

GUÍA PARA EL DISEÑO DE NÚCLEOS DE TRANSFORMADORES DE
DISTRIBUCIÓN

CRISTHIAN EDUARDO GONZALEZ AGUAS
OSCAR GARCÍA COLMENARES

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
BUCARAMANGA

2008

GUÍA PARA EL DISEÑO DE NÚCLEOS DE TRANSFORMADORES DE
DISTRIBUCIÓN

CRISTHIAN EDUARDO GONZALEZ AGUAS
OSCAR GARCÍA COLMENARES

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director
HERMANN RAÚL VARGAS TORRES
Doctor Ingeniero Electricista

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
BUCARAMANGA

2008

A mis padres

Luis Eduardo Gonzalez Niño.

Maribel Aguas Moreno.

Cristhian Eduardo Gonzalez Aguas

A mis padres

Humberto García Castro.

Esperanza Colmenares Corredor.

y a mis hermanos

Oscar García Colmenares

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Al Dr. Hermann Raúl Vargas, director del proyecto por su dirección y asesoría las cuales hicieron posible la realización de este trabajo de grado. A los profesores Liliana Jaimes y Julio Cesar Chacon por las indicaciones y colaboración prestada para el desarrollo de este proyecto.

RESUMEN

TÍTULO:

GUIA PARA EL DISEÑO DE NÚCLEOS DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN*

AUTORES:

CRISTHIAN EDUARDO GONZALEZ AGUAS

OSCAR GARCÍA COLMENARES**

PALABRAS CLAVE:

Transformadores de distribución, evaluación del núcleo, comportamiento magnético, cuantificación de pérdidas, estimación de parámetros, estudio económico.

DESCRIPCIÓN:

Este trabajo de grado propone dar una guía para la evaluación de la viabilidad en la reparación de transformadores de distribución usados, desde el punto de vista de pérdidas en el núcleo. Inicialmente se propone un estudio específico del comportamiento magnético que experimenta en la actualidad el núcleo, el cual se desarrolla empleando sus características constructivas y un circuito eléctrico.

La evaluación se complementa con el estudio del nivel de pérdidas, las cuales se establecen con los parámetros del modelo T del transformador en vacío para los diferentes niveles de tensión. El criterio para seleccionar si el transformador se repara, es el cumplimiento del nivel máximo de pérdidas en el hierro estipuladas en la NTC 1954 para transformadores monofásicos, trifásicos reparados o reconstruidos. Igualmente, es posible ver de forma simple la característica de la curva de histéresis del transformador de distribución.

Después de seleccionado el núcleo con las condiciones óptimas de funcionamiento, se procede a la reparación del transformador y posterior estimación de sus parámetros ante las diferentes condiciones de operación. Conociendo estos parámetros, y a partir de las curvas de demanda diaria de la Eléctricadora de Santander (ESSA) se pueden determinar sus respectivas pérdidas diarias de energía, las cuales son sometidas a un estudio económico que permita establecer el tiempo para el cual la utilización de este transformador es viable en comparación con el costo que representa un transformador nuevo para el mismo período de trabajo.

*Proyecto de Grado

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Hermann Raúl Vargas Torres.

ABSTRACT

TITLE:

GUIDE FOR THE DESIGN OF DISTRIBUTION TRANSFORMERS CORE^{***}

AUTHORS:

CRISTHIAN EDUARDO GONZALEZ AGUAS

OSCAR GARCÍA COLMENARES^{****}

KEY WORDS:

Distribution transformers, core evaluation, behavior magnetic, losses quantification, parameters estimation, economic study.

DESCRIPTION:

This thesis proposes a guide for evaluating the viability of repairing the used distribution transformers, from the point of view of core losses. At the beginning, it is proposed a specific study about the magnetic behavior that happens in the core, it is developed using their building characteristic and electrical circuit.

The evaluation is fulfilling with the study losses level, which are settle up with the parameters of the open circuit transformers T model with different levels of voltage. The criteria for selecting if the transformer will be fixed or not, are the reaching of the iron highest losses level according to NTC 1954 for monophasic and triphasic rebuilding or fixed transformers. In this paper, a simplified method for the hysteresis characteristics analysis in distribution transformer.

