



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E
INVESTIGACIÓN**

**ANÁLISIS DEL USO DE LA CORRIENTE DE
ENERGIZACIÓN COMO MÉTODO PARA LA
DETECCIÓN DE FALLAS INTERNAS EN
TRANSFORMADORES**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
ELÉCTRICA**

PRESENTA:

ANGEL RODRIGO HERNÁNDEZ SANTIAGO



CIUDAD DE MÉXICO, DICIEMBRE 2016



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-14 BIS

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México siendo las 13:00 horas del día 22 del mes de noviembre del 2016 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E. S. I. M. E. para examinar la tesis titulada:

“ANÁLISIS DEL USO DE LA CORRIENTE DE ENERGIZACIÓN COMO MÉTODO PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS INTERNAS EN LOS TRANSFORMADORES”

Presentada por el alumno:

HERNÁNDEZ
Apellido paterno

SANTIAGO
Apellido materno

ÁNGEL RODRIGO
Nombre(s)

Con registro:

B	1	4	0	8	4	6
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA ELÉCTRICA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

DR. FERMIN PASCUAL ESPINO CORTÉS

DR. JUAN CARLOS OLIVARES GALVÁN

Presidente

Segundo Vocal

DR. DANIEL OLGUÍN SALINAS

DR. JUAN CARLOS OLIVARES GALVÁN

Tercer Vocal

Secretario

M. EN G. TOMÁS IGNACIO ASIAÍN OLIVARES

DR. DANIEL RUIZ VEGA

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. MIGUEL TOLEDO VELÁZQUEZ
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D.F. el día 18 del mes de noviembre del año 2016, el que suscribe Angel Rodrigo Hernández Santiago alumno del Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, con número de registro B140846, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, manifiesta que es el autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Fermín Pascual Espino Cortés y del Dr. Juan Carlos Olivares Galván y cede los derechos del trabajo titulado Análisis del uso de la corriente de energización como método para la detección de fallas internas en transformadores, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones venok_angel@hotmail.com, frespino@gmail.com y jolivaresgalvan@gmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Angel Rodrigo Hernández Santiago

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por ser el pilar fundamental en todo lo que soy. Gracias por su apoyo, por sus consejos, por compartir mis tristezas y alegrías, por todo su amor, por su esfuerzo, por sus preocupaciones al querer que sea mejor día con día y por su entera confianza.

Un sincero agradecimiento a mis asesores el Dr. Fermín Pascual Espino Cortés y el Dr. Juan Carlos Olivares Galván por todo el apoyo, la orientación, el seguimiento y la supervisión continúa brindada durante el proceso de este trabajo. A los miembros del jurado, Dr. Daniel Olguín Salinas, Dr. Daniel Ruíz Vega, M. en C. Tomás Ignacio Asiaín y al Dr. Jaime Rodríguez Rivas por los comentarios y correcciones que sirvieron para darle mayor calidad a este trabajo.

Al Instituto Politécnico Nacional el cual ha sido mi orgullo y emblema durante toda mi formación académica y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, ambos por el apoyo económico que me brindaron para poder realizar mis estudios de posgrado.

Quisiera expresar mi eterna gratitud, así como la comprensión, paciencia y el ánimo recibidos de mis amigos.

Un especial agradecimiento al Dr. David Granados Lieberman, por toda la ayuda, comentarios y contribuciones que fueron parte esencial en el desarrollo del trabajo.

*“El presente es nuestro, pero el futuro es mío”
-Nikola Tesla*

RESUMEN

Durante la vida útil de un transformador su sistema de aislamiento está expuesto a sobretensiones, muchas de las cuales pueden llegar a dañar parcialmente el material aislante, sin necesariamente provocar una falla completa del equipo. Un ejemplo son las fallas por vueltas en cortocircuito, las cuales se originan por el contacto directo entre vueltas de diferente potencial, y que representan un riesgo importante para la integridad del transformador, ya que esta falla activa puede evolucionar a una falla más severa de no ser detectada a tiempo.

En este trabajo se analiza la posibilidad de relacionar los cambios en corriente de energización con la presencia y severidad de fallas entre vueltas en los devanados de un transformador. Para esta investigación se utiliza un transformador monofásico reductor de baja potencia, tipo acorazado, al cual se le registra la corriente de energización en diferentes condiciones de falla por vueltas en cortocircuito en el devanado primario.

Para poder medir la corriente de energización de una forma controlable y reproducible, se implementó un circuito de control para un interruptor de estado sólido que permite controlar el instante de conexión de la fuente alimentadora. Este circuito permite energizar al transformador en el cruce por cero de la forma de onda de tensión. La corriente de energización fue analizada por medio de un análisis espectral utilizando un algoritmo implementado en MATLAB®. El comportamiento de las componentes armónicas presentes en la corriente de energización se relaciona con la severidad de la falla en el devanado a través de los cambios en las constantes de tiempo de atenuación de dichas componentes.

Un modelo electromagnético del transformador fue desarrollado en COMSOL Multiphysics® para simular la corriente de energización. Este modelo acopla el circuito eléctrico utilizado para energizar el transformador con el modelo de elemento finito que se utiliza para el cálculo de los campos electromagnéticos. El modelo es además modificado para poder analizar la corriente de energización en condiciones de falla por vueltas en cortocircuito en el devanado primario.

Se muestra cómo es que hay una correlación entre el número de vueltas en cortocircuito y las constantes de tiempo de la componente de segunda armónica de la corriente de energización experimental. Similar correlación se presenta con las corrientes de energización obtenidas mediante simulación, aunque con diferencias con respecto a la observada en las pruebas experimentales, lo cual se atribuye al uso de un modelo simplificado para el transformador. Lo anterior muestra que existe la posibilidad de utilizar el análisis de la corriente de energización para diagnosticar el estado de un transformador cuando presenta fallas entre vueltas.

ABSTRACT

During the operating life of a transformer, its electrical insulation system is exposed to overvoltages, many of which may partially damage the insulating materials without necessarily causing the complete failure of the equipment. An example are the faults due to short circuited turns, which are produced due to the direct contact between turns with different voltage and which represents an important risk to the integrity of the transformer since they can evolve to more serious problems if they are not detected on time.

In this work the possibility of relating the changes in the inrush current with the presence and severity of the inter-turn faults in the windings of a transformer is analyzed. For this investigation, a low power, shell-type transformer is used, in this transformer the inrush current is recorded under different fault conditions due to short circuited turns in the primary winding.

In order to measure the inrush current in a controllable and reproducible manner, a control circuit was implemented to drive a solid-state switch. This circuit allows to energize the transformer during the zero crossing of the voltage waveform. The inrush current was analyzed by means of a spectral analysis using an algorithm implemented in MATLAB®. The behavior of the harmonic components present in the inrush current is related to the severity of the fault in the winding through changes in the attenuation time constants of said components.

An electromagnetic model of the transformer was developed in COMSOL Multiphysics® to simulate the inrush current. This model couples the electric circuit used to energize the transformer with the finite element model that is used for the calculation of electromagnetic fields. The model is further modified to analyze the inrush current with short circuited turns in the primary winding.

It is shown how there is a correlation between the number of short circuit turns and the time constants of the second harmonic component of the experimental inrush current. Similar correlation occurs with the inrush current obtained through simulation, although with differences with respect to the correlation observed in the experimental tests, which is attributed to the use of a simplified model for the transformer. The results show that there is the possibility of using an inrush current analysis to diagnose the state of a transformer when it presents faults between turns.

CONTENIDO GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	III
CONTENIDO GENERAL	V
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABLAS.....	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS UTILIZADOS.....	XV
GLOSARIO DE ABREVIATURAS.....	XVII
CAPÍTULO 1 : INTRODUCCIÓN	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Antecedentes	2
1.3 Objetivos	5
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	5
1.3.2 <i>Objetivos particulares</i>	5
1.4 Planteamiento del problema	5
1.5 Justificación.....	6
1.6 Limitaciones y alcances.....	7
1.6.1 <i>Limitaciones</i>	7
1.6.2 <i>Alcances</i>	7
1.7 Aportaciones.....	8
1.8 Estado del arte.....	8
1.9 Trabajos relacionados en la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Zacatenco.....	11
1.10 Estructura de la tesis	12
1.11 Trabajos publicados y derivados del desarrollo de la tesis	14
CAPÍTULO 2 : CORRIENTE DE ENERGIZACIÓN Y FALLA POR VUELTAS EN CORTOCIRCUITO	15
2.1 Características de los núcleos de transformadores.....	15
2.2 Parámetros de tensión, flujo magnético e intensidad de corriente en un transformador	16
2.3 Inductancia de dispersión	19
2.4 Corriente de energización	21
2.5 Factores que afectan a la corriente de energización	25
2.5.1 <i>Ángulo de la tensión al momento de la conexión</i>	25
2.5.2 <i>Densidad de flujo residual</i>	26
2.5.3 <i>Resistencias en serie</i>	29
2.6 Circuito equivalente del transformador	29
2.7 Modelo del transformador con falla por vueltas cortocircuitadas	30

CAPÍTULO 3 : MEDICIÓN DE LA CORRIENTE DE ENERGIZACIÓN EN UN TRANSFORMADOR CON VUELTAS CORTOCIRCUITADAS.....	33
3.1 Transformador bajo estudio.....	33
3.2 Mediciones de la corriente de energización sin el uso del circuito de control para el momento de la energización.....	35
3.3 Circuito de control para el momento de la energización	36
3.3.1 <i>Detector de cruce por cero</i>	37
3.3.2 <i>Microcontrolador FRDM-K64F</i>	38
3.3.3 <i>Relevador de estado sólido</i>	41
3.4 Desarrollo de las mediciones experimentales	41
3.5 Comportamiento de la corriente de energización sin falla	44
3.6 Comportamiento de la corriente de energización con fallas por vueltas en cortocircuito	45
CAPÍTULO 4 : PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES DE CORRIENTE DE ENERGIZACIÓN	51
4.1 Contenido armónico de la corriente de energización	51
4.2 Transformada Discreta de Fourier.....	52
4.3 Aplicación de la DFT a las señales de corriente de energización.....	53
4.4 Resultados del procesamiento de las señales de corriente.....	55
CAPÍTULO 5 : SIMULACIÓN DE LA CORRIENTE DE ENERGIZACIÓN UTILIZANDO EL MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO.....	67
5.1 Introducción.....	67
5.2 Comportamiento electromagnético del transformador.....	68
5.2.1 <i>Campo Magnético Cuasi-Estacionario</i>	68
5.2.2 <i>Método del Elemento Finito</i>	71
5.3 Modelado del transformador bajo estudio para la simulación	72
5.3.1 <i>Comportamiento del transformador bajo condiciones sin falla</i>	74
5.3.2 <i>Comportamiento del transformador bajo condiciones de falla</i>	76
5.4 Resultados del procesamiento de las señales de corriente de energización simuladas.....	82
5.5 Comparación entre resultados simulados y experimentales	90
CAPÍTULO 6 : CONCLUSIONES.....	93
6.1 Aportaciones	94
6.2 Recomendaciones para trabajos futuros	94
REFERENCIAS	97
APÉNDICE A. DETALLES GEOMÉTRICOS DEL NÚCLEO DEL TRANSFORMADOR	103
APÉNDICE B. CÓDIGO PARA EL ANÁLISIS DE LAS SEÑALES DE CORRIENTE DE ENERGIZACIÓN.....	105

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1. Transformador alimentado con fuente de tensión en circuito abierto.	16
Fig. 2.2. Relaciones de fase entre la tensión del primario, flujo y corriente primaria en un transformador.....	18
Fig. 2.3. Diagrama esquemático del transformador con carga.....	20
Fig. 2.4. Diagrama esquemático del transformador trabajando en vacío.	22
Fig. 2.5. Variación de la inductancia a partir de los valores de corriente y flujo magnético.....	23
Fig. 2.6. Forma de onda de la corriente de energización obtenida de la ecuación (2.22).	24
Fig. 2.7. Comportamiento de la corriente de energización para diferentes ángulos, (a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=45^\circ$, (c) $\theta=90^\circ$	25
Fig. 2.8. Densidad de flujo residual.....	26
Fig. 2.9. Comportamiento de la corriente de energización considerando flujo remanente [7].....	27
Fig. 2.10. Diagrama esquemático del valor que llega a alcanzar la densidad de flujo magnético B_n cuando el transformador entra al estado de saturación.	28
Fig. 2.11. Circuito equivalente de un transformador.....	29
Fig. 2.12. Circuito equivalente T referido al primario	30
Fig. 2.13. Diagrama esquemático de una falla por vueltas en cortocircuito en el devanado primario de un transformador	31
Fig. 2.14. Circuito equivalente del transformador, incluyendo una falla por vueltas cortocircuitadas en el devanado primario [14].....	32
Fig. 3.1. Transformador de 120VA bajo prueba	34
Fig. 3.2. Derivaciones disponibles de la tercera capa del devanado primario del transformador.	34
Fig. 3.3. Corriente de energización para diferente número de vueltas en cortocircuito medida en el transformador bajo prueba sin la aplicación del circuito de control para el momento de la conexión.....	35
Fig. 3.4. Circuito de control para la energización del transformador.	36
Fig. 3.5. Circuito experimental para medición de la corriente de energización.	36
Fig. 3.6. Circuito detector de cruce por cero [37].....	37

Fig. 3.7. Pulsos generados por medio del circuito detector de cruce por cero para la tensión de alimentación.....	38
Fig. 3.8. Microcontrolador FRDM-K64F [38].	39
Fig. 3.9. Pulso generado por medio del microcontrolador FRDM-K64F.....	39
Fig. 3.10. Desfasamiento entre las formas de onda de tensión primaria y flujo magnético en el transformador.	40
Fig. 3.11. Relevador de Estado Sólido para el accionamiento del transformador ante el cruce por cero de la señal de tensión de alimentación [39].	41
Fig. 3.12. Circuito de medición para condiciones sin falla.	42
Fig. 3.13. Circuito de medición considerando fallas por vueltas en cortocircuito. a) Descripción 1, b) Descripción 2.	42
Fig. 3.14. Sonda de corriente Tektronix A622, utilizada para medir la corriente de energización.	43
Fig. 3.15. Osciloscopio Tektronix TDS 2024B.	44
Fig. 3.16. Oscilograma de la corriente de energización sin falla para el transformador bajo estudio.	44
Fig. 3.17. Tensiones en el lado primario y secundario del transformador bajo condiciones sin falla para el transformador bajo estudio.	45
Fig. 3.18. Oscilogramas de las tensiones en el lado primario y secundario para 40 vueltas en cortocircuito del transformador bajo estudio.....	46
Fig. 3.19. Oscilograma de la corriente de energización para 5 vueltas en cortocircuito.	47
Fig. 3.20. Corriente de energización medida para 20 vueltas en cortocircuito para el transformador bajo estudio.....	47
Fig. 3.21. Corriente de energización medida para 40 vueltas en cortocircuito para el transformador bajo estudio.....	48
Fig. 3.22. Oscilogramas de la corriente de energización para diferente número de vueltas en cortocircuito para el transformador bajo estudio.	48
Fig. 3.23. Acercamiento a los oscilogramas de corriente de energización.	49
Fig. 4.1. Comportamiento en el tiempo y la frecuencia de una señal discreta aplicando la STFT [42]......	53
Fig. 4.2. Diagrama de flujo para el análisis de las corrientes de energización bajo condiciones de falla por vueltas en cortocircuito.	54
Fig. 4.3. Medición de las señales de tensión primaria y corriente de energización para condiciones sin falla del transformador bajo prueba.	56

Fig. 4.4. Ventanas de análisis con duración de un ciclo a la corriente de energización en condiciones sin falla para el transformador bajo prueba.	56
Fig. 4.5. Análisis espectral de la corriente de energización bajo condiciones sin falla del transformador bajo prueba.	57
Fig. 4.6. Comportamiento de la DFT respecto a la frecuencia y al tiempo de la corriente de energización bajo condiciones sin falla del transformador bajo estudio.	57
Fig. 4.7. Magnitud vs tiempo de cada componente armónica de la señal de corriente de energización bajo condiciones sin falla del transformador bajo prueba.	58
Fig. 4.8. Análisis espectral de la corriente de energización para 5 vueltas en cortocircuito del transformador bajo prueba.	58
Fig. 4.9. Comportamiento de la DFT respecto a la frecuencia y al tiempo de la corriente de energización para 5 vueltas en cortocircuito del transformador bajo estudio.	59
Fig. 4.10. Magnitud de la señal de corriente de energización vs tiempo de cada componente armónica para 5 vueltas en cortocircuito del transformador bajo prueba.	59
Fig. 4.11. Análisis espectral de la corriente de energización para 20 vueltas en cortocircuito del transformador bajo prueba.	60
Fig. 4.12. Comportamiento de la DFT respecto a la frecuencia y al tiempo de la corriente de energización para 20 vueltas en cortocircuito del transformador bajo estudio.	60
Fig. 4.13. Magnitud de la señal de corriente de energización vs tiempo de cada componente armónica para 20 vueltas en cortocircuito del transformador bajo prueba.	61
Fig. 4.14. Análisis espectral de la corriente de energización para 35 vueltas en cortocircuito del transformador bajo prueba.	61
Fig. 4.15. Comportamiento de la DFT respecto a la frecuencia y al tiempo de la corriente de energización para 35 vueltas en cortocircuito del transformador bajo estudio.	62
Fig. 4.16. Magnitud de la señal de corriente de energización vs tiempo de cada componente armónica para 35 vueltas en cortocircuito del transformador bajo prueba.	62
Fig. 4.17. Comportamiento de b respecto al número de vueltas en cortocircuito.	64
Fig. 4.18. Comportamiento de d respecto al número de vueltas en cortocircuito.	65
Fig. 5.1. Acoplamiento entre el modelo electromagnético del transformador y el modelo circuital de excitación.	72

Fig. 5.2. Geometría del transformador bajo prueba.	73
Fig. 5.3. Mallado del problema para condiciones sin falla del transformador bajo prueba.	73
Fig. 5.4. Curva B-H utilizada para simular el comportamiento no lineal del núcleo del transformador.	74
Fig. 5.5. Líneas de flujo magnético simuladas en el núcleo del transformador bajo prueba para condiciones sin falla.....	75
Fig. 5.6. Tensiones simuladas en el primario y en el secundario del transformador bajo prueba.	75
Fig. 5.7. Oscilograma de la corriente de energización simulada para condiciones sin falla.	76
Fig. 5.8. Subdominio de falla correspondiente a 5 vueltas en cortocircuito.	76
Fig. 5.9. Mallado generado para 5 vueltas en cortocircuito del transformador bajo prueba.	77
Fig. 5.10. Mallado generado para 40 vueltas en cortocircuito del transformador bajo prueba.	77
Fig. 5.11. Líneas de flujo magnético simuladas en el núcleo del transformador bajo prueba para 5 vueltas en cortocircuito.	78
Fig. 5.12. Oscilograma de la corriente de energización simulada para 5 vueltas en cortocircuito.	79
Fig. 5.13. Líneas de flujo magnético simuladas en el núcleo del transformador bajo prueba para 20 vueltas en cortocircuito.	79
Fig. 5.14 Oscilograma de la corriente de energización simulada para 20 vueltas en cortocircuito.	80
Fig. 5.15. Líneas de flujo magnético simuladas en el núcleo del transformador bajo prueba para 40 vueltas en cortocircuito.	80
Fig. 5.16. Oscilograma de la corriente de energización simulada para 35 vueltas en cortocircuito.	81
Fig. 5.17. Oscilogramas de la corriente de energización simuladas para diferente número de vueltas en cortocircuito para el transformador bajo prueba.	81
Fig. 5.18. Análisis espectral de la corriente de energización simulada bajo condiciones sin falla del transformador bajo prueba.	82
Fig. 5.19. Comportamiento de la DFT respecto a la frecuencia y al tiempo de la corriente de energización simulada bajo condiciones sin falla del transformador bajo estudio.	82

Fig. 5.20. Magnitud vs tiempo de cada componente armónica de la señal de corriente de energización simulada bajo condiciones sin falla del transformador bajo prueba.....	83
Fig. 5.21. Análisis espectral de la corriente de energización simulada para 5 vueltas en cortocircuito del transformador bajo prueba.	83
Fig. 5.22. Comportamiento de la DFT respecto a la frecuencia y al tiempo de la corriente de energización simulada para 5 vueltas en cortocircuito del transformador bajo estudio.....	84
Fig. 5.23. Magnitud vs tiempo de cada componente armónica de la señal de corriente de energización simulada para 5 vueltas en cortocircuito del transformador bajo prueba.....	84
Fig. 5.24. Análisis espectral de la corriente de energización simulada para 20 vueltas en cortocircuito del transformador bajo prueba.	85
Fig. 5.25. Comportamiento de la DFT respecto a la frecuencia y al tiempo de la corriente de energización simulada para 20 vueltas en cortocircuito del transformador bajo estudio.....	85
Fig. 5.26. Magnitud vs tiempo de cada componente armónica de la señal de corriente de energización simulada para 20 vueltas en cortocircuito del transformador bajo prueba.....	86
Fig. 5.27. Análisis espectral de la corriente de energización simulada para 35 vueltas en cortocircuito del transformador bajo prueba.	86
Fig. 5.28. Comportamiento de la DFT respecto a la frecuencia y al tiempo de la corriente de energización simulada para 35 vueltas en cortocircuito del transformador bajo estudio.....	87
Fig. 5.29. Magnitud vs tiempo de cada componente armónica de la señal de corriente de energización simulada para 35 vueltas en cortocircuito del transformador bajo prueba.....	87
Fig. 5.30. Comportamiento de b respecto al número de vueltas en cortocircuito.	89
Fig. 5.31. Comportamiento de d respecto al número de vueltas en cortocircuito.....	89
Fig. 5.32. Comportamiento de b respecto al número de vueltas en cortocircuito: (a) experimental, (b) simulación.....	90
Fig. 5.33. Comportamiento de d respecto al número de vueltas en cortocircuito: (a) experimental, (b) simulación.....	91
Fig. A.1. Núcleo tipo EI del transformador bajo estudio.	103
Fig. A.2. Ancho total del núcleo magnético.	103

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Técnicas de diagnóstico en transformadores [1, 6]	3
Tabla 2.1. Condiciones de la corriente de energización [25]	27
Tabla 3.1. Características del transformador bajo prueba	33
Tabla 3.2. Estados de falla en el devanado primario del transformador bajo prueba ..	34
Tabla 4.1. Parámetros de las curvas ajustadas para las componentes armónicas de la corriente de energización	64
Tabla 5.1. Porcentaje de falla en el devanado primario.	78
Tabla 5.2. Parámetros de las curvas ajustadas para las componentes armónicas de la corriente de energización simulada	88

LISTA DE SÍMBOLOS UTILIZADOS

\bar{A}	Potencial vectorial magnético
\bar{B}	Densidad de flujo magnético
B_m	Densidad de flujo magnético mutuo
B_{mp}	Valor máximo de la densidad de flujo magnético
B_r	Densidad de flujo magnético residual
C_1, C_2, C_3	Capacitores en el circuito detector de cruce por cero
\bar{D}	Densidad de flujo eléctrico
D_1, D_2, \dots, D_5	Diodos en el circuito detector de cruce por cero
\bar{E}	Campo eléctrico
e_1, e_2	Tensiones inducidas en el devanado primario y secundario
F_s	Frecuencia de muestreo
f	Frecuencia del sistema
\bar{H}	Intensidad de campo magnético
i_0	Corriente de excitación
i_c	Corriente de pérdidas en el núcleo
i_f	Corriente de falla
i_{ip}	Corriente en la parte del devanado sana
i_m	Corriente de magnetización
i_n	Corriente nominal
i_p, i_s	Corrientes en el devanado primario y secundario
i_s'	Corriente secundaria referida al primario
\bar{J}	Densidad de corriente
J_s	Densidad de corriente externa
L_p, L_s	Inductancias propias del devanado primario y secundario
L_{lp}, L_{ls}	Inductancia de dispersión del devanado primario y secundario
k	Número de datos
N	Número de muestras
N_p, N_s	Número de vueltas del devanado primario y secundario
p	Punto de operación
R_1, R_2, \dots, R_8	Resistencias en el circuito detector de cruce por cero
R_c	Resistencia de pérdidas en el núcleo
R_f	Resistencia de falla
R_G	Resistencia del generador
R_p, R_s	Resistencias del devanado primario y secundario

R_s'	Resistencia del devanado secundario referida al primario
R_{vc}	Resistencia de las vueltas en cortocircuito
t	Tiempo
v_G	Tensión del generador
v_p, v_s	Tensiones en el lado primario y secundario
\hat{V}_p	Tensión máxima del lado primario
\bar{V}_p	Tensión eficaz del lado primario
V_s	Tensión de la fuente de alimentación
ω	Frecuencia angular
X_{lp}, X_{ls}	Reactancia de fuga del devanado primario y secundario
X_{ls}'	Reactancia de fuga del devanado secundario referida al primario
X_m	Reactancia de magnetización
X_{vc}	Reactancia de las vueltas en cortocircuito
$X_{\sigma 1}, X_{\sigma 2}$	Reactancia de acoplamiento entre las vueltas en cortocircuito y los devanados primario y secundario
$x[n]$	Señal en tiempo discreto
$X[k]$	Muestras de frecuencia
$X[l, k]$	Muestras de tiempo y frecuencia
ε	Permitividad eléctrica absoluta
ε_r	Permitividad relativa del material
ε_0	Permitividad del vacío
θ	Ángulo de la fuente de tensión de alimentación
λ	Enlaces de flujo total
λ_1, λ_2	Enlaces de flujo total en el devanado primario y secundario
λ_m	Enlaces de flujo mutuo total
$\lambda_{\sigma 1}, \lambda_{\sigma 2}$	Enlaces de flujo total entre las vueltas en cortocircuito y los devanados primario y secundario
ϕ	Flujo magnético
ϕ_1, ϕ_2	Flujo magnético en el devanado primario y en el devanado secundario
ϕ_{12}, ϕ_{21}	Flujos mutuos debidos a las corrientes primaria y secundaria
ϕ_{l1}, ϕ_{l2}	Flujos dispersos en los devanados primario y secundario
ϕ_m	Flujo mutuo
μ	Permeabilidad magnética absoluta
μ_r	Permeabilidad relativa del material
μ_0	Permeabilidad del vacío
ρ_v	Densidad de carga volumétrica
σ	Conductividad eléctrica

GLOSARIO DE ABREVIATURAS

A. T.	Alta Tensión
ATP/EMTP	Alternative Transient Program/Electromagnetic Transient Program
B. T.	Baja Tensión
C. D.	Corriente Directa
DFT	Transformada Discreta de Fourier
IEC	International Electrotechnical Commission
f.e.m.	Fuerza Electromotriz
f.m.m.	Fuerza Magnetomotriz
rms	Root Mean Square
CC	Cortocircuito
SEP	Sistema Eléctrico de Potencia
STFT	Transformada de Tiempo Corto de Fourier

CAPÍTULO 1 :

INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

Las bases del funcionamiento del transformador surgieron cuando el científico inglés Michael Faraday descubrió el principio de inducción electromagnética en 1831[54]. A partir de la creación de un pulso de tensión a través de las terminales secundarias de su arreglo experimental, por medio de la interrupción de una corriente directa que fluía por la bobina primaria, demostró que una variación de corriente en una bobina generaría tensión en la otra. A finales del siglo XIX (en 1882), Lucien Gaulard de Francia y el inglés, John Dixon Gibbs, patentaron un sistema de potencia de distribución que usaba corriente alterna con dispositivos de inducción de dos bobinas (que en 1884 fueron conocidos como generadores secundarios) enlazadas por un núcleo de hierro abierto [1,2]. Entre 1884 y 1886, los ingenieros húngaros Károly Zipernowsky, Otto Bláthy y Miska Déri, de la compañía Ganz en Budapest, crearon un aparato de núcleo cerrado basado en el trabajo de Gaulard y Gibbs denominado ZBD, la patente de este aparato fue la primera en utilizar el término transformador, estableciéndose de esta forma los principios del transformador que han permanecido prácticamente sin cambios hasta la actualidad [1].

El transformador actualmente sigue siendo un componente esencial en la transmisión y distribución de la energía eléctrica y continuamente se encuentra en evolución, tanto en relación a las prácticas y herramientas de diseño, como en lo relacionado a las técnicas de diagnóstico y monitoreo utilizadas con estos dispositivos. Al igual que otros elementos dentro del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), los transformadores están expuestos a fallas; debidas a las diversas circunstancias y condiciones a las que son sometidos durante su estado de operación.

Aunque no todas las fallas llegan a ser catastróficas éstas pueden tener otras consecuencias como pueden ser: puntos con altas temperaturas, deterioro del sistema de aislamiento, daños en las boquillas de alta tensión del transformador y pérdidas de las propiedades magnéticas del núcleo. Por la importancia que tiene el transformador, aunado a su alto costo en comparación con otros equipos, es muy importante poder prevenir fallas catastróficas mediante el monitoreo y diagnóstico de sus condiciones de operación.

Dentro de la práctica, existen muchos métodos y técnicas para el monitoreo y el diagnóstico de diferentes tipos de fallas dentro del transformador, ejemplos de ellos son: esquemas de protección diferencial, análisis de gases disueltos, análisis de respuesta en la frecuencia [1, 6].

Actualmente, el monitoreo y diagnóstico de transformadores de distribución ha cobrado gran interés con la introducción del concepto de “red eléctrica inteligente”, el cual involucra un gran número de conceptos y definiciones, en términos generales, el objetivo es permitir una mayor participación por parte de los consumidores finales, incluir mayores recursos de energía distribuida, mejorar el uso de los activos a través de índices dinámicos y una administración activa de la red, así como un mayor índice de fiabilidad y eficiencia de la misma [3, 4]. Por lo anterior, existe un gran interés en adecuar los métodos ya existentes para incorporarlos a este nuevo concepto de red eléctrica, así como en proponer nuevos métodos de diagnóstico que vengan a complementarlos.

1.2 Antecedentes

Con el constante crecimiento en capacidad de los sistemas de energía eléctrica, la tensión de operación de los transformadores de potencia va incrementando, haciendo que la cantidad de aislamiento en el transformador se vuelva una parte significativa de su costo. De igual forma, el incremento en las dimensiones del aislamiento influye en el costo de las partes activas como el núcleo y los devanados, los cuales representan el 32.5% y 22% del costo total del transformador respectivamente [5]. Esto también incrementa la cantidad de aceite requerida por el transformador, teniendo un gran impacto en el diseño del mismo. Estas son algunas razones por las que se hace un esfuerzo continuo para poder reducir al máximo el sistema de aislamiento del transformador. Esto requiere de grandes esfuerzos por parte de investigadores y diseñadores para calcular de forma exacta los niveles de campo eléctrico para diversas configuraciones de componentes dentro del transformador bajo los diferentes niveles de tensión de prueba a los que son sometidos [1].

Actualmente se cuenta con herramientas computacionales basadas en las simulaciones de campos electromagnéticos usadas con el fin de calcular de una forma precisa los esfuerzos dieléctricos causados por el alto campo eléctrico presente dentro del transformador, comparando estos niveles de esfuerzo con los niveles de aguante que son establecidos en base a información experimental o estándares publicados.

Como se mencionó anteriormente, existen diferentes métodos para la detección de fallas internas en los transformadores, algunos de ellos son descritos en [6]. Las principales pruebas que se realizan al transformador para la detección de problemas en el sistema de aislamiento se mencionan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Técnicas de diagnóstico en transformadores [1, 6]

Tipo de prueba	Objetivo	Detecta	Limitaciones
Análisis de gases disueltos	Se analiza la composición de los gases presentes dentro del transformador para diferenciar entre las condiciones normales y de falla, a través del contenido de metano, hidrógeno, etano, etileno y acetileno.	Arqueo interno, mal contacto eléctrico, puntos calientes, descargas parciales y sobrecalentamientos de conductores, aceite y aislamientos.	El transformador debe estar energizado y el método es costoso.
Análisis de respuesta en la frecuencia	La admitancia (función de transferencia) se mide sobre un amplio rango de frecuencias y los resultados se comparan con un conjunto de referencia.	Movimientos y deformaciones locales en los devanados.	El transformador debe estar desconectado y el equipo utilizado es costoso
Corriente de excitación	También denominada prueba en vacío, se le aplica tensión nominal al devanado de alta tensión dejando abierto el devanado de baja tensión, se miden corriente, tensión y potencia.	Corto entre vueltas, devanados abiertos, malas conexiones, laminaciones cortocircuitadas en el núcleo, malas uniones y corrientes circulantes.	Interrupción costosa y desconexión necesaria.
Prueba de potencial aplicado	Asegura que el aislamiento de los devanados resistirá esfuerzos eléctricos a los que se verá sometido el transformador.	Presencia de una falla a tierra o en el aislamiento mayor.	Requieren equipos especiales de alta tensión y solo se hacen en laboratorio.
Prueba de potencial inducido	Comprueba si el aislamiento entre vueltas y entre capas de los devanados del transformador, es de la calidad requerida.	Presencia de falla en el aislamiento menor	
Relación de transformación	Determina la relación entre el número de vueltas del devanado primario y el secundario.	Polaridad, continuidad, falsos contactos, fallas incipientes y espiras en corto circuito.	Solo se hace en baja tensión y puede no mostrar falla por vueltas en corto si estas no son francas.
Resistencia de devanados con corriente directa	Determina el valor de la resistencia en C.D. en cada uno de los devanados del transformador.	Vueltas cortocircuitadas, uniones defectuosas y malos contactos.	Interrupción costosa y desconexión necesaria

El sistema de aislamiento del transformador está conformado por el aislamiento mayor y el aislamiento menor, el aislamiento mayor es aquel presente entre devanados, entre devanados y yugo, y entre las terminales de alta tensión y tierra; mientras que el aislamiento menor consiste básicamente del aislamiento presente entre vueltas [7]. Está sujeto a diversos tipos de esfuerzos durante su operación, debidos típicamente a sobretensiones ocasionadas por descargas atmosféricas o por maniobra de interruptores. Estos esfuerzos pueden llegar a generar fallas internas en los devanados del transformador, siendo las más comunes: falla por vueltas cortocircuitadas, que pueden presentarse en la misma capa o entre capas adyacentes y falla de vueltas a tierra [8].

Una falla por contacto entre vueltas puede originarse por los esfuerzos mecánicos presentes en el devanado [2, 9, 10], por un alto esfuerzo eléctrico de tipo transitorio [11, 12] o por el deterioro progresivo del sistema de aislamiento del transformador [13]. Este tipo de fallas se presentan usualmente en lado de alta tensión del transformador, involucrando inicialmente un pequeño número de vueltas por medio de un contacto directo o por un arco eléctrico entre vueltas de diferente potencial [14].

Cuando un transformador es energizado por primera vez, experimenta una característica transitoria debida a las propiedades magnéticas no lineales del núcleo, esto se ve reflejado en una corriente que se encarga de magnetizarlo para que el transformador pueda operar de forma adecuada. Esta corriente presente en el transformador se denomina corriente de energización y está conformada por una parte transitoria y una parte estable. El transitorio de esta corriente se caracteriza por tener una forma de onda asimétrica (representada por picos de corriente de gran magnitud) que se va amortiguando después de algunos ciclos hasta alcanzar un estado estable. La estabilización de esta corriente se ve afectada por las resistencias en serie presentes en el sistema (resistencias del devanado primario y líneas de transmisión). Se ha observado que la corriente de energización presenta deformaciones en su forma de onda cuando existe una falla por vueltas cortocircuitadas en los devanados [15, 16, 17].

En este trabajo se propone una técnica para detectar fallas por vueltas cortocircuitadas en devanados de transformadores, la cual se basa en el análisis de la corriente de energización. La aplicación de esta técnica se prueba experimentalmente mediante mediciones en un transformador de baja potencia, el cual puede operar controladamente con falla entre vueltas. En este transformador se tiene acceso a un cierto número de derivaciones en el devanado primario, lo que permite simular diferentes condiciones de falla. A las señales de corriente de energización se les aplica un análisis espectral para poder analizar el comportamiento del contenido armónico y encontrar diferencias con respecto a la señal de corriente en condiciones sin falla. Lo anterior con el fin de establecer un criterio que permita diagnosticar la presencia y severidad de vueltas cortocircuitadas en el devanado del transformador.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Verificar el uso de la corriente de energización como un método para detectar fallas por vueltas cortocircuitadas en devanados de transformadores.

1.3.2 Objetivos particulares

- Diseñar e implementar un circuito para el control del ángulo de la tensión al momento de energizar al transformador.
- Medición experimental de la corriente de energización para condiciones sin falla y para diferente número de vueltas en cortocircuito.
- Realizar comparaciones entre la corriente de energización sin falla y la corriente de energización para diferentes condiciones de falla.
- Establecer un criterio que permita dar un diagnóstico del devanado con vueltas cortocircuitadas.
- Modelar mediante el método del elemento finito la corriente de energización del transformador para condiciones sin falla y para distintos casos de falla.

1.4 Planteamiento del problema

El transformador es un elemento de gran importancia en los Sistemas Eléctricos de Potencia, ya que es esencial para la transmisión y distribución de energía; conforme el transformador se aproxima a los límites de su vida útil (normalmente asumida por los diseñadores entre 20 y 25 años), la probabilidad de las fallas internas aumenta, ya que un factor importante que define el desempeño del sistema de aislamiento es el envejecimiento. Sin embargo, normalmente las compañías no desechan un transformador por el simple hecho de que tenga 20 años en operación, y muchas de ellas operan sus equipos por 30 o 35 años, tomando medidas adecuadas para el monitoreo de su adecuada operación [2].

Las fallas por vueltas cortocircuitadas representan un riesgo importante para la integridad del transformador, ya que éstas pueden evolucionar a una falla más severa de no ser detectada a tiempo. La magnitud de la corriente en el punto de falla ocasiona una temperatura elevada en el devanado, provocando que la falla vaya involucrando un número mayor de vueltas debido al deterioro progresivo del sistema de aislamiento.

Al presentarse este tipo de falla en alguno de los devanados (primario o secundario), existe una impedancia de falla que actúa como una carga adicional en el devanado [6, 18]. El valor de esta impedancia afecta directamente a la corriente en el devanado y a la magnitud de la corriente en el punto de falla. Es importante que este tipo de fallas sean detectadas a tiempo para que el transformador no experimente problemas inesperados por la degradación progresiva de su sistema de aislamiento.

En este trabajo se analizan los cambios en la corriente de energización ante la presencia de cortocircuito entre vueltas del devanado de un transformador. El objetivo de este análisis es proponer una técnica para la detección de fallas entre vueltas que además sea capaz de determinar su magnitud. Lo anterior, en base a correlacionar algunas características de la corriente con el número de vueltas en cortocircuito en devanados de transformadores.

Esta técnica busca complementar otras de las pruebas que actualmente se realizan a este equipo, teniendo como principal característica que se realizaría durante la re-energización del transformador después de una salida programada o después de la desconexión por la operación de los sistemas de protección.

1.5 Justificación

Los transformadores son especificados y diseñados para poder soportar los esfuerzos provocados por diferentes fenómenos eléctricos presentes en el sistema eléctrico de potencia; sin embargo, algunos de estos fenómenos van degradando progresivamente partes importantes del transformador, reduciendo así su vida útil e incrementando la posibilidad de una falla inesperada.

Actualmente existen transformadores que se encuentran operando con muchos años de servicio, y que son vulnerables a presentar una falla en cualquier momento debido al grado de envejecimiento de su sistema de aislamiento.

Cuando una falla se presenta en el transformador y éste llega a salir de operación, debido a la acción de sus protecciones, es necesario evaluar la posibilidad de volver a energizar el equipo, previa evaluación que permita asegurar que no existe ningún riesgo.

Realizar una inspección interna generalmente es costoso, depende del tipo de transformador que se esté utilizando (tipo seco o sumergido en aceite) y lleva demasiado tiempo, es por eso que deben tenerse técnicas de diagnóstico efectivas que permitan evaluar la severidad de la falla presente en el transformador.

Aunque existen pruebas para detectar fallas internas en los transformadores, ninguna de ellas puede predecir con certeza en qué lugar exactamente se encuentra la falla, y solo algunas de ellas pueden dar información aproximada de la severidad de la misma. Es común que se requiera combinar varios tipos de pruebas para poder evaluar de mejor manera el estado en el que se encuentra el transformador.

