mathworks.com/help/matlab/matlab_env/change-desktop-colors-and-select-dark-theme.html)

Canseco, H. (2016). diseño y construcción de un prototipo de adquisición de datos para diagnosticar fallas de cortocircuito en transformadores. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. Recuperado 20 de enero de 2023

Cia. (2015, 16 abril). La importancia del transformador. transformadorescia. Recuperado 20 de enero de 2024 de <https://transformadorescia.wordpress.com/2015/04/16/la-importancia-del-transformador/>

Cifuentes, M. C. (2020). Sistemas de monitoreo para transformadores de potencia (Monitoring systems for power transformers. Universidad del valle Colombia. Recuperado 20 de enero de 2024.

Create radio button component - MATLAB uiradiobutton - MathWorks América Latina. (2023). Recuperado 17 de marzo de 2024, de <https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/uiradiobutton.html>

Crodriguez, & Crodriguez. (2023). ¿Qué es un transformador y cuándo se necesita uno? SDI. Recuperado 22 de enero de 2024 de <https://sdindustrial.com.mx/blog/que-es-un-transformador/>

Díaz, H. (2022, 28 diciembre). El mercado de transformadores de tipo seco tendrá un crecimiento interanual de 7.9% hasta 2028. Recuperado 22 de enero de 2024 de <https://www.energetichoy.com/post/el-mercado-de-transformadores-de-tipo-seco-tendr%C3%A1-un-crecimiento-interanual-de-7-9-hasta-2028>

Electric, O. (2021). Fallas más comunes en un transformador. SIOSAC. Recuperado 22 de enero de 2024 de <https://transformadoressiosac.com/fallas-mas-comunes-en-un-transformador/>

Estadísticas de Fallas en Transformadores de Potencia y Mantenimiento Predictivo | GEBCO SAS. (s. f.). GEBCO SAS. Recuperado 22 de enero de 2024 de <https://gebco.co/estadisticas-de-fallas-en-transformadores-de-potencia-y-mantenimiento-predictivo>

Especificar las etiquetas y los valores de marcas del eje - MATLAB & Simulink- MathWorks América Latina. (2024). Recuperado 3 de marzo de 2024 de [https://la.mathworks.com/help/matlab/creating\\_plots/change-tick-marks-and-tick-labels-of-graph-1.html](https://la.mathworks.com/help/matlab/creating_plots/change-tick-marks-and-tick-labels-of-graph-1.html)

Etiquetas y anotaciones - MATLAB & Simulink - MathWorks América Latina. (2023). Recuperado 17 de marzo de 2024, de <https://la.mathworks.com/help/matlab/titles-and-labels.html>

Fixed Resistors - Products - JRM Japan Resistor MFG. Co., Ltd. (2021). Recuperado 3 de marzo de 2024 de <https://www.jrm.co.jp/en/products/products1.html>

Garfias, L. (2020). Monitoreo y análisis de vibraciones y motores de inducción para detección de fallas de cortocircuito. UAQ. Recuperado 20 de enero de 2024.

Greyrat, R. (2022, 5 julio). Widget EditText en Android usando Java con ejemplos – Barcelona Geeks. Recuperado 3 de marzo de 2024 de <https://barcelonageeks.com/widget-edittext-en-android-usando-java-con-ejemplos/>

GUI de MATLAB. (2024). MATLAB & Simulink. Recuperado 3 de marzo de 2024 de <https://la.mathworks.com/discovery/matlab-gui.html>

Herres, D. (2019, 11 octubre). Understanding instrumentation for measuring total harmonic distortion. Electrical Engineering News and Products. Recuperado 22 de enero de 2024. <https://www.eeworldonline.com/understanding-instrumentation-for-measuring-total-harmonic-distortion/>

Huerta Rosales, R. H., & director. (2023, 1 marzo). Modelo basado en vibraciones para el diagnóstico de transformadores ante deformaciones estructurales con condiciones armónicas y desbalance en fuente de alimentación. Recuperado 22 de enero de 2024. <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/7991>

I200S Sonda amperimétrica AC. (2024). Fluke. Recuperado 3 de marzo de 2024 de <https://www.fluke.com/es-mx/producto/accesorios/pinzas-de-corriente/fluke-i200s-ac-current-clamp>

Instrucciones para la instalación, operación y mantenimiento de los transformadores de distribución tipo seco. (1999). Instrucciones Para la Instalación, Operación y Mantenimiento de los Transformadores de Distribución Tipo Seco. Recuperado 22 de enero de 2024 de

<https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/low-voltage-power-distribution-controls-systems/crouse-hinds/instruction-sheets/crouse-hinds-if-xdt-instruction-sheet.PDF>

M. en C. Manuel García Quijada [jefe de laboratorios] & Dr. Luis Alberto Morales Hernández [Coordinador de Ingeniería Electromecánica]. (2021). REGLAMENTO GENERAL DE LABORATORIOS DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA y AUTOMOTRIZ. UAQ - FI.