After the core optimal operation conditions are selected, continues the transformer reparation and the parameter estimation with different operation conditions. With these parameters and the daily demand curves of the ESSA (*eléctricadora de santander*) it is possible to find out the daily energy losses of the transformers. An economic study is carried out in order to determinate the viability of using the transformers during a period in comparison with the cost of a new transformer for the same work time.

^{***} Degree Project

^{****} School of Electrical Engineering. Hermann Raúl Vargas Torres.

Índice general

1. Introducción	18
1.1. Objetivos	18
1.2. Antecedentes	19
1.3. Estructura del documento.	20
1.4. Planteamiento del problema.	20
2. Planteamiento de la propuesta	22
2.1. Introducción	22
2.2. Evaluación del núcleo usado	22
2.2.1. Selección de las bobinas	22
2.2.1.1. Determinación de la sección transversal de la columna	23
2.2.1.2. Determinación de los calibres del alambre de las bobinas	24
2.2.2. Análisis de parámetros	24
2.2.2.1. Bobinas con núcleo de madera	25
2.2.2.2. Bobinas con núcleo de hierro	27
2.2.3. Obtención del lazo de histéresis en forma experimental	29
2.2.3.1. Intensidad magnética H	29
2.2.3.2. Densidad magnética B	30
2.2.4. Determinación de pérdidas	32
2.2.4.1. Determinación de las pérdidas en el cobre	32
2.2.4.2. Determinación de las pérdidas en el hierro	34
2.2.5. Circuito esquemático	34
2.2.6. Comportamientos experimentales	35
2.2.6.1. Lazo de histéresis	35
2.2.6.2. Curva densidad flujo magnético B contra intensidad de campo magnético H	35

2.2.6.3.	Curva permeabilidad relativa μ_r contra intensidad de campo magnético H .	36
2.2.6.4.	Curva de densidad de flujo magnético B contra voltamperios por kilogramo $(va)_\mu$.	36
2.2.6.5.	Curva de la tensión aplicada en bornes de la bobina primaria V_i , tensión inducida V_{ind} contra corriente de excitación I_e .	36
2.2.6.6.	Curva de densidad de flujo magnético B contra pérdidas en el hierro W_o .	36
2.2.7.	Comparación de las características del núcleo nuevo y usado	37
2.2.7.1.	Cálculo de la corriente de magnetización	37
2.2.7.2.	Determinación de las pérdidas en el hierro W_o	38
2.2.7.3.	Determinación de la densidad de flujo magnético B	39
2.3.	Criterio para determinar la reparación del transformador	39
2.4.	Comparación del transformador	41
2.4.1.	Estimación de parámetros	41
2.4.2.	Determinación de las pérdidas en el hierro y el cobre para el transformador de distribución	42
2.4.2.1.	Determinación de las pérdidas en el hierro	43
2.4.2.2.	Determinación de las pérdidas en el cobre	43
2.4.3.	Estudio económico	43
2.4.4.	Costo del transformador nuevo	44
2.4.5.	Costo del transformador reparado	44
3.	Pruebas y resultados	46
3.1.	Introducción	46
3.2.	Evaluación del núcleo	46
3.2.1.	Especificaciones del núcleo utilizado	46
3.2.2.	Características de la bobina seleccionada	48
3.2.3.	Curvas características del núcleo utilizado	48
3.2.3.1.	Lazo de histéresis	49
3.2.3.2.	Curva densidad de flujo magnético B contra intensidad de campo magnético H .	51
3.2.3.3.	Curva permeabilidad relativa μ_r contra intensidad de campo magnético H .	51