La corriente de energización sufre alteraciones cuando se presenta una falla por vueltas cortocircuitadas, por lo que su análisis puede ser utilizado como una técnica de diagnóstico en conjunto con otras pruebas que suelen realizarse en campo. Sin embargo, no se cuenta con un criterio de interpretación de resultados del análisis de la corriente de energización que permita establecer la presencia de fallas entre vueltas. En este trabajo se realiza un análisis de la corriente de energización que permite establecer una correlación entre algunas características de su forma de onda y la presencia y severidad de fallas por vueltas cortocircuitadas.

1.6 Limitaciones y alcances

1.6.1 Limitaciones

- Por limitaciones en la capacidad de la alimentación y en la sonda de medición de corriente, se utilizó un transformador monofásico experimental de baja potencia tipo seco para las mediciones de corriente de energización. Pero la metodología es aplicable a transformadores de mayor capacidad y mayores niveles de tensión.
- El análisis de la corriente de energización del transformador se realizó únicamente en la condición de cruce por cero de la tensión de alimentación.
- No fue considerado el flujo residual en las mediciones de corriente de energización, ya que en todas las mediciones este flujo se eliminó.
- Las fallas por vueltas en cortocircuito fueron realizadas solo en el devanado primario del transformador.
- En las simulaciones de la corriente de energización utilizando el método del elemento finito se consideró una geometría en dos dimensiones del transformador bajo prueba.

1.6.2 Alcances

En este trabajo se analiza la posibilidad de utilizar la corriente de energización en transformadores para diagnosticar fallas entre vueltas. Para lo anterior se implementó un circuito que permite controlar el instante de energización de un transformador al cual se le pueden simular fallas entre vueltas.

Se determinó que el comportamiento de la corriente de energización puede ser relacionado con el número de vueltas en cortocircuito a través de constantes de tiempo que definen la atenuación de la componente del segundo armónico. Simulaciones de la corriente de energización para diferentes estados de falla por vueltas en cortocircuito realizadas con el método del elemento finito, muestran un comportamiento similar por lo que es posible extender mediante simulación este análisis a transformadores de mayor capacidad y diferentes diseños.

1.7 Aportaciones

- Se implementa un circuito de control del ángulo de cierre de la fuente de alimentación de corriente alterna. Este circuito permite energizar al transformador exactamente en el cruce por cero de la forma de onda de tensión.
- Se implementa un algoritmo de análisis para la corriente de energización, para condiciones sin falla y para diferentes estados de falla por vueltas cortocircuitadas.
- Se implementaron dos modelos electromagnéticos del transformador en el dominio del tiempo: uno para condiciones sin falla y otro considerando vueltas en cortocircuito. Estos modelos consideran la no linealidad del núcleo magnético y permiten observar el comportamiento de la corriente de energización bajo condiciones sin falla y para diferente número de vueltas en cortocircuito.
- Se muestra que existe la posibilidad de utilizar el análisis de la corriente de magnetización para diagnosticar el estado de un transformador cuando presenta fallas entre vueltas.

1.8 Estado del arte

Existen diversas investigaciones referentes al análisis del transformador con fallas internas que combinan el uso de modelos matemáticos y simulaciones por campos electromagnéticos con el fin de poder reproducir lo mejor posible el comportamiento de la corriente de energización cuando el transformador experimenta una falla interna por vueltas en corto circuito. También estas investigaciones presentan el análisis de la señal de corriente de energización, sin embargo, no se muestran casos en donde se tenga un análisis para una señal de corriente en condiciones de falla. Los trabajos más relevantes relacionados con esta tesis se describen a continuación:

Bastard, Bertrand y Meunier en **1994** presentan un modelo de falla por vueltas cortocircuitadas basándose en la rutina BCTRAN integrada en el programa ATP-EMTP [19].

Esta rutina provee una serie de resultados que se utilizan para describir al transformador por medio de los datos obtenidos de las pruebas de corto circuito y en vacío. Se definen dos matrices, una para la resistencia y otra para las inductancias mutua y dispersa en el transformador (esto para transformadores trifásicos de dos devanados), aumentando el orden de las matrices cuando una falla por vueltas en corto se presenta después de dividir el devanado afectado en tres sub bobinas (dos partes sanas y una parte correspondiente a las vueltas en cortocircuito). Analizando las variaciones que sufren los parámetros de resistencia e inductancia del transformador cuando ocurre la falla. Este artículo muestra las bases para entender el comportamiento de una falla por vueltas en cortocircuito analizando únicamente los parámetros del transformador, sin considerar el comportamiento de la corriente de energización bajo este estado de falla.

Wang y Butler en 2001 [8] presentan el análisis de elementos finitos de fallas internas en un transformador de distribución. El transformador es modelado usando un acoplamiento indirecto del método de elementos finitos y simulación de circuitos con un software comercial. Observando el comportamiento que tienen las corrientes primaria y secundaria, así como los voltajes primario y secundario de forma experimental cuando una falla por vueltas cortocircuitadas ocurre, de igual forma se analiza el comportamiento de la corriente en el punto de falla. Los resultados experimentales fueron validados a través del modelo en elemento finito que simula este tipo de fallas, sin embargo, este modelo únicamente muestra el comportamiento de la corriente cuando la falla se presenta y demuestra que los valores de tensión en el lado primario y secundario no sufren alteraciones cuando se presenta la falla.

Elrefaie y Megahed en 2002 [17] se basaron en la técnica de Chee-Mun Ong para simular transformadores monofásicos de dos devanados, haciendo modificaciones para poder modelar fallas internas en transformadores de forma numérica utilizando MATLAB®. Los resultados de las simulaciones realizadas incluyen el comportamiento de la corriente de energización y la corriente en el punto de falla, posteriormente analizan estas corrientes y extraen las componentes armónicas para cada una de ellas. En esta investigación únicamente se extraen las componentes armónicas de la corriente de energización para condiciones sin falla y la corriente primaria para un 10% de falla en el devanado primario, sin comparar los resultados con pruebas experimentales ni considerar la corriente de energización bajo condiciones de falla por vueltas en cortocircuito.

González, Fernández y Arboleya en 2004, muestran un modelo electromagnético con vueltas en cortocircuito en transformadores [20]. En esta investigación se muestra el comportamiento de una falla por vueltas en cortocircuito presentes en el devanado primario como en el devanado secundario del transformador, esto a través de la consideración del acoplamiento magnético que tiene el devanado con respecto al número de vueltas involucradas en la falla dividiendo al devanado bajo falla en dos

partes: la parte que involucra las vueltas en cortocircuito y la parte sana. El resultado es un modelo electromagnético que considera este tipo de falla basado en el circuito equivalente del transformador y validado a través de una comparación con un modelo de elemento finito, sin embargo, solo se analizan las corrientes de falla y no se muestra el comportamiento que llega a tener la corriente de energización bajo esta condición.

Abed y Mohammed en 2007 [21] investigaron el comportamiento de un transformador trifásico con fallas internas (de fase a tierra y vueltas cortocircuitadas), a través del acoplamiento de un modelo electromagnético en elemento finito del transformador con un circuito externo de excitación. Posteriormente analizaron las señales de corriente en el punto de falla por medio de la aplicación de la Transformada Discreta Wavelet para poder proporcionar una representación local de la señal de corriente para condiciones sin falla y condiciones de falla. Sin embargo, no se analiza la corriente de energización para condiciones de falla y no se consideran casos que involucren diferente número de vueltas en corto circuito.

Liu y Mohammed en 2007 [15] realizaron un modelo basado en el Método de Elementos Finitos de un transformador monofásico de distribución con falla por vueltas en cortocircuito. En este artículo se presenta un modelo en variables de fase en donde estas variables son los flujos presentes en el transformador incluyendo el flujo formado por las vueltas en cortocircuito, la variación de estos flujos con respecto a las corrientes en el devanado es usada para representar la no linealidad del núcleo magnético. Esto se ve reflejado en los resultados de las simulaciones, las cuales muestran el comportamiento de la corriente de energización cuando está presente una falla por vueltas en cortocircuito, observando una deformación en su forma de onda.

Oliveira y Cardoso en 2010 [11], detallaron el comportamiento del transformador bajo la influencia de la corriente de energización con fallas por vueltas en cortocircuito. Ellos sugieren un nuevo método denominado Aproximación Vectorial Extendida de Park (EPVA, por sus siglas en inglés), basado en el análisis espectral de las señales de corriente de energización para identificar defectos de aislamiento entre vueltas en devanados de transformadores. El trabajo presenta como la corriente de energización se ve afectada cuando existe una falla interna por vueltas en cortocircuito en el devanado primario de un transformador trifásico, sin embargo, únicamente se limitan a analizar la corriente de energización para 4 vueltas en cortocircuito y no muestran el comportamiento electromagnético del transformador bajo condiciones de falla.

Huang, Chen, Wu, Guan y Cheng en 2012 [16] realizaron una detección de fallas en devanados de transformador a partir del análisis de la corriente de energización utilizando el modelo Jiles-Atherton para considerar las condiciones no lineales del

núcleo magnético. En este artículo se muestran las diferencias que tiene el comportamiento de la corriente de energización para condiciones sin falla y para un caso que presenta una falla por vueltas cortocircuitadas haciendo una correlación de coeficientes de los parámetros del modelo Jiles-Atherton de un transformador bajo condiciones en vacío. En los resultados que presentan, puede notarse como la corriente de energización sufre cambios importantes cuando una falla por vueltas en cortocircuito se presenta.

Behjat y Vahedi en 2013 [18]. El objetivo principal de esta investigación es tener un mejor entendimiento del comportamiento físico de una falla por vueltas en cortocircuito en el transformador, esto con ayuda de un modelo en elemento finito que describe el comportamiento del flujo en el núcleo, las corrientes primaria y secundaria y la corriente que circula entre las vueltas en cortocircuito. También se muestra la relación que existe entre los valores de corriente y el valor de la resistencia que involucra el 1% de falla para los devanados primario y secundario. Sin embargo, en los resultados finales, solo se hace una correlación de la corriente primaria y la corriente entre las vueltas en corto con respecto al número de vueltas en cortocircuito y no se analiza el efecto que tiene este tipo de falla en la corriente de energización, mostrando el comportamiento de la falla para estado estable.

Dolgicers y Kozadajevs en 2015 [22] tienen la idea de crear un dispositivo basado en micro procesos que utilizará la corriente de energización como una fuente de información para la detección de fallas por vueltas en cortocircuito en devanados de transformadores. Muestran el comportamiento de la curva de histéresis para condiciones sin falla y para 1 y 2 vueltas en cortocircuito, a partir de la curva de histéresis. Se muestra como la corriente de energización sufre deformaciones en su forma de onda cuando están presentes 1 y 2 vueltas en cortocircuito. El análisis que plantean en este trabajo de investigación es detectar este tipo de falla para un número reducido de vueltas en cortocircuito, sin embargo para los dos casos de falla que analizan, los resultados obtenidos son muy precisos, pero no muestran el comportamiento electromagnético del transformador, como se ven afectadas las líneas de flujo magnético para un mayor número de vueltas cortocircuitadas y como se ve afectada la corriente de energización para un mayor número de vueltas cortocircuitadas.

1.9 Trabajos relacionados en la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Zacatenco

En la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica unidad Zacatenco, se han realizado investigaciones enfocadas al análisis de fallas internas en los transformadores. Los trabajos más relevantes son:

R. Ocón Valdéz en 2004 [2], analizó las deformaciones mecánicas presentes en devanados de transformadores a través del método de respuesta en la frecuencia construyendo un modelo equivalente para un transformador experimental.

D. Soto Meza en 2012 [50], desarrolló una metodología para el diseño dieléctrico en transformadores utilizando la interfaz entre COMSOL Multiphysics® y MATLAB®. Ella realizó el cálculo de esfuerzos dieléctricos, después de simular una descarga atmosférica al devanado del transformador para poder evaluar si el diseño soporta la prueba de impulso, si no soporta esta prueba la geometría o los materiales aislantes deben ser modificados.

W. G. Nájera Gutiérrez en 2012 [51], analizó las sobretensiones PWM que se producen en devanados de transformadores con ayuda de un modelo de parámetros concentrados en el dominio del tiempo.

R. Reyes de Luna en 2015 [52], analizó la propagación de descargas parciales en devanados de transformadores utilizando un modelo de parámetros concentrados en el dominio de la frecuencia.

Z. Luna López en 2015 [53], implemento dos modelos detallados de devanados de transformador en el dominio de la frecuencia utilizando MATLAB®, uno de parámetros concentrados y otro de parámetros distribuidos. Las tensiones resultantes por vuelta fueron transformadas al dominio del tiempo con ayuda de la transformada numérica de Laplace inversa. Comparó con mediciones experimentales y mostró como los dos modelos implementados permiten calcular la propagación de un pulso rápido en el devanado con muy buena aproximación.

1.10 Estructura de la tesis

Capítulo 1. Introducción

En este capítulo se exponen generalidades, antecedentes del trabajo, planteamiento del problema, los objetivos perseguidos, justificación, limitaciones y alcances y también una revisión de trabajos relacionados con este tema de investigación.

Capítulo 2. Corriente de energización y fallas por vueltas cortocircuitadas

Se presentan los conceptos fundamentales acerca de la corriente de energización, mostrando conceptos teóricos que ayuden a entender como es el comportamiento de esta corriente y cuándo es que se presenta, así mismo se explican los factores que

pueden llegar a afectarla y como es que puede ser utilizada para poder detectar fallas por vueltas en cortocircuito en devanados de transformadores. Posteriormente, se hace mención del origen de una falla por vueltas cortocircuitada en los devanados de transformadores, presentándose la teoría preliminar acerca de este tipo de fallas explicando en base al circuito equivalente del transformador que es lo que ocurre y como es el comportamiento físico de la misma.

Capítulo 3. Medición de la corriente de energización para diferente número de vueltas en cortocircuito

Se describe el uso de un circuito de control para la energización del transformador bajo prueba, con el fin de observar la corriente de energización de una manera reproducible en cada uno de los casos de falla analizados, con el fin de comparar su comportamiento en base a las condiciones sin falla. De igual forma, se observa el comportamiento que tiene la corriente cuando se presenta una falla en el devanado primario del transformador para diferente número de vueltas en cortocircuito. Este capítulo muestra cómo es que se pueden controlar dos de los factores más importantes presentes en el momento de energización y des-energización del transformador como son: el ángulo de la fuente de alimentación de tensión y el flujo remanente presente en el núcleo magnético.

También se observa como la forma de onda de la corriente de energización sufre alteraciones conforme el número de vueltas en cortocircuito es mayor comparándola con la corriente en condiciones sin falla.

Capítulo 4. Procesamiento de las señales de corriente de energización

En esta parte se describe un algoritmo que se encarga de aplicar la Transformada Corta de Fourier (STFT por sus siglas en inglés) a las señales de corriente de energización para los diferentes casos de falla establecidos, mostrando como se van presentando alteraciones conforme el número de vueltas en cortocircuito aumenta, se analiza el comportamiento armónico presente en cada una de las señales y se grafica la atenuación de las primeras cinco componentes armónicas presentes en las señales, comparándolas con la corriente de energización en condiciones sin falla. En este capítulo se trata de establecer la correlación que existe entre la corriente de energización con respecto al número de vueltas en cortocircuito presentes en el devanado.

Capítulo 5. Resultados de las simulaciones utilizando el método del elemento finito

Se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas con el software COMSOL Multiphysics® utilizando un modelo en 2-D para observar el comportamiento físico de la falla presente en el transformador, primeramente, simulando el transformador para condiciones sin falla y posteriormente simulando cada uno de los diferentes casos de falla establecidos en el devanado.

Se describen las ecuaciones que el programa resuelve, así mismo, se mencionan las dificultades encontradas para la simulación de este fenómeno.

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se presentan las conclusiones del trabajo y se mencionan algunas recomendaciones para trabajos futuros.

1.11 Trabajos publicados y derivados del desarrollo de la tesis

- A. R. Hernández-Santiago., J. C. Olivares-Galván, F. P. Espino-Cortés, D. Granados-Lieberman. *“Diagnóstico del transformador con falla entre vueltas utilizando la corriente de energización,”* Reunión de Verano de Potencia RVP AI-2016. Acapulco, 17-23 Julio, 2016, Memoria Técnica, (Artículo: TR-93).
- A. R. Hernández-Santiago., J. C. Olivares-Galván, F. P. Espino-Cortés, D. Granados-Lieberman. *“Análisis de la corriente de energización para la detección de vueltas en cortocircuito en devanados de transformadores,”* 8° Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas, 17-21 Octubre, 2016. Instituto Politécnico Nacional, Sección de posgrado, Memoria Técnica, Área: Eléctrica (Artículo: ELE-11).

CAPÍTULO 2 :

CORRIENTE DE ENERGIZACIÓN Y FALLA POR VUELTAS EN CORTOCIRCUITO

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos referentes al fenómeno de la corriente de energización en los transformadores, asimismo se hace mención de los aspectos relacionados con el diagnóstico y origen de las fallas por vueltas en cortocircuito. Se describe un modelo matemático basado en el circuito equivalente del transformador que permite analizar el comportamiento de la corriente de energización.

2.1 Características de los núcleos de transformadores

El material más usado para núcleos de transformadores es el acero al silicio, ya que su permeabilidad magnética es grande y su costo por unidad de peso es menor en comparación con otros materiales ferromagnéticos. El uso de este tipo de núcleos en bobinas de transformadores se hace con el fin de aumentar considerablemente el valor de su inductancia, esto tiene ventajas considerables ya que esto permite reducir las dimensiones de las bobinas, la resistencia del devanado y la reducción del peso del mismo. Otro aspecto importante del uso de un núcleo de acero al silicio es que se confina en él la casi totalidad del flujo magnético y, por tanto, para una inductancia dada, la dispersión del campo magnético en la región que rodea a la bobina es menor que al utilizar un núcleo de aire [23].

Sin embargo, el uso de este tipo de material en los núcleos de transformadores introduce fenómenos no deseados que pueden llegar a afectar el funcionamiento correcto del transformador si es que estos no se consideran durante la etapa de diseño. La no linealidad que presentan los materiales magnéticos utilizados en la construcción de núcleos de transformadores hace que la inductancia se convierta en una variable dependiente del flujo, impactando directamente en la forma de onda de la corriente de excitación que requiere el transformador al momento de ser energizado. Lo anterior tiene como consecuencia una forma de corriente no sinusoidal aun cuando el flujo varié en forma sinusoidal.

El fenómeno no lineal presente en núcleos de transformadores está definido por la característica $B-H$, típica de los materiales ferromagnéticos. Este comportamiento está relacionado con el ciclo de histéresis, el cual se muestra como un área diferente de cero, encerrada por la trayectoria $B-H$ cuando el material magnético se somete a una magnetización cíclica [7], [23-25].

2.2 Parámetros de tensión, flujo magnético e intensidad de corriente en un transformador

Como se había mencionado anteriormente, el principio de funcionamiento del transformador se basa en la Ley de Faraday, la cual establece que una tensión inducida aparece en las terminales de una bobina cuando esta está presente ante un flujo magnético variante en el tiempo [7, 44], denotada por la ecuación:

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

El signo negativo indica que esta tensión inducida se opone a la causa que lo produce, lo que corresponde a la Ley de Lenz [7, 44]. Considerando el circuito mostrado en la Fig. 2.1, podemos observar un generador con resistencia R_G y una tensión de alimentación v_G conectado al devanado primario de un transformador. De acuerdo a este circuito y considerando que el devanado secundario está abierto, aplicando la ley de Kirchhoff de tensiones obtenemos las siguientes relaciones para el transformador:

$$v_G = (R_G + R_p)i_p + \frac{d\lambda_1}{dt} \quad (2.2)$$

Donde,

R_p es la resistencia del devanado primario

i_p es la corriente que circula por el devanado primario

λ_1 son los enlaces de flujo del devanado primario

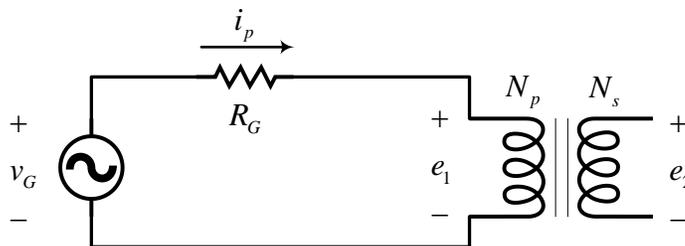


Fig. 2.1. Transformador alimentado con fuente de tensión en circuito abierto.

En un transformador con núcleo de hierro trabajando en vacío, el flujo útil es mayor que el 99% del flujo total. Suponiendo que todo el flujo ϕ atraviesa las N_p vueltas primarias, como ocurriría si el flujo se hallara totalmente confinado en el núcleo, el flujo que atraviesa el primario será igual a las vueltas primarias y la tensión inducida en el devanado primario e_1 será tal como se indicó en la ecuación (2.1) [7], [23-25].

Entonces, sustituyendo la ecuación (2.1) en la ecuación (2.2) tenemos otra forma de expresar la ecuación del transformador, considerando el número de vueltas del devanado primario, tal como se indica a continuación:

$$v_G = (R_G + R_p)i_p + N_p \frac{d\phi}{dt} \quad (2.3)$$

Asimismo, el flujo en el núcleo también atraviesa las N_s vueltas del devanado secundario, por lo que la tensión inducida en el secundario es:

$$e_2 = N_s \frac{d\phi}{dt} \quad (2.4)$$

El flujo ϕ es creado por medio de la fuerza magneto motriz (f.m.m) de la corriente i_p , el cual está en función de la curva de saturación del material del núcleo del transformador, por lo tanto se puede expresar el flujo magnético ϕ en términos de e_1 por medio de la siguiente ecuación:

$$\phi = -\frac{1}{N_p} \int_0^t e_1 dt \quad (2.5)$$

Considerando que $e_1 = -\hat{V}_p \cos(\omega t)$ y sustituyendo en la ecuación (2.5), obtenemos:

$$\phi = \frac{\hat{V}_p}{N_p} \int_0^t \cos(\omega t) dt \quad (2.6)$$

Integrando la ecuación (2.6), se obtiene la siguiente expresión:

$$\phi = \frac{\hat{V}_1}{\omega N_1} \sin \omega t \quad (2.7)$$

De la ecuación (2.7) podemos observar que el flujo máximo en el transformador se da cuando se alcanza el punto máximo en la forma de onda [18]:

$$\phi_{\max} = \frac{\hat{V}_p}{\omega N_p} \quad (2.8)$$

Pero sabemos que $\omega = 2\pi f$, entonces sustituyendo esta expresión en la ecuación (2.8) y calculando el valor eficaz para la tensión, tendremos:

$$\bar{V}_p = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} fN\phi_{\max} = 4,44 fN\phi_{\max} \quad (2.9)$$

De la ecuación anterior se puede observar que el valor máximo del flujo en el núcleo del transformador está definido por la tensión eficaz aplicada al devanado primario, la frecuencia del sistema y el número de vueltas del devanado primario.

$$\phi_{\max} = \frac{\bar{V}_1}{4,44 fN_1} [Wb] \quad (2.10)$$

La ecuación (2.10) muestra la relación que existe entre el valor eficaz de la tensión generada por un flujo variante en el tiempo y el valor máximo del mismo.

Puesto que el flujo es proporcional a la f.m.m en el núcleo, y ésta a su vez es proporcional a la corriente que circula en el devanado, la forma de onda de la corriente estará en fase con la forma de onda del flujo y ambas serán adelantadas 90° con respecto a la tensión primaria en el transformador, tal como se observa en la Fig. 2.2.

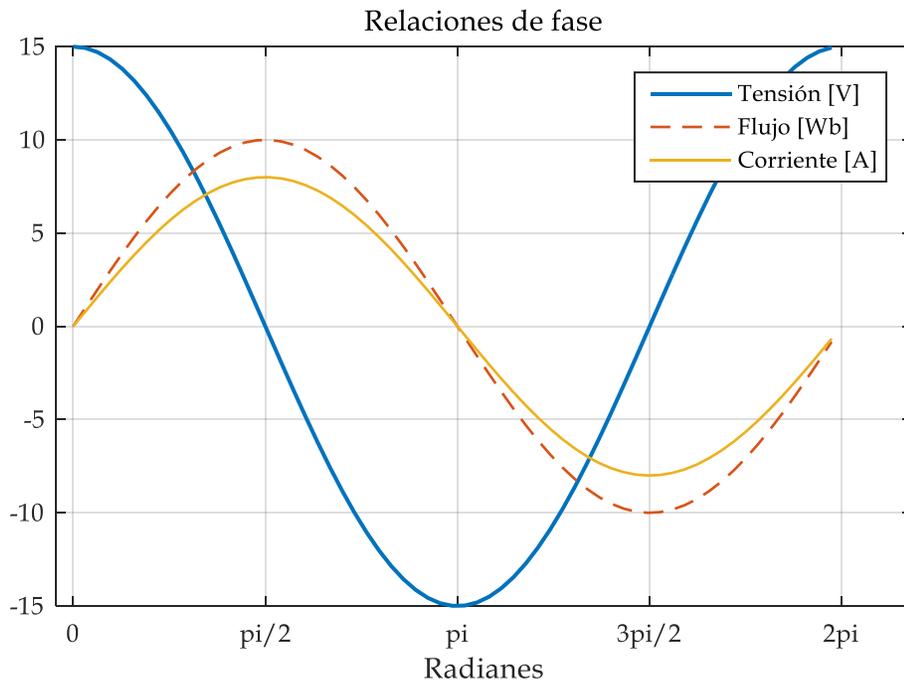


Fig. 2.2. Relaciones de fase entre la tensión del primario, flujo magnético y corriente primaria en un transformador.

2.3 Inductancia de dispersión

Hasta ahora se ha considerado al transformador como un elemento perfecto eléctricamente hablando, sin embargo, cabe resaltar que esto no es así ya que un transformador real cuenta con una serie de características que interfieren en su funcionamiento ideal, estas características son:

- La resistencia en los devanados.
- La presencia de flujo de dispersión.
- La corriente de excitación necesaria para crear el flujo.
- Las pérdidas por histéresis y por corrientes circulantes en el núcleo

Cuando un transformador está conectado a una carga, se genera un flujo en el devanado secundario que se encarga de producir una corriente secundaria, esto ocasiona que exista un flujo de dispersión al igual que en el devanado primario.

La presencia de fugas magnéticas ejerce un efecto importante sobre las características de carga de todas las máquinas de corriente alterna. Aun cuando las fugas presentes en un transformador suelen ser muy pequeñas cuando trabaja en vacío, el estudio del campo magnético creado por la corriente que circula por un devanado ayuda a comprender las condiciones más complicadas e importantes que se tienen cuando circulan corrientes por los dos devanados [17]. Un análisis más detallado sobre los flujos dispersos presentes en el transformador puede encontrarse en las referencias [7], [23-25].

La Fig. 2.3 muestra el diagrama esquemático de un transformador monofásico en vacío, donde el flujo mutuo ϕ_m presente en el núcleo enlaza a ambos devanados (primario y secundario). También se muestra la corriente de excitación i_p presente en el devanado primario y los flujos dispersos ϕ_{l1} y ϕ_{l2} para cada devanado.

Tomando como referencia a la ecuación (2.3) podemos escribir las ecuaciones que gobiernan al circuito de la Fig. 2.3 como sigue:

$$v_p = R_p i_p + N_p \frac{d\phi_1}{dt} \quad (2.11)$$

$$v_s = R_s i_s + N_s \frac{d\phi_1}{dt} \quad (2.12)$$

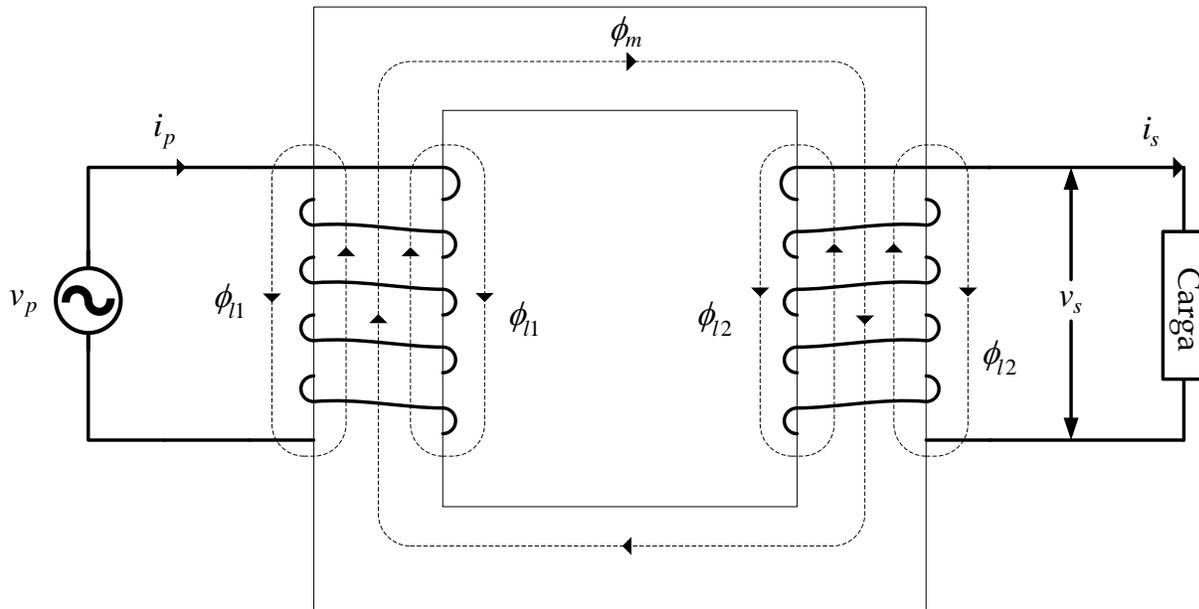


Fig. 2.3. Diagrama esquemático del transformador con carga.

Los flujos ϕ_1 y ϕ_2 representan los flujos que atraviesan cada vuelta de los devanados e incluyen las componentes de fuga y mutua. Entonces cada uno de estos flujos puede ser representado de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\phi_1 &= \phi_{l1} + \phi_{21} + \phi_{12} \\ \phi_2 &= \phi_{l2} + \phi_{12} + \phi_{21}\end{aligned}\tag{2.13}$$

Donde,

ϕ_{l1} y ϕ_{l2} son las componentes de flujo de fuga creadas por cada corriente

ϕ_{21} es la componente del flujo mutuo creado por la corriente primaria

ϕ_{12} es la componente del flujo mutuo creado por la corriente secundaria

Como los flujos ϕ_{12} y ϕ_{21} representan las componentes del flujo mutuo, se puede considerar que $\phi_m = \phi_{12} + \phi_{21}$ y entonces las ecuaciones (2.13) se pueden escribir de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\phi_1 &= \phi_{l1} + \phi_m \\ \phi_2 &= \phi_{l2} + \phi_m\end{aligned}\tag{2.14}$$

Haciendo esta consideración, la ecuación (2.11) se descompone de la siguiente manera:

$$v_p = R_p i_p + N_p \frac{d\phi_{l1}}{dt} + N_p \frac{d\phi_m}{dt} \quad (2.15)$$

Ahora la tensión entre las terminales del primario del transformador está conformada por una caída de tensión óhmica, una tensión inducida por el flujo de fuga y otra inducida por el flujo mutuo resultante ϕ . Lo mismo ocurre con el devanado secundario. El flujo de fuga ϕ_{l1} únicamente induce tensión en el devanado primario, mientras que el flujo mutuo ϕ_m enlaza al devanado primario y al devanado secundario.

La componente de autoinducción del devanado primario debida al flujo de fuga ϕ_{l1} del devanado primario respecto al secundario se define como inductancia de fuga del devanado primario respecto al devanado secundario [7, 23]. Por lo tanto, las inductancias de fuga para el devanado primario y secundario serán:

$$L_{lp} = N_p \frac{d\phi_{l1}}{di_p} \quad (2.16)$$

$$L_{ls} = N_s \frac{d\phi_{l2}}{di_s} \quad (2.17)$$

Si se expresa la ecuación (2.15) en términos de la inductancia de fuga, se obtiene la siguiente relación:

$$v_p = R_p i_p + L_{lp} \frac{di_p}{dt} + N_p \frac{d\phi_m}{dt} \quad (2.18)$$

2.4 Corriente de energización

Cuando un transformador es energizado, las características no lineales que presenta el núcleo del transformador causan un comportamiento asimétrico en la forma de onda de la corriente primaria, teniendo de igual manera un comportamiento no lineal. Cuando el núcleo de un transformador llega a saturarse debido al cambio repentino en la tensión de alimentación aplicada, el transformador absorbe una corriente de magnetización, denominada corriente de energización, la cual puede alcanzar un valor de 10 a 20 veces el valor de la corriente nominal del transformador [26, 27].

Durante la energización de un transformador (para el caso más severo de la corriente de energización), el flujo dentro del núcleo llega a alcanzar teóricamente un valor máximo de 2 a 3 veces su valor nominal, esto debido a la baja permeabilidad relativa del material ferromagnético en el estado de saturación [7]. Un incremento significativo en el flujo ocasionará un incremento en la magnitud de la corriente de energización. Cuando el transformador no tiene carga conectada en el devanado secundario, la caída de tensión debida al flujo de fuga es despreciable, únicamente tomando en cuenta la tensión inducida en el devanado primario, como se observa en la Fig. 2.4.

Considerando que $v_p = \hat{V}_p \sin(\omega t - \theta)$ y el transformador está operando en vacío, la ecuación (2.18) únicamente considerará la caída de tensión óhmica y la tensión inducida e_1 :

$$\hat{V}_p \sin(\omega t - \theta) = R_p i_p + e_1 \quad (2.19)$$

Debido a la naturaleza no lineal del núcleo magnético, el enlace de flujo λ se vuelve una función de la corriente $\lambda_1 = \lambda(i)$, recordando que $\lambda_1 = N_p \phi_m$. Para este caso, la tensión inducida e_1 se define como:

$$e_1 = L_p \frac{di_p}{dt} \quad (2.20)$$

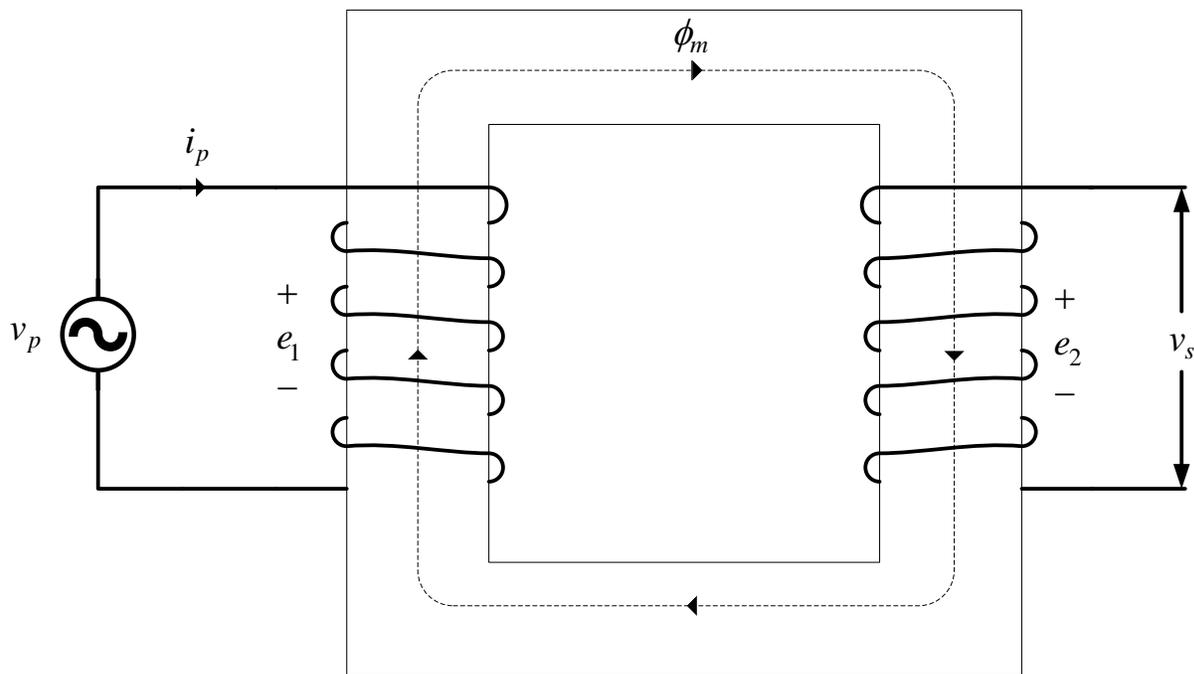


Fig. 2.4. Diagrama esquemático del transformador trabajando en vacío.

El valor de la inductancia puede ser expresado en función de los enlaces de flujo $L_p = d\lambda_1/di_p$, este valor simplemente representa la pendiente de la gráfica $\lambda - i$ en el punto de operación p [23], como se muestra en la Fig. 2.5.

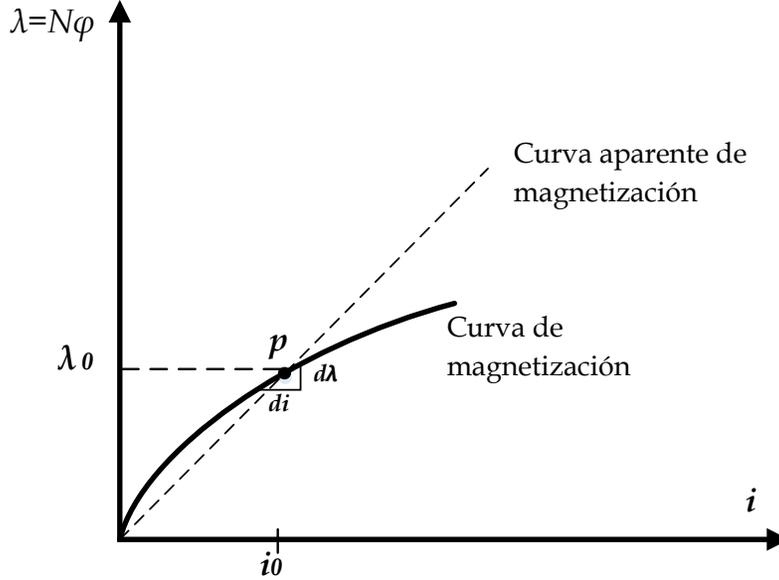


Fig. 2.5. Variación de la inductancia a partir de los valores de corriente y flujo magnético.

Con las consideraciones hechas, la ecuación (2.19) se puede reescribir como sigue:

$$\hat{V}_p \sin(\omega t - \theta) = R_p i_p + \frac{d\lambda_1}{di_p} \frac{di_p}{dt} \quad (2.21)$$

Donde,

\hat{V}_p es la tensión máxima del lado primario

θ es el ángulo de la fuente de tensión de alimentación

λ_1 son los enlaces de flujo total en el devanado primario

$\frac{d\lambda_1}{di_p}$ es la inductancia del devanado primario

Como puede observarse en la ecuación (2.21), la inductancia es un término diferencial y su valor varía en función de la curva de saturación del material magnético del núcleo. La solución analítica para esta ecuación es muy compleja, como puede verse en [23, 25] y [28], también existen fórmulas que se encargan de calcular el primer pico de la corriente de energización [29-32].

Para poder obtener la forma de onda de la corriente de energización, se despeja di_1/dt de la ecuación (2.21) como se muestra a continuación:

$$\frac{di_p}{dt} = -\frac{R_p}{\partial\lambda_1/\partial i_p} i_p + \frac{\hat{V}_p}{\partial\lambda_1/\partial i_p} \sin(\omega t - \theta) \quad (2.22)$$

La solución a la ecuación (2.22) se obtiene aplicando el método Runge-Kutta de cuarto orden [24, 56] y considerando los parámetros que se obtiene a partir de la prueba de cortocircuito y del valor de la resistencia del devanado primario R_p . Se obtienen arreglos de tensión y corriente primaria para poder convertir los valores de tensión primaria en valores de enlaces de flujo en el transformador, como lo indica la ecuación (2.10). De esta forma puede generarse la curva de magnetización del transformador, la cual servirá para poder evaluar numéricamente el valor de la inductancia $\partial\lambda_1/\partial i_p$ para cada incremento en la solución [24], como lo indica a Fig. 2.5. La corriente de energización obtenida a partir de la ecuación (2.22) se puede apreciar en la Fig. 2.6, considerando $\theta = 0^\circ$ y $R_1 = 0.6\Omega$. Esta corriente tiene una forma de onda muy peculiar con características asimétricas y no lineales, se caracteriza por tener un cierto número de picos de corriente de alta magnitud que se van amortiguando debido a las resistencias serie presentes en el sistema (resistencias del devanado primario, líneas de transmisión, generador, etc.).