Mago, M. G., Vallés, L., Olaya, J. J., & Zequera, M. (2011). Análisis de fallas en transformadores de distribución utilizando ensayos no destructivos y pruebas de tensión mecánicas. Revista INGENIERÍA UC, 18(2), 15-26. Recuperado 22 de enero de 2024 de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70723254003>

MATLAB - el lenguaje del cálculo técnico. (2024). Recuperado 22 de enero de 2024 de <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>

Martínez, M. F. o. A. (2023). 2. Normas y estándares de calidad para el desarrollo de software. Recuperado 20 de enero de 2024 de <https://fernandoarciniega.com/normas-y-estandares-de-calidad-para-el-desarrollo-de-software-2/>

Model. (2024). Recuperado 20 de enero de 2024 de <https://www.ni.com/es-mx/shop/model/usb-6002.html>

NORMA Oficial Mexicana NOM-002-SEDE-2010, Requisitos de seguridad y eficiencia energética para transformadores de distribución. (n.d.). Recuperado 22 de enero de 2024 de <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4577/sener/sener.htm>

Parra, H. (2007). Software de cálculo de esfuerzos en sistemas de contención de transformadores de potencia. Centro de Investigación en Materiales Avanzados. Recuperado 20 de enero de 2024.

Prueba de transformadores | Megger. (2024). CSA. Recuperado 22 de enero de 2024 de <https://csa.megger.com/transformadores>

Quora. (2023). What are the advantages and disadvantages of linear and non-linear loads? Recuperado 20 de enero de 2024 de <https://www.quora.com/What-are-the-advantages-and-disadvantages-of-linear-and-non-linear-loads>

Raul Martínez López, J., Martinez [Martínez López]. (2017). Clasificación de los transformadores. Maquinas Eléctricas. Recuperado 20 de enero de 2024 de <https://maquinaselectricasg4.files.wordpress.com/2017/05/clasificacic3b3n-de-transformadores.pdf>

Rectificadores de puente de alta potencia. (2024). Digikey. Recuperado 8 de marzo de 2024, de <https://www.digikey.com.mx/es/product-highlight/i/ixys/high-power-600v-2000v-bridge-rectifier-for-3-phase-applications>

Relé SSR ORO. (2022). Proveedor de relés de estado sólido, Fabricante de relés SSR | Relé SSR ORO. Recuperado 8 de marzo de 2024 de <https://www.goldssr.com/es>

Relsamex. (2020). Tipos de transformadores eléctricos. RELSAMEX. Recuperado 20 de enero de 2024 de <https://www.relsamex.com/tipos-de-trasformadores-electricos/>

RTE. (2021, 19 enero). Transformadores tipo secos monofásico - RTE de México. Recuperado 8 de marzo de 2024 de <https://rte.mx/transformadores/secos-monofasico#:~:text=Los%20transformadores%20tipo%20seco%20de%20baja%20tensi%C3%B3n%20se,presencia%20de%20arm%C3%B3nicas%20en%20la%20red%20%28factor%20K%29.>

SANERGRID. (2022). Transformadores secos encapsulados resina ECODESIGN ECODESIGN dispositivos contra incendio. Recuperado 22 de enero de 2024 de <https://www.sanergrid.com/es/transformadores-y-aparatos-electricos/72-trafoeletro-transformadores-secos-encapsulados-bi-tension-sanergrid.html>

Seenco Group Team. (2018). Total harmonic distortion – What happened to my perfect wave? Seenco Group. Recuperado 20 de enero de 2024 de <https://www.seencogroup.com/en/total-harmonic-distortion-what-happened-to-my-perfect-wave/>

Selección e instalación de transformadores secos en subestación tipo interior. (2017). Recuperado 20 de enero de 2024 de <https://comercializadorenergia.epm.com.co/content/dam/epm/proveedores-y-contratistas/RA8-013.pdf>

Tecsa. (2021). ¿Qué es un transformador eléctrico y cómo funciona? Tecsa. Recuperado 20 de enero de 2024 de <https://www.tecsagro.com.mx/blog/que-es-un-transformador-electrico/>

Transformada de Fourier. (2016). Recuperado 20 de enero de 2024 de [http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/simbolico/fourier/fourier\\_1.html](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/simbolico/fourier/fourier_1.html).

Zorilla, J. D. H., Fernández, A. C., & Gómez, D. F. G. (2019). Técnicas para el diagnóstico de transformadores de potencia: Una revisión crítica. Recuperado 20 de enero de 2024 Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería, 28(2), 184-203.