3.2.3.4.	Curva de densidad de flujo magnético B contra voltamperios por kilogramo $(va)_u$ en $[VA/kg]$	52
3.2.3.5.	Curva de la tensión aplicada en bornes de la bobina primaria V_i , tensión inducida V_{ind} contra corriente de excitación I_e	52
3.2.3.6.	Curva de densidad de flujo magnético B contra pérdidas en el hierro W_o	53
3.2.4.	Estimación de parámetros para el núcleo de hierro y el núcleo de madera. . .	54
3.2.4.1.	R y L del núcleo de madera para corriente alterna y corriente continua	54
3.2.4.2.	R y L del núcleo de madera empleando el analizador de redes	56
3.2.4.3.	Parámetros con núcleo de hierro	56
3.2.5.	Determinación de pérdidas	58
3.3.	Estimación de parámetros del transformador	59
3.3.1.	Especificación del transformador utilizado	59
3.3.2.	Parámetros del transformador	59
4.	Estudio económico del transformador en funcionamiento	61
4.1.	Introducción	61
4.2.	Curvas de demanda diaria	61
4.3.	Viabilidad económica	67
5.	Implementación de la herramienta software	70
5.1.	Introducción	70
5.2.	Esquema del proceso	70
5.3.	Funciones	72
5.3.1.	Función <i>calibre</i>	72
5.3.2.	Función <i>curvas</i>	73
5.3.3.	Función <i>graficasal</i>	74
5.3.4.	Función <i>perdidas1phi</i>	75
5.3.5.	Función <i>vacio3phi</i>	75
5.3.6.	Función <i>carga3phi</i>	76
5.3.7.	Función <i>perdidasanuales</i>	76
5.3.8.	Función <i>perdidasanuales2</i>	77
5.4.	Ejercicio tipo	78
5.4.1.	Diseño de la bobina	78

5.4.2. Evaluación del núcleo utilizando la herramienta "Primera"	79
5.4.3. Evaluación del núcleo utilizando la herramienta "Parametrosal"	82
5.4.4. Estudio económico utilizando la herramienta "estudioEconomico"	85
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS	88
6.1. PARA TRABAJOS FUTUROS SE RECOMIENDA :	88
Bibliografía	90
A. Especificaciones del sistema de prueba.	92
A.1. Introducción	92
A.2. Cuadros de datos	92
B. Análisis de las señales de prueba	100
B.1. Introducción	100
B.2. Adecuación de las señales adquiridas.	100
B.3. Representación de las señales de trabajo.	102
C. Manual del usuario	108
C.1. Introducción	108
C.2. Requerimientos	108
C.3. Instalación	109
C.4. Ejecución	109
C.4.1. Ejecución primera	109
C.4.2. Ejecución Parametrosal	112
C.4.3. Ejecución estudioEconomico	114
D. Imágenes de los montajes de laboratorio	118
D.1. Introducción	118
D.2. Imágenes	118

Índice de figuras

2.1. a) Columna del núcleo b) Sección transversal c) Bobina arrollada sobre el núcleo. . .	25
2.2. Modelo T en vacío	27
2.3. Parámetros Z_1 y Z_m del modelo T	28
2.4. Rama de la resistencia serie	30
2.5. Circuito Integrador	31
2.6. Conexión de elementos.	35
2.7. Inducción B Vs VA/kg. (Curva tomada de la NIPPON STEEL CORPORATION) .	38
2.8. Inducción B Vs Pérdidas Fe.(Curva tomada de la NIPPON STEEL CORPORATION)	38
2.9. Inducción B Vs Intensidad H.(Curva tomada de la NIPPON STEEL CORPORATION)	39
2.10. Modelo T.	42
2.11. Circuito equivalente transformador por fase.	43
3.1. Núcleo monofásico de 2 kVA	47
3.2. Montaje de elementos para encontrar las curvas características	49
3.3. Ciclo de histéresis 80,4 V	49
3.4. Ciclo de histéresis 85,3 V	50
3.5. Ciclo de histéresis 90,4 V	50
3.6. B vs H	51
3.7. Permeabilidad relativa vs H	51
3.8. B vs VA/kg.	52
3.9. $V_i - V_{ind}$ vs I_e	53
3.10. B vs W_o	54
3.11. Montaje de bobina con núcleo de madera	54
3.12. V_{bobina} vs I_{bobina} en C.A	55
3.13. V_{bobina} vs I_{bobina} en C.C	55