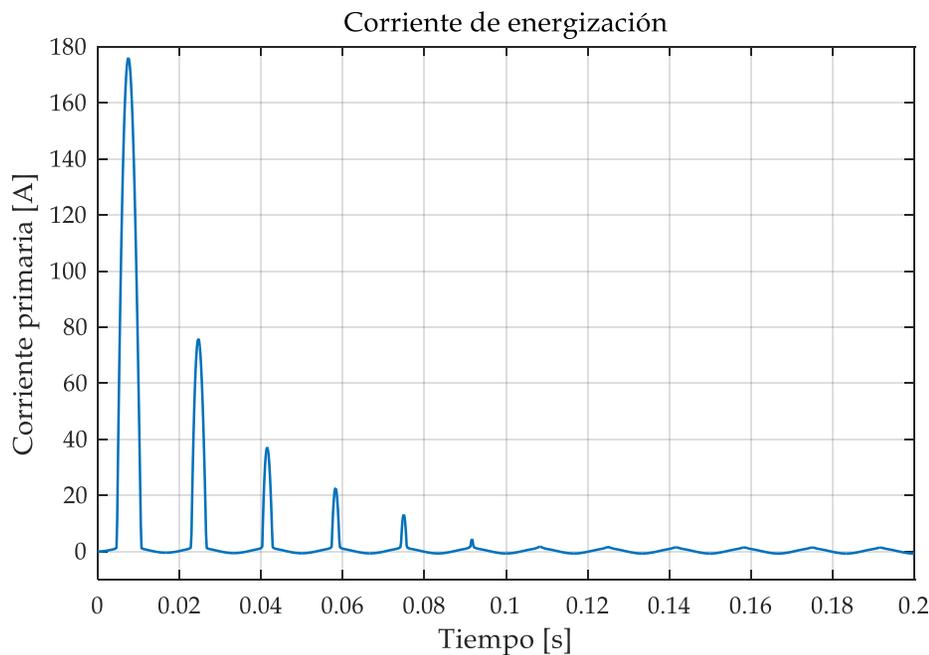


Fig. 2.6. Forma de onda de la corriente de energización obtenida de la ecuación (2.22).

2.5 Factores que afectan a la corriente de energización

Existen algunos factores que afectan directamente a la magnitud de la corriente de energización durante los primeros ciclos, como son: el ángulo de la tensión al momento de conexión, densidad del flujo residual, resistencias en serie, carga conectada en el secundario [7, 33]. Cada uno de estos factores se describe a continuación.

2.5.1 Ángulo de la tensión al momento de la conexión

Este ángulo es el que se observa en la ecuación (2.19) y es el ángulo presente al momento de la energización del transformador. La magnitud de la corriente de energización decrece cuando este ángulo aumenta (variando θ entre 0° y 90°), teniendo un valor máximo de magnitud de corriente de energización para $\theta=0^\circ$ y un valor mínimo para $\theta=90^\circ$ [34]. La Fig. 2.7 representa la solución de la ecuación (2.22) para diferentes valores de θ .

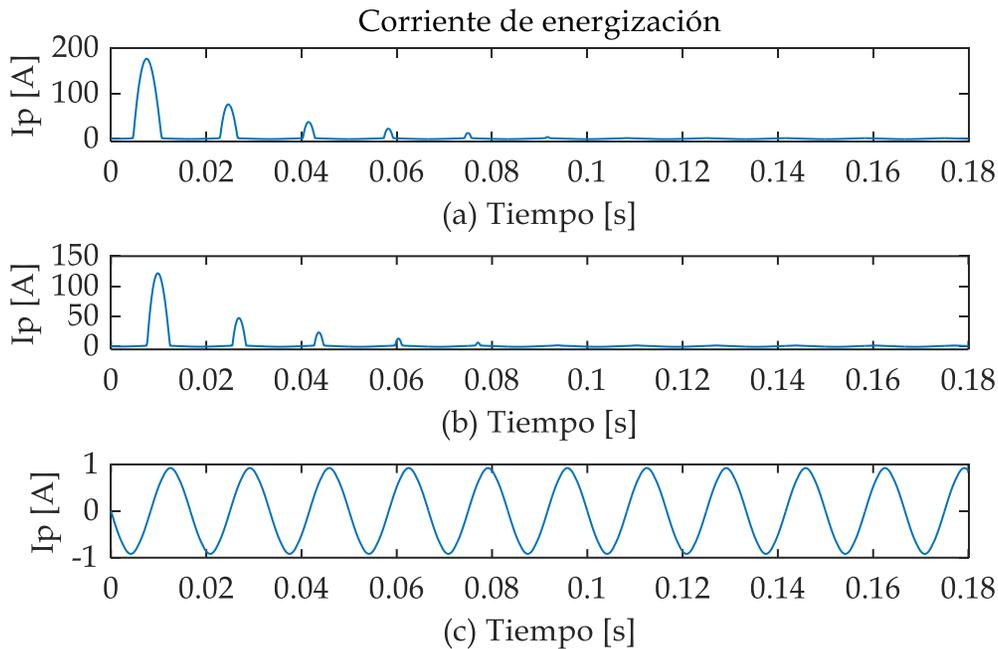


Fig. 2.7. Comportamiento de la corriente de energización para diferentes ángulos, (a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=45^\circ$, (c) $\theta=90^\circ$.

Como puede observarse, conforme el ángulo θ varía de 0° a 90° la magnitud de la corriente de energización va siendo cada vez menor, desapareciendo completamente la parte transitoria cuando se tiene un ángulo $\theta=90^\circ$, permaneciendo únicamente la componente estable tal como se observa en la Fig. 2.7 (c).

2.5.2 Densidad de flujo residual

La Fig. 2.8 muestra el comportamiento de B y H al momento de des-energizar un transformador. Cuando esto ocurre, la corriente primaria decrece a cero mientras que el flujo en el núcleo sigue el ciclo de histéresis, tal como se muestra en la Fig. 2.8, ocasionando que un flujo residual B_r quede encerrado en el núcleo. Al momento de energizar nuevamente al transformador, el flujo inicial será diferente de cero comenzando en el valor del flujo presente de la última des-energización. Dependiendo de la magnitud del flujo residual presente en el núcleo, la magnitud del primer pico de la corriente de energización tendrá un incremento significativo, el flujo residual puede ser del 80% al 90% del valor del flujo nominal, ocasionando que el transformador sobrepase el punto rodilla en la curva de saturación correspondiente al material magnético del núcleo [34].

El flujo magnético en un circuito inductivo no puede tener un cambio repentino; el flujo justo después de cerrar el interruptor en $t = 0^+$ deberá permanecer igual al flujo justo antes del cierre del interruptor en $t = 0^-$. Por lo tanto, la densidad de flujo, en lugar de comenzar de un valor máximo negativo $-B_{mp}$, comenzará desde $+B_r$ y alcanzará un valor pico positivo de $B_r + 2B_{mp}$ ocasionando que el núcleo se sature, como se observa en la Fig. 2.9 [7, 31].

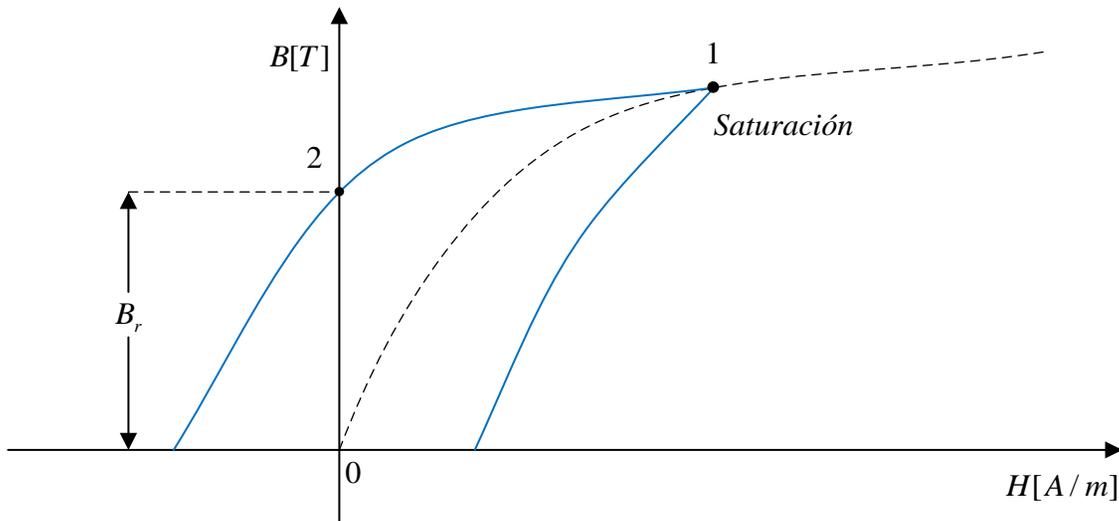


Fig. 2.8. Densidad de flujo residual.

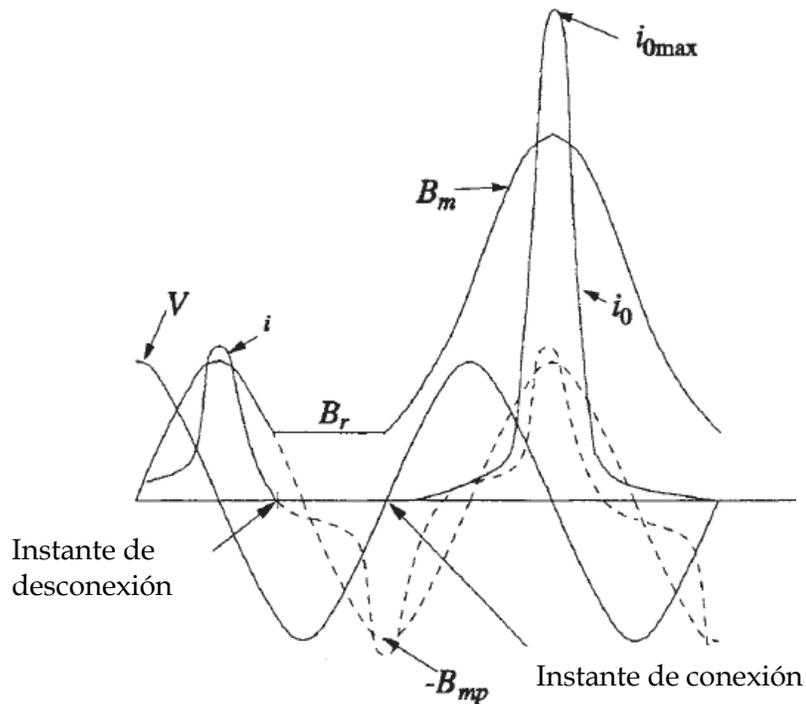


Fig. 2.9. Comportamiento de la corriente de energización considerando flujo remanente [7].

Como se mencionó anteriormente, el valor del ángulo de la tensión al momento de la energización y la magnitud y polaridad del flujo residual presente en el núcleo determinan el valor inicial y comportamiento de la corriente de energización en el transformador. Existen seis condiciones que definen el comportamiento de la corriente de energización en función de las dos variables antes mencionadas [25], estas condiciones se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Condiciones de la corriente de energización [25]

Condiciones	Tensión de energización	Flujo residual	Magnitud del flujo magnético
A	0	0	Doble del nominal
B	0	Máximo, polaridad contraria a la nominal	Triple del nominal
C	0	Máximo, polaridad igual a la nominal	Nominal
D	Máxima	0	Nominal
E	Máxima	Máximo, polaridad contraria a la nominal	Doble del nominal
F	Máxima	Máximo, polaridad igual a la nominal	Doble del nominal

Bajo condiciones estables, el flujo magnético se encuentra desfasado 90° con respecto a la tensión del primario, alcanzando su valor máximo cuando la tensión cruza por cero de acuerdo a la Fig. 2.2. Este desfase hace que la magnitud del flujo varíe de un valor máximo en una dirección a un valor máximo en la dirección opuesta, esto con el fin de producir medio ciclo de la f.e.m requerida por el devanado primario [25, 35].

Cuando no hay flujo residual en el núcleo al momento de que el transformador es energizado, el flujo partirá desde cero y para poder mantener el primer medio ciclo de la forma de onda de la tensión primaria éste deberá alcanzar un valor aproximado del doble de la densidad de flujo nominal en el transformador, como lo indica la Fig. 2.10. Este incremento en la densidad de flujo magnético B se ve reflejado en el primer pico de la corriente de energización del transformador, como se observa en la Fig. 2.9.

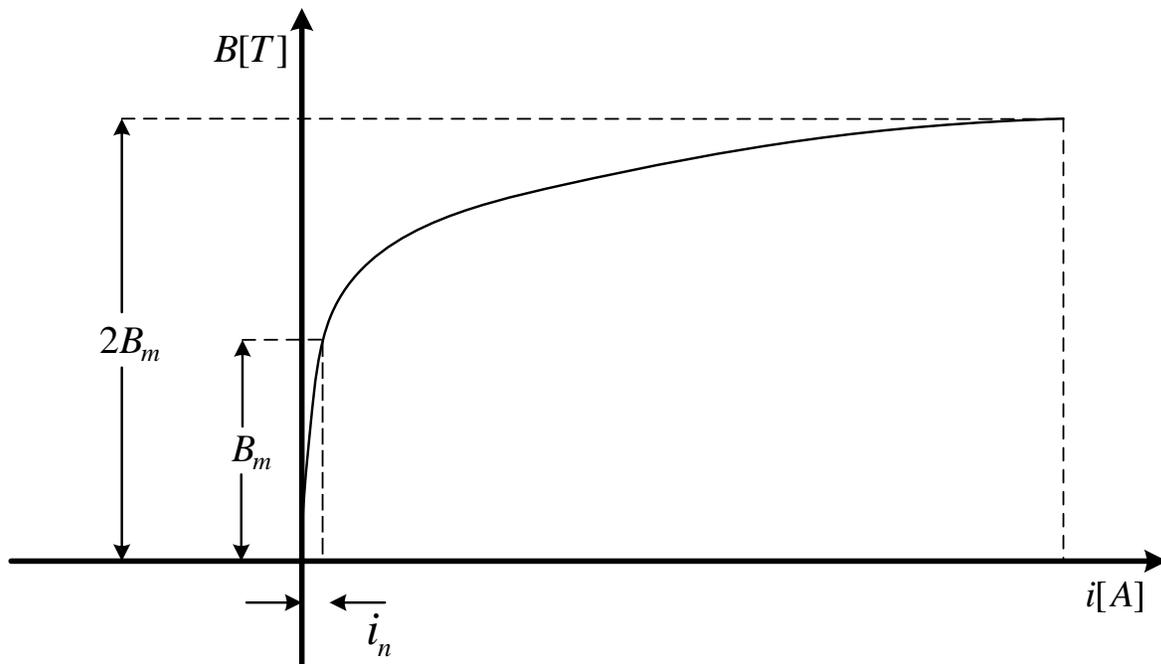


Fig. 2.10. Diagrama esquemático del valor que llega a alcanzar la densidad de flujo magnético B_n cuando el transformador entra al estado de saturación.

De la Fig. 2.10 se observa que la corriente nominal del transformador i_n se presenta en la parte lineal (estable) del transformador, sin embargo, cuando el transformador es conectado por primera vez o re-conectado, la corriente alcanza valores muy altos de magnitud, superando a la corriente nominal del transformador.

2.5.3 Resistencias en serie

Este concepto tiene que ver con la resistencia equivalente que existe entre el transformador y la línea de transmisión. El efecto que tiene esta resistencia equivalente sobre la corriente de energización es un amortiguamiento que está impactando en la velocidad de decaimiento; otro efecto que se tiene es la variación de la magnitud del primer pico de la corriente [7].

2.6 Circuito equivalente del transformador

El circuito equivalente del transformador considera las pérdidas en el cobre y en el núcleo, los parámetros de éste se determinan a través de la prueba en vacío y la prueba de cortocircuito [7], [23-25]. En base a estas pruebas se puede construir el circuito equivalente del transformador mostrado en la Fig. 2.11, donde puede observarse que se parte del circuito ideal del transformador.

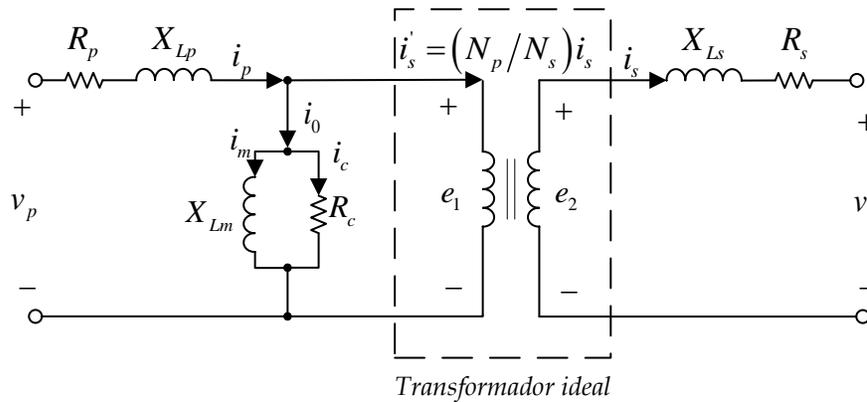


Fig. 2.11. Circuito equivalente de un transformador

Recordando la ecuación (2.18), la tensión v_p se aplica a la resistencia del primario R_p en serie con la inductancia de fuga L_p e induciendo una fuerza electromotriz e_1 en el devanado primario. La corriente que circula por el circuito principal de la Fig. 2.11 es la componente de carga i'_s [7] de la corriente del primario y también relaciona a la corriente secundaria por medio de:

$$N_p i'_s = N_s i_s \quad (2.23)$$

Despejando obtenemos:

$$i'_s = \frac{N_s}{N_p} i_s \quad (2.24)$$

El circuito de la Fig. 2.11 puede simplificarse aún más, omitiendo al transformador ideal, esto se hace refiriendo todas las cantidades al lado primario o al secundario, en la Fig. 2.12 puede observarse el circuito equivalente del transformador con todas las cantidades referidas al primario, esto a través de:

$$X'_{Ls} = X_{Ls} (N_p / N_s)^2 \quad (2.25)$$

$$R'_s = R_s (N_p / N_s)^2 \quad (2.26)$$

El circuito equivalente del transformador da un mejor panorama de los efectos que tienen las pérdidas en vacío y las pérdidas del hierro, sin embargo, este circuito es para condiciones estables del transformador, pero es la base para el análisis de modelos más complejos que intenten reproducir diferentes condiciones del transformador, como lo son las fallas internas por vueltas en cortocircuito [23, 34].

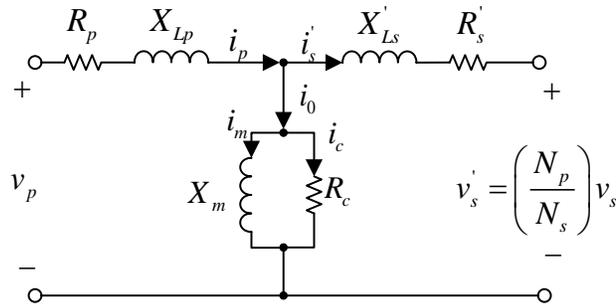


Fig. 2.12. Circuito equivalente T referido al primario

2.7 Modelo del transformador con falla por vueltas cortocircuitadas

La naturaleza de las fallas por vueltas en cortocircuito ha originado gran interés en los últimos años, con el fin de poder entender el comportamiento del transformador bajo estas condiciones de falla. Para poder hacerlo, se utilizan modelos matemáticos que ayuden a comprender la naturaleza de la falla de la forma más precisa que se pueda, ya que las pruebas experimentales que se realizan para estas condiciones involucran corrientes de alta magnitud [8], que pueden dañar permanentemente al transformador.

Los modelos que tratan de analizar este tipo de fallas se basan en el circuito equivalente del transformador descrito en la sección anterior. Existen diferentes tipos de modelos desarrollados que muestran de forma precisa el comportamiento de este

tipo de falla, haciendo énfasis en la variación de sus parámetros de resistencia e inductancia [17, 32] y [36].

Sin embargo, los modelos más recientes basan sus análisis con ayuda del método del elemento finito, el cual resulta de gran utilidad para resolver de una forma más precisa los campos electromagnéticos debidos a la no linealidad del núcleo magnético, esto en base a la curva de saturación del mismo [8, 16].

Ahora bien, si consideramos una falla por vueltas en cortocircuito en el devanado primario del transformador, estas generarán un flujo propio que se debe a que el flujo total del devanado primario estará limitado por la reducción de la f.e.m. Esto hace que las vueltas involucradas se encuentren aisladas del devanado primario, pero teniendo un acoplamiento magnético con el mismo, como se observa en la Fig. 2.13.

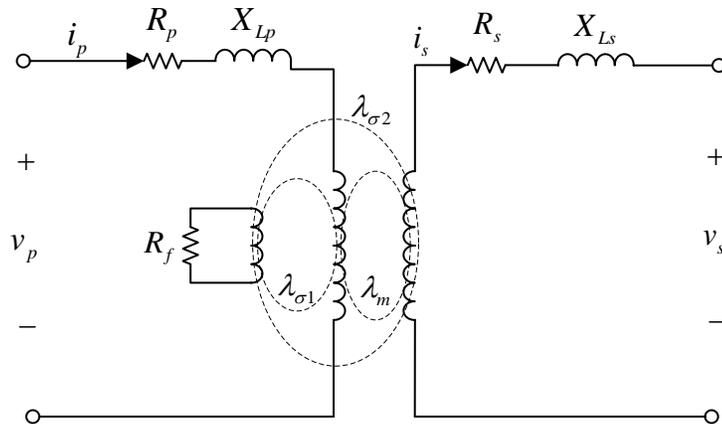


Fig. 2.13. Diagrama esquemático de una falla por vueltas en cortocircuito en el devanado primario de un transformador

En forma directa, la parte dañada del transformador se considera como un devanado terciario que se encuentra enlazado al devanado primario a través del enlace de flujo $\lambda_{\sigma 1}$. Estas consideraciones pueden ser introducidas al circuito equivalente del transformador, conectando una rama en paralelo antes de la impedancia del devanado primario, lo que permitirá que una corriente i'_f circule por la resistencia de falla R_f [14], tal como se muestra en el circuito de la Fig. 2.14.

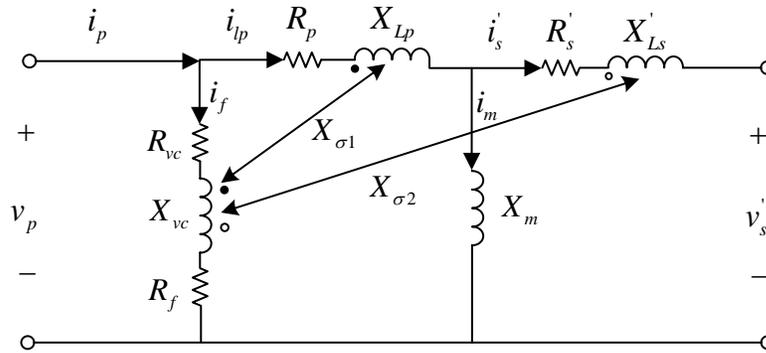


Fig. 2.14. Circuito equivalente del transformador, incluyendo una falla por vueltas cortocircuitadas en el devanado primario [14].

Este circuito equivalente, puede ser utilizado para analizar este tipo de fallas en el transformador en función de los enlaces de flujo que se tienen entre las vueltas cortocircuitadas con los devanados primario y secundario respectivamente, el análisis detallado de este circuito puede consultarse en [14].

CAPÍTULO 3 :

MEDICIÓN DE LA CORRIENTE DE ENERGIZACIÓN EN UN TRANSFORMADOR CON VUELTAS CORTOCIRCUITADAS

En este capítulo se presentan los resultados experimentales de corrientes de energización para diferentes estados de falla por vueltas cortocircuitadas en el devanado primario de un transformador de baja potencia. Las mediciones se realizan utilizando un circuito de control para el instante de energización con el fin de observar esta corriente bajo una condición controlada y reproducible.

3.1 Transformador bajo estudio

Para poder realizar la medición de la corriente de energización considerando una falla por vueltas cortocircuitadas, se utilizó un transformador experimental con las características mostradas en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Características del transformador bajo prueba

Capacidad	120 VA
Fases	1
Tensión primaria	127 V
Tensión secundaria	24 V
Corriente primaria	0.94 A
Corriente secundaria	5 A
Vueltas del primario	474
Vueltas del secundario	91

La característica principal de este transformador es que se tiene acceso a 12 terminales correspondientes a 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 y 40 vueltas de la tercera capa del devanado primario, tal como se muestra en la Fig. 3.1 y la Fig. 3.2. Las terminales observadas en la Fig. 3.2 fueron cortocircuitadas para simular diferentes estados de falla en el transformador que involucren un número diferente de vueltas en cortocircuito en el devanado primario, de acuerdo a la Tabla 3.2; en cada caso se realizaron mediciones de corriente de energización, de tensión primaria y tensión secundaria. Las especificaciones geométricas del transformador bajo estudio pueden consultarse en el Apéndice A de esta tesis.



Fig. 3.1. Transformador de 120VA bajo prueba



Fig. 3.2. Derivaciones disponibles de la tercera capa del devanado primario del transformador.

Tabla 3.2. Estados de falla en el devanado primario del transformador bajo prueba

Vueltas en cortocircuito	Porcentaje de falla en el devanado primario [%]
2	0.42
3	0.63
4	0.84
5	1.05
10	2.11
15	3.16
20	4.22
25	5.27
30	6.33
35	7.38
40	8.44

3.2 Mediciones de la corriente de energización sin control del ángulo de la tensión al instante de la conexión.

Como punto de partida, se realizaron mediciones de la corriente de energización a través de la conexión y desconexión del transformador bajo prueba por medio de un interruptor; sin embargo, esto provocaba que no se tuviera un control adecuado del momento de la energización del transformador, ocasionando que la corriente de energización sufriera alteraciones en su magnitud.

En estas pruebas tampoco se utilizó un método para eliminar el flujo residual presente en el transformador, que depende del instante de desconexión y que afecta directamente en la corriente de energización tal como se observa en la Fig. 3.3, y como se mencionó en el Capítulo 2.

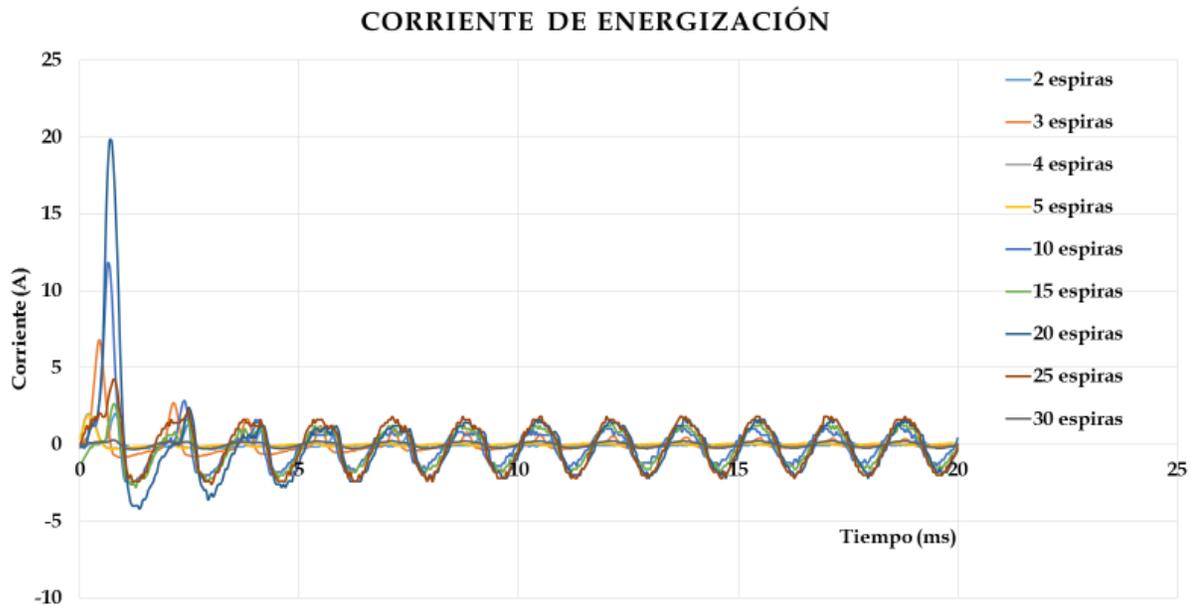


Fig. 3.3. Corriente de energización para diferente número de vueltas en cortocircuito medida en el transformador bajo prueba sin control del ángulo de la tensión al instante de la conexión y del flujo residual.

Para controlar las variables que influyen en la corriente de energización, como se muestra en la Fig. 3.3, se implementó un circuito de control que energiza al transformador bajo prueba al instante del cruce por cero de la fuente de alimentación de corriente alterna, tal como se explica en la siguiente sección.

3.3 Circuito de control para el momento de la energización

Se implementó un circuito de disparo que conecta el transformador a la fuente de alimentación en el cruce por cero de la tensión. Lo anterior, con el fin de observar la corriente de energización bajo una condición controlada y reproducible. El circuito está conformado por un circuito detector de cruce por cero, el cual genera un pulso cada vez que se detecta esta condición en la tensión de alimentación del transformador. Posteriormente estos pulsos entran a un microcontrolador (FRDM K64F), programado para accionar a un Relevador de Estado Sólido (SSR por sus siglas en inglés) que energice al transformador ante un cruce por cero “positivo” (voltaje negativo a positivo) de la tensión de alimentación. La Fig. 3.4 muestra el circuito de control para el momento de conexión del transformador y la Fig. 3.5 muestra el circuito de conexión y medición para la corriente de energización en el transformador experimental.

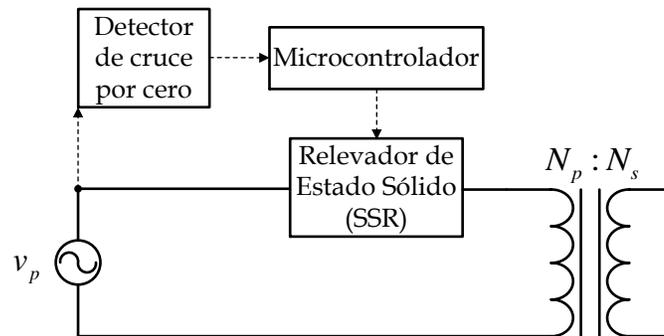


Fig. 3.4. Circuito de control para la energización del transformador.



Fig. 3.5. Circuito experimental para control y medición de la corriente de energización.

Considerando los diferentes casos establecidos en la tabla 2.1 del capítulo 2, el objetivo principal del circuito de control es energizar al transformador exactamente en el primer cruce por cero de la onda de tensión de alimentación, esto con el fin de poder observar la corriente de energización en los diferentes casos de falla bajo una misma condición. A continuación, se especifica el funcionamiento de cada componente del circuito experimental mostrado en la Fig. 3.5.

3.3.1 Detector de cruce por cero

El circuito detector de cruce por cero sirve para mandar pulsos cada vez que la señal de tensión de alimentación pasa por cero, el circuito utilizado para realizar esta acción se muestra en la Fig. 3.6. Durante el semi-ciclo positivo de la fuente de tensión, el capacitor C_2 se carga a través de R_1 , R_2 , D_1 , D_5 , D_3 , R_4 y R_3 . El tiempo efectivo constante, τ , para la carga es de aproximadamente 43ms, y C_2 apenas recoge algo de carga en el medio-periodo. Una vez que se presenta una caída de tensión por debajo de la tensión almacenada en C_2 (esto ocurre justo antes del final del semi-ciclo), el capacitor deja de cargarse y empieza a fluir una corriente de C_2 a través de R_5 llegando a la base del transistor Q_1 , encendiéndolo. Esto provoca que el capacitor se descargue a través del LED interno del opto acoplador U_1 , produciendo un pulso de salida del circuito. Lo mismo ocurre para el semi-ciclo negativo, solo que en esta ocasión los diodos D_4 y D_2 cargan al capacitor C_3 y R_6 activa a Q_1 cuando el semi-ciclo negativo está a punto de terminar [37].

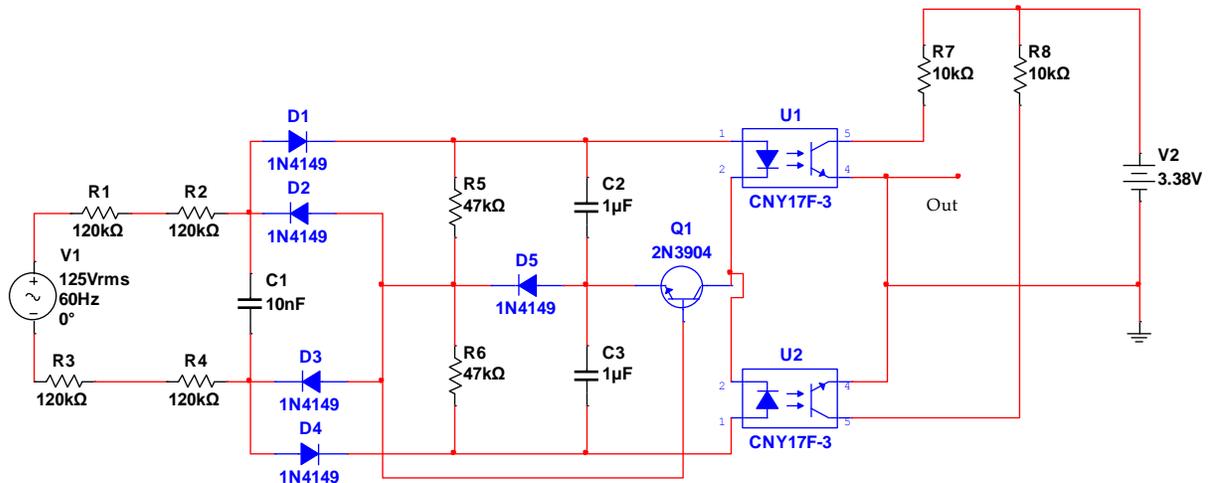


Fig. 3.6. Circuito detector de cruce por cero [37].

La ventaja que se tiene al usar este circuito detector de cruce por cero es que se mandan pulsos cada vez que la onda de tensión cruza por cero, correspondientes a cada semi-ciclo (positivo y negativo).

Es por eso que las señales de salida del circuito de la Fig. 3.7 muestran dos pulsos diferentes cada vez que la onda de tensión hace el cruce por cero. Para poder garantizar que la forma de onda de la corriente de energización siempre saldrá positiva, se utilizó el pulso positivo del circuito de la Fig. 3.7(b). Esta señal se refiere prácticamente a los pulsos generados cada vez que la forma de onda de la tensión de alimentación de la Fig. 3.7(a) hace un cruce por cero “positivo” (voltaje negativo a positivo), mientras que la Fig. 3.7(c) corresponde al cruce por cero “negativo” (voltaje positivo a negativo).

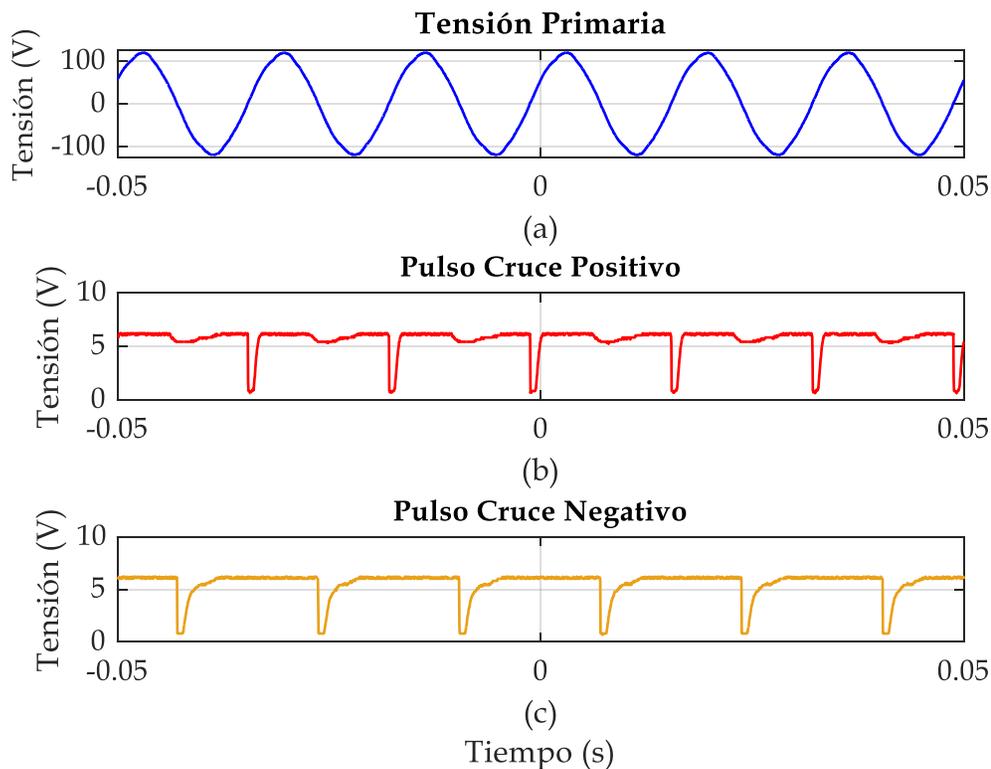


Fig. 3.7. Pulsos generados por medio del circuito detector de cruce por cero para la tensión de alimentación.

3.3.2 Microcontrolador FRDM-K64F

La Fig. 3.8 muestra al microcontrolador FRDM-K64F utilizado en el circuito de control para la energización, el cual presenta las siguientes características [38]:

- MK64FN1M0VLL12 MCU (120 MHz, memoria flash de 1 MB, 256 KB de RAM, baja consumo de potencia, cristal inferior USB, y 100 de bajo perfil Quad Flat Package (LQFP)).
- Interfaz USB doble con conector micro USB-B.
- LED RGB.

- Acelerómetro y magnetómetro FXOS8700CQ.
- Dos botones pulsadores para usuarios.
- Opción de fuente de alimentación flexible - OpenSDAv2 USB, Kinetis K64 USB, y una fuente externa.
- Fácil acceso a la entrada MCU / salida a través de conectores compatibles Arduino™ R3 E / S.

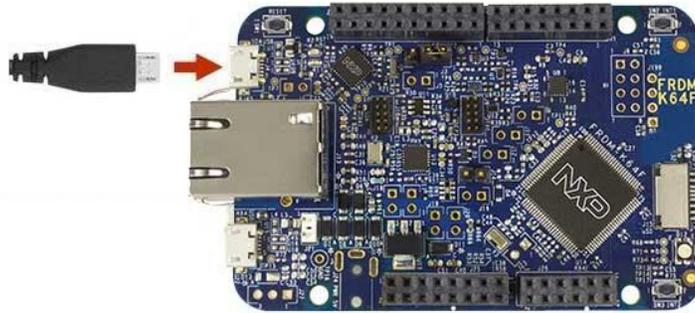


Fig. 3.8. Microcontrolador FRDM-K64F [38].

El microcontrolador FRDM-K64F dentro del circuito de control para la energización es de detectar el primer cruce por cero de la señal de tensión de alimentación y mandar un pulso con una duración de 15 ciclos para activar al relevador de estado sólido, esto con el fin de visualizar solo algunos ciclos de esta corriente para su respectivo análisis, tal como lo muestra la Fig. 3.9(a) y la Fig. 3.9(b).

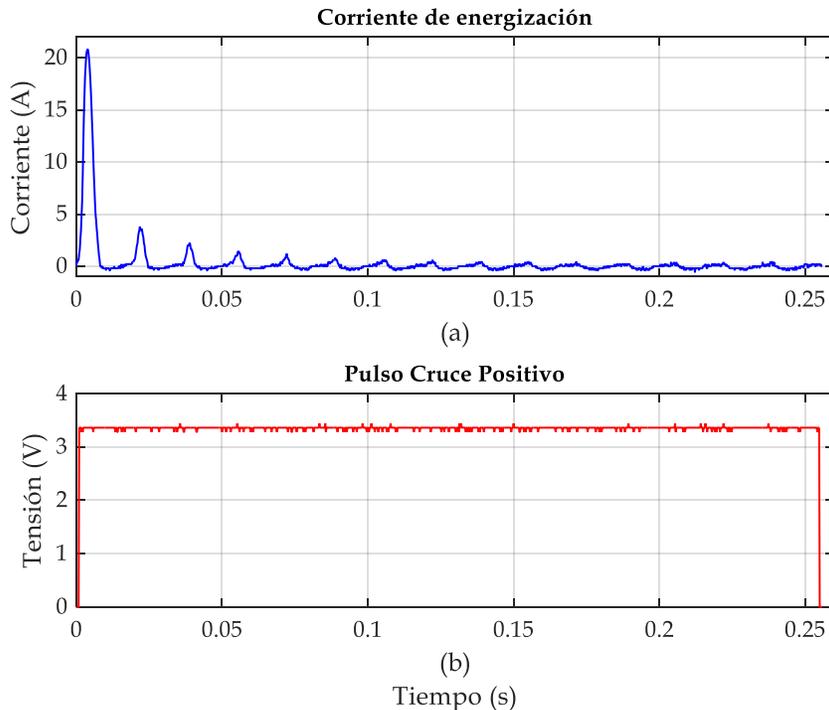


Fig. 3.9. Pulso generado por medio del microcontrolador FRDM-K64F.