3.14. Montaje de bobina con núcleo de hierro	57
4.1. Curva de demanda diaria (Sector residencial estratos 1 y 2)	62
4.2. Curva de demanda diaria (Sector residencial estrato 3)	62
4.3. Curva de demanda diaria (Sector residencial estrato 4)	63
4.4. Curva de demanda diaria (Sector residencial estrato 5)	63
4.5. Curva de demanda diaria (Sector residencial estrato 6)	64
5.1. Esquema de evaluación del núcleo	71
5.2. Esquema del proceso económico	72
5.3. Corriente y número de espiras para el diseño de la bobina	79
5.4. Tabla de selección del calibre del conductor	79
5.5. Ventana principal para la evaluación del núcleo	81
5.6. Ventana para la visualización de las gráficas en el proceso de evaluación del núcleo	82
5.7. Interfaz para la evaluación del núcleo mediante el modelo T	83
5.8. Ventana del estudio económico	86
B.1. Análisis de Fourier para la señal V_1 adquirida con el analizador de redes	101
B.2. Ondas de V_1 , V_2 , I_1 para el transformador monofásico en vacío 120V	102
B.3. Análisis de Fourier para la señal V_1 adquirida con el analizador de redes a 120V	102
B.4. Análisis de Fourier para la señal V_2 adquirida con el analizador de redes a 120V	103
B.5. Análisis de Fourier para la señal I_1 adquirida con el analizador de redes a 120V	104
B.6. Ondas de V_1 , V_2 , I_1 para el transformador trifásico en vacío 220V	105
B.7. Análisis de Fourier para la señal V_1 adquirida con el analizador de redes a 220V	106
B.8. Análisis de Fourier para la señal V_2 adquirida con el analizador de redes a 220V	106
B.9. Análisis de Fourier para la señal I_1 adquirida con el analizador de redes a 220V	107
B.10. Ondas de V_1 , V_2 , I_1 , I_2 para el transformador trifásico en carga	107
C.1. Ventana que representa la función PRIMERA	110
C.2. Selección del archivo de datos para el proceso de evaluación	111
C.3. Datos adquiridos en las pruebas y entrada como archivo a la función primera	112
C.4. Ventana para la selección de gráficas a visualizar	112
C.5. Ventana de la función parámetros dividida en áreas	113
C.6. Ventana en la que se selecciona el archivo, en donde se han almacenado los datos del adquisidor de señales	114

C.7. Ventana para realizar el estudio económico de un transformador reparado	115
C.8. Ventana para selección de datos con que se desea trabajar	116
D.1. Estudio de la bobina con núcleo de madera	118
D.2. Montaje del circuito para adquirir la curva de histéresis	119
D.3. Núcleo monofásico usado en el estudio	119
D.4. Adquisición de datos para el núcleo en estudio	120
D.5. Adquisición de las ondas de corriente	120
D.6. Adquisición de las ondas de tensión	121
D.7. Transformador trifásico de 8 kVA utilizado	121
D.8. Adquisición de datos para el transformador trifásico bajo carga	122

Índice de cuadros

2.1. Transformadores reparados parcial o totalmente, monofásico sumergidos en aceite serie 15/1, 2 kV fabricados antes de 1996.	40
2.2. Transformadores reparados parcial o totalmente, trifásicos sumergidos en aceite serie 15/1, 2 kV fabricados antes de 1996.	41
3.1. Datos de R y L para algunas tensiones inferiores e iguales a 120 V	56
3.2. Z_1 y Z_m para diferentes tensiones aplicadas en bornes del transformador monofásico	58
3.3. Pérdidas de hierro y cobre para el transformador en estudio.	59
3.4. Parámetros del transformador trifásico de 8 kVA	60
4.1. Pérdidas de energía en el hierro, cobre y totales para el transformador en estudio. . .	66
4.2. Costos en miles de pesos de las pérdidas de energía para diferentes años de amortización en el transformador reparado.	67
4.3. Costos totales en millones de pesos del transformador reparado para diferentes años de amortización.	67
4.4. Pérdidas de energía en el hierro, cobre y totales para el transformador nuevo.	68
4.5. Costos en miles de pesos de las pérdidas de energía para diferentes años de amortización en el transformador nuevo.	68
4.6. Costos totales en millones de pesos del transformador nuevo para diferentes años de amortización.	69
5.1. Z_1 y Z_m para diferentes tensiones aplicadas en bornes del transformador monofásico	84
5.2. Pérdidas de hierro y cobre para el transformador en estudio.	85
5.3. Parámetros del transformador trifásico de 8 kVA	86
5.4. Pérdidas de energía en el hierro, en el cobre y totales para el transformador reparado.	87
5.5. Costos totales en millones de pesos del transformador reparado para diferentes años de amortización.	87