Con el fin de no generar flujo residual que pudiera afectar la magnitud de la corriente de energización en la siguiente medición, fue utilizado un método que consiste en ir aumentando gradualmente la tensión en el transformador desde cero hasta el valor de tensión nominal, una vez alcanzada la tensión nominal se reduce de igual forma el valor de la tensión hasta llegar a cero, lo que ocurre es que el lazo de histéresis asociado al núcleo del transformador se va reduciendo con respecto a la variación de la tensión de alimentación, como se explica en [55], ya que como se mencionó en la Tabla 2.1 del Capítulo 2, las variaciones del flujo residual presente en el núcleo del transformador afectan directamente a la magnitud del flujo nominal en el transformador, causando aumento en el primer pico de la corriente de energización. Lo anterior es debido al desfaseamiento que se tiene entre las formas de onda de tensión y flujo magnético en el transformador esto de acuerdo a las ecuaciones 2.6 y 2.7, en donde se observa matemáticamente que estas formas de onda están desfasadas 90° una con respecto a otra.

Considerando esto y observando la Fig. 3.10 podemos notar que, para el valor máximo de la forma de onda de tensión en el primario, el valor del flujo magnético en el transformador será igual a cero [7, 23], que es la condición en la que se realiza la apertura del relevador.

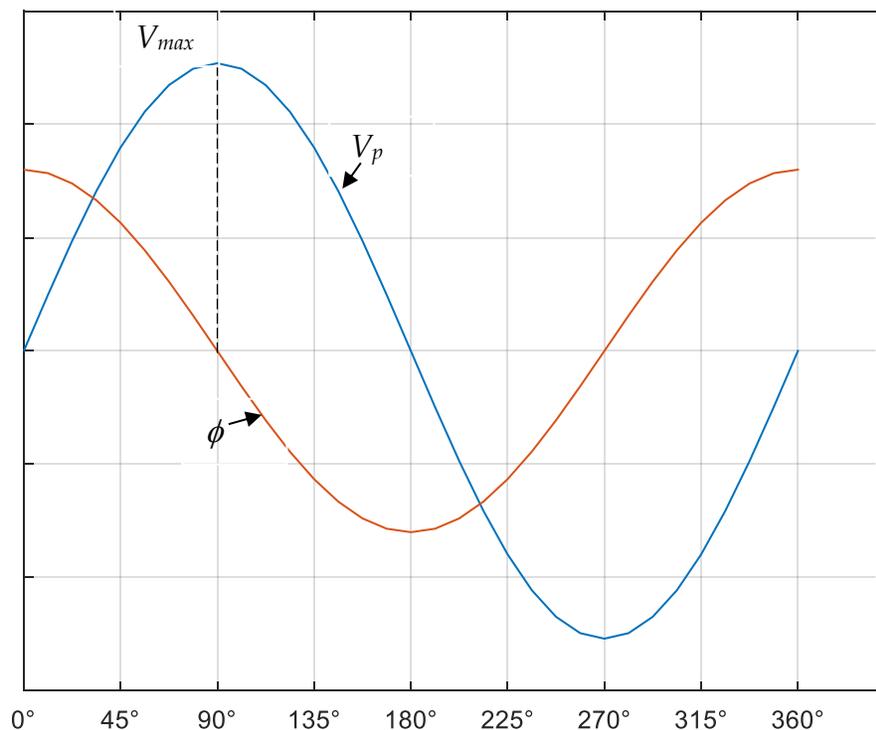


Fig. 3.10. Desfaseamiento entre las formas de onda de tensión primaria y flujo magnético en el transformador.

3.3.3 Relevador de estado sólido

Para poder accionar al transformador, aislando la parte de control de la potencia, se utilizó un Relevador de Estado Sólido (SSR por sus siglas en inglés) mostrado en la Fig. 3.11, con un tiempo de activación de 0.1ms de acuerdo a [39]:

- Valores de 10A-90A y 24-280V.
- 800V de sobretensión.
- Cubierta de seguridad extraíble IP 20.
- LED indicador de estado.
- Diseñado en acuerdo con los requisitos de la norma IEC 62314.



Fig. 3.11. Relevador de Estado Sólido para el accionamiento del transformador ante el cruce por cero de la señal de tensión de alimentación [39].

3.4 Desarrollo de las mediciones experimentales

La metodología seguida durante las pruebas experimentales consiste en medir las variables de corriente y tensión primaria, así como de la tensión secundaria mientras el transformador se encuentra en circuito abierto. Lo anterior para condiciones sin falla y para diferentes estados de falla establecidos en la Tabla 3.2. Con esto se busca simular la energización de un transformador posterior a una salida operación del transformador, programada o producto de una falla en el sistema.

En el transformador bajo prueba se realizaron mediciones para condiciones sin falla y para condiciones de falla en el devanado primario.

La severidad de la falla se fue incrementando gradualmente repitiendo la prueba al incrementar el número de vueltas en cortocircuito. La corriente de energización fue registrada y almacenada para cada condición.

Como primer paso, se armó el circuito de la Fig. 3.12 para realizar la medición correspondiente a las condiciones sin falla, posteriormente se realizaron pruebas para los casos con vueltas en cortocircuito del devanado primario, tal como se observa en el circuito de la Fig. 3.13.

La Fig. 3.13(a) representa el circuito de medición para condiciones de falla mientras que la Fig. 3.13(b) representa las vueltas en cortocircuito del devanado primario, llegando a tener 40 vueltas en cortocircuito.

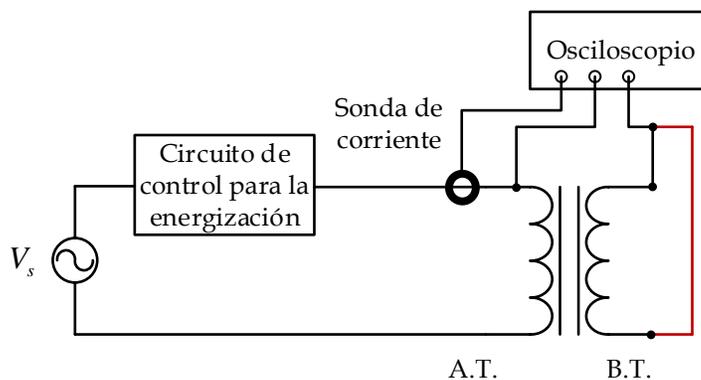


Fig. 3.12. Circuito de medición para condiciones sin falla.

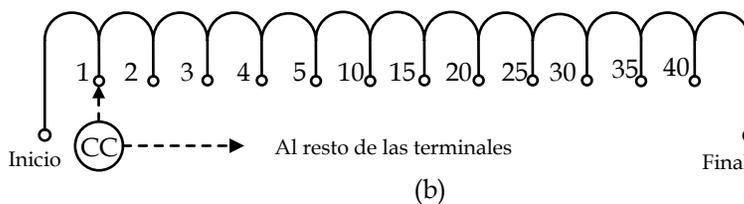
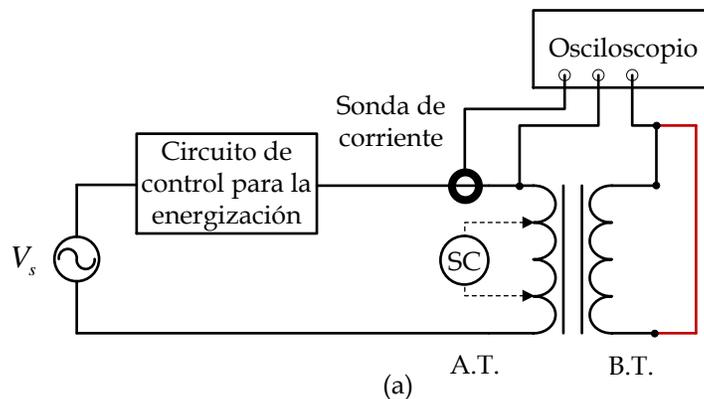


Fig. 3.13. Circuito de medición considerando fallas por vueltas en cortocircuito. a) Descripción 1, b) Descripción 2.

Al incrementar gradualmente el número de vueltas en cortocircuito se tienen 11 estados de falla más el estado en condiciones sin falla. Para poder medir la corriente de energización, se utilizó una sonda de corriente *Tektronix A622*, AC/DC-100kHz, 50mA a 100A de valor pico, mostrada en la Fig. 3.14.

La sonda de corriente tiene la opción de conectarse directamente al osciloscopio, para poder observar la forma de onda de la corriente de energización, tiene las siguientes características:

- Rango de frecuencia de C.D. a 100 kHz.
- Rango de la sonda de corriente de 50 mA a 100 A.
- Salidas de 10 mV/A y 100 mV/A.
- Diámetro máximo de conductor de 11.8 mm (0.46 in).
- Terminal tipo BNC.
- Tensión máxima del cable 600 V (CAT III).
- Proporciona salida de 10mV o 100mV para cada ampere medido.



Fig. 3.14. Sonda de corriente Tektronix A622, utilizada para medir la corriente de energización.

Esta sonda de corriente fue conectada a un osciloscopio *Tektronix TDS 2024B*, 200 MHz, 2 GS/s de cuatro canales, mostrado en la Fig. 3.15 con las siguientes características:

- Ancho de banda de 200 MHz
- 4 canales
- Frecuencia de muestreo de 2 GS/s
- FFT estándar
- Almacenamiento masivo a través del puerto host USB del panel frontal
- Conectividad a PC por medio del puerto USB



Fig. 3.15. Osciloscopio Tektronix TDS 2024B.

3.5 Comportamiento de la corriente de energización sin falla

En esta sección se presentan las mediciones de la corriente de energización, tensión en el lado primario y tensión en el lado secundario del transformador bajo estudio para condiciones sin falla. Las mediciones fueron realizadas considerando al transformador en circuito abierto, obteniéndose las formas de onda de cada variable para su análisis posterior. La Fig. 3.16 muestra el oscilograma de la corriente de energización para condiciones sin falla.

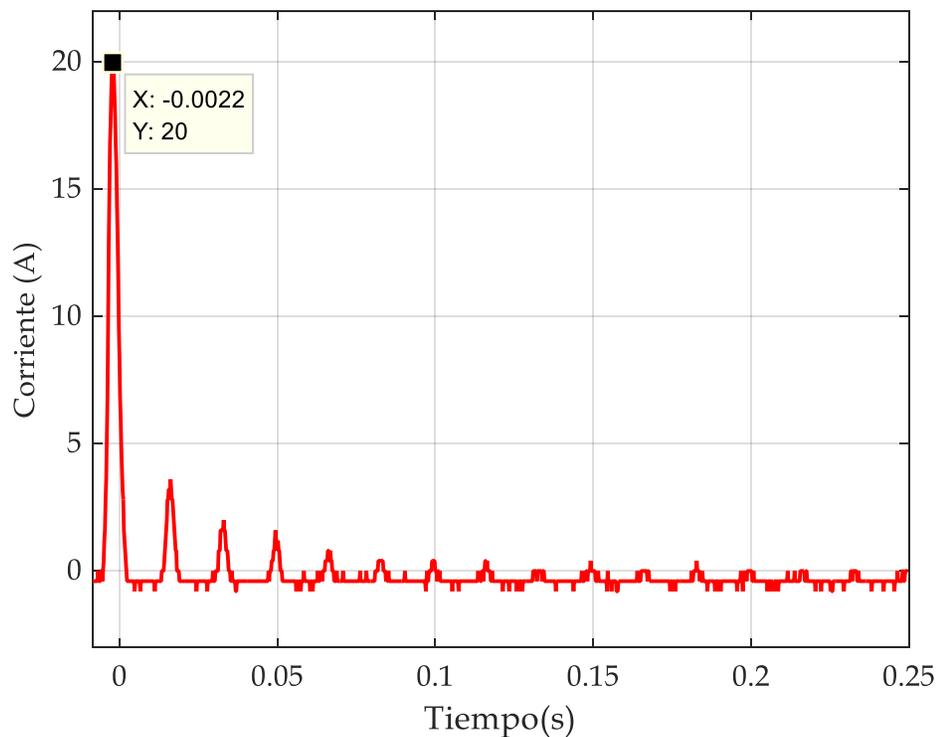


Fig. 3.16. Oscilograma de la corriente de energización sin falla para el transformador bajo estudio.

De igual forma, la Fig. 3.17 muestra los oscilogramas obtenidos de las tensiones en el lado primario y secundario del transformador bajo condiciones sin falla, observando que ambas señales se encuentran en fase y con valores de 127 Vrms en el lado primario y de 24 Vrms en el lado secundario del transformador, tal como se indica en la Tabla 3.1 respectivamente.

Estas mediciones sirven de referencia para poder ser comparadas con los diferentes estados de falla en el devanado primario del transformador.

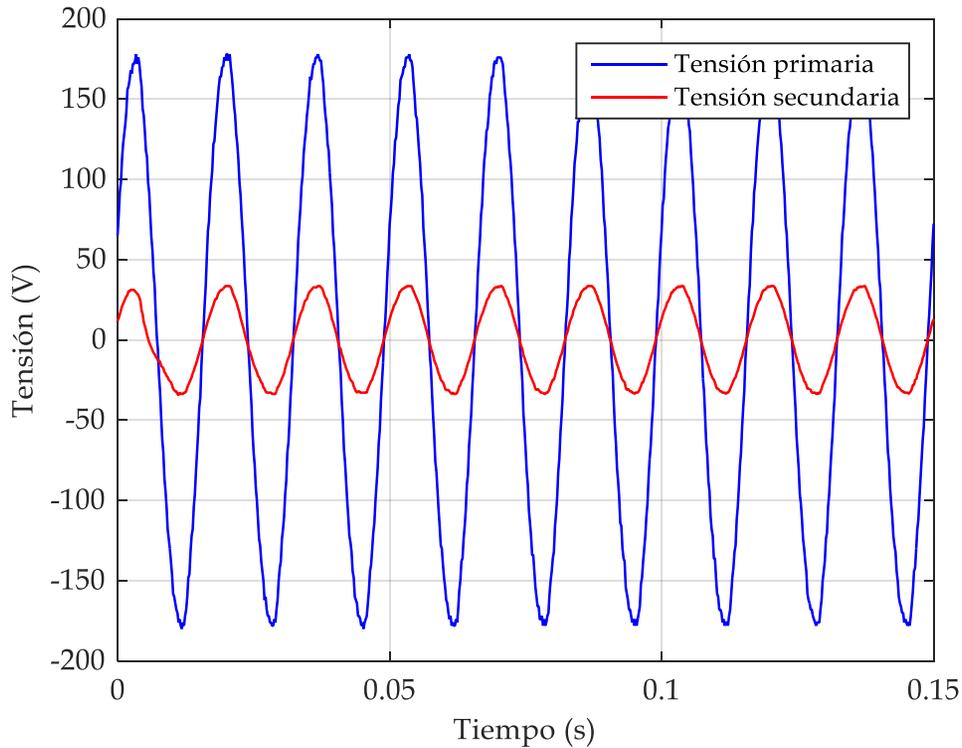


Fig. 3.17. Tensiones en el lado primario y secundario del transformador bajo condiciones sin falla para el transformador bajo estudio.

3.6 Comportamiento de la corriente de energización con fallas por vueltas en cortocircuito

En esta sección se presentan las formas de onda de la corriente de energización, tensión en el lado primario y tensión en el lado secundario del transformador cuando éste experimenta una falla por vueltas en cortocircuito. Los casos corresponden a 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 y 40 vueltas en cortocircuito de la tercera capa del devanado primario, realizando las mediciones con el transformador sin carga.

Durante todos los estados de falla los oscilogramas de la tensión en el lado primario y en el lado secundario no mostraron deformaciones significativas como puede observarse en la Fig. 3.18, la cual muestra los oscilogramas de tensión para 40 vueltas en cortocircuito.

Las Figuras 3.19 a la 3.21 muestran los oscilogramas de corriente de energización para 5, 20 y 40 vueltas en cortocircuito, mientras que la Fig. 3.22 muestra la comparación de la corriente de energización para diferente número de vueltas en cortocircuito.

Cada uno de los oscilogramas de corriente de energización con falla, muestra los valores instantáneos de corriente. Puede notarse el cambio que sufre esta corriente cuando el número de vueltas en cortocircuito incrementa.

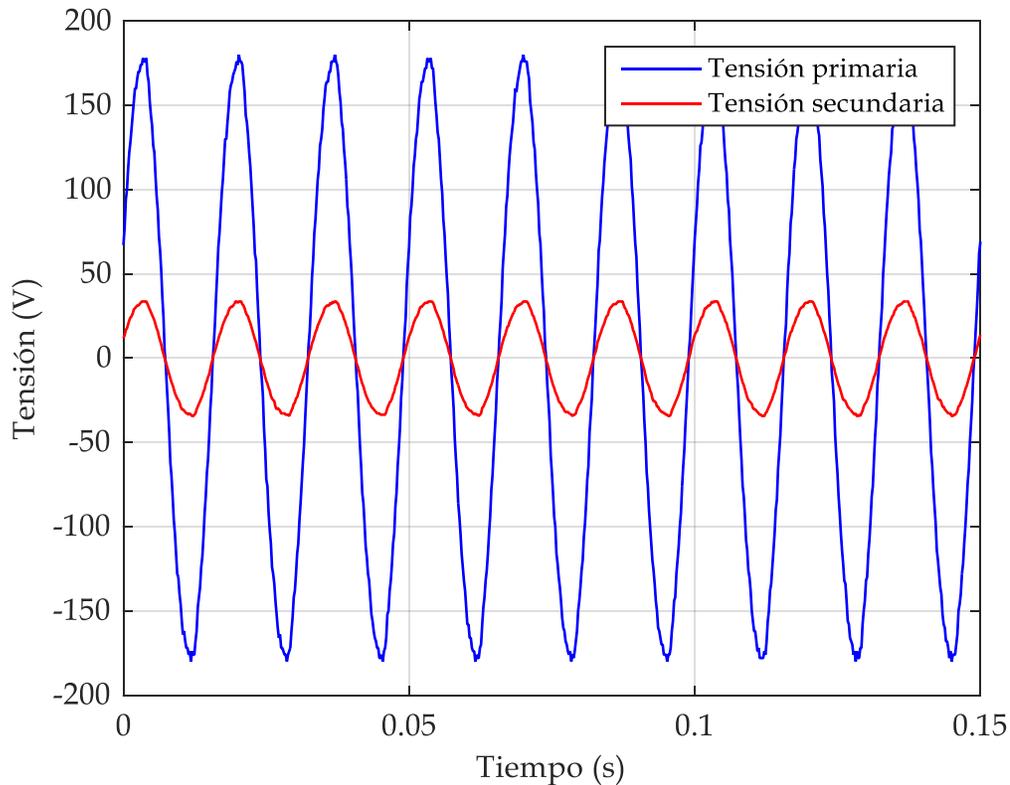


Fig. 3.18. Oscilogramas de las tensiones en el lado primario y secundario para 40 vueltas en cortocircuito del transformador bajo estudio.

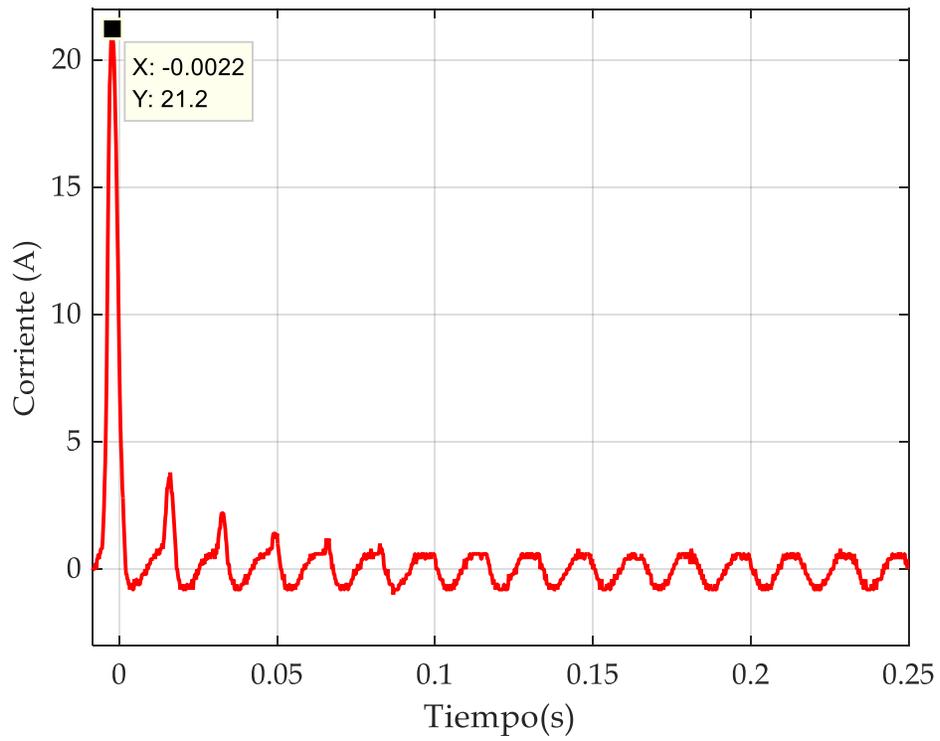


Fig. 3.19. Oscilograma de la corriente de energización para 5 vueltas en cortocircuito.

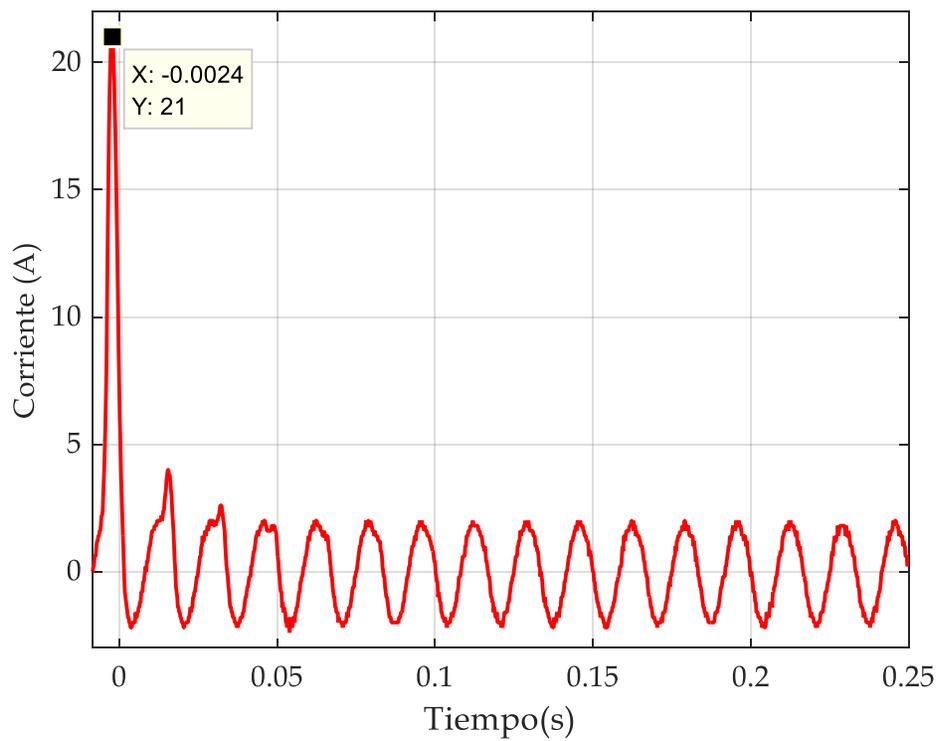


Fig. 3.20. Corriente de energización medida para 20 vueltas en cortocircuito para el transformador bajo estudio.

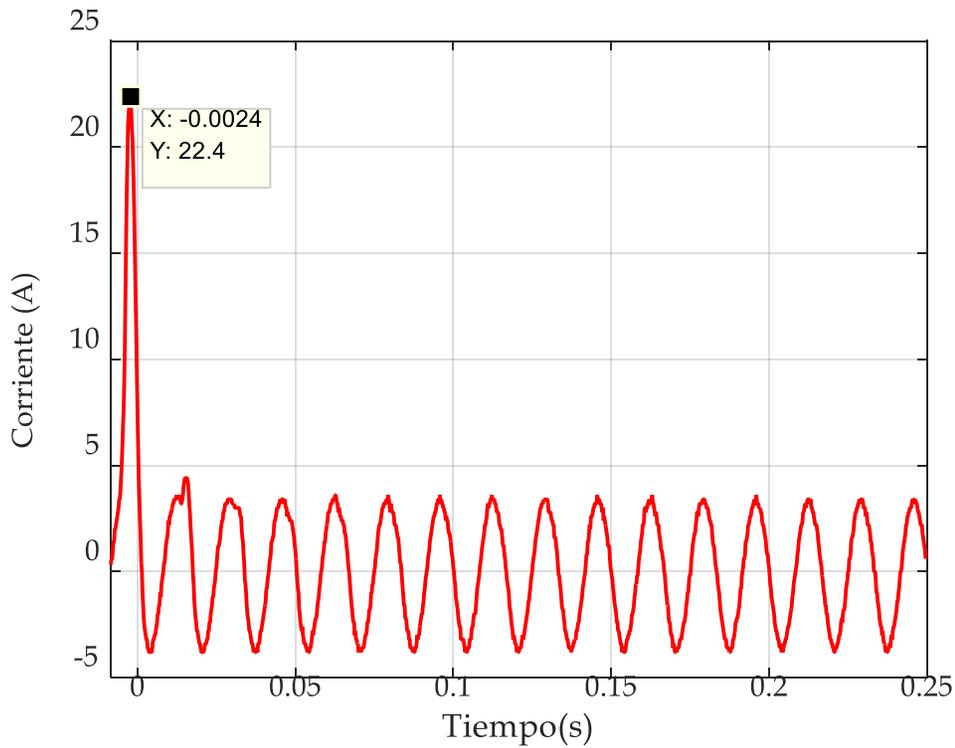


Fig. 3.21. Corriente de energización medida para 40 vueltas en cortocircuito para el transformador bajo estudio.

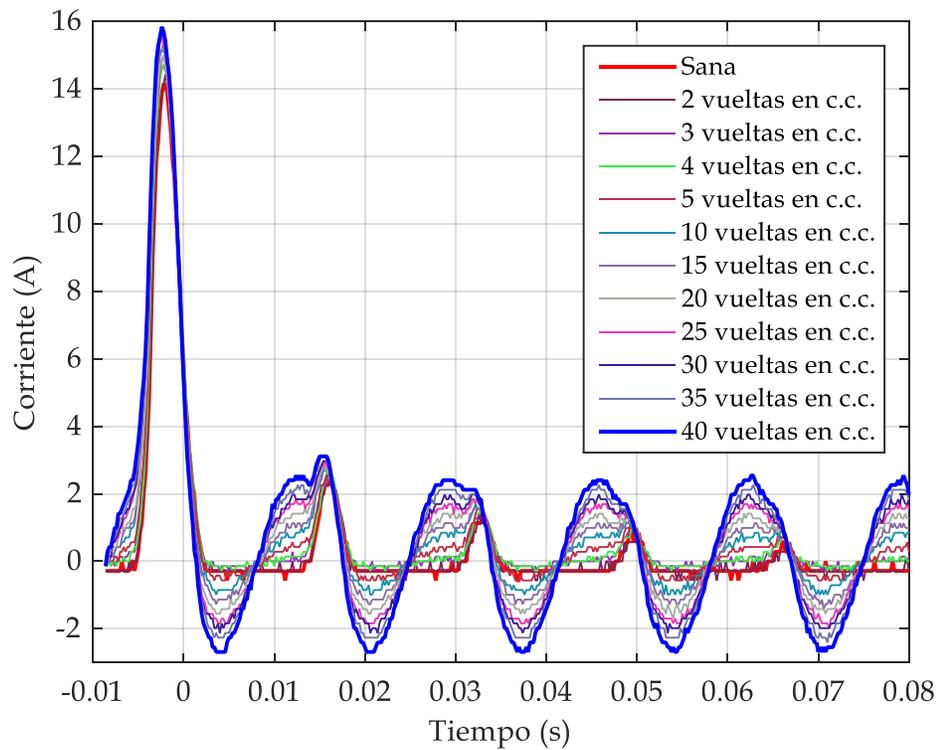


Fig. 3.22. Oscilogramas de la corriente de energización para diferente número de vueltas en cortocircuito para el transformador bajo estudio.

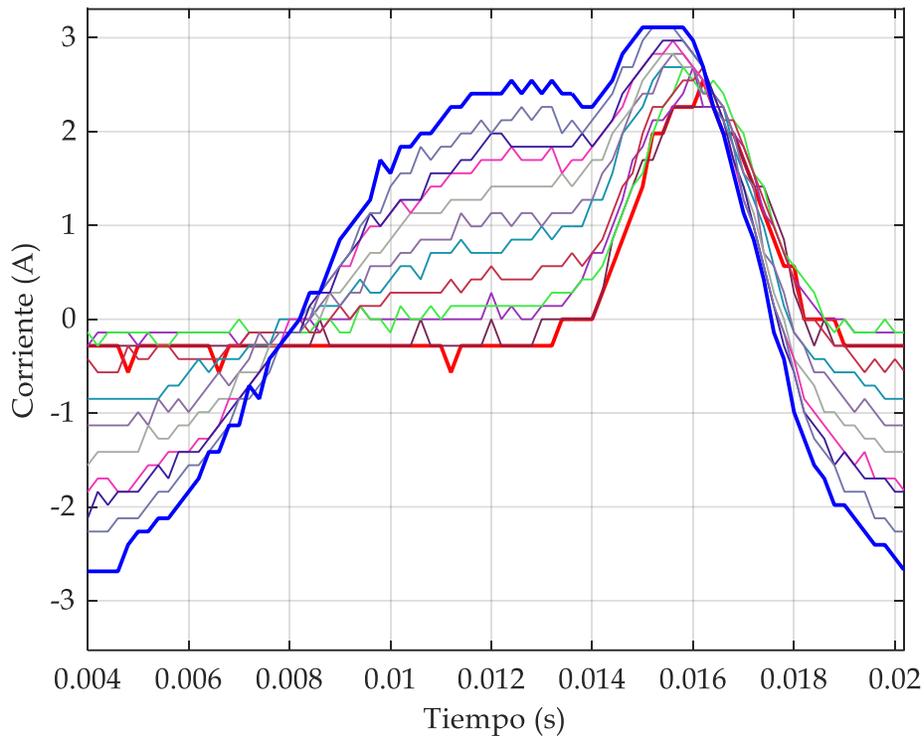


Fig. 3.23. Acercamiento a los oscilogramas de corriente de energización.

De la Fig. 3.22, conforme el número de vueltas en cortocircuito aumenta, la corriente de energización empieza a sufrir cambios. El comportamiento de la corriente de energización en estado estable (corriente primaria), empieza a comportarse como si el transformador tuviera carga conectada en el lado secundario, ya que la corriente primaria aumenta en magnitud.

En la Fig. 3.23 se muestra un acercamiento a los oscilogramas de corriente de energización, para poder observar las variaciones que tiene conforme el número de vueltas en cortocircuito aumenta.

Análisis del uso de la corriente de energización como método para la detección de fallas internas en transformadores

CAPÍTULO 4 :

PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES DE CORRIENTE DE ENERGIZACIÓN

Como se muestra en el capítulo anterior la corriente de energización sufre alteraciones en su forma de onda cuando existe una falla por vueltas en cortocircuito. Para utilizar la medición de esta corriente como una técnica de diagnóstico de fallas entre vueltas, es necesario definir algún parámetro o índice que permita correlacionar los cambios en la corriente con la severidad de la falla por vueltas cortocircuitadas. En este capítulo se presenta el análisis de las señales de corriente de energización bajo condiciones sin falla y para los diferentes casos de falla en el devanado primario del transformador, esto por medio de la aplicación de la Transformada Discreta de Fourier por ventana (de sus siglas en inglés *Discrete Fourier Transform*, DFT) para poder analizar la evolución del contenido armónico y encontrar diferencias con respecto a la señal de corriente en condiciones sin falla. Lo anterior con el fin de establecer un criterio para un diagnóstico del devanado con vueltas cortocircuitadas a través del análisis de la corriente de energización.

4.1 Contenido armónico de la corriente de energización

Como se había mencionado anteriormente, la corriente de energización es un estado transitorio que experimenta un transformador cuando es energizado por primera vez o es re-energizado al sistema, y ésta se ve afectada por las características no lineales del núcleo magnético.

Esto hace que esta corriente de energización contenga componentes armónicas, de las cuales la componente de 2° armónico es la de mayor amplitud [34]. La evolución de las componentes armónicas no se puede generalizar, ya que depende en gran medida del transformador, la alimentación de la red y de las condiciones iniciales de energización [40].

Para poder observar el comportamiento de las componentes armónicas en la señal de corriente de energización, se hace uso de la Transformada Discreta de Fourier para extraer estas componentes y de esta forma observar el espectro de la corriente de energización.

4.2 Transformada Discreta de Fourier

La Transformada Discreta de Fourier (*DFT*) es la transformada de Fourier para el dominio discreto. Esto significa que se puede transformar una señal discreta que se encuentra en el dominio del tiempo a su equivalente en el dominio de la frecuencia. Al dominio de la frecuencia también se le conoce como análisis espectral o análisis armónico. Para poder encontrar las componentes espectrales $X[k]$ se utiliza la siguiente expresión [41]:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (4.1)$$
$$k = 0, 1, \dots, N-1$$

Donde:

$x[n]$: Señal en tiempo discreto

$X[k]$: Muestras de frecuencia

N : Número de muestras

Los valores para $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ de la *DFT* en la ecuación (4.1) corresponden a las muestras de la transformación continua en los valores $0, \Delta k, 2\Delta k, \dots, (N-1)\Delta k$. Los términos Δk y Δn están relacionados por la expresión:

$$\Delta k = \frac{1}{N\Delta n} \quad (4.2)$$

Para aplicar la *DFT* a una señal real, se puede hacer de las siguientes maneras:

1. Calcular la *DFT* para toda la señal bajo estudio (lo que resulta impráctico, especialmente para señales de larga duración).
2. **Dividir la señal en ventanas y a cada ventana aplicar la *DFT*.**

Cuando la señal bajo estudio no es periódica y de forma asimétrica, tal como lo es la corriente de energización, es mejor dividir la señal de corriente en un cierto número de ventanas para poder aplicar a cada una de ellas la *DFT*. A esta aplicación de la *DFT* en ventanas de corta duración se le denomina Transformada Corta de Fourier (De sus siglas en inglés *Short Time Fourier Transform*, **STFT**), y es similar a la *DFT* con la diferencia de que la señal, a ser transformada, es multiplicada por una función ventana para su respectivo análisis. La *STFT* para tiempo discreto puede ser calculada por:

$$X[l, k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] w[n-l(N/Fs)] e^{-j \frac{2\pi k(n-l(N/Fs))}{N}} \quad (4.3)$$

Donde:

$X[l,k]$: Muestras de tiempo y frecuencia.

F_s : Frecuencia de muestreo.

Como puede apreciarse de la ecuación (4.3) la STFT nos arroja muestras tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, esto resulta ser una ventaja de esta transformada ya que se pueden notar cambios en la señal bajo estudio simultáneamente en el tiempo y la frecuencia, tal como se observa en la Fig. 4.1.

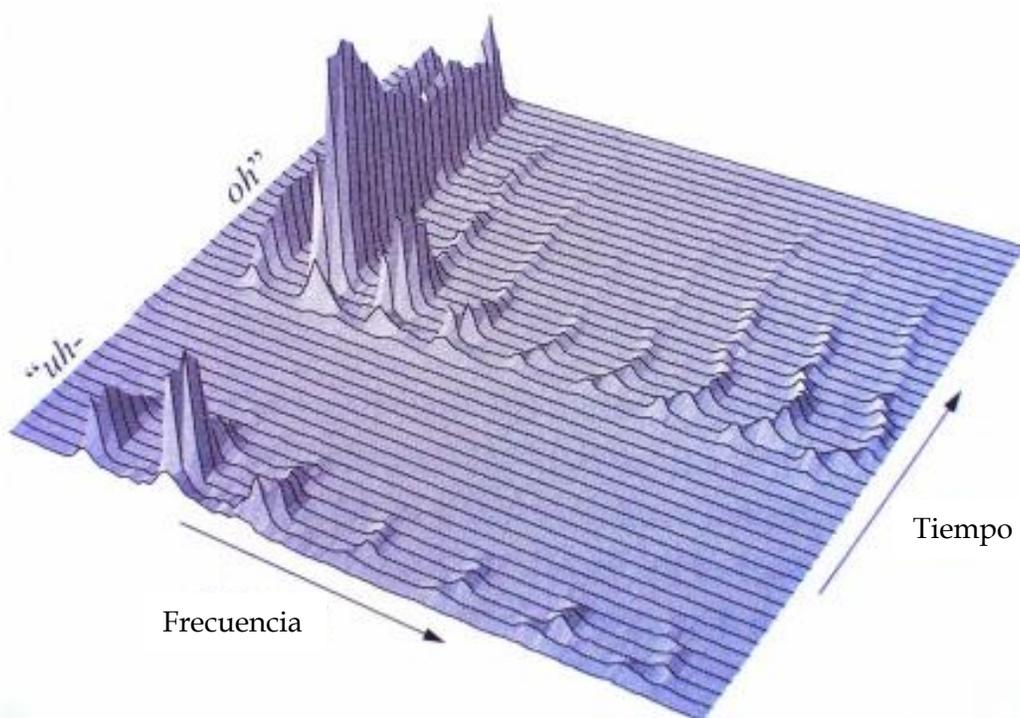


Fig. 4.1. Comportamiento en el tiempo y la frecuencia de una señal discreta aplicando la STFT [42].

4.3 Aplicación de la DFT a las señales de corriente de energización

Como se había mencionado anteriormente, el análisis de la corriente de energización puede hacerse a través de un análisis espectral (Aplicación de la DFT), esto para la señal de corriente de energización tanto en condiciones sin falla y para los diferentes estados de falla por vueltas en cortocircuito en el devanado primario del transformador bajo prueba. En este trabajo se implementó un algoritmo que se encarga de analizar las señales de corriente de energización, y a través del uso de la DFT aplicada a ventanas con duración de un ciclo, se pudo obtener el comportamiento de la magnitud de las componentes de frecuencia.

El diagrama de flujo para este análisis espectral de las señales medidas se puede observar en la Fig. 4.2.