5.6. Costos totales en millones de pesos del transformador nuevo para diferentes años de amortización.	87
A.1. Datos de tensión y corriente C.A. en la bobina con núcleo de madera	92
A.2. Datos de tensión y corriente C.C. en la bobina con núcleo de madera	93
A.3. Datos de tensiones, corriente y potencia en C.A para el núcleo en estudio	94
A.4. Datos de tensiones, corriente y potencia en C.A para el núcleo en estudio	95
A.5. Datos de tensiones, corriente y potencia en C.A para el núcleo en estudio	96
A.6. Datos del comportamiento magnético y pérdidas asociadas.	97
A.7. Datos del comportamiento magnético y pérdidas asociadas.	98
A.8. Datos del comportamiento magnético y pérdidas asociadas.	99
B.1. Factores de escala K para las diferentes señales	100
B.2. Ajuste de fase para la señales de tensión y corriente en el transformador trifásico . .	101
B.3. Magnitudes de los Armónicos de la onda V_1 del transformador monofásico para incrementos de 0-120V	103
B.4. Magnitudes Armónicas de la onda V_2 del transformador monofásico para incrementos de 0-120V	104
B.5. Magnitudes Armónicas de la onda I_1 del transformador monofásico para incrementos de 0-120V	105
B.6. Magnitudes Armónicas de las ondas V_1, V_2, I_1 en vacío del transformador trifásico para 220V	107

Capítulo 1

Introducción

Uno de los problemas en las empresas de distribución son las pérdidas de energía eléctrica. El ente regulador [CREG 024, 2008] reconoce hasta un 11,75% de estas pérdidas. Uno de los elementos, dada su cantidad, que participa ampliamente en esas pérdidas es el transformador de distribución.

Los transformadores de distribución están energizados a un nivel de tensión, el cual cambia de acuerdo con la operación y variación de la carga. Se ha visto que la tensión de alimentación tiene incidencia en las pérdidas, entonces, se hace necesario cuantificar las pérdidas debidas al núcleo cuando la tensión aumenta.

Este estudio plantea la creación de una metodología fundamentada en la valoración de las características constructivas de núcleos usados, logrando que las empresas de energía sean más competitivas al demostrar que aprovechan al máximo sus bienes tangibles como lo es el transformador de distribución, elemento esencial en todo sistema eléctrico. Dicha valoración se realiza tomando como punto de partida las curvas características de núcleos nuevos.

Como última fase de estudio se somete el transformador reparado a un estudio de estimación de sus parámetros durante un ciclo de trabajo establecido, encontrando el modelo que represente el comportamiento del transformador de distribución. En base a este modelo se puede apreciar el funcionamiento del transformador ante diversas condiciones de operación en busca de cuantificar las pérdidas para cada una de ellas. Las pérdidas de potencias computables en un transformador se reducen a las pérdidas en el hierro P_{Fe} , y las pérdidas en el cobre P_{Cu} proporcionales al cuadrado de la intensidad en los devanados, y por lo tanto, al cuadrado de la potencia instantánea S consumida a través del transformador. Permittedole a la empresa de energía determinar el tiempo para el cual la utilización de este transformador es viable en comparación con el costo que representa un transformador nuevo para el mismo periodo de trabajo.

1.1. Objetivos

El objetivo general de este trabajo de grado es dar una guía para la evaluación en la reparación de transformadores de distribución, desde el punto de vista del núcleo.

Por ello, para el cumplimiento de este objetivo se trazaron los siguientes objetivos específicos:

- Proponer una metodología para realizar la estimación de parámetros del transformador.
- Modelar y simular el comportamiento del transformador ante diferentes niveles de tensión permitidos y desde el punto de vista de las pérdidas en el núcleo.
- Proponer una metodología para evaluar las pérdidas de núcleos usados.
- Proponer una metodología para evaluar la viabilidad económica de reparar un transformador usado.
- Elaborar en Matlab una herramienta que recoja las metodologías propuestas.

1.2. Antecedentes

En la actualidad existen diversos estudios referentes a los transformadores de distribución, que buscan encontrar el modelo que mejor represente el comportamiento real del transformador ante variaciones de la carga, queriendo establecer así su comportamiento energético. Entre esos estudios se tienen algunos que se mencionan a continuación :

En [López R, 2000] "Desarrollo y validación de modelos de transformadores monofásicos y trifásicos con saturación para el análisis de armónicos en sistemas de potencia", se obtiene un modelo matemático del transformador trifásico con saturación del núcleo de tres columnas y dos devanados. Para obtener este modelo se plantea un algoritmo de resolución de régimen permanente del sistema de ecuaciones no lineal del transformador trifásico con saturación del núcleo.