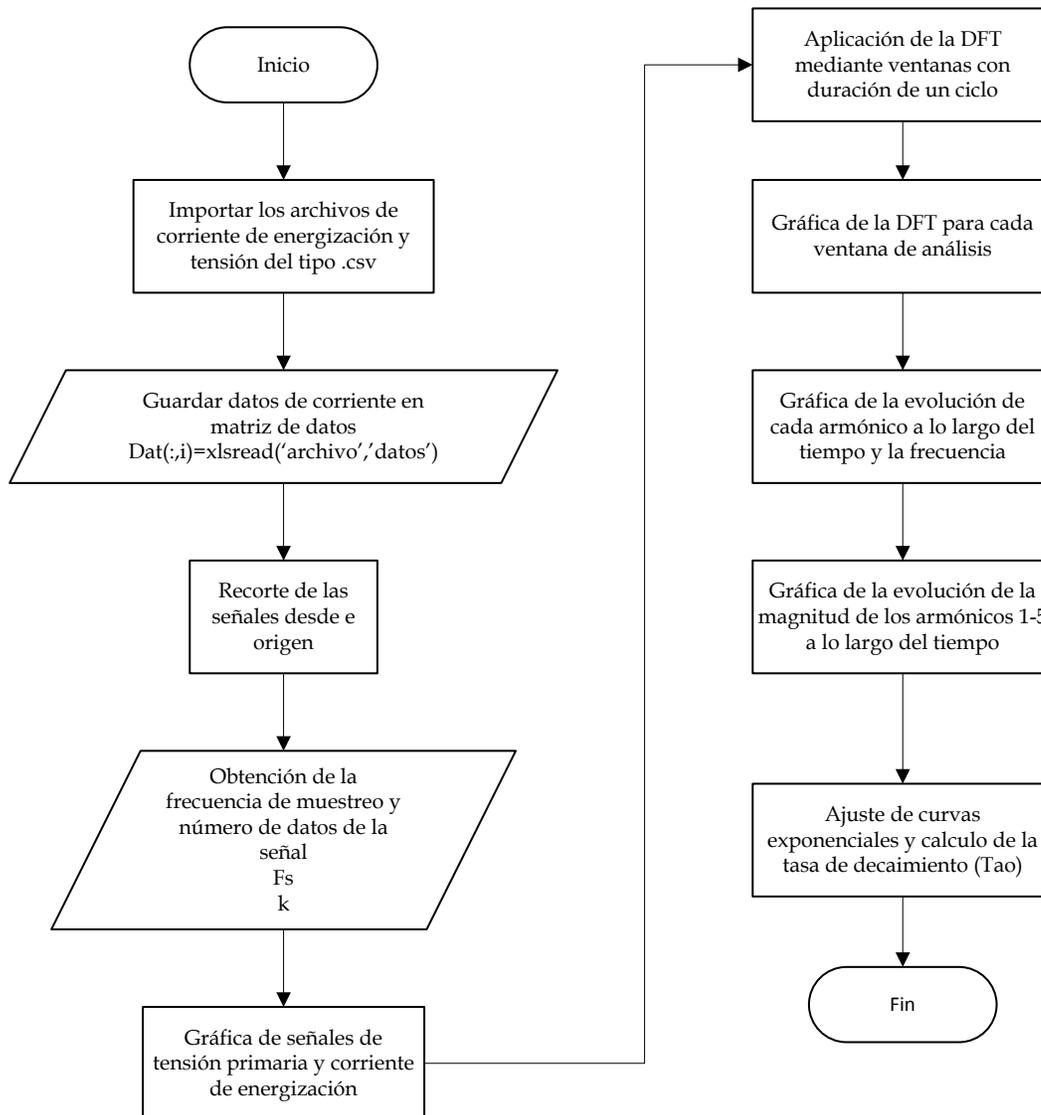


Fig. 4.2. Diagrama de flujo para el análisis de las corrientes de energización bajo condiciones de falla por vueltas en cortocircuito.

La descripción del diagrama de flujo mostrado en la Fig. 4.2 es la siguiente:

1. Se cargan las señales de tensión y corriente de energización a partir de archivos con extensión .csv generados de las lecturas en el osciloscopio, guardándolos en una matriz de datos Datos.mat para poder ser manipulados en MATLAB®.
2. Se realiza un corte de las señales a partir del inicio de los vectores de tensión primaria y corriente de energización a partir del valor de Rc en adelante.

3. Se obtienen los parámetros de la señal de frecuencia de muestreo F_s y el número de datos de las señales.
4. Se grafican las señales de tensión primaria y corriente de energización.
5. Se aplica la DFT, mediante el uso de ventanas con duración de 1 ciclo que corresponden a 166 muestras por ventana.
6. Posteriormente se grafican las diferentes DFT sobrepuestas, mostrando el comportamiento de la DFT a cada ventana de análisis en la señal de corriente.
7. Se realiza una gráfica en tres dimensiones tiempo-frecuencia-magnitud, mostrando la evolución de cada armónico a lo largo del tiempo con su respectivo valor de amplitud y frecuencia.
8. Se grafica el comportamiento de la magnitud de las primeras 5 componentes armónicas a lo largo del tiempo.
9. Se realiza la gráfica de la evolución de las componentes de fase correspondientes a cada componente armónica del punto anterior.
10. Se realiza un ajuste de curva exponencial y tasa de decaimiento (τ) sobre las magnitudes de cada componente armónica en la señal de corriente.

Los pasos anteriormente descritos pueden visualizarse en el algoritmo descrito en el Apéndice B.

4.4 Resultados del procesamiento de las señales de corriente

A continuación, se muestran los resultados obtenidos a partir de la aplicación del algoritmo a las señales de corriente de energización, para condiciones sin falla y para los diferentes estados de falla por vueltas en cortocircuito en el devanado primario del transformador bajo prueba.

La Fig. 4.3 muestra los oscilogramas de tensión primaria y corriente de energización para condiciones sin falla mientras que la Fig. 4.4 muestra la aplicación de las ventanas a la señal de corriente con duración de 1 ciclo.

Como primer paso se muestran los resultados obtenidos a partir del análisis a la señal de corriente de energización para condiciones sin falla de acuerdo a los pasos descritos en el punto anterior y posteriormente se hizo lo mismo para cada estado de falla en el transformador, tal como se muestra en la Fig. 4.5 y la Fig. 4.6, observando el comportamiento que tiene la DFT aplicada a las señales de corriente de energización cuando el número de vueltas en cortocircuito aumenta.

También muestra el comportamiento de la DFT a través del tiempo y la frecuencia para cada estado de falla en el transformador y por último se analiza el comportamiento de las componentes armónicas presentes en la señal de corriente de energización.

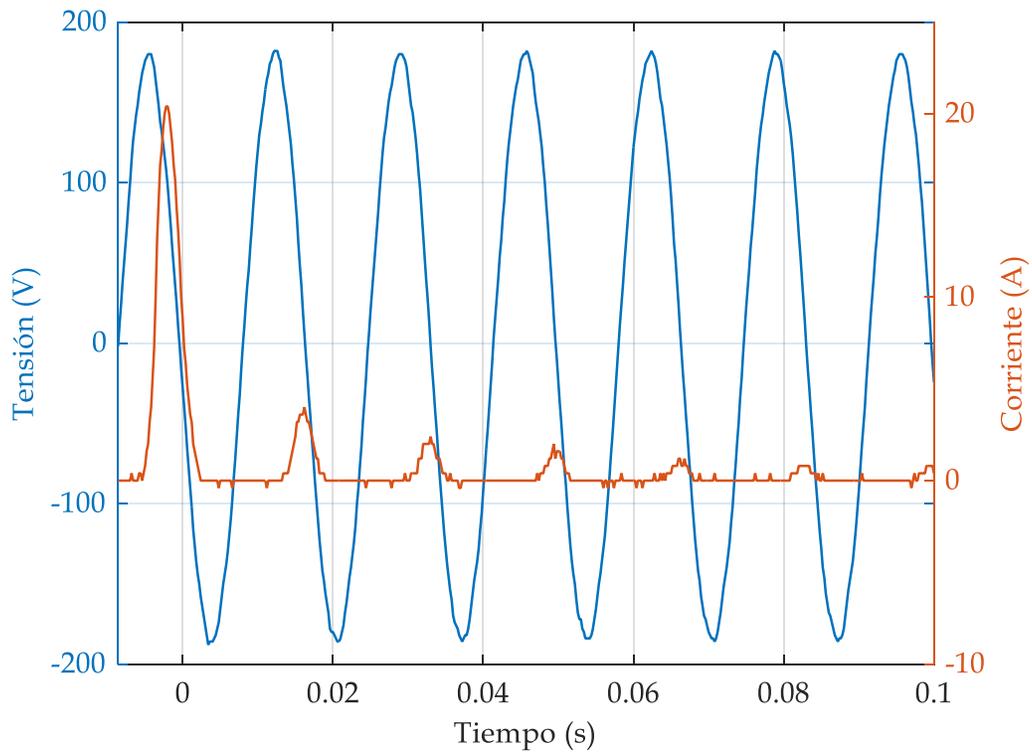


Fig. 4.3. Medición de las señales de tensión primaria y corriente de energización para condiciones sin falla del transformador bajo prueba.

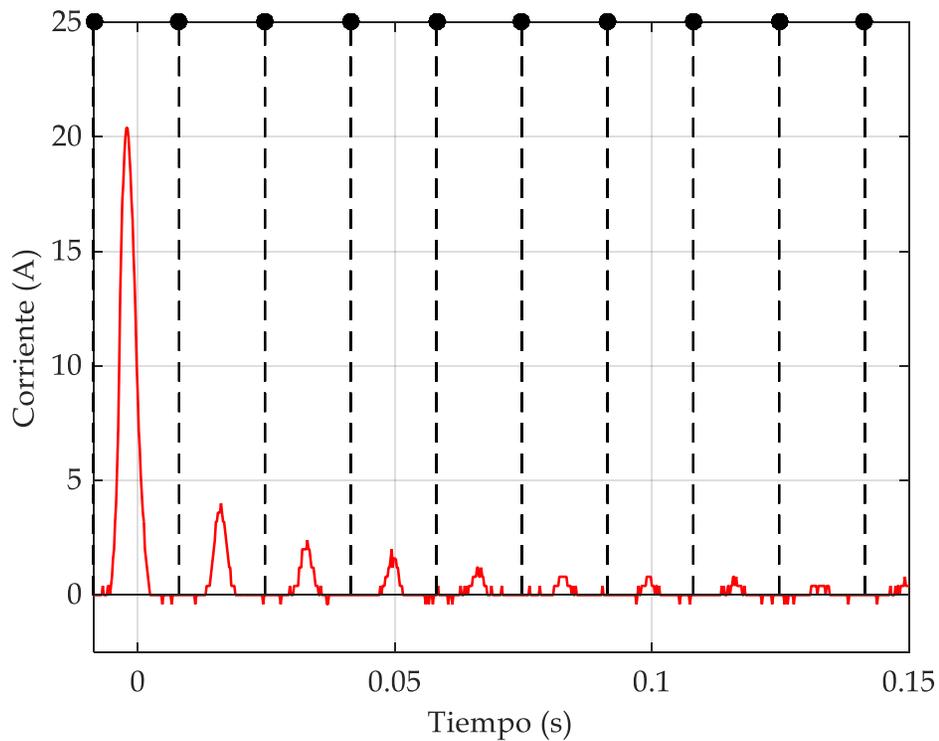


Fig. 4.4. Ventanas de análisis con duración de un ciclo a la corriente de energización en condiciones sin falla para el transformador bajo prueba.

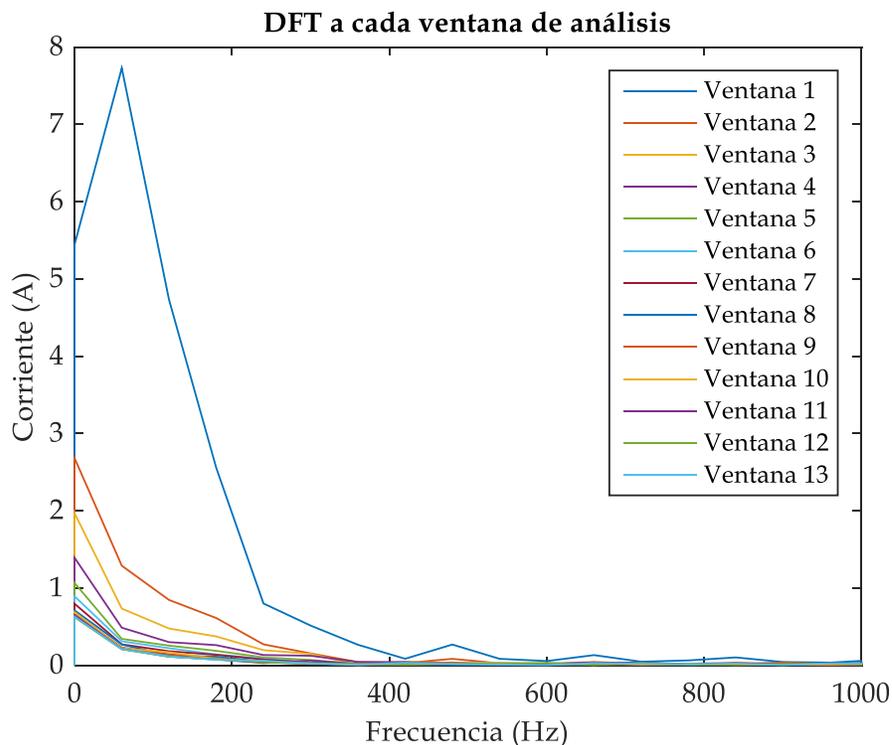


Fig. 4.5. Análisis espectral de la corriente de energización bajo condiciones sin falla del transformador bajo prueba.

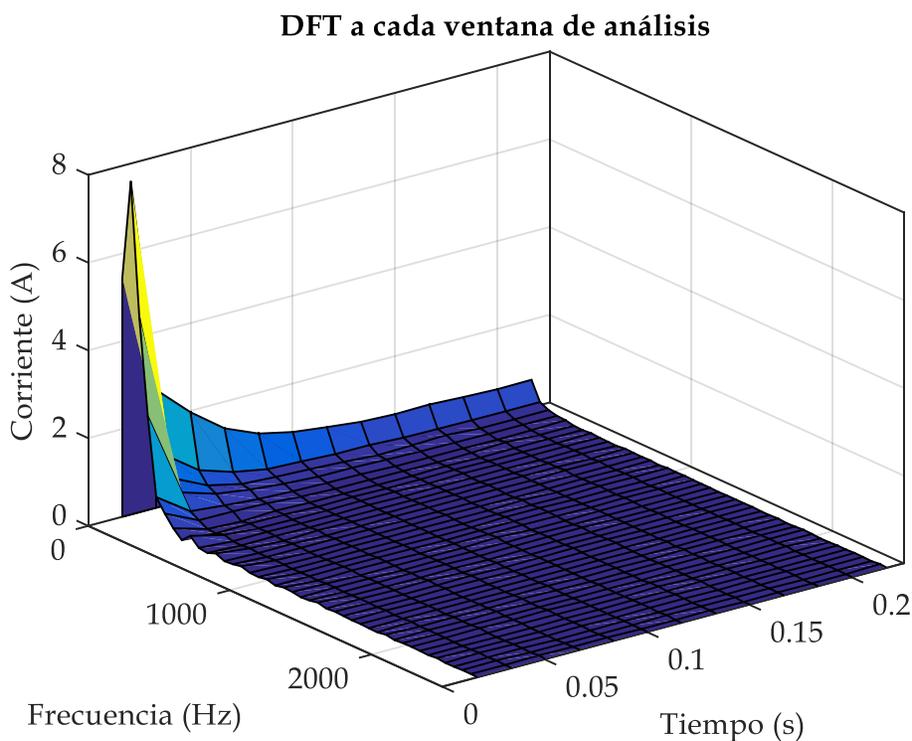


Fig. 4.6. Comportamiento de la DFT respecto a la frecuencia y al tiempo de la corriente de energización bajo condiciones sin falla del transformador bajo estudio.

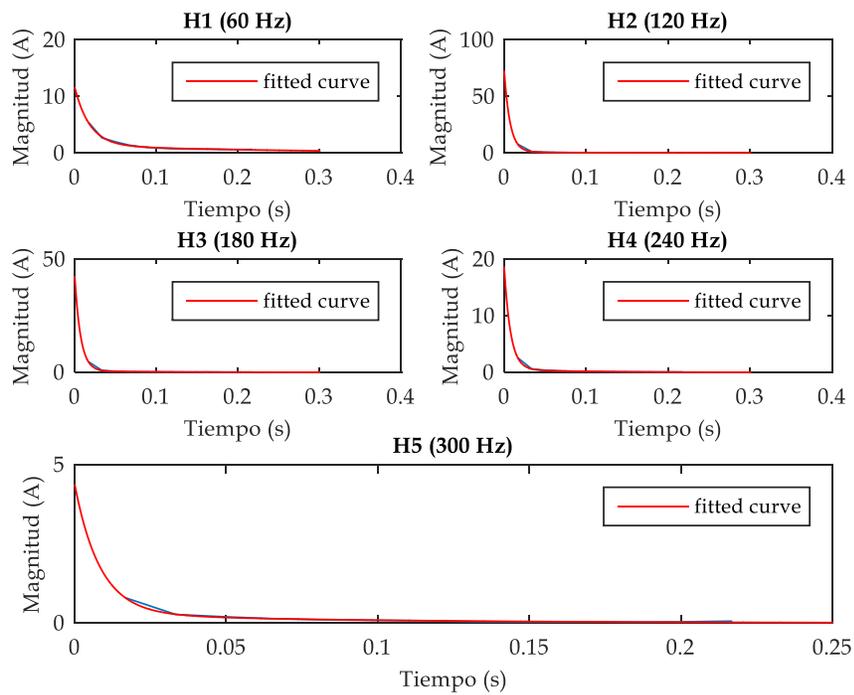


Fig. 4.7. Magnitud vs tiempo de cada componente armónica de la señal de corriente de energización bajo condiciones sin falla del transformador bajo prueba.

Las Figuras 4.8 a la 4.16 muestran el comportamiento de la DFT y las primeras 5 componentes armónicas de la corriente de energización para 5, 20 y 40 vueltas en cortocircuito.

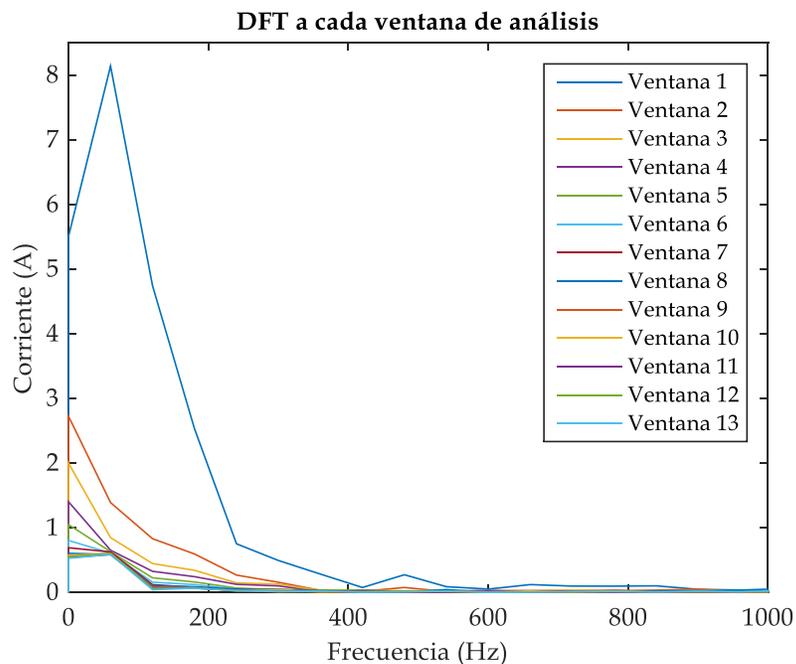


Fig. 4.8. Análisis espectral de la corriente de energización para 5 vueltas en cortocircuito del transformador bajo prueba.

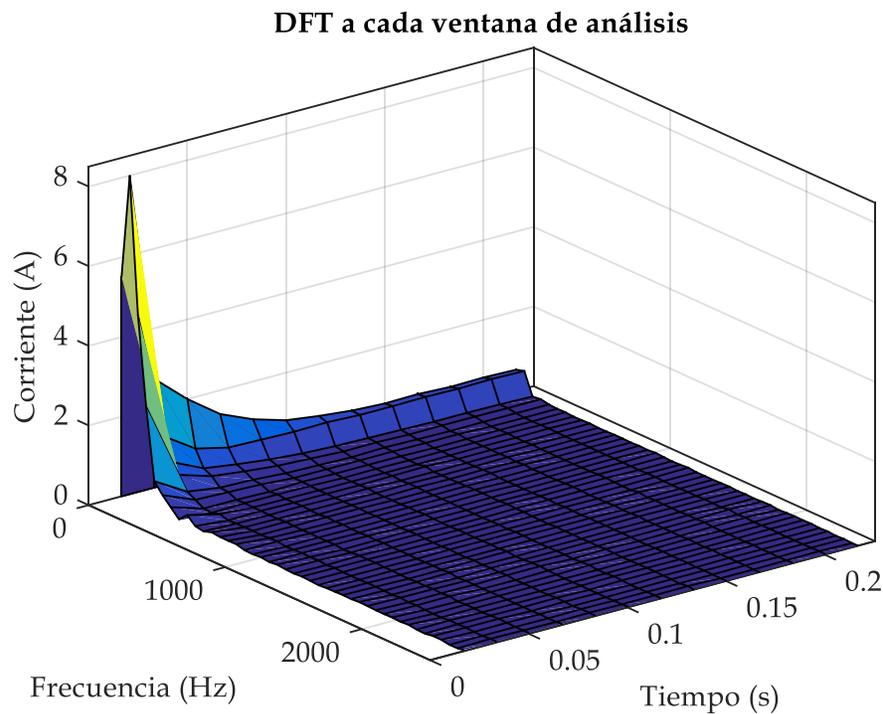


Fig. 4.9. Comportamiento de la DFT respecto a la frecuencia y al tiempo de la corriente de energización para 5 vueltas en cortocircuito del transformador bajo estudio.

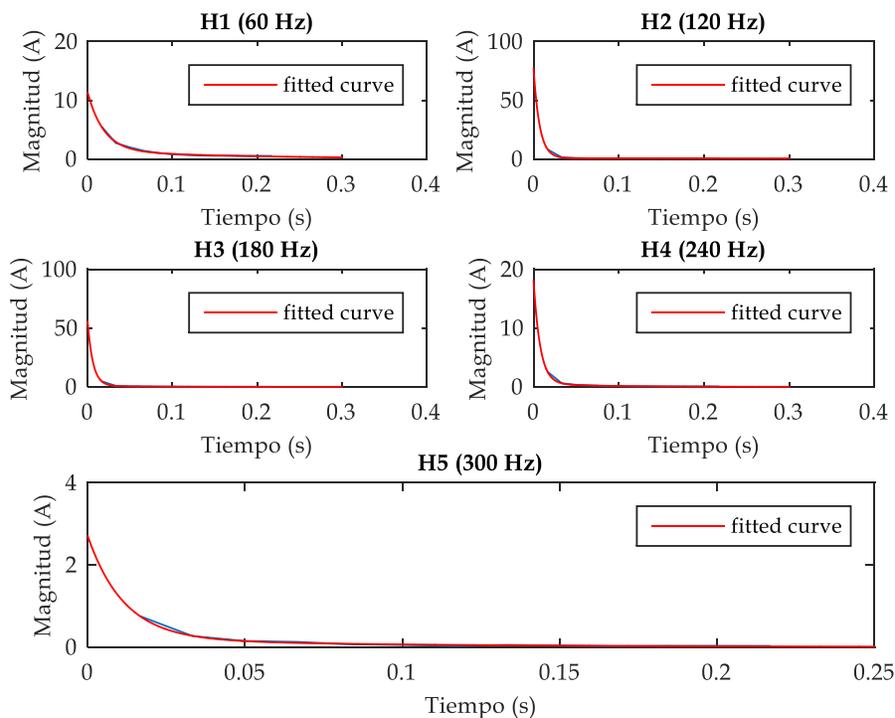


Fig. 4.10. Magnitud de la señal de corriente de energización vs tiempo de cada componente armónica para 5 vueltas en cortocircuito del transformador bajo prueba.

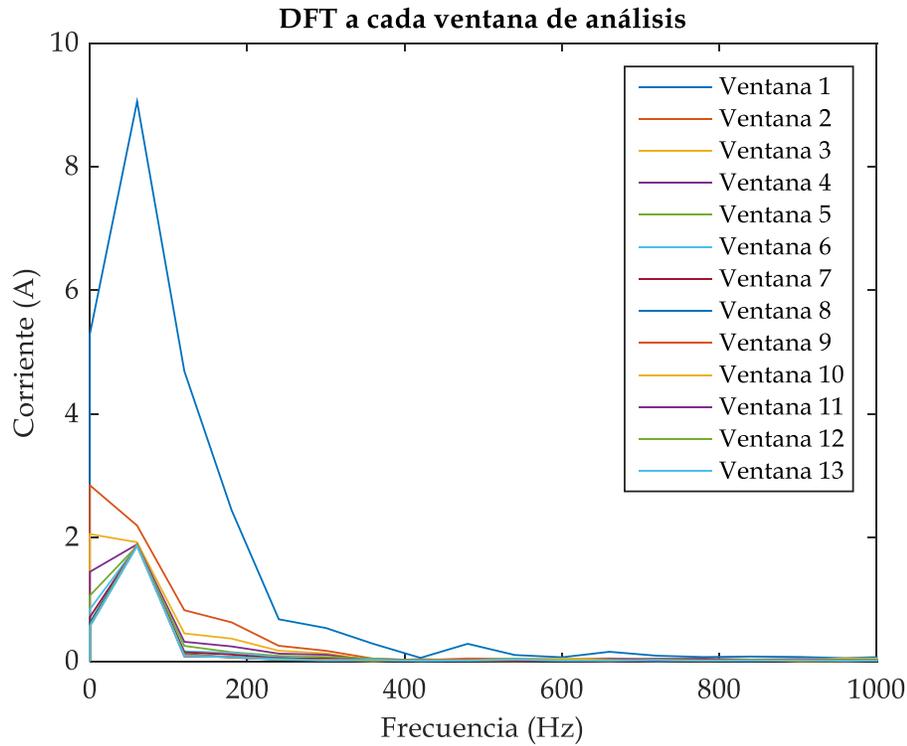


Fig. 4.11. Análisis espectral de la corriente de energización para 20 vueltas en cortocircuito del transformador bajo prueba.

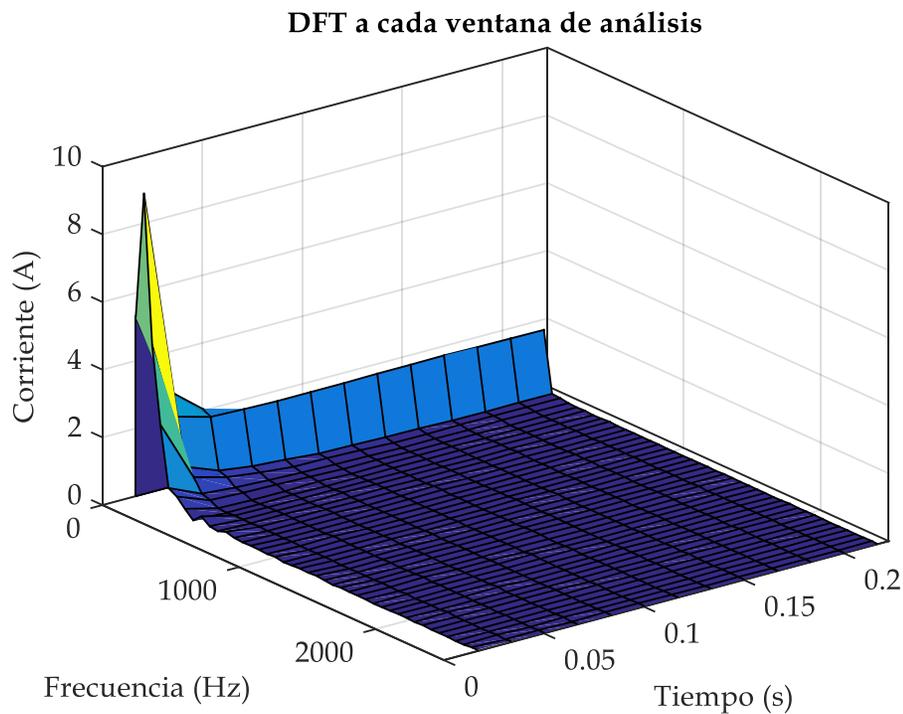


Fig. 4.12. Comportamiento de la DFT respecto a la frecuencia y al tiempo de la corriente de energización para 20 vueltas en cortocircuito del transformador bajo estudio.

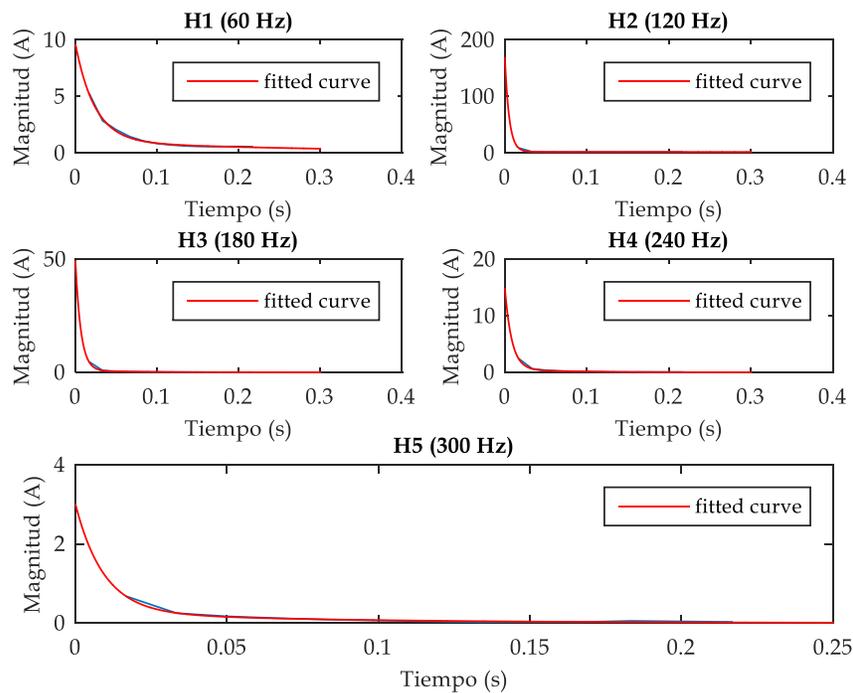


Fig. 4.13. Magnitud de la señal de corriente de energización vs tiempo de cada componente armónica para 20 vueltas en cortocircuito del transformador bajo prueba.

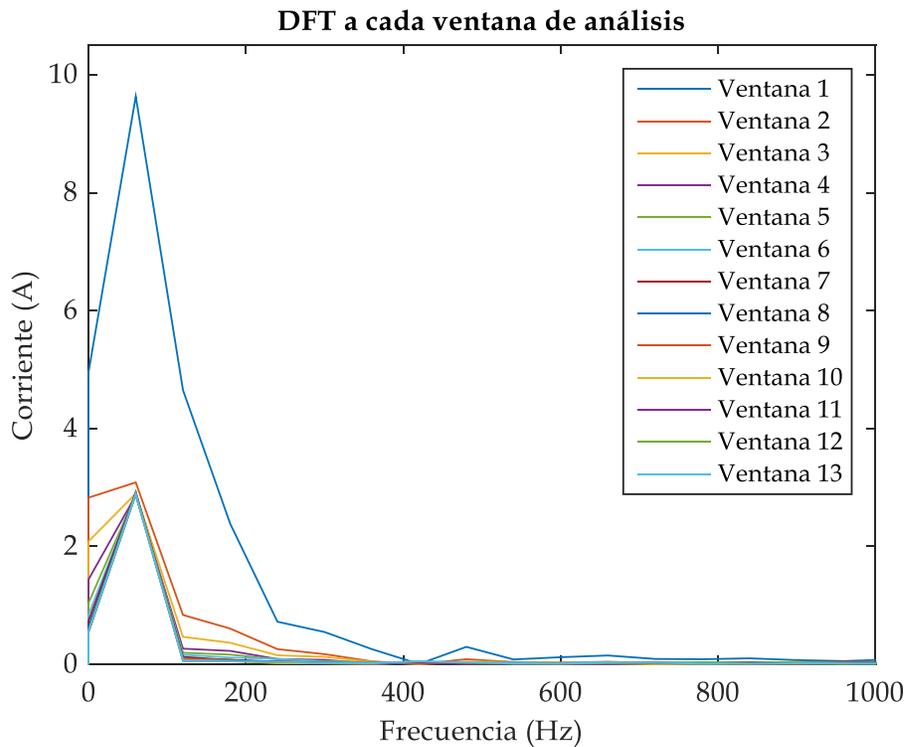


Fig. 4.14. Análisis espectral de la corriente de energización para 35 vueltas en cortocircuito del transformador bajo prueba.

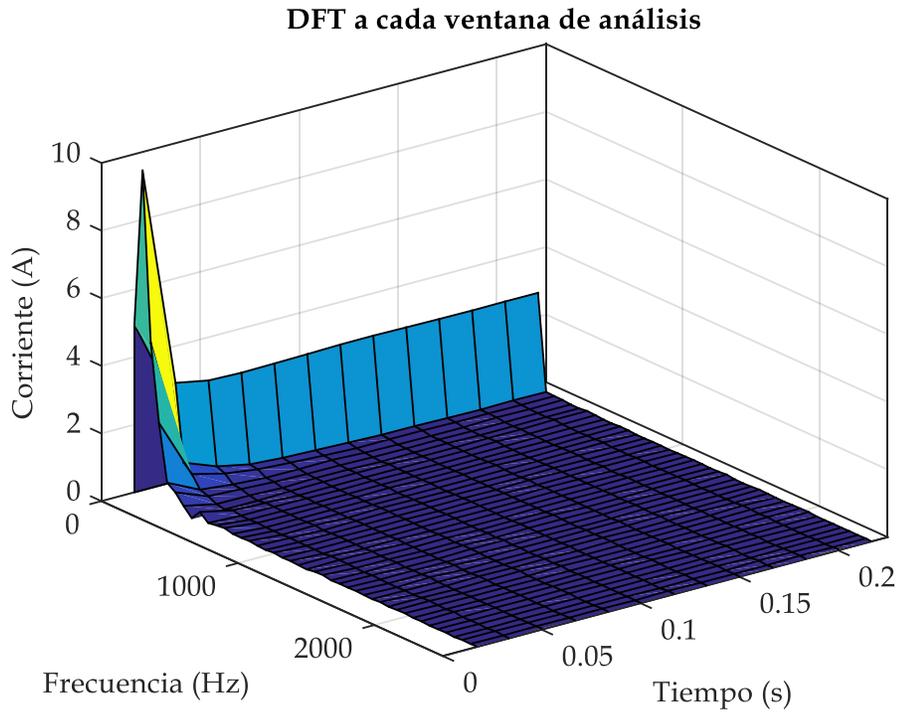


Fig. 4.15. Comportamiento de la DFT respecto a la frecuencia y al tiempo de la corriente de energización para 35 vueltas en cortocircuito del transformador bajo estudio.

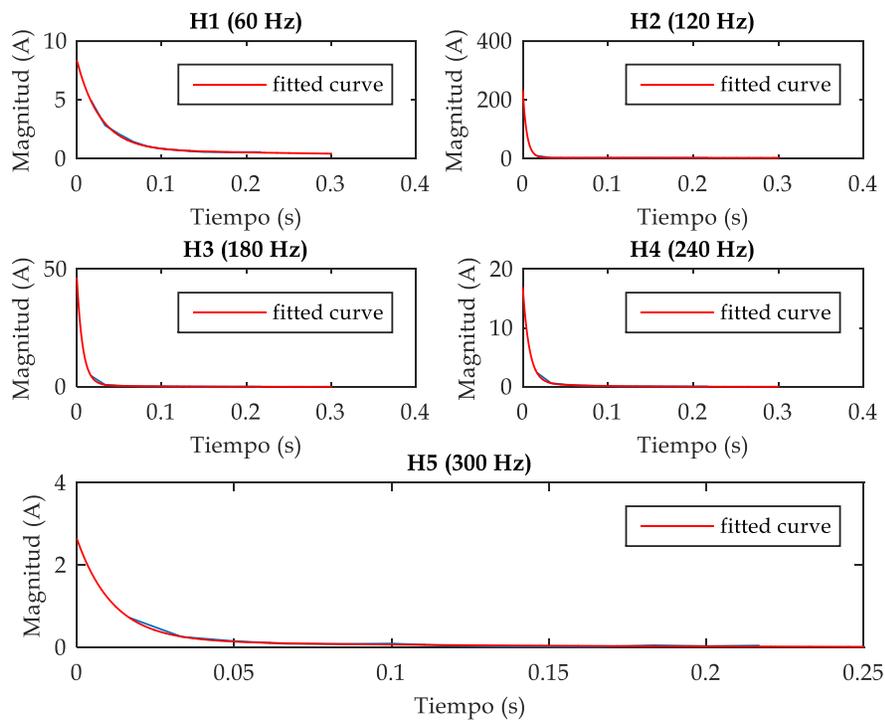


Fig. 4.16. Magnitud de la señal de corriente de energización vs tiempo de cada componente armónica para 35 vueltas en cortocircuito del transformador bajo prueba.

Las gráficas obtenidas en las Figs. 4.8 a la 4.16 corresponden al análisis espectral de cada señal de corriente de energización empezando con la corriente de energización para condiciones sin falla y continuando con cada caso de falla definido en el transformador bajo prueba. Se muestra el comportamiento armónico para la magnitud a lo largo del tiempo de la corriente de energización, así como una gráfica en tres dimensiones que muestra el comportamiento de la magnitud de la *DFT* a través del tiempo y la frecuencia.

Una vez finalizado el análisis espectral, se procedió a hacer la correlación entre el número de vueltas en cortocircuito con la corriente de energización, cuantificando los valores de los ajustes de las curvas mostrados en las Figs. 4.10, 4.13 y 4.16. Los ajustes de las curvas fueron realizados por medio de la función expresada a continuación:

$$f(t) = a \cdot e^{bt} + c \cdot e^{dt} \quad (4.4)$$

La selección de la función mostrada en la ecuación (4.4) fue elegida para ajustar de mejor manera el comportamiento de cada componente armónica presente en la corriente de energización, aplicando esta función de ajuste se encontró el valor de las constantes de tiempo b y d que definen la tasa de decaimiento de la corriente de energización a lo largo del tiempo.

Los valores de los ajustes de las curvas se pueden observar en la Tabla 4.1, la cual muestra los valores obtenidos para cada ajuste de curva correspondiente al comportamiento de las 5 componentes armónicas de la señal de corriente de energización medida en el transformador bajo prueba. Puede notarse que la componente de segundo armónico presenta cambios importantes en b y d , las cuales corresponden a los valores de las constantes de tiempo definidas para el comportamiento armónico a lo largo del tiempo.

Al graficar el valor absoluto de las constantes b y d con respecto al número de vueltas en cortocircuito, se pueden observar diferencias en las magnitudes conforme el número de vueltas en cortocircuito. Para b se puede notar una tendencia a incrementar en magnitud conforme las vueltas en cortocircuito aumentan en el devanado, como se observa en la Fig. 4.17.

Al graficar d se puede notar una reducción conforme el número de vueltas en cortocircuito aumenta, como se observa en la Fig. 4.18. Esta correlación entre las constantes y el número de vueltas cortocircuitadas puede ser utilizada como referencia para determinar la severidad de la falla en devanados de transformadores.

Tabla 4.1. Parámetros de las curvas ajustadas para las componentes armónicas de la corriente de energización

h_k	Const.	Sin falla	5 vueltas en c.c.	10 vueltas en c.c.	15 vueltas en c.c.	20 vueltas en c.c.	25 vueltas en c.c.	30 vueltas en c.c.	35 vueltas en c.c.
h_1	a	10.24	9.987	9.085	8.749	8.6	8.067	7.936	7.554
	b	-54.49	-52.3	-45.04	-43.23	-42	-39.3	-38.57	-36.32
	c	1.371	1.412	1.165	1.087	1.025	0.954	0.925	0.809
	d	-4.205	-5.37	-4.014	-3.784	-3.288	-3.174	-3.152	-2.129
h_2	a	71.94	77.07	111.2	138.9	167.9	222.1	217.5	230.9
	b	-139.7	-140.3	-162.7	-176.9	-189.3	-207.6	-206.9	-212
	c	0.8246	0.7189	1.134	1.538	1.189	2.32	2.515	2.888
	d	-8.133	-1.08	-0.377	-0.232	-0.053	-0.086	-0.046	-0.011
h_3	a	41.99	55.16	54.65	43.54	48.63	42.18	44.13	45.59
	b	-137.7	-156.8	-155.3	-141	-148.6	-139.5	-143.1	-145.8
	c	0.586	0.9183	0.843	0.677	0.757	0.6588	0.757	0.823
	d	-9.162	-15.95	-15.18	-12.05	-13.16	-11.99	-13.75	-15.39
h_4	a	18.15	17.71	16.47	13.72	14.37	20	19.24	16.27
	b	-129.5	-128.4	-127.4	-114.3	-118.8	-141.6	-140.8	-130.2
	c	0.5585	0.5589	0.6024	0.509	0.578	0.706	0.755	0.6874
	d	-11.76	-13.28	-14.15	-12.33	-13.78	-16.34	-16.87	-16.1
h_5	a	4.072	2.515	2.15	7.639	2.725	4.993	2.32	2.464
	b	-119.7	-87.38	-80.97	-173.1	-107.4	-152.6	-87.15	-87.87
	c	0.2996	0.202	0.182	0.377	0.279	0.389	0.181	0.179
	d	-11.94	-11.16	-11.06	-17.98	-13.33	-17.76	-9.22	-9.533

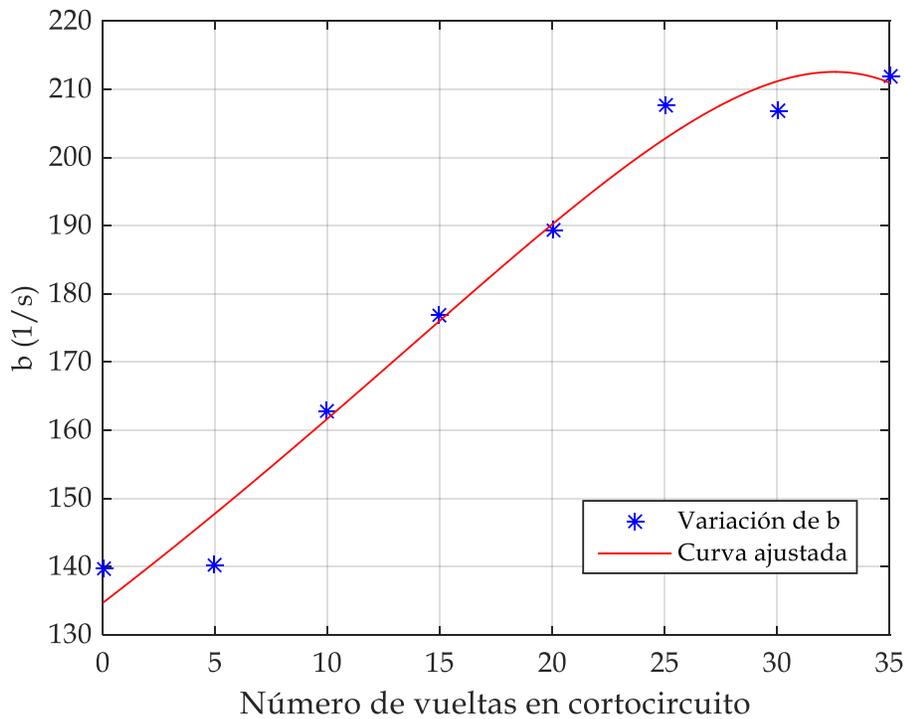


Fig. 4.17. Comportamiento de b respecto al número de vueltas en cortocircuito.

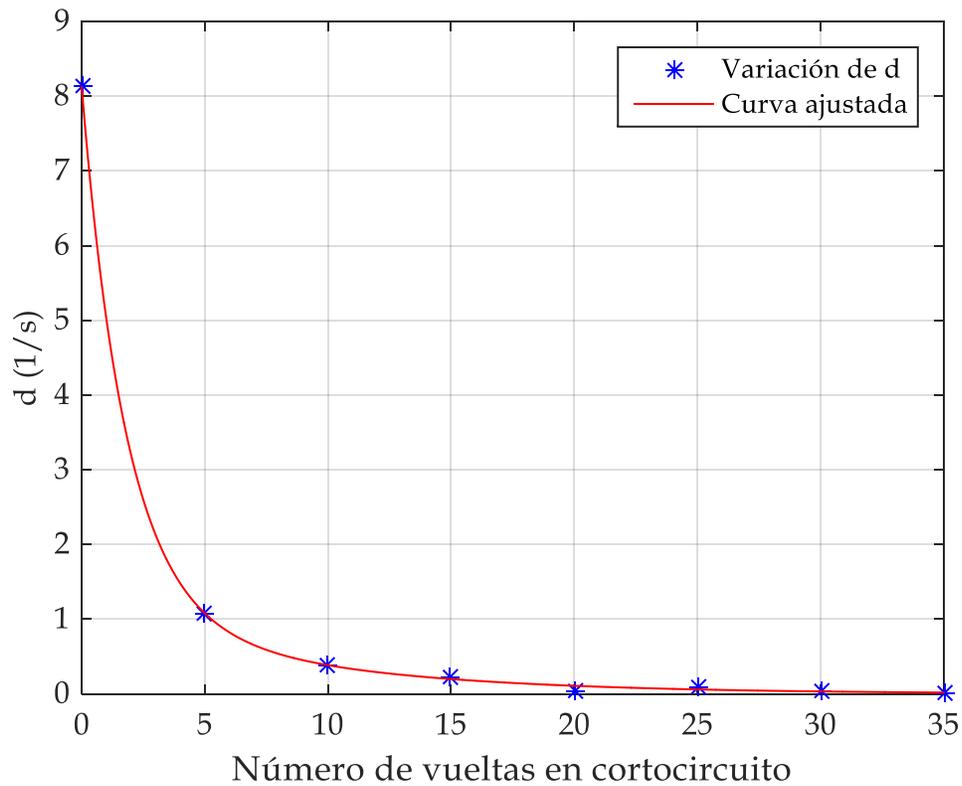


Fig. 4.18. Comportamiento de d respecto al número de vueltas en cortocircuito.

Al observar las Figs. 4.17 y 4.18 podemos notar como las constantes de tiempo correspondientes a la componente de segunda armónica presentan variaciones significativas conforme el número de vueltas en cortocircuito incrementa.

La constante b tiende a incrementar en magnitud conforme las vueltas en cortocircuito aumentan y la constante d tiende a decrecer en magnitud para la misma situación, observando cambios importantes en b cuando se tiene el 2.11% del devanado primario bajo falla, mientras que para la constante d se muestran cambios significativos cuando el 1.05% del devanado se encuentra bajo la misma condición.

Análisis del uso de la corriente de energización como método para la detección de fallas internas en transformadores

CAPÍTULO 5 :

SIMULACIÓN DE LA CORRIENTE DE ENERGIZACIÓN UTILIZANDO EL MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos a partir de la simulación de la corriente de energización del transformador bajo prueba, utilizando el software comercial COMSOL Multiphysics, el cual utiliza el Método de Elemento Finito (MEF) [8, 46], para obtener soluciones aproximadas a problemas físicos con valor en la frontera. Posteriormente se obtuvieron las formas de onda de las corrientes de energización para diferentes estados de falla y se aplicó el análisis espectral a cada una de estas señales tal como se realizó en el capítulo 4. El propósito de estas simulaciones es contar con un modelo que pueda ser utilizado para verificar la aplicabilidad de la técnica de detección de vueltas cortocircuitadas mediante el análisis de la corriente de energización en diferentes diseños de transformador. Se realiza una comparación entre los resultados simulados y los resultados experimentales para verificar que las simulaciones reproducen el comportamiento de la corriente de energización en condiciones de fallas entre vueltas. Es importante mencionar que las simulaciones son realizadas considerando varias simplificaciones, en el modelo por lo que es de esperarse que los resultados no coincidan en cuanto a magnitudes, pero como se menciona anteriormente, lo que se busca es verificar el comportamiento de la corriente de energización con el número de vueltas en corto circuito.

5.1 Introducción

Existen diversos modelos de fallas internas en transformadores, los cuales se basan en circuitos equivalentes y magnéticos [8, 15, 20, 21] y [43]. Sin embargo, estos modelos presentan soluciones aproximadas y no son prácticos para un análisis más detallado.

Actualmente se cuenta con herramientas computacionales basadas en las simulaciones de campos electromagnéticos usadas con el fin de observar y analizar la severidad de la falla presente en los transformadores. Para poder analizar la severidad de la falla en un transformador, primero debe analizarse el comportamiento electromagnético del transformador, el cual se describe a continuación.

5.2 Comportamiento electromagnético del transformador

Para poder entender el comportamiento electromagnético del transformador, es necesario identificar como primer paso el tipo de problemática que se tiene. Los fenómenos electromagnéticos pueden ser clasificados como [44, 45]:

- Campo Electromagnético Cuasi-Estacionario.
- Propagación de ondas.
- Campo Electromagnético Estacionario.
- Campo Magnetostático.
- Campo Electroestático.

El análisis del transformador se encuentra en la clasificación de Campo Electromagnético Cuasi-Estacionario, el cual se detalla a continuación.

5.2.1 Campo Magnético Cuasi-Estacionario

En este tipo de problemas, se considera que no existen las corrientes de desplazamiento $\partial\vec{D}/\partial t$. De las ecuaciones de Maxwell, el campo magnético cuasi-estacionario está definido por:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (5.1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (5.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (5.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (5.4)$$

Donde \vec{H} es la intensidad de campo magnético, \vec{J} es la densidad de corriente de conducción, \vec{E} es el campo eléctrico, \vec{B} es la densidad de flujo magnético, \vec{D} es la densidad de flujo eléctrico y ρ_v es la densidad volumétrica de carga. La densidad de corriente eléctrica para este problema está definida por \vec{J}_s que representa la densidad de corriente externa que se encarga de excitar al transformador definida como:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} + \vec{J}_s \quad (5.5)$$

Las relaciones constitutivas están dadas por:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (5.6)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (5.7)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (5.8)$$

Donde μ es la permeabilidad magnética absoluta, definida como $\mu = \mu_0 \mu_r$, ϵ es la permitividad eléctrica absoluta, definida como $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ y σ es la conductividad eléctrica. Sustituyendo las ecuaciones (5.6), (5.7) y (5.8) en las ecuaciones (5.1) y (5.4), obtenemos las ecuaciones que describen al campo magnético cuasi-estacionario en función del campo magnético y el campo eléctrico como sigue:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \vec{B} \right) = \sigma \vec{E} + \vec{J}_s \quad (5.9)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho_v}{\epsilon} \quad (5.10)$$

Se utiliza el potencial vectorial magnético, el cual se deduce a partir de la Ley de continuidad del campo magnético, expresado como:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (5.11)$$

Sustituyendo en las ecuaciones (5.3) y (5.9) obtenemos:

$$\nabla \cdot (\nabla \times \vec{A}) = 0 \quad (5.12)$$

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{A}) \right] = \sigma \vec{E} \quad (5.13)$$

Sustituyendo el potencial vectorial magnético en la Ley de Faraday ecuación (5.2), tenemos:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{A}) \quad (5.14)$$

De donde:

$$\nabla \times \left(\vec{E} + \frac{\partial}{\partial t} \vec{A} \right) = 0 \quad (5.15)$$

Utilizando la propiedad del cálculo vectorial $\nabla \times (-\nabla V) = 0$, encontramos la siguiente relación:

$$-\nabla V = \vec{E} + \frac{\partial}{\partial t} \vec{A} \quad (5.16)$$

De donde el campo eléctrico se puede calcular como:

$$\vec{E} = -\nabla V - \frac{\partial}{\partial t} \vec{A} \quad (5.17)$$

De la ecuación (5.17), podemos notar que el campo eléctrico tiene dos componentes una debida a cargas estáticas y la segunda componente que representa al campo eléctrico inducido. En este tipo de problemas la componente de campo eléctrico debida a cargas estáticas es despreciada, considerando únicamente que el campo eléctrico está representado por:

$$\vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{A} \quad (5.18)$$

Sustituyendo la ecuación (5.18) en la ecuación (5.13) obtenemos:

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{A}) \right] + \sigma \frac{\partial}{\partial t} \vec{A} = \vec{J}_s \quad (5.19)$$

Considerando la norma de Coulomb como sigue:

$$\nabla \cdot \vec{A} = 0 \quad (5.20)$$

La ecuación (5.19) define el comportamiento del transformador en función del potencial vectorial magnético \vec{A} . Considerando la relación:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \nabla (\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \quad (5.21)$$

Y teniendo en cuenta la norma de Coulomb descrita en la ecuación (5.20), la ecuación (5.21) se escribe como:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = -\nabla^2 \vec{A} \quad (5.22)$$

Que se define como el Laplaciano del potencial vectorial magnético, entonces desarrollando el Laplaciano en coordenadas cartesianas tenemos:

$$-\nabla^2 \vec{A} = -\frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial z^2} \quad (5.23)$$

Sustituyendo la ecuación (5.23) en la ecuación (5.19) obtenemos:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \vec{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \vec{A}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \vec{A}}{\partial z} \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_s \quad (5.24)$$

La solución analítica de la ecuación (5.24) es muy compleja, por lo que es necesario aplicar un método numérico para su solución como lo es el MEF, el cual se describe a continuación.

5.2.2 Método del Elemento Finito

El MEF es una técnica numérica para obtener soluciones aproximadas para problemas físicos con valor en la frontera. En este caso el método es aplicado para la solución de problemas electromagnéticos debido a su capacidad para modelar problemas geoméricamente complejos. En términos generales, este método numérico aproxima un problema de ecuaciones diferenciales parciales con un modelo que tiene un número finito de parámetros desconocidos. Este concepto introduce elementos finitos que se refieren a la discretización del problema original, que se encargan de describir las formas posibles de aproximar la solución [8, 46, 47].

El MEF se reduce a seguir una serie de pasos, los cuales son:

1. Discretización del dominio (dividir el dominio en pequeños elementos identificando nodos en cada uno de ellos, usualmente los vértices).
2. Interpolación de la solución dentro de cada elemento.
3. Determinar la ecuación matricial que exprese las propiedades de cada elemento (ecuación de elemento).
4. Ensamble de la ecuación matricial global.
5. Ingresar condiciones de frontera.
6. Resolver la ecuación matricial.
7. Post-procesamiento.

Existen muchos programas que aplican este método numérico para la solución de problemas electromagnéticos, el software utilizado en esta investigación fue COMSOL Multiphysics v5.2a [48]. El proceso que lleva este software para la solución de problemas se divide en 3 etapas importantes, las cuales son:

A. Descripción del modelo

- Parámetros, funciones y variables.
- Dimensión de la geometría.
- Diseño de la geometría.

B. Proceso de simulación

- Especificaciones del modelo.
- Aplicación de la física al modelo.
- Selección del tipo de solución.

C. Visualización de resultados

- Resultados de la simulación.
- Análisis de los resultados.

5.3 Modelado del transformador bajo estudio para la simulación

A continuación, se muestra como fue realizada la simulación transitoria del transformador monofásico bajo estudio, considerando el efecto no lineal del núcleo magnético por medio de la curva de magnetización B-H para el acero al silicio utilizado en la simulación. El modelo del transformador, calcula la distribución del campo magnético, el efecto de la saturación magnética, la respuesta transitoria de la corriente de energización y el flujo disperso. Se asume que los devanados primario y secundario están conformados de múltiples vueltas modelados por medio de la característica "Coil" incluida en el software. El modelo no toma en cuenta las corrientes circulantes en las vueltas individuales de los devanados.

La interfaz *Magnetic Fields* (MF) fue utilizada para poder modelar el comportamiento del transformador. La excitación del modelo se realiza a través del acoplamiento del modelo electromagnético con un modelo circuital mostrado en la Fig. 5.1, el cual se encuentra conformado por una fuente de tensión v_s , una resistencia R_{ps} de muy baja magnitud conectada en serie al devanado primario y una resistencia R_{ss} conectada a las terminales del devanado secundario para indicar que se encuentra en circuito abierto, esto por medio de la interfaz *Electrical Circuit*.

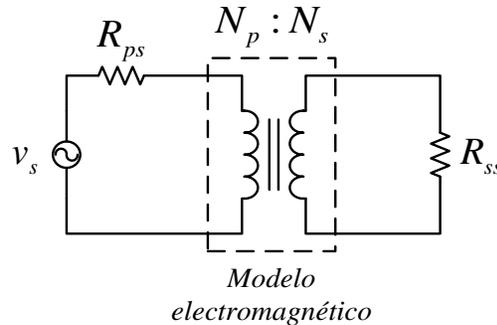


Fig. 5.1. Acoplamiento entre el modelo electromagnético del transformador y el modelo circuital de excitación.

Posteriormente se agregó un paso de estudio denominado *Coil Geometry Analysis* y para poder determinar la corriente de energización y las tensiones en el devanado primario y secundario, se realizó un estudio dependiente del tiempo, el proceso de simulación detallado puede consultarse en [49]. Antes de empezar a simular el transformador bajo prueba, se consideró el modelo geométrico descrito en el Apéndice 4 en donde se explica detalladamente como fue generada la geometría completa del transformador.

La Fig. 5.2 muestra la geometría del transformador en dos dimensiones, en donde se puede observar que está conformada por el núcleo magnético, el devanado primario y el devanado secundario.

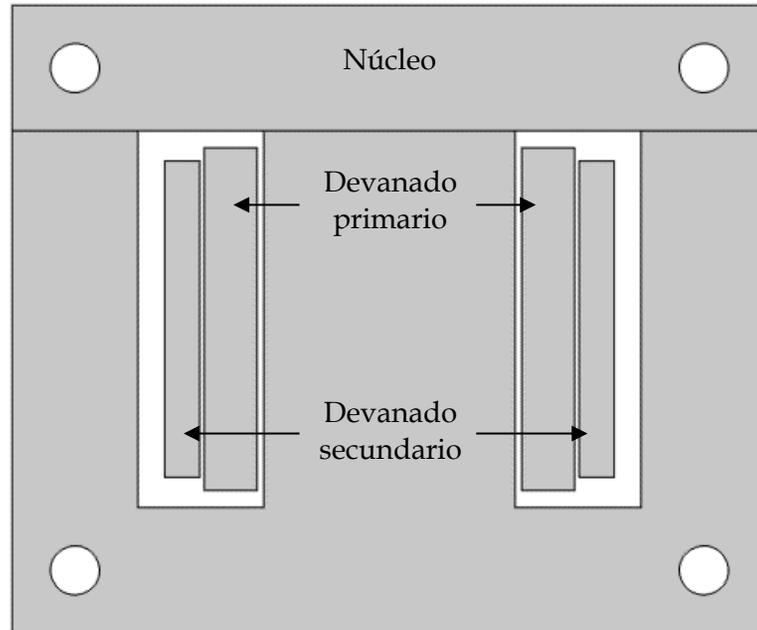


Fig. 5.2. Geometría del transformador bajo prueba.

Tomando como punto de partida la geometría de la Fig. 5.2, se procedió a realizar la simulación del transformador para condiciones sin falla para poder obtener el comportamiento del flujo magnético en el núcleo, la corriente de energización, las tensiones primaria y secundaria. Para esto fue necesario generar un mallado del problema, la Fig. 5.3 muestra el mallado generado para condiciones sin falla. Se utilizó un mallado extra fino para poder obtener buenos resultados en la visualización del comportamiento de las líneas de flujo magnético y de la corriente de energización. El número de elementos que componen el mallado del problema fue de 7226.

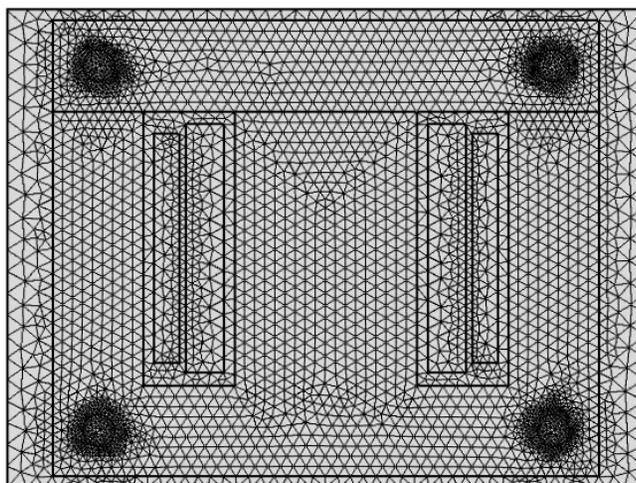


Fig. 5.3. Mallado del problema para condiciones sin falla del transformador bajo prueba.

Posteriormente se realizaron las simulaciones para los diferentes estados de falla en el transformador bajo estudio, considerando un modelo que represente las vueltas en cortocircuito en el devanado primario del transformador. De igual manera, para cada estado de falla en el transformador se obtuvieron los comportamientos del flujo magnético, corriente de energización y tensiones en el devanado primario y secundario del transformador.

Es importante mencionar que no se cuenta con los datos del material del núcleo del transformador utilizado en las pruebas experimentales, por lo que en las simulaciones se seleccionó un material de los ya incluidos en la base de datos con la que cuenta COMSOL. En la Fig. 5.4 se presenta la curva de magnetización para el acero al silicio con el que fue simulado el núcleo del transformador bajo prueba.

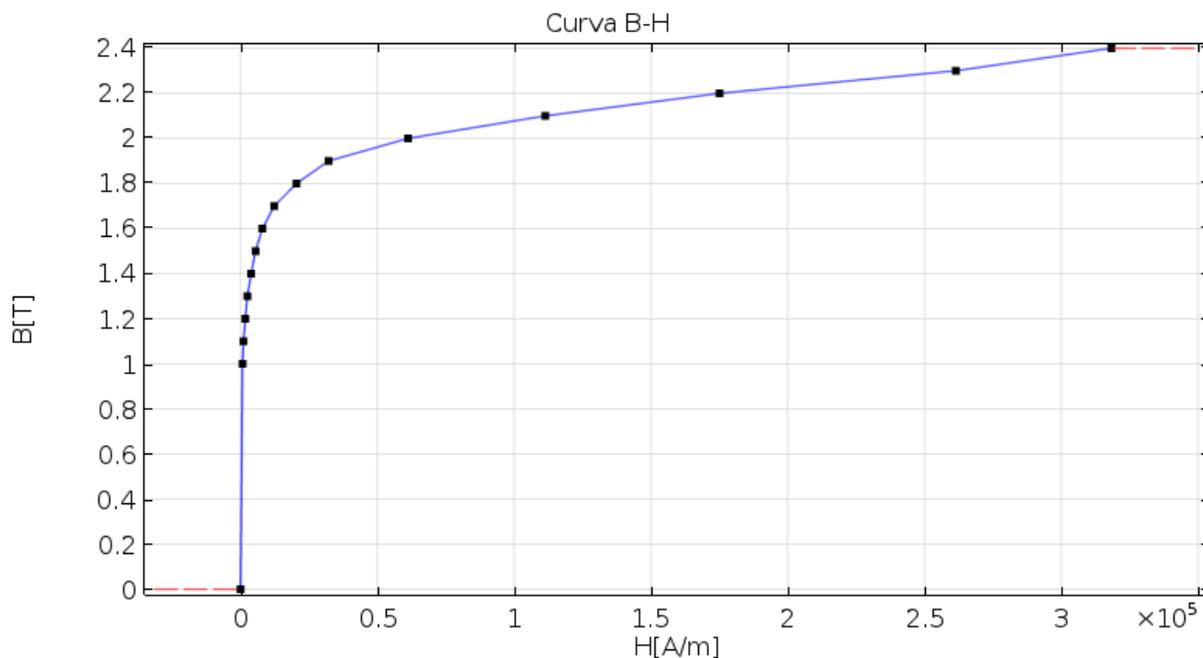


Fig. 5.4. Curva B-H utilizada para simular el comportamiento no lineal del núcleo del transformador.

5.3.1 Comportamiento del transformador bajo condiciones sin falla

En esta sección se muestran los resultados de las simulaciones que muestran los comportamientos de las líneas de flujo magnético, las tensiones en el devanado primario y secundario y la corriente de energización para condiciones sin falla, tal como puede observarse en las Figs. 5.5 a la 5.7.

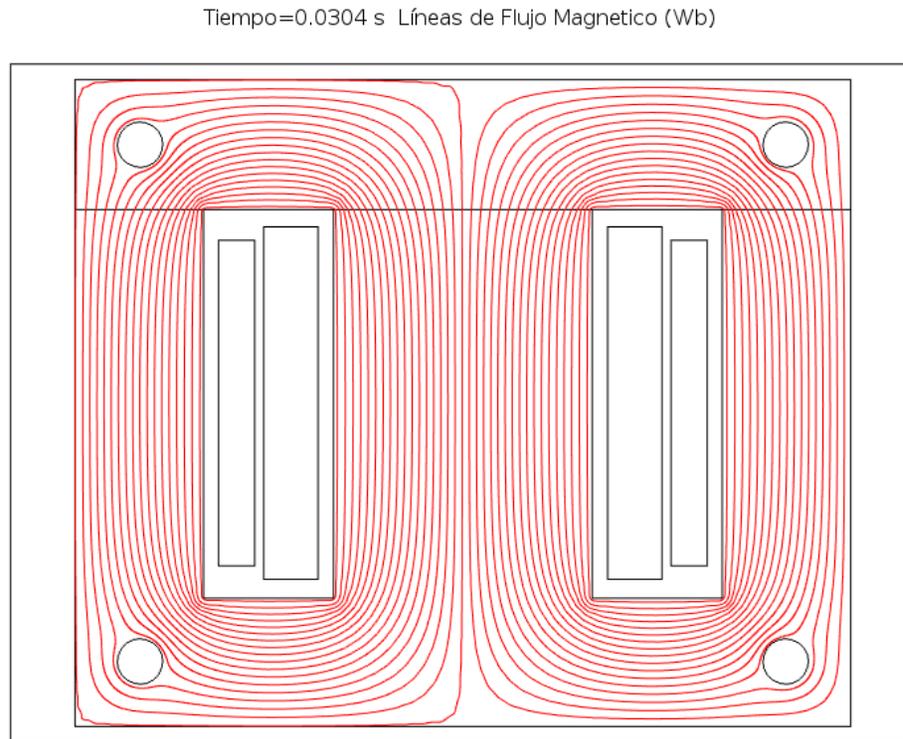


Fig. 5.5. Líneas de flujo magnético simuladas en el núcleo del transformador bajo prueba para condiciones sin falla.

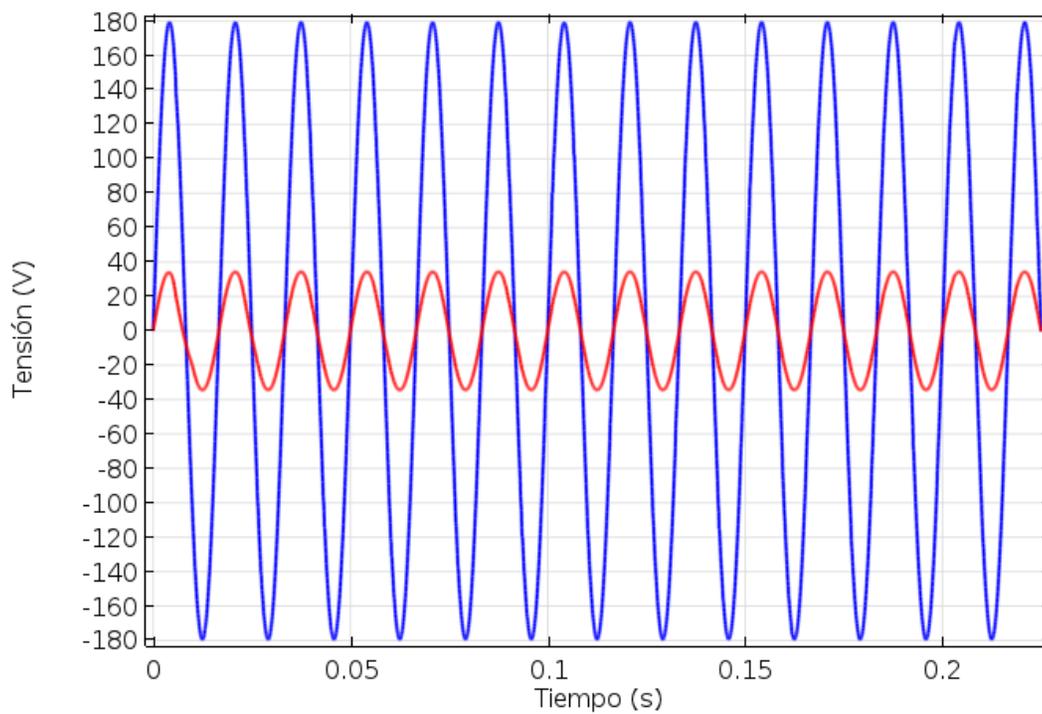


Fig. 5.6. Tensiones simuladas en el primario y en el secundario del transformador bajo prueba.

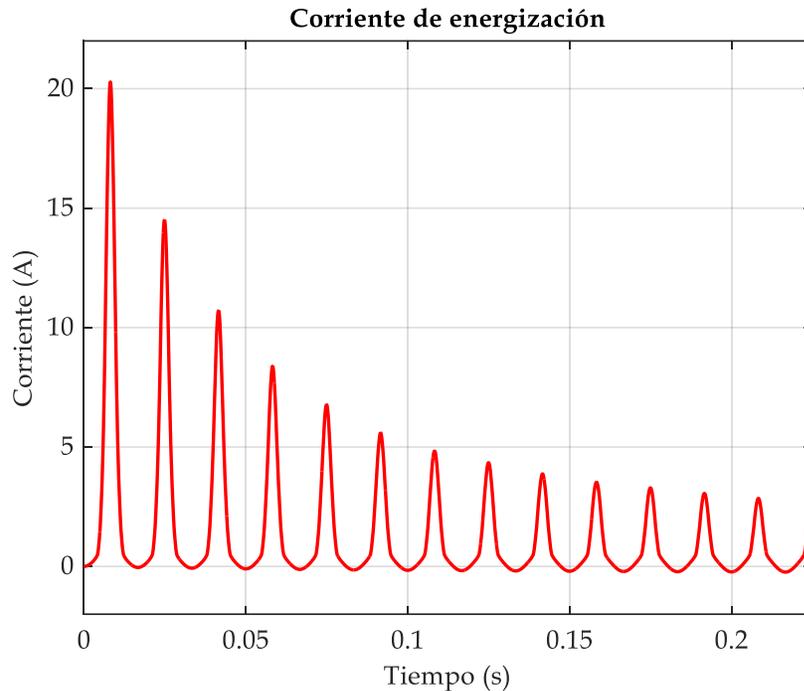


Fig. 5.7. Oscilograma de la corriente de energización simulada para condiciones sin falla.

5.3.2 Comportamiento del transformador bajo condiciones de falla

Para poder simular una falla por vueltas en cortocircuito en el software de simulación, se introdujo un subdominio dentro del devanado primario, el cual representa las diferentes vueltas en cortocircuito. La Fig. 5.8 muestra el subdominio de falla dentro del devanado primario, al cual se le asignaron únicamente el número de vueltas que se encuentran en cortocircuito.

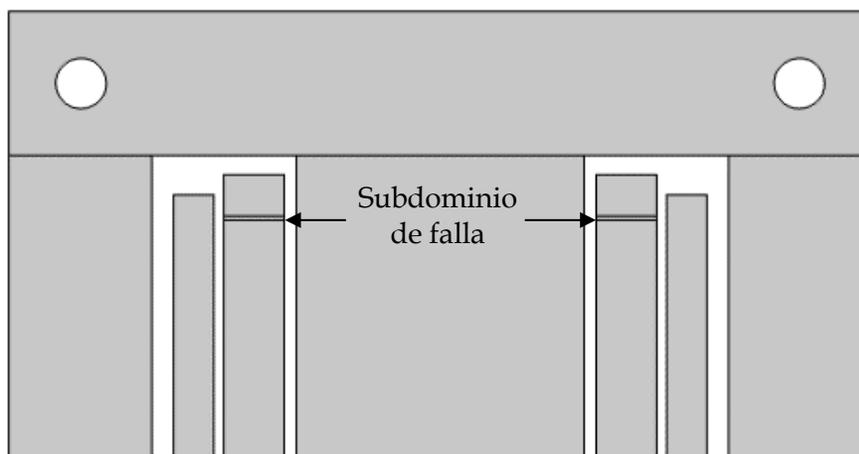


Fig. 5.8. Subdominio de falla correspondiente a 5 vueltas en cortocircuito.

La malla generada para 5 vueltas en cortocircuito puede apreciarse en la Fig. 5.9, la cual tiene un total de 8300 elementos, mientras que la malla para 40 vueltas en cortocircuito tiene 7664 elementos, como puede observarse en la Fig. 5.10.

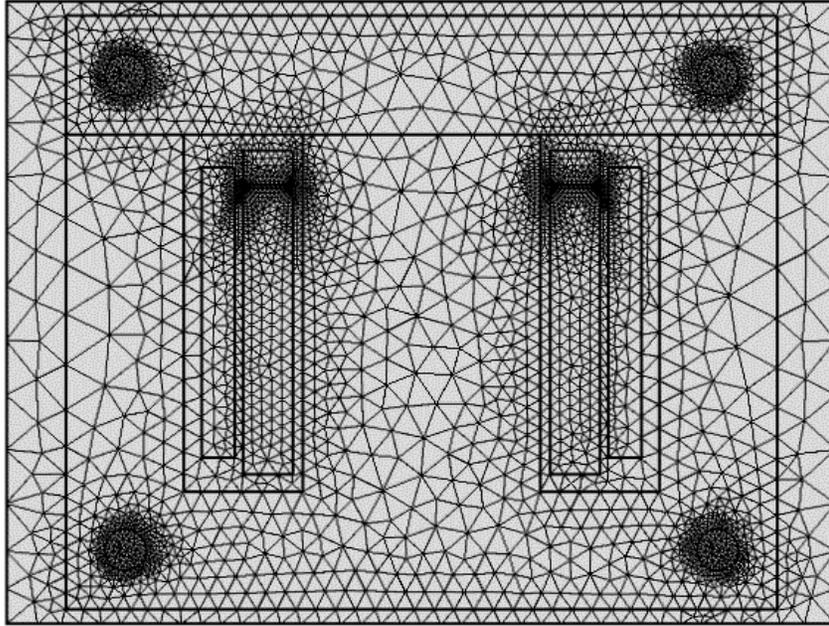


Fig. 5.9. Mallado generado para 5 vueltas en cortocircuito del transformador bajo prueba.

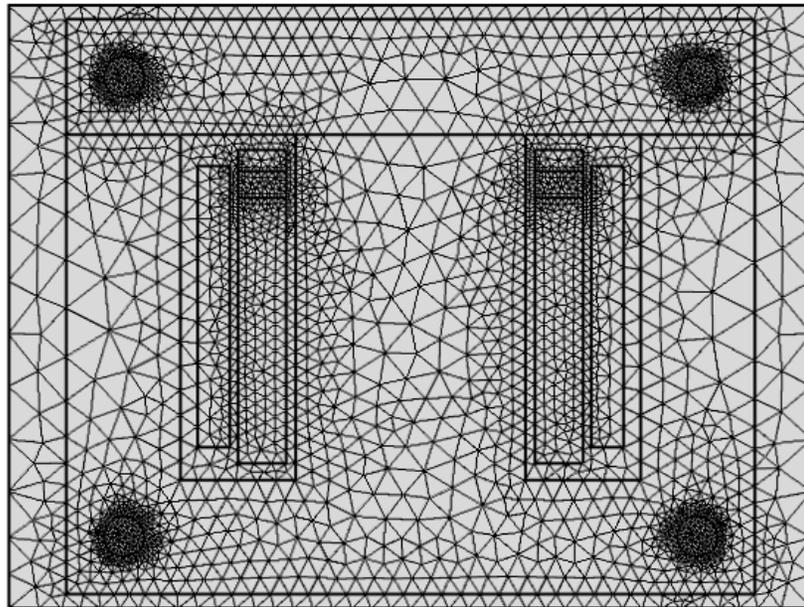


Fig. 5.10. Mallado generado para 40 vueltas en cortocircuito del transformador bajo prueba.

Los subdominios generados para los distintos estados de falla, fueron generados con respecto al área equivalente del devanado primario que tiene vueltas en cortocircuito de acuerdo a la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Porcentaje de falla en el devanado primario.

Vueltas en cortocircuito	Porcentaje de falla en el devanado primario [%]
5	1.0549
10	2.1097
15	3.1646
20	4.2194
25	5.2743
30	6.3291
35	7.3840
40	8.4388

Los comportamientos del flujo magnético y la corriente de energización para 5, 20 y 40 vueltas en cortocircuito pueden observarse en las Figs. 5.11 a la 5.16. La Fig. 5.17 muestra el comportamiento de la corriente de energización simulada conforme el número de vueltas en cortocircuito aumenta.

Tiempo=0.0304 s Línea de Flujo:

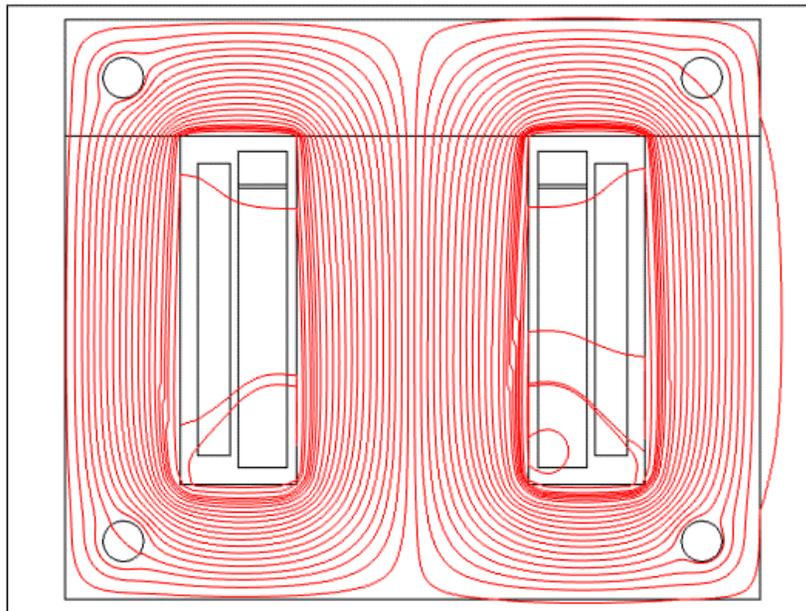


Fig. 5.11. Líneas de flujo magnético simuladas en el núcleo del transformador bajo prueba para 5 vueltas en cortocircuito.

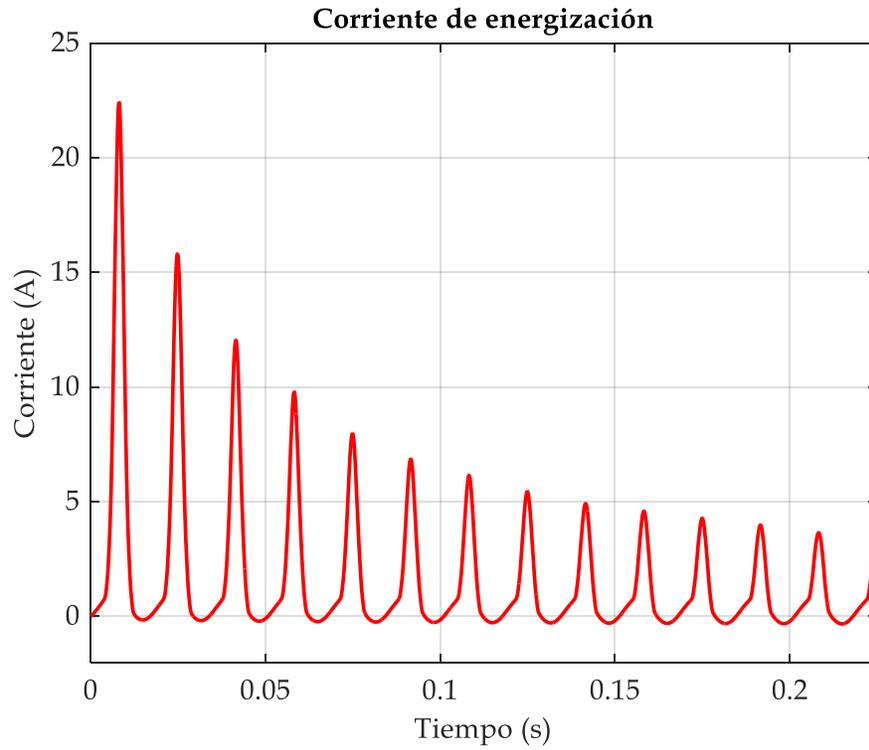


Fig. 5.12. Oscilograma de la corriente de energización simulada para 5 vueltas en cortocircuito.