En [Sánchez O, 2006] "Diseño de una aplicación para la gestión de carga en transformadores de distribución", este artículo presenta una aplicación software para realizar la gestión de carga en transformadores de distribución y calcular los índices de calidad para el servicio de energía en los sistemas de distribución. Entre las estrategias de gestión de carga presentadas están: estimación del estado de operación del transformador, cálculo de las pérdidas del núcleo y la selección de transformadores de distribución, basada en un criterio técnico-económico.

En [Díaz Á, 2005] "Pérdidas en los transformadores de distribución", este artículo trata sobre la disminución de pérdidas en los transformadores de distribución, las cuales se pueden disminuir si se aplican criterios racionales en el diseño de los transformadores que se fabrican y en la compra en el extranjero de unidades que reúnan los requisitos establecidos. El criterio de compra es sencillo, cuando se adquieren también se compran sus pérdidas. En este artículo se demuestra que invertir un poco más, da beneficios dentro de su vida útil, que no son alcanzables con equipos o núcleos cuyos precios en el mercado son tentadores. Se introduce el tema de los aceros de bajas pérdidas, usados por el autor en el diseño de transformadores y su positivo resultado técnico-económico.

En [Blas A, 2005] "Modelización de la histéresis magnética y su aplicación al cálculo numérico en máquinas eléctricas". Trata sobre el modelado de la histéresis magnética y su aplicación al cálculo numérico. En concreto, se trata de aportar un sistema de cálculo numérico que permita considerar el efecto de la histéresis en la determinación de la distribución del campo magnético en los núcleos ferromagnéticos de las máquinas eléctricas. Lo aquí expuesto es fácilmente extrapolable a otros sistemas que emplean materiales ferromagnéticos.

1.3. Estructura del documento.

La presentación de este libro se realiza en seis capítulos.

capítulo 2

Se presentan la metodología implementada para la evaluación del estado del núcleo a reparar y para cuantificar los costos totales asumidos al reparar un transformador de distribución, frente a los costos adquiridos al reemplazarlo por otro transformador nuevo.

capítulo 3

Contiene las pruebas y resultados obtenidos al implementar la metodología propuesta, para un núcleo monofásico y un transformador trifásico de 8 kVA en funcionamiento.

capítulo 4

Muestra la cuantificación de los costos asumidos por el funcionamiento de un transformador reparado, a partir del modelo obtenido y las curvas de demanda diaria para cada zona residencial.

capítulo 5

Se describe la herramienta en Matlab que reúne las metodologías propuestas.

capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

1.4. Planteamiento del problema.

Los transformadores de distribución tienen un período de funcionamiento establecido por los fabricantes, pero una vez entren a operar en el sistema de distribución este tiempo se puede ver reducido por alguna posible falla en el transformador. Ante esta situación particular surgen algunas preguntas, como: ¿Se deben o no reparar?, ¿Es viable la reparación y puesta en funcionamiento?.

En la actualidad las empresas de energía no tienen una metodología confiable que les permita establecer en que condiciones se encuentran algunos transformadores candidatos a ser reparados, se conoce de la existencia de empresas de ingeniería especializada que emplean software para realizar gestión de carga en transformadores de distribución además de calcular los índices de calidad para el

servicio de la energía eléctrica, pero no se conoce de la existencia de algún procedimiento que proponga un estudio específico de las condiciones en las que se encuentran los núcleos de transformadores de distribución.

Se tiene una solución, la cual está fundamentada en la evaluación del núcleo usado tomando como punto comparativo curvas características de núcleos nuevos. Además se plantea la implementación de un modelo matemático que permita cuantificar sus pérdidas una vez reparado, comparándolas igualmente con las que presenta un transformador nuevo.

Capítulo 2

Planteamiento de la propuesta

2.1. Introducción

En este capítulo se plantea la evaluación del núcleo usado, conformado por una serie de procedimientos para realizar el estudio de las características magnéticas y eléctricas del núcleo. Paralelo a este análisis se emplea el modelo T del transformador, para determinar los parámetros y pérdidas asociadas, de la mano de un estudio económico.

2.2. Evaluación del núcleo usado

Para la evaluación del núcleo usado, se procede a utilizar dos bobinas, un circuito integrador y una resistencia serie, que permita determinar las pérdidas en el núcleo y observar el comportamiento del mismo ante variaciones de tensión. Comparándolo con respecto a las características que presenta un núcleo nuevo, con el objetivo de seleccionar si es o no viable la reutilización del núcleo.

2.2.1. Selección de las bobinas

Es necesario determinar el número de espiras de las bobinas a implementar y para ello se utiliza la siguiente expresión:

$$E = 4,44 f n \Phi 10^{-8} \quad (2.1)$$

$$E = 4,44 f n S B 10^{-8} \quad (2.2)$$

Donde:

E = Tensión rms de la bobina en V .

f = Frecuencia en Hz .

n = Número de espiras.

Φ = Flujo magnético en *maxwells*.

S = Área de la sección transversal de la columna en m^2 .

B = Densidad de flujo magnético en *maxwells*/ m^2 .

$1 Wb = 10^8 maxwell$.

Teslas = $1 Wb/m^2 = 10^4 gauss$.

Debido a que en los catálogos se especifica la densidad de campo magnético B es necesario determinar el área de la sección transversal S de la columna del núcleo del transformador usado.

Teniendo los valores de tensión del devanado primario y secundario, densidad de flujo magnético, área, frecuencia, se obtiene el número de espiras de las bobinas.

$$n = \frac{E 10^8}{4,44 f S B} \quad (2.3)$$

2.2.1.1. Determinación de la sección transversal de la columna

La figura 2.1.a representa la columna del núcleo del circuito magnético, como no se puede trabajar con un área totalmente circular ver figura 2.1.b, se calcula el área de cada escalón que conforma la sección transversal de la columna y se suman en conjunto, para determinar lo que vulgarmente se conoce como área bruta S_{bruta} , éste resultado se multiplica por un factor fu de espacio debido al aislamiento entre las planchas, el cual se determina mediante la ecuación (2.4). Posteriormente se arrolla la bobina seleccionada sobre la columna del núcleo, necesaria para el estudio de las características magnéticas y eléctricas ver figura 2.1.c.

$$fu = \frac{el}{el + eal} \quad (2.4)$$

Donde:

el =Espesor de la lámina.

eal =Espesor del aislamiento entre láminas.

$$S = S_{bruta} \cdot fu \quad (2.5)$$

En la práctica este valor fu está estipulado entre 0,92 y 0,96.

2.2.1.2. Determinación de los calibres del alambre de las bobinas

Se debe especificar el valor de la potencia nominal del transformador, la tensión de los devanados primario y secundario para determinar el valor de la corriente nominal en cada bobina mediante la siguiente expresión.

$$S_{3\Phi} = \sqrt{3}V_L I_L \quad (2.6)$$

$$I_L = \frac{S_{3\Phi}}{\sqrt{3}V_L} \quad (2.7)$$

Donde:

$S_{3\Phi}$ = Potencia trifásica kVA .

I_L = Corriente de línea A .

V_L = Tensión de línea kV .

Las pruebas que se realizan están en vacío, a partir de esta aplicación se espera un flujo de corriente de aproximadamente un 10 % de la corriente nominal, por lo tanto se toma un factor de utilización de 0,2 y con base a esta corriente se selecciona el calibre de los devanados.

2.2.2. Análisis de parámetros

Para estudiar las condiciones del núcleo usado es necesario crear un flujo magnético, siendo necesario acoplar una bobina que lo genere a partir de una fuente de tensión. Pero para obtener un completo estudio del núcleo se deben conocer los parámetros de dicha bobina R y L factores representativos que influyen en el comportamiento del núcleo.

La inductancia de una bobina L depende del material arrollado, el material del núcleo sobre el cual se arrolló y del número de espiras [Schaum M, 1990].

$$L \propto K \frac{n^2 A}{l} \quad (2.8)$$

Donde:

L = Inductancia de la bobina en Henrios H .

K = Permeabilidad magnética, la cual varía con la inducción aplicada H/m .

n = Número de espiras.

$A =$ Área de la sección transversal