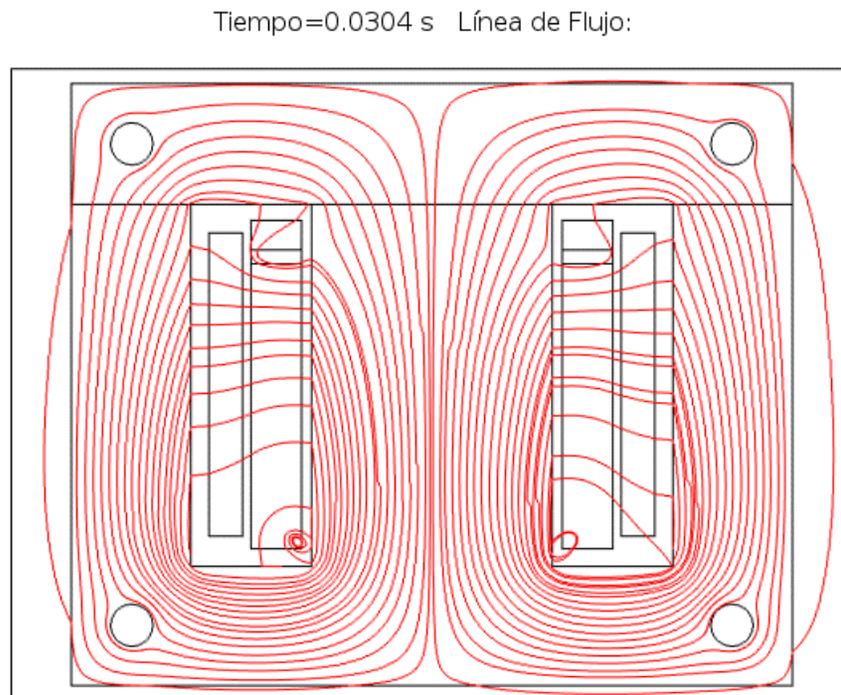


Fig. 5.13. Líneas de flujo magnético simuladas en el núcleo del transformador bajo prueba para 20 vueltas en cortocircuito.

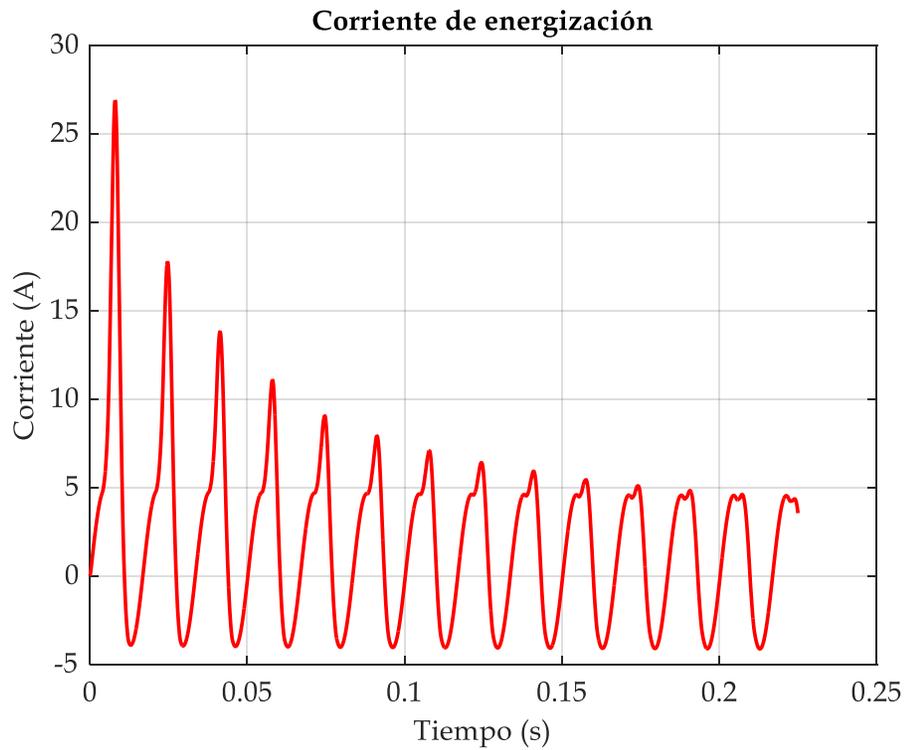


Fig. 5.14 Oscilograma de la corriente de energización simulada para 20 vueltas en cortocircuito.

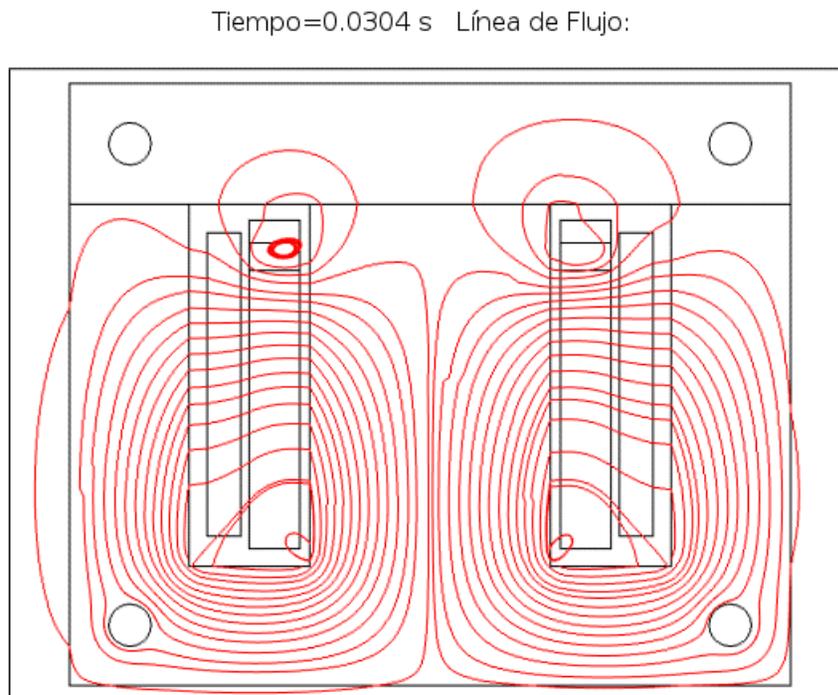


Fig. 5.15. Líneas de flujo magnético simuladas en el núcleo del transformador bajo prueba para 40 vueltas en cortocircuito.

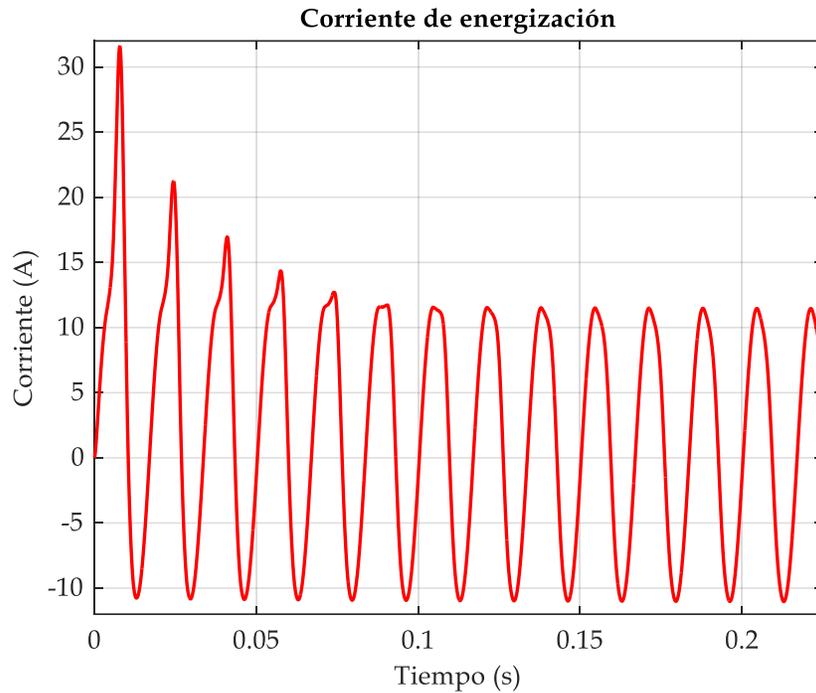


Fig. 5.16. Oscilograma de la corriente de energización simulada para 35 vueltas en cortocircuito.

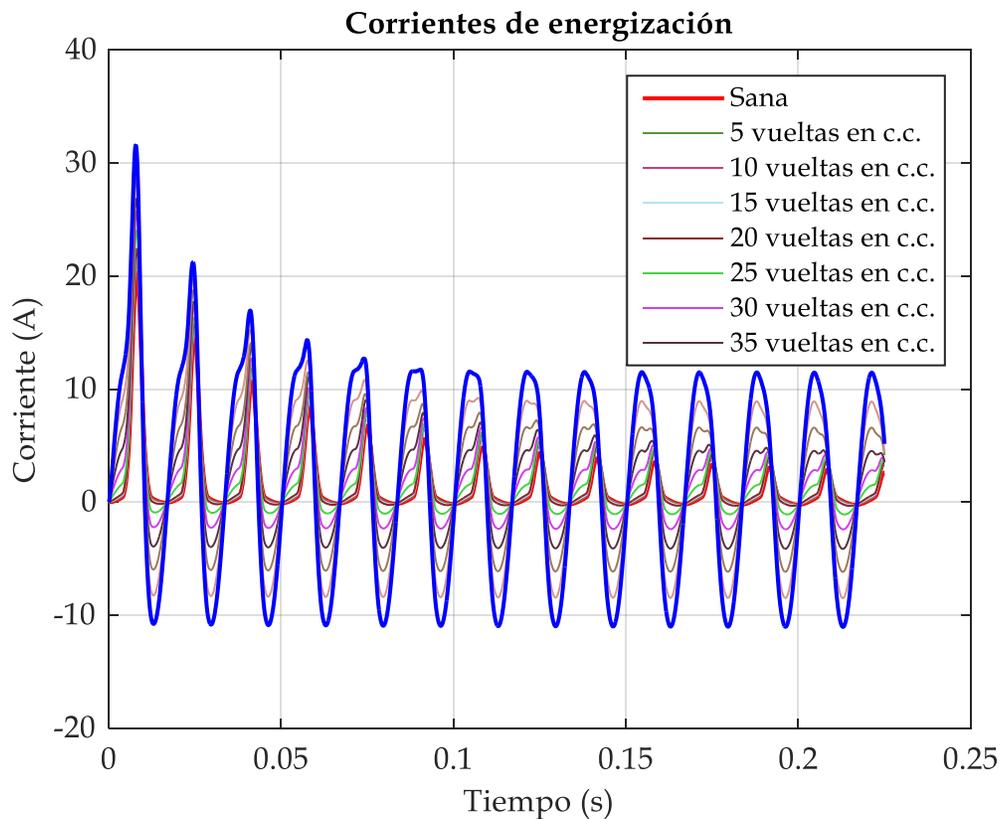
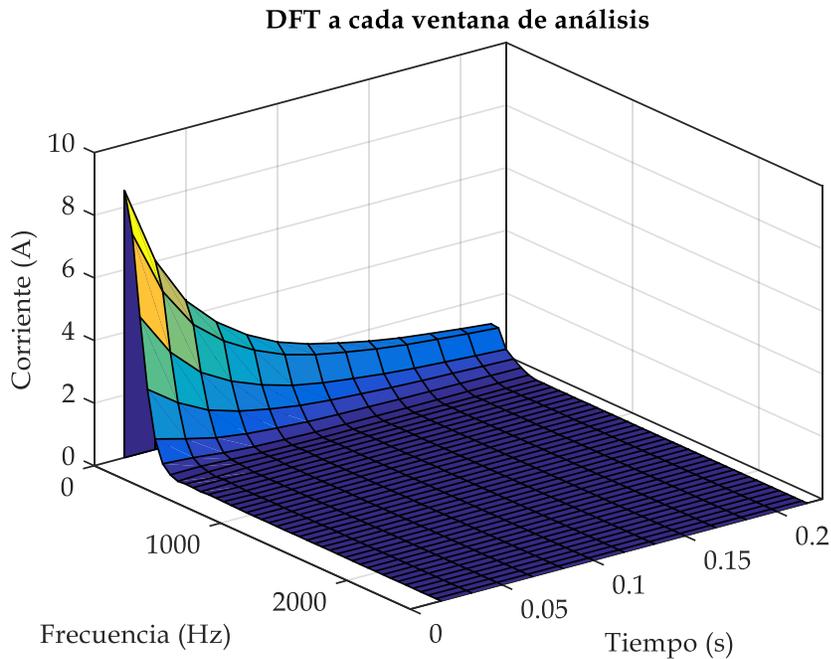
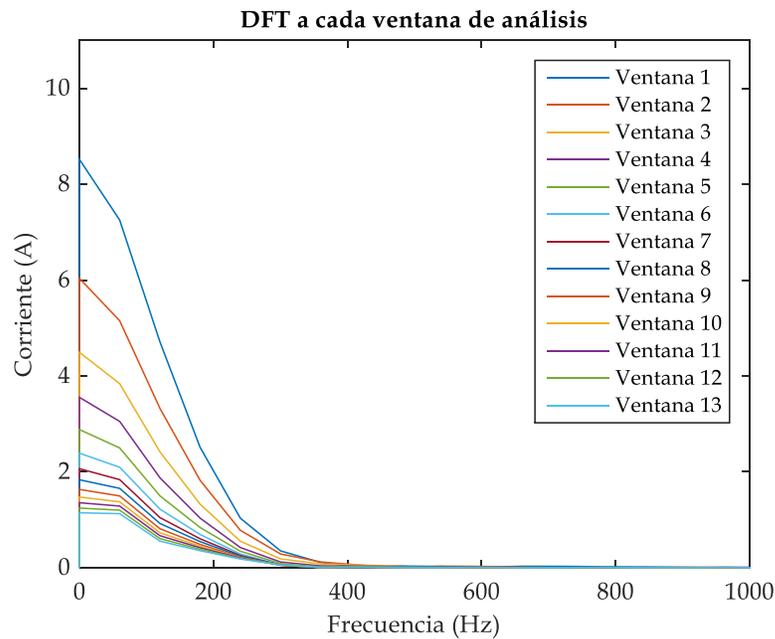


Fig. 5.17. Oscilogramas de la corriente de energización simuladas para diferente número de vueltas en cortocircuito para el transformador bajo prueba.

5.4 Resultados del procesamiento de las señales de corriente de energización simuladas

A continuación, se muestran los resultados obtenidos a partir de la aplicación del algoritmo a las señales de corriente de energización simuladas, tal como se realizó en la sección 4.4 del capítulo anterior.



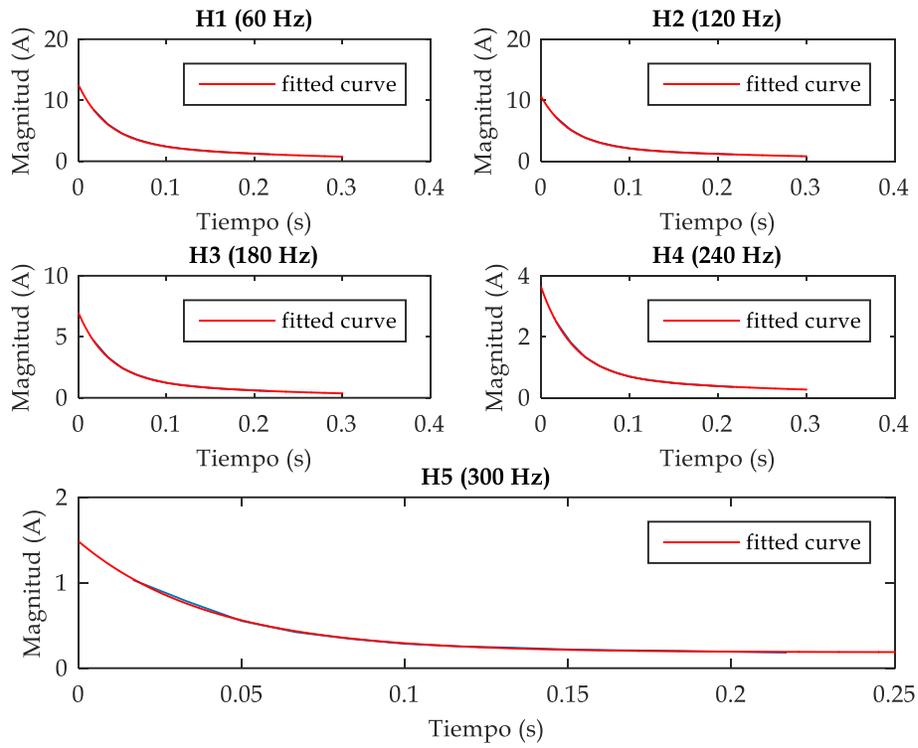


Fig. 5.20. Magnitud vs tiempo de cada componente armónica de la señal de corriente de energización simulada bajo condiciones sin falla del transformador bajo prueba.

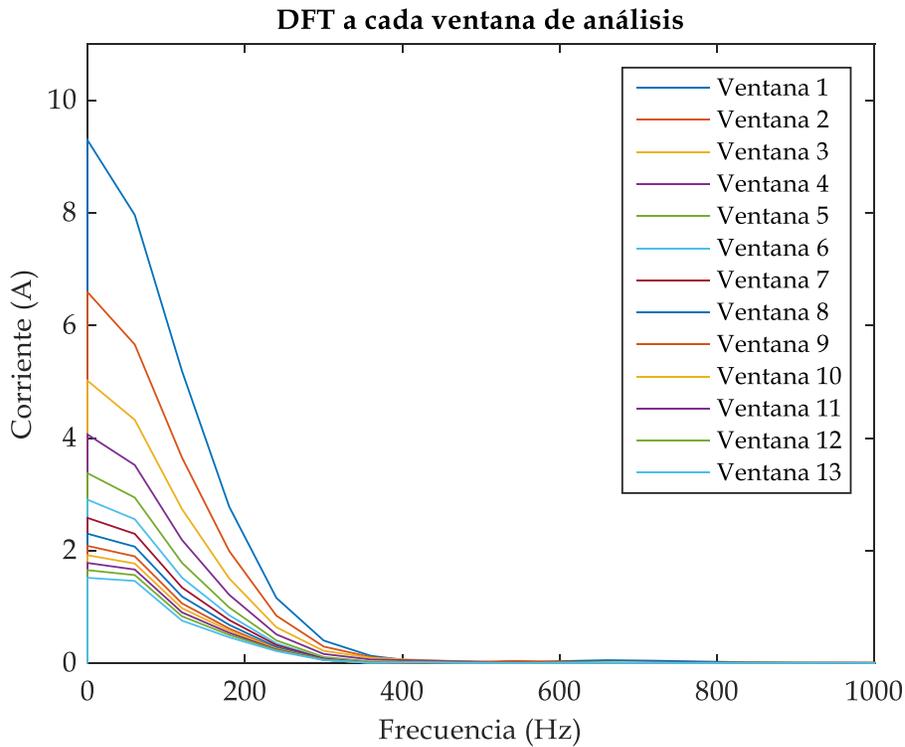


Fig. 5.21. Análisis espectral de la corriente de energización simulada para 5 vueltas en cortocircuito del transformador bajo prueba.

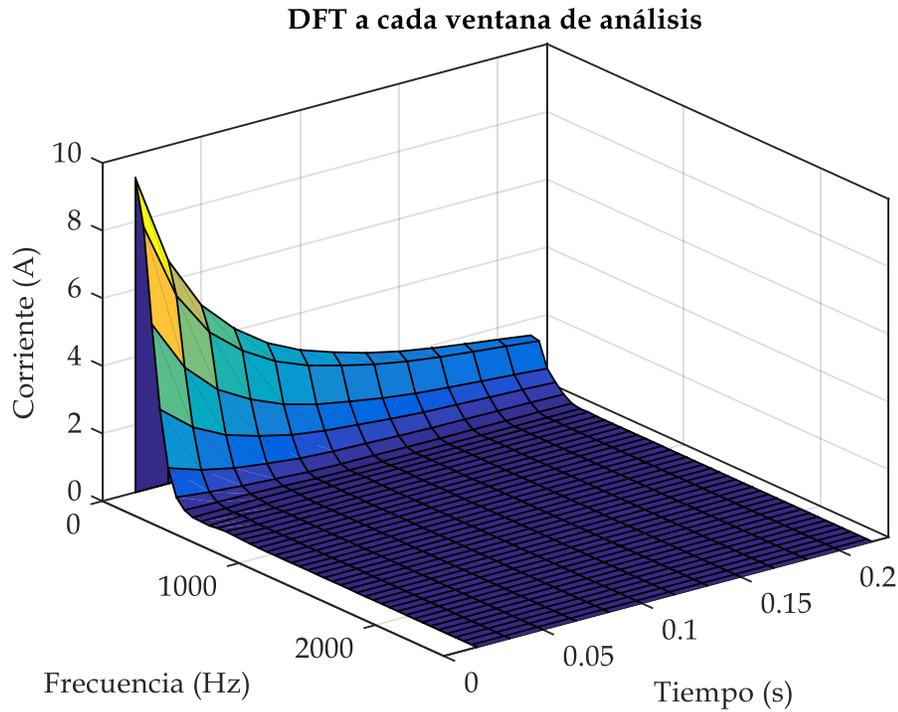


Fig. 5.22. Comportamiento de la DFT respecto a la frecuencia y al tiempo de la corriente de energización simulada para 5 vueltas en cortocircuito del transformador bajo estudio.

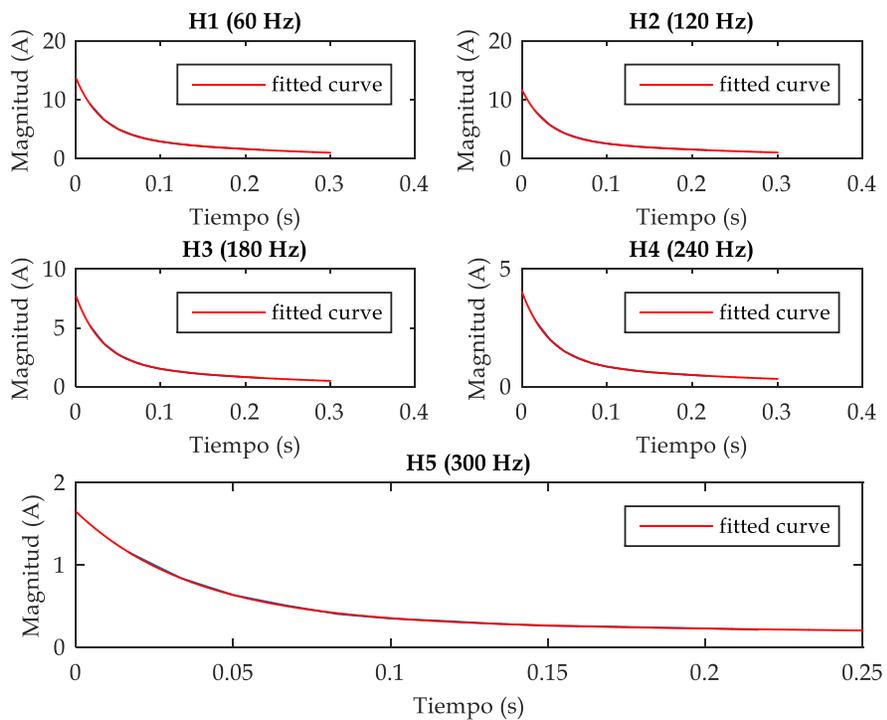


Fig. 5.23. Magnitud vs tiempo de cada componente armónica de la señal de corriente de energización simulada para 5 vueltas en cortocircuito del transformador bajo prueba.

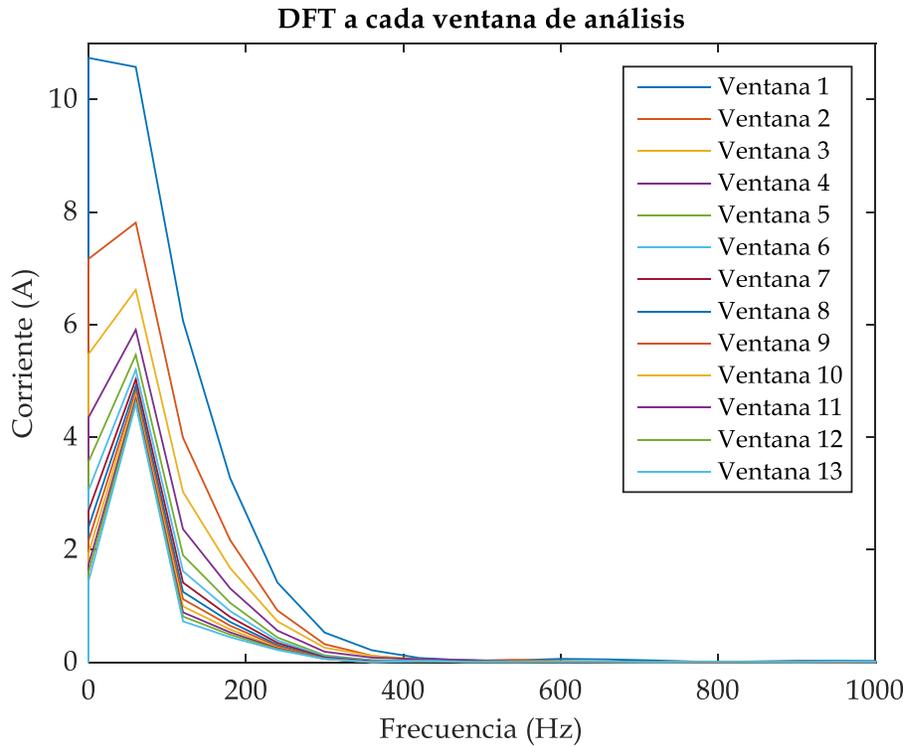


Fig. 5.24. Análisis espectral de la corriente de energización simulada para 20 vueltas en cortocircuito del transformador bajo prueba.

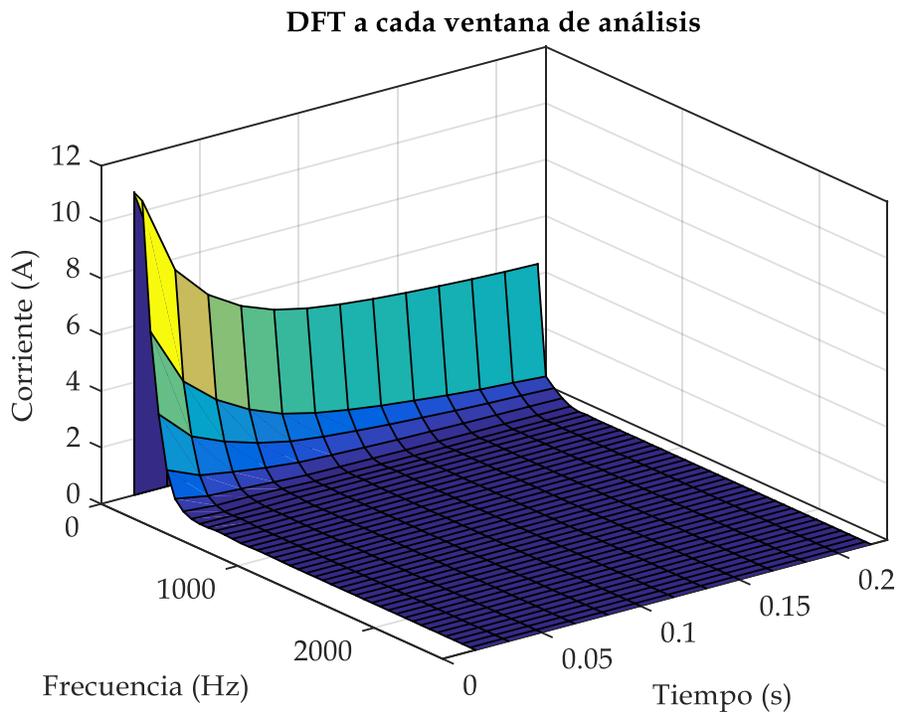


Fig. 5.25. Comportamiento de la DFT respecto a la frecuencia y al tiempo de la corriente de energización simulada para 20 vueltas en cortocircuito del transformador bajo estudio.

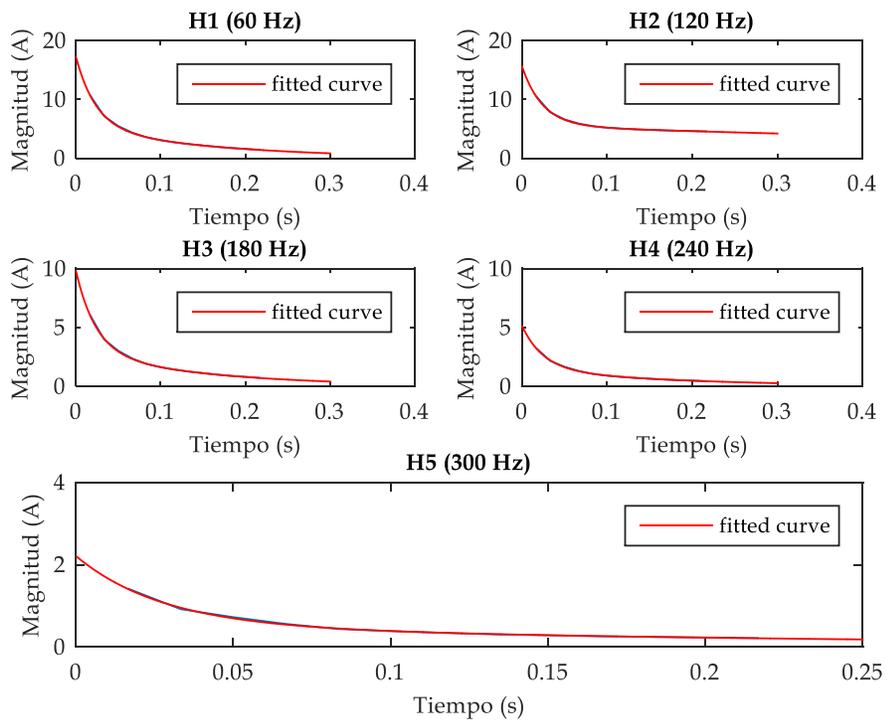


Fig. 5.26. Magnitud vs tiempo de cada componente armónica de la señal de corriente de energización simulada para 20 vueltas en cortocircuito del transformador bajo prueba.

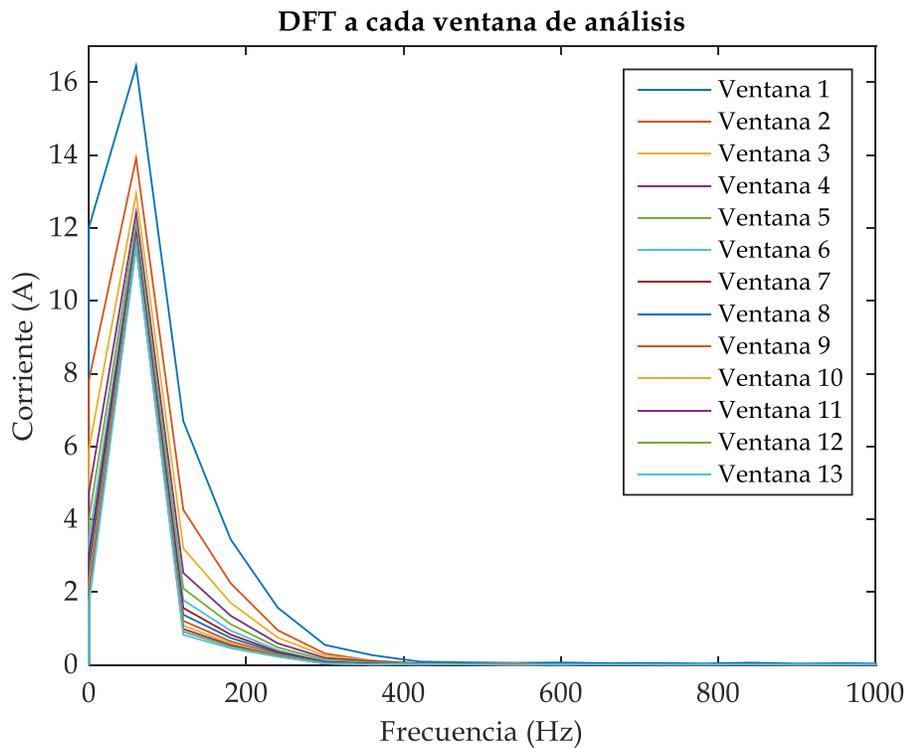


Fig. 5.27. Análisis espectral de la corriente de energización simulada para 35 vueltas en cortocircuito del transformador bajo prueba.

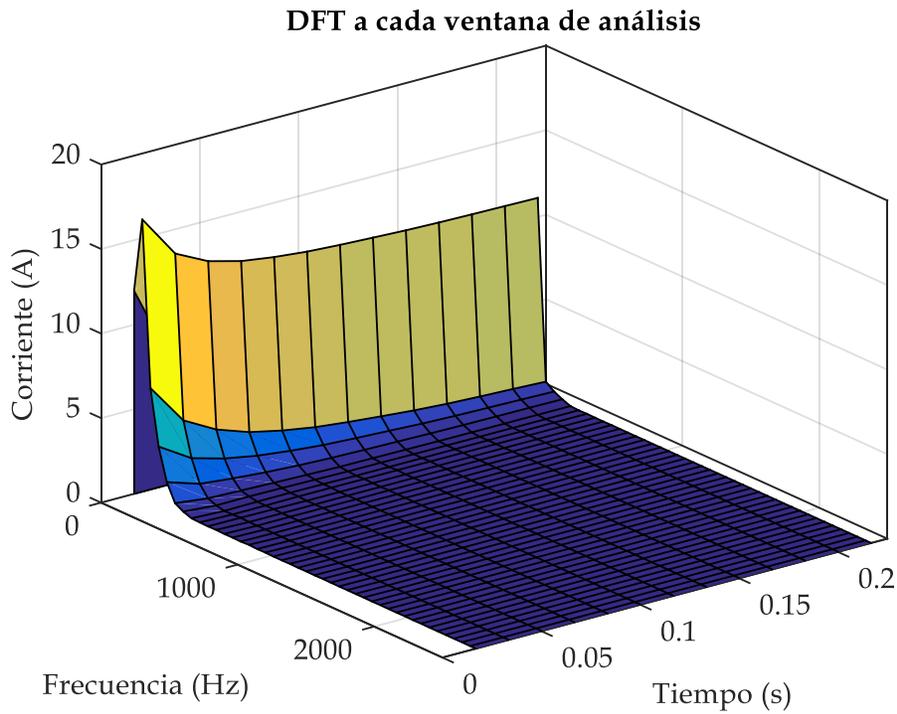


Fig. 5.28. Comportamiento de la DFT respecto a la frecuencia y al tiempo de la corriente de energización simulada para 35 vueltas en cortocircuito del transformador bajo estudio.

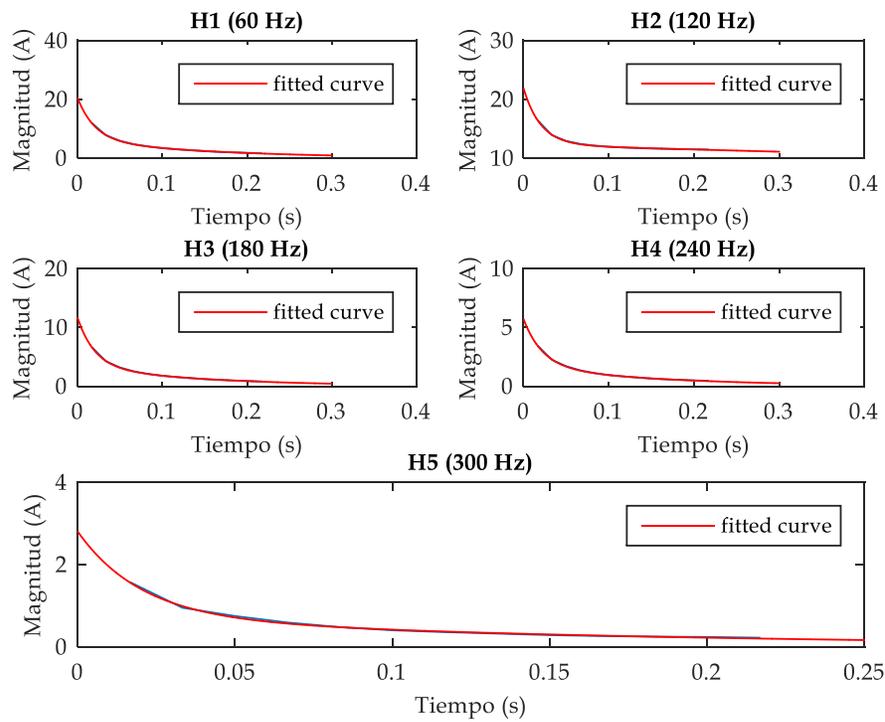


Fig. 5.29. Magnitud vs tiempo de cada componente armónica de la señal de corriente de energización simulada para 35 vueltas en cortocircuito del transformador bajo prueba.

Los valores de los ajustes de las curvas realizados se pueden observar en la Tabla 4.1, la cual muestra los valores obtenidos para cada ajuste de curva correspondiente al comportamiento de las 5 componentes armónicas de la señal de corriente de energización medida en el transformador bajo prueba.

Tabla 5.2. Parámetros de las curvas ajustadas para las componentes armónicas de la corriente de energización simulada

h_k	Const.	Sin falla	5 vueltas en c.c.	10 vueltas en c.c.	15 vueltas en c.c.	20 vueltas en c.c.	25 vueltas en c.c.	30 vueltas en c.c.	35 vueltas en c.c.
h_1	a	9.261	9.615	11.31	12.17	11.82	13.82	14.18	14.2
	b	-30.71	-34.24	-36.31	-38.72	-42.93	-42.53	-45.18	-48.64
	c	3.205	4.159	3.943	4.34	5.475	4.896	5.484	6.312
	d	-4.839	-4.702	-4.278	-4.762	-6.248	-5.253	-5.863	-6.35
h_2	a	8.122	8.434	9.964	10.62	10.2	10.65	10.22	9.632
	b	-30.13	-33.47	-35.73	-38.64	-41.56	-45.89	-48.25	-49.69
	c	2.479	3.332	3.246	4.006	5.527	7.339	9.647	12.29
	d	-3.859	-3.065	-2.445	-1.373	-0.912	-0.5064	-0.3898	-0.339
h_3	a	5.393	5.569	6.594	7.109	6.85	8.056	8.241	8.214
	b	-29.77	-33.44	-35.91	-38.43	-42.69	-42.56	-45.67	-49.7
	c	1.549	2.166	2.07	2.319	3.003	2.653	3	3.47
	d	-4.805	-4.879	-4.45	-4.998	-6.647	-5.579	-6.296	-6.861
h_4	a	2.919	2.987	3.534	3.821	3.664	4.273	4.27	4.007
	b	-27.58	-31.06	-34.24	-36.91	-40.1	-40.81	-43.45	-45.04
	c	0.710	1.065	1.055	1.196	1.516	1.36	1.525	1.723
	d	-3.222	-3.86	-3.603	-4.211	-5.756	-4.885	-5.686	-6.31
h_5	a	1.305	1.335	1.568	1.72	1.683	2.005	2.103	2.078
	b	-24.67	-26.88	-31.14	-34.57	-36.69	-40.82	-46.08	-50.16
	c	0.178	0.3153	0.345	0.4195	0.5289	0.594	0.6142	0.7342
	d	0.157	-1.728	-1.899	-2.804	-4.226	-3.872	-4.93	-5.898

De acuerdo a las simulaciones realizadas, se hizo la correlación entre el número de vueltas en cortocircuito y la corriente de energización por medio de las constantes b y d , tomando como referencia la componente de segunda armónica, que al igual que en la Tabla 4.1 se muestran cambios significativos en estas constantes de tiempo que definen su comportamiento a lo largo del tiempo.

Las Figs. 5.30 y 5.31 corresponden al comportamiento que tienen b y d conforme el número de vueltas en cortocircuito incrementa, esto corresponde para los casos simulados.

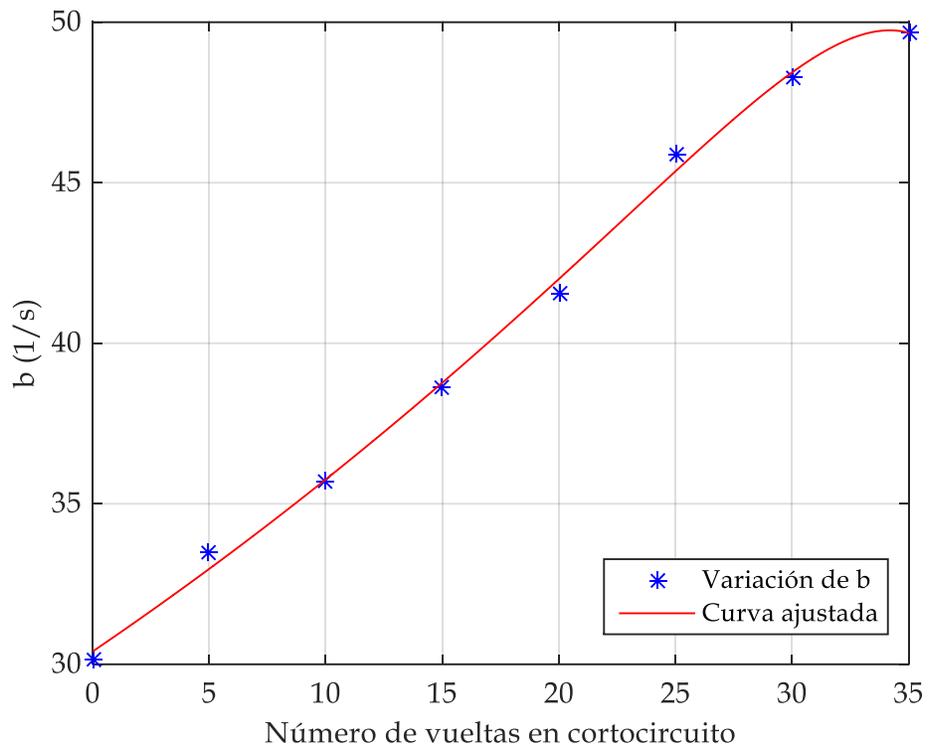


Fig. 5.30. Comportamiento de b respecto al número de vueltas en cortocircuito.

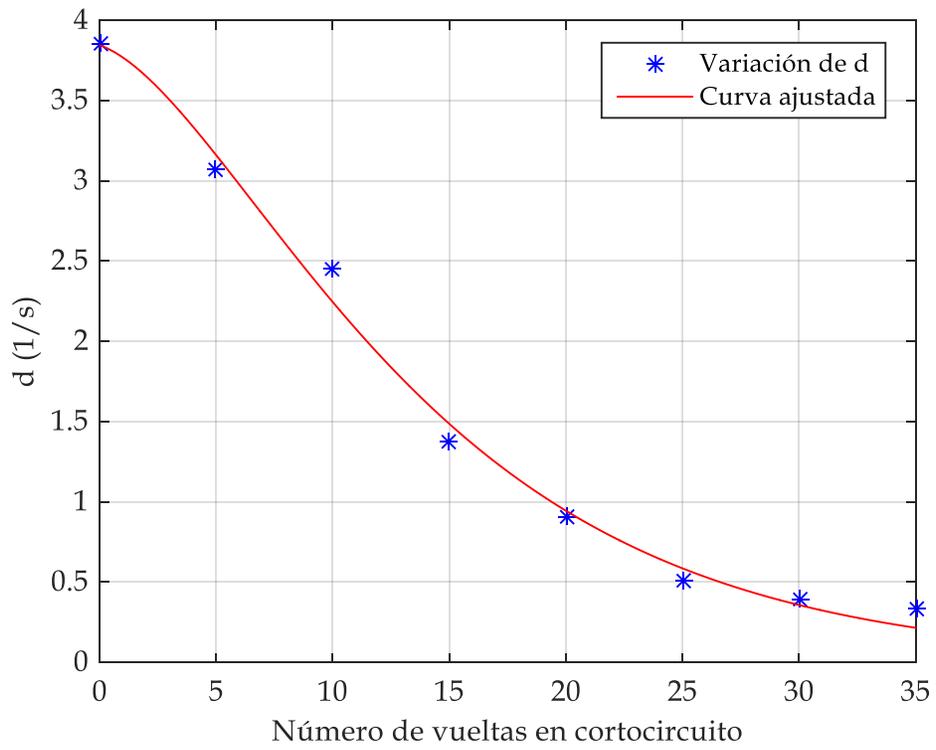


Fig. 5.31. Comportamiento de d respecto al número de vueltas en cortocircuito.

5.5 Comparación entre resultados simulados y experimentales

La Fig. 5.32(a) muestra el comportamiento de b de la componente de segunda armónica de la corriente de energización respecto al número de vueltas en cortocircuito para el caso experimental, mientras que la Fig. 5.32(b) muestra el comportamiento de b para las simulaciones. Como se puede observar, para ambos casos se tiene un comportamiento a incrementar en magnitud conforme el número de vueltas en cortocircuito aumenta, por ejemplo, el valor de la constante b incrementa alrededor del 30 % cuando el 3.16% del devanado se encuentra bajo falla, esto corresponde a 15 vueltas en cortocircuito de acuerdo a la Tabla 5.1.

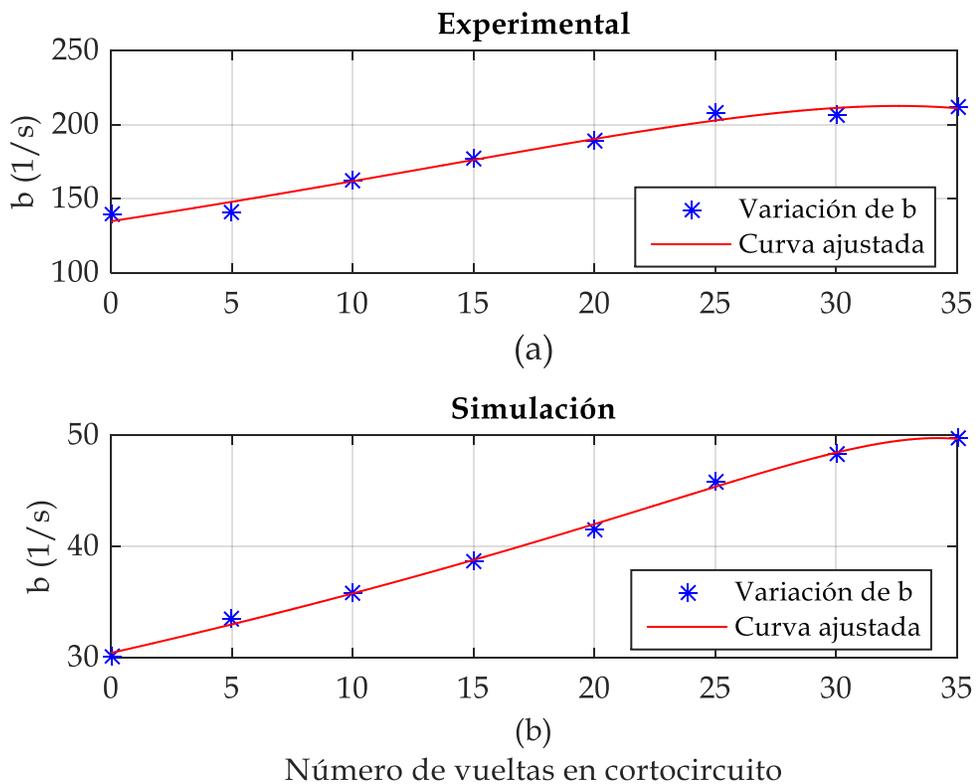


Fig. 5.32. Comportamiento de b respecto al número de vueltas en cortocircuito: (a) experimental, (b) simulación.

La Fig. 5.33(a) muestra el comportamiento de d de la componente de segunda armónica de la corriente de energización respecto al número de vueltas en cortocircuito para el caso experimental, mientras que la Fig. 5.33(b) muestra el comportamiento de d para las simulaciones.

Como se puede observar, para ambos casos se tiene un comportamiento a decrecer en magnitud conforme el número de vueltas en cortocircuito aumenta, aunque este cambio es más pronunciado para el caso experimental. Mientras que para el caso experimental cuando la falla corresponde al 3.16% de las vueltas (15 vueltas en corto circuito) la reducción de la constante d es de casi un 98 % en el caso de los resultados de simulación el cambio es menos significativo con aproximadamente un 65% de reducción para el mismo número de vueltas en corto circuito. Pero ambas curvas muestran una tendencia similar cuando el número de vueltas en cortocircuito aumenta.

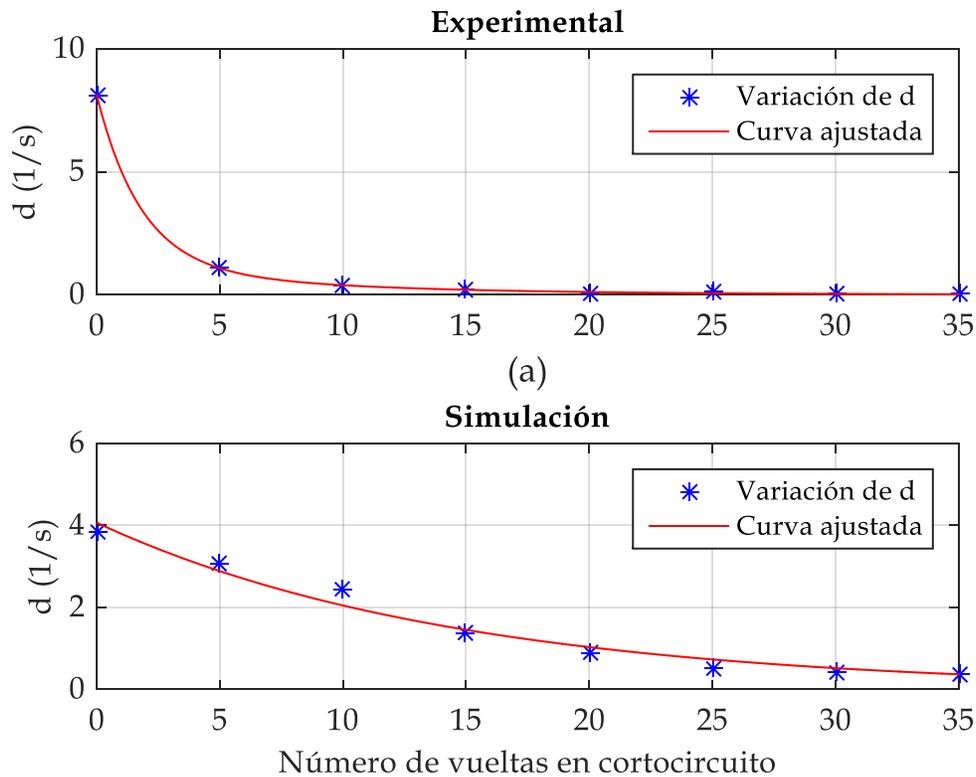


Fig. 5.33. Comportamiento de d respecto al número de vueltas en cortocircuito: (a) experimental, (b) simulación.

Es necesario mencionar que, al hacer la comparación entre los resultados experimentales y los resultados de las simulaciones, se puede notar que los comportamientos de b y d no son parecidos en magnitud, esto se debe a que el material correspondiente al núcleo magnético utilizado en el transformador bajo prueba se desconoce, lo que dificultó elegir un material adecuado para realizar las simulaciones con el modelo electromagnético, sin embargo, se tiene una misma tendencia para ambos casos.

Observando la Fig. 5.32 podemos notar como la magnitud de la constante de tiempo b tiende a aumentar conforme el número de vueltas en cortocircuito aumenta, mientras que en la Fig. 5.33 la magnitud de la constante d tiende a disminuir conforme el número de vueltas en cortocircuito aumenta.

Estos cambios en las constantes de tiempo de la componente de segunda armónica en la corriente de energización, pueden tomarse como referencia para evaluar y detectar la presencia de fallas en el transformador durante el proceso de energización. El objetivo principal de desarrollar un modelo electromagnético del transformador bajo condiciones de falla por vueltas en cortocircuito, fue poder observar el comportamiento de la corriente de energización y del flujo magnético en el núcleo cuando este tipo de fallas se presentan en el devanado primario.

Con el modelo electromagnético será posible extender el análisis de la metodología utilizada en este trabajo para relacionar los cambios en la corriente con el número de vueltas en corto circuito en diferentes diseños y capacidades de transformador.

CAPÍTULO 6 :

CONCLUSIONES

La corriente de energización es un estado transitorio que experimentan los transformadores al momento de ser conectados por primera vez o reconectados al sistema. Esta corriente se caracteriza por tener una serie de picos de alta magnitud, los cuales están relacionados con la saturación que alcanza el núcleo. Por otro lado, una falla por vueltas en cortocircuito es el producto del contacto directo de vueltas de diferente potencial. Cuando una falla por vueltas en cortocircuito se presenta en el devanado primario de un transformador en vacío, la corriente de energización se ve alterada en su forma de onda.

En este trabajo de tesis se partió del análisis de la corriente de energización cuando se presenta una falla por vueltas en cortocircuito en el devanado primario de un transformador reductor monofásico de 127V a 24V con una capacidad de 120VA, comparando la corriente de energización cuando existe una falla por vueltas en cortocircuito con la corriente de energización sin falla. La característica principal de este transformador es que se tiene acceso a cierto número de vueltas del devanado primario, para producir cortocircuitos entre diferentes vueltas y observar el comportamiento de la corriente de energización bajo estas condiciones.

Se obtuvo el comportamiento de la corriente de energización sin falla y para 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 y 40 vueltas en cortocircuito, observando que la corriente de energización sufre alteraciones en su forma de onda cuando el número de vueltas en cortocircuito incrementa. Las señales de corriente sin falla y con diferente número de vueltas en cortocircuito fueron analizadas con un algoritmo que aplica un análisis espectral, cuantificando los cambios en las deformaciones de las formas de onda de corriente de energización.

Se observó que cuando se presenta una falla por vueltas en cortocircuito, la componente de segunda armónica presenta cambios importantes en su comportamiento a lo largo del tiempo, por lo que un ajuste de curva a esta componente mostró como existen variaciones en las constantes de tiempo conforme el número de vueltas en cortocircuito aumenta.

Fueron realizados dos modelos electromagnéticos: para condiciones sin falla y para diferente número de vueltas en cortocircuito. Los modelos electromagnéticos mostraron el comportamiento del flujo magnético en el núcleo y de la corriente de

energización cuando una falla por vueltas en cortocircuito se presenta en el transformador.

La corriente de energización obtenida a través de las simulaciones no es exactamente igual a la experimental, lo cual se atribuye a que se utiliza un modelo simplificado en dos dimensiones y a que no se conocen las propiedades del material con el que está fabricado el núcleo, lo cual afecta directamente en el comportamiento de la corriente de energización, debido a las características no lineales. Sin embargo, las comparaciones entre los resultados experimentales y simulados muestran similitudes respecto a la variación de las constantes de tiempo de la componente de segunda armónica conforme el número de vueltas en cortocircuito incrementa.

La correlación entre las constantes de tiempo de la componente de segunda armónica y el número de vueltas en cortocircuito puede ser utilizada como un índice para evaluar la severidad de la falla en el devanado primario del transformador.

6.1 Aportaciones

- Se utilizó un circuito de control del ángulo de cierre de la fuente de alimentación de corriente alterna. Este circuito permite energizar al transformador exactamente en el cruce por cero de la forma de onda de tensión.
- Se implementa un algoritmo de análisis para la corriente de energización, para condiciones sin falla y para diferentes estados de falla por vueltas cortocircuitadas.
- Se implementaron dos modelos electromagnéticos del transformador en el dominio del tiempo: uno para condiciones sin falla y otro considerando vueltas en cortocircuito. Estos modelos consideran la no linealidad del núcleo magnético y permiten observar el comportamiento de la corriente de energización bajo condiciones sin falla y para diferente número de vueltas en cortocircuito.
- Se muestra que existe la posibilidad de utilizar el análisis de la corriente de magnetización para diagnosticar el estado de un transformador cuando presenta fallas entre vueltas.

6.2 Recomendaciones para trabajos futuros

De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo de investigación, se enlistan las recomendaciones para trabajos futuros, relacionados con el análisis de la corriente de energización para la detección de fallas por vueltas en cortocircuito en devanados de transformadores:

- Verificar la aplicabilidad de la técnica propuesta bajo diferentes condiciones de ángulo de energización y de flujo remanente.
- Emplear un modelo electromagnético en 3D para obtener el comportamiento de la corriente de energización considerando las laminaciones del núcleo magnético y las dimensiones específicas de los devanados primario y secundario.
- Utilizar un transformador de mayor capacidad y con geometría más compleja para poder determinar el comportamiento de la corriente de energización bajo fallas por vueltas en cortocircuito.

Análisis del uso de la corriente de energización como método para la detección de fallas internas en transformadores

REFERENCIAS

- [1] ALSTOM Grid. "Power Transformers". 2008.
- [2] R. O. Valdez. "Determinación de deformaciones mecánicas en devanados de transformadores de potencia por medio del análisis de la función de transferencia del devanado", Tesis de maestría, SEPI ESIME Zacatenco, Ciudad de México 2004.
- [3] V. M. Catterson, J. Castellon, J. A. Pilgrim, T. K. Saha, H. Ma, M. Vakilian, A. Moradnouri, M. Gholami and B. D. Sparling. "The impact of smart grid technology on dielectrics and electrical insulation," IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, Vol. 22, Núm. 6, Diciembre 2015.
- [4] E. R. Velasco, C. A. Camacho, M. G. Martínez. "Redes de transmisión inteligente. beneficios y riesgos," Ingeniería Investigación y Tecnología, Vol. 14, Núm. 1, Enero-Marzo 2013.
- [5] J. C. Olivares-Galván, F. de León, P. S. Georgilakis, R. Escarela-Peréz. "Selection of copper against aluminum windings for distribution transformers," IET Electric Power Applications, Vol. 4, Núm. 6, págs. 474-485, 2010.
- [6] R. S. Bhide, M. S. S. Srinivas, A. Banerjee, R. Somakumar. "Analysis of winding inter-turn fault in transformer: a review and transformer models," IEEE Conference on Sustainable Energy Technologies, 6-9 Diciembre 2010.
- [7] S. V. Kulkarni. "Transformer Engineering: Design and Practice". Marcel Dekker, New York, 2004.
- [8] H. Wang and K. L. Butler. "Finite element analysis of internal winding faults in distribution transformers," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, Núm. 3, Julio 2001.
- [9] M. Steurer, K. Fröhlich. "The impact of inrush currents on the mechanical stress of high voltage power transformers coils," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, Núm. 1, Enero 2002.
- [10] D. Zhou, C. Ke, X. Yang, Z. Li, Z. Hao. "Simulation of transformer windings mechanical characteristics during the external short-circuit fault," 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 26-29 Noviembre 2015.

- [11] L. M. R. Oliveira, A. J. M. Cardoso. "Power transformers behavior under the occurrence of inrush currents and turn-to-turn winding insulation faults," XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM), 6-8 Septiembre 2010.
- [12] L. M. R. Oliveira, A. J. M. Cardoso. "Intermittent turn-to-turn winding faults diagnosis in power transformers by the on-load exciting current park's vector approach," 18th International Conference on Electrical Machines (ICEM), 6-9 Septiembre 2008.
- [13] M. F. Cabanas, M. G. Melero, C. H. Rojas, G. A. Orcajo, J. M. Cano, F. P. Gonzalez, J. G. Norniella, S. D. Rozada. "Detection of insulation faults on disc-type winding transformers by means of leakage flux analysis," IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), 31 Agosto- 3 Septiembre 2009.
- [14] G. D. González, J. Gómez-Aleixandre Fernández and P. A. Arboleya. "Diagnosis of a turn-to-turn short circuit in power transformers by means of zero sequence current analysis," Electric Power Systems Research, Vol. 69, Núm. 2-3, págs. 321-329, Mayo 2004.
- [15] Z. Liu, S. Liu and O. A. Mohammed. "A practical method for building the fe-based phase variable model of single phase transformers for dynamic simulations," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 43, Núm. 4, Abril 2007.
- [16] S. R. Huang, H. T. Chen, C. C. Wu, C. Y. Guan and C. Cheng. "Distinguishing internal winding faults from inrush currents in power transformers using jiles-atherton model parameters based on correlation Coefficient," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 27, Núm. 2, Abril 2012.
- [17] B. Elrefaie and A. I. Megahed, "Modeling transformer internal faults using Matlab," 11th Mediterranean Electrotechnical Conference Melecon, 7-9 Mayo 2002.
- [18] V. Behjat, A. Vahedi. "Analysis of internal windings short circuit faults in power transformers using transient finite element method coupling with external circuit equations," International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, Vol. 26, págs. 425-442, 2013.
- [19] P. Bastard, P. Bertrand, M. Meunier. "A transformer model for winding fault studies," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, Núm. 2, Abril 1994.
- [20] G. D. González, J. G. A. Fernández and P. A. Arboleya. "Electromagnetic model of turn-to turn short circuits in transformers," COMPEL The International Journal for

Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 23, Núm. 2, págs. 558-571, 2004.

[21] N. Y. Abed, O. A. Mohammed. "Modelling and characterization of transformers internal faults using finite element and discrete wavelet transforms," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 43, Núm. 4, Abril 2007.

[22] A. Dolgicers, J. Kozadajevs. "Signal extraction from inrush current for interwinding fault protection of power transformers," IEEE Eindhoven Power Tech, 29 Junio - 2 Julio 2015.

[23] E. E. del MIT. "Circuitos Magnéticos y Transformadores". Reverté, 1981.

[24] J. J. Cathey. "Máquinas Eléctricas: Análisis y diseño aplicando Matlab". McGraw Hill, 2002.

[25] M. J. Heathcore." J&P Transformer Book". Elsevier, 2007, Thirteenth edition.

[26] L. C. Wu, C. W. Liu, S. E. Chien, C. S. Chen. "The effect on inrush current on transformer protection," IEEE Conference Publications 38th North American Power Symposium, 17-19 Septiembre 2006.

[27] G. Ning, W. Aiyuan, W. Jie, L. Haitao, R. Zhong. "Analysis and reduction of magnetizing inrush current for switch-on unloaded transformer," IEEE Conference Publications 2nd International Symposium on Instrumentation and Measurement, Sensor Network and Automation (IMSNA), 23-24 Diciembre 2013.

[28] J. E. Holcomb, "Distribution transformer magnetizing inrush current," IEEE Journals & Magazines, Vol. 80, Núm. 3, págs. 697-702, Diciembre 1961.

[29] Y. Wang, S. G. Abdulsalam, W. Xu. "Analytical formula to estimate the maximum inrush current," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, Núm. 2, Abril 2008.

[30] S. Jazebi, F. de León and N. Wu. "Enhanced analytical method for the calculation of the maximum inrush currents of single-phase power transformers," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 30, Núm. 6, Diciembre 2015.

[31] R. Yacamini, A. A. Nasser, "Numerical calculation of inrush current in single-phase transformers," IEE Proceedings B - Electric Power Applications, Vol. 128, Núm. 6, Noviembre 1981.

- [32] N. Chiesa, B. A. Mork and H. Kristian Høidalen. "Transformer model for inrush current calculations: simulations, measurements and sensitivity analysis," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, Núm. 4, Octubre 2010.
- [33] R. Hamilton, "Analysis of transformer inrush current and comparison of harmonic restraint methods in transformer protection," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 49, Núm. 4, Julio/Agosto 2013.
- [34] A. K. Al-khalifah, E. F. El-saadany. "Investigation of magnetizing inrush current in a single-phase transformer," Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, 2006.
- [35] M. O. Oliveira, A. S. Bretas et. al. "Principales características de la corriente inrush en transformadores," [Online]. Disponible en: <http://www.ceed.org.ar/?cat=14&paged=2>.
- [36] Egorova, Elizaveta O. "ATP modeling of internal transformer faults for relay performance testing," Master's report, Michigan Technological University, 2011.
- [37] D. Ponikvar. "A circuit for mains synchronization has two separate outputs for each half-period," [Online]. Slovenia: University of Ljubljana, 2013. Disponible en: <http://www.edn.com/design/power-management/4410475/A-circuit-for-mains-synchronization-has-two-separate-outputs-for-each-half-period>.
- [38] NXP Semiconductors, "FRDM-K64F: Freedom Development Platform for Kinetis K64, K63, and K24 MCUs," [Online]. 2016. Disponible en: <http://www.nxp.com/products/software-and-tools/hardware-development-tools/freedom-development-boards/freedom-development-platform-for-kinetis-k64-k63-and-k24-mcus:FRDM-K64F>.
- [39] Goldelectric.ca. "Solid-State Relay 3 - 32 VDC Control, 50A 24 - 280 VAC-OUT(Zero-crossing)," [Online]. 2016 Canadá. Disponible en: http://goldelectric.ca/index.php?route=product/product&product_id=1472.
- [40] CIGRE. Transformer energization in power systems: A study Guide. Working Group C4.307. Febrero 2014.
- [41] A. V. Oppenheim, R. W. Shafer, J. R. Buck. Discrete-Time Signal Processing. Prentice Hall, 1999, Segunda Edición.
- [42] G. Loy. Musimathics The Mathematical Foundations of Music. The MIT Press, London, England, 2006, Vol. 1.

- [43] H. B. Elrefaie and A. I. Megahed, "Modeling transformer internal faults using Matlab," IEEE Conference Publications, 11th Mediterranean Electrotechnical Conference, MELECON, Mayo 2002.
- [44] M. N. O. Sadiku. Elementos de electromagnetismo. Oxford University Press, 2003.
- [45] N. Bianchi. Machine Analysis Using Finite Elements. CRC Taylor & Francis Group, 2005.
- [46] A. Eslami, Mehdi Vakilian. "Time-variant evaluation of electromagnetic forces on transformer windings during inrush current and short-circuit by FEM," Arabian Journal for Science and Engineering, Vol. 38, Issue 4, págs. 883-893, Abril 2013.
- [47] I. A. H. Robles. Modelo de la densidad del flujo magnético y pérdidas en el núcleo de los transformadores. CINVESTAV del IPN, Unidad Guadalajara, Jalisco, Diciembre de 2012.
- [48] COMSOL Multiphysics Manual de referencia, Version: COMSOL 5.2a.
- [49] E-Core Transformer, creado en COMSOL Multiphysics 5.2a.
- [50] D. Soto Meza. Técnicas computacionales para el diseño dieléctrico de transformadores de potencia. Tesis de maestría. SEPI ESIME Zacatenco, Ciudad de México 2012.
- [51] W. G. Nájera Gutiérrez. Análisis de esfuerzos dieléctricos en transformadores debidos a excitaciones no sinusoidales. Tesis de maestría. SEPI ESIME Zacatenco, Ciudad de México 2012.
- [52] R. Reyes de Luna. Modelado de un devanado de transformador para el análisis de la propagación de descargas parciales. Tesis de maestría. SEPI ESIME Zacatenco, Ciudad de México 2015.
- [53] Z. Luna López. Validación experimental de modelos de devanados de transformador para transitorios electromagnéticos rápidos. Tesis de maestría. SEPI ESIME Zacatenco, Ciudad de México 2015.
- [54] E. II Carranza Arteaga. Validación de un procedimiento de diseño de un motor de inducción mediante pruebas de laboratorio. Tesis de maestría. SEPI ESIME Zacatenco, Ciudad de México 2008.

[55] OMICRON electronics GmbH, "Reliable demagnetization of Transformers cores," [Online]. 2016. Disponible en:
https://www.omicronenergy.com/fileadmin/user_upload/pdf/papers/2014-07-PotM-Reliable-demagnetization-of-transformer-cores-ENU.pdf

[56] D. G. Zill. "Ecuaciones Diferenciales con aplicaciones de modelado". CENAGE Learning, 2009.

APÉNDICE A. DETALLES GEOMÉTRICOS DEL NÚCLEO DEL TRANSFORMADOR

El núcleo del transformador es tipo apilado con laminaciones E I, como se observa en la Fig. A.1. Se encuentra conformado por 42 laminaciones con un espesor de 0.74mm cada una, la Fig. A.2 muestra una vista lateral del núcleo.

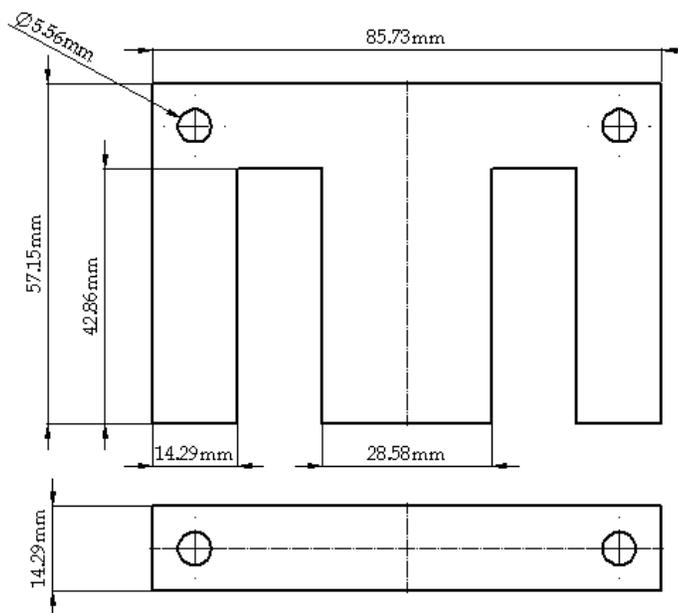


Fig. A.1. Núcleo tipo EI del transformador bajo estudio.

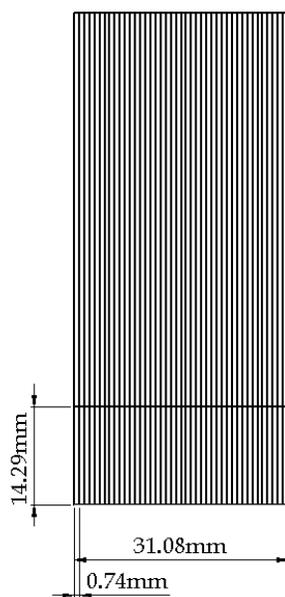


Fig. A.2. Ancho total del núcleo magnético.

APENDICE B. CÓDIGO PARA EL ANÁLISIS DE LAS SEÑALES DE CORRIENTE DE ENERGIZACIÓN

A continuación, se presenta el código utilizado para el análisis de la corriente de energización, para condiciones sin falla y para diferente número de vueltas en cortocircuito. El algoritmo inicia con la lectura de los datos obtenidos de la corriente de energización, posteriormente se le aplica la DFT por medio de ventanas con duración de un ciclo, mostrándose los resultados correspondientes del análisis.

```
clc
clear all
close all
%-----%
%%%%%%%%%Carga de datos de tensión y corrientes de energización%%%%%%%%%
%-----%
load('DatImf.mat');      %Datos de corrientes de energización
%-----%
%%%%%%%%%Recorte de las señales para inicio en cero%%%%%%%%%
%-----%
re = 208;                %Inicio de cero a partir de archivo excel
fin = 1499;              %Final de los cilclos de analisis de prueba
p = 9;                   %Estado de falla p = 1,2,3,...,12

t = dat(re:fin,1);      %Vector de tiempo
Vs = dat(re:fin,2);    %Vector de tensión primaria

for j=3:14                %Almacenamiento de datos Im en nueva variable
    Im(:,j-2)=dat(re:fin,j);
end
%-----%
%%%%%%%%%Graficas de tensión primaria y corriente de energización%%%%%%%%%
%-----%
figure(1)
Im(:,1) = Im(:,1)+0.4;
Im(:,2) = Im(:,2)+0.4;
% Grafica de tensiones y corrientes
[ax,h1,h2] = plotyy(t,Vs,t,Im(:,p),'plot')
xlabel('Tiempo (s)','FontName',...
    'Book Antiqua','FontSize',12)
set(get(ax(1),'YLabel'),'String',...
    'Tensión (V)','FontName',...
    'Book Antiqua','FontSize',12)
set(get(ax(2),'YLabel'),'String',...
    'Corriente (A)','FontName',...
    'Book Antiqua','FontSize',12)
set(ax(1),'Xlim',[-0.0086 0.15],'Ylim',[-200 200],'FontName',...
    'Book Antiqua','FontSize',12)
```

Análisis del uso de la corriente de energización como método para la detección de fallas internas en transformadores de potencia

```

set(ax(2),'Xlim',[-0.0086 0.15],'Ylim',[-10 25],'FontName',...
    'Book Antiqua','FontSize',12)
set(h1,'LineStyle','-','LineWidth',1)
set(h2,'LineStyle','-','LineWidth',1)
get(ax(1))
grid on
box on
%-----%
%%Graficas de corriente de energización para diferentes estados de falla%%
%-----%
figure(2)
% Corriente de energización Im(:,1) para condiciones sin falla
plot(t,Im(:,1),'linewidth',1.5,'Color','r')
drawnow;
pause(0.3)
hold on
    for n=2:11
        plot(t,Im(:,n),'linewidth',0.5,'Color',rand(1,3))
        drawnow;
        pause(0.3)
        hold on
    end
% Corriente de energización Im(:,9) para 40 vueltas en cortocircuito
plot(t,Im(:,12),'linewidth',1.5,'Color','b')
drawnow;
pause(0.3)
hold on
axis([-0.01,0.1,-5,25])
title('Corrientes de energización','FontName','Book Antiqua','FontSize',12)
xlabel('Tiempo (s)','FontName','Book Antiqua','FontSize',12)
ylabel('Corriente (A)','FontName','Book Antiqua','FontSize',12)
grid on
box on
%-----%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Aplicación de la DFT por ventana%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----%
Fs=1/(t(2)-t(1));      % Frecuencia de muestreo
L=length(t);          % Longitud o Numero de datos
Lvent=(1/60)*Fs;      % Numero de datos por ventana cada 16.6 ms (1/60 hz)
Nvent=fix(L/Lvent);   % Numero de ventanas en toda la señal

% Se grafican las secciones de cada ventana de análisis
a=([1:Nvent]-1)*Lvent+1;
h=stem((a-1)/Fs + t(1) , ones(length(a))*25,'fill','-- k');
[Mag_HI,Fas_HI,f_H]= funcion_STFT(Im(:,p),Fs); % STFT de Corriente

% GRAFICA: Diferentes DFT sobrepuestas
figure (3)
plot(f_H,Mag_HI)
title('DFT a cada ventana de análisis','FontName',...
    'Book Antiqua','FontSize',12)
xlabel('Frecuencia (Hz)','FontName',...
    'Book Antiqua','FontSize',12)
ylabel('Corriente (A)','FontName',...
    'Book Antiqua','FontSize',12)

```

```

legend('Ventana 1','Ventana 2','Ventana 3',...
       'Ventana 4','Ventana 5','Ventana 6',...
       'Ventana 7','Ventana 8','Ventana 9',...
       'Ventana 10','Ventana 11','Ventana 12',...
       'Ventana 13','Ventana 14','Ventana 15',...
       'FontName','Book Antiqua','FontSize',12)
set(gca,'FontName','Book Antiqua','fontsize',12)
axis([0 1000 0 11])

% Vector de tiempo correspondiente a cada ventana
t2=(1:Nvent)*(1/60);

% GRAFICA: 3D tiempo-frecuencia-magnitud (evolucion armonica)
figure (4)
surface(t2,f_H,Mag_HI)
view(3)
title('DFT a cada ventana de análisis','FontName',...
      'Book Antiqua','FontSize',12)
xlabel('Tiempo (s)','FontName',...
      'Book Antiqua','FontSize',12)
ylabel('Frecuencia (Hz)','FontName',...
      'Book Antiqua','FontSize',12)
zlabel('Corriente (A)','FontName',...
      'Book Antiqua','FontSize',12)
set(gca,'FontName','Book Antiqua','fontsize',12)
grid on
box on

% Magnitud de armonicos a lo largo del tiempo por armonico 1-5
figure (5)
subplot (3,2,1)
plot(t2, Mag_HI(2,:))
title ('H1 (60 Hz)','FontName',...
      'Book Antiqua','FontSize',10)

subplot (3,2,2)
plot(t2, Mag_HI(3,:))
title ('H2 (120 Hz)','FontName',...
      'Book Antiqua','FontSize',10)

subplot (3,2,3)
plot(t2, Mag_HI(4,:))
title ('H3 (180 Hz)','FontName',...
      'Book Antiqua','FontSize',10)

subplot (3,2,4)
plot(t2, Mag_HI(5,:))
title ('H4 (240 Hz)','FontName',...
      'Book Antiqua','FontSize',10)

subplot (3,2,[5,6])
plot(t2, Mag_HI(6,:))
title ('H5 (300 Hz)','FontName',...
      'Book Antiqua','FontSize',10)

```

Análisis del uso de la corriente de energización como método para la detección de fallas internas en transformadores de potencia

```

%-----%
%%%%%%%%%Ajuste de curvas exponenciales y tasa de decaimiento (tao)%%%%%%%%%
%-----%
funtion_exp_H1 = fit(t2',Mag_HI(2,:)','exp1')
funtion_exp_H2 = fit(t2',Mag_HI(3,:)','exp1')
funtion_exp_H3 = fit(t2',Mag_HI(4,:)','exp1')
funtion_exp_H4 = fit(t2',Mag_HI(5,:)','exp1')
funtion_exp_H5 = fit(t2',Mag_HI(6,:)','exp1')
% EXP2--> f2(x) = a*exp(b*x) + c*exp(d*x)

% Ajuste de curvas exponenciales para cada armonico 1 al 5
figure (6)
subplot (3,2,1), hold on
plot(funtion_exp_H1,'r')
xlabel('Tiempo (s)','FontName',...
      'Book Antiqua','FontSize',10)
ylabel('Magnitud (A)','FontName',...
      'Book Antiqua','FontSize',10)
set(gca,'FontName','Book Antiqua','fontsize', 10)

subplot (3,2,2), hold on
plot(funtion_exp_H2,'r')
xlabel('Tiempo (s)','FontName',...
      'Book Antiqua','FontSize',10)
ylabel('Magnitud (A)','FontName',...
      'Book Antiqua','FontSize',10)
set(gca,'FontName','Book Antiqua','fontsize', 10)

subplot (3,2,3), hold on
plot(funtion_exp_H3,'r')
xlabel('Tiempo (s)','FontName',...
      'Book Antiqua','FontSize',10)
ylabel('Magnitud (A)','FontName',...
      'Book Antiqua','FontSize',10)
set(gca,'FontName','Book Antiqua','fontsize', 10)

subplot (3,2,4), hold on
plot(funtion_exp_H4,'r')
xlabel('Tiempo (s)','FontName',...
      'Book Antiqua','FontSize',10)
ylabel('Magnitud (A)','FontName',...
      'Book Antiqua','FontSize',10)
set(gca,'FontName','Book Antiqua','fontsize', 10)

subplot (3,2,[5,6]), hold on
plot(funtion_exp_H5,'r')
xlabel('Tiempo (s)','FontName',...
      'Book Antiqua','FontSize',10)
ylabel('Magnitud (A)','FontName',...
      'Book Antiqua','FontSize',10)
set(gca,'FontName','Book Antiqua','fontsize', 10)

figure(10)
plot(t2, Mag_HI(3,:))
title ('H2 (120 Hz)','FontName',...
      'Book Antiqua','FontSize',12)

```

```

hold on
plot(funtion_exp_H2,'r')
xlabel('Tiempo (s)','FontName',...
      'Book Antiqua','FontSize',12)
ylabel('Magnitud (A)','FontName',...
      'Book Antiqua','FontSize',12)
set(gca,'FontName','Book Antiqua','fontsize', 12)
legend('Señal real','Curva ajustada','FontName',...
      'Book Antiqua','FontSize',12)
%-----%
%*****Funcion STFT*****%
%-----%

function [Mag_H,Fas_H,f_H]= funcion_STFT(sig,Fs)

L=length(sig);
%-----%
%*****Transformada Corta de Fourier STFT (cada 200 ms)*****%
%-----%
Lvent=(1/60)*Fs;      % Numero de datos por ventana cada 200 ms (0.2s)
Nvent=fix(L/Lvent);  % Numero de ventanas en toda la señal

for i=1:Nvent          % Ciclo para separar cada ventana de tiempo
    % valor que toma cada tramo de ventana de a hasta b
    a(i)=((i-1)*Lvent+1);
    b(i)=((i)*Lvent);
    Vventaneado(i,:)= sig(a(i):b(i));
end

NFFT=Lvent*10;
%-----%
%*****Transformada de Fourier aplicada a cada ventana*****%
%-----%
Y = fft(Vventaneado',NFFT)/Lvent;
ff = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
% Magnitud y fase de cada componente espectral
Mag=2*abs(Y(1:NFFT/2+1,:));
Fas= atan2(imag(Y(1:NFFT/2+1,:)),real(Y(1:NFFT/2+1,:)));
%-----%
%*****Datos por armónico*****%
%-----%
% Se toman solo los datos
% que corresponden a cada Armonico (cada 60 Hz)
for v=1:Nvent
    k=0;
    for i=0:60: round(Fs/2/60-1)*60
        %un armonico antes del maximo dado por nyquist
        k=k+1;
    pos(k)=round((i)/Fs*NFFT+1);

        f_H(k+1,v)= ff(pos(k));
        Mag_H(k+1,v)=Mag(pos(k),v);
        Fas_H(k+1,v)=Fas(pos(k),v)*180/pi;
    end
end
end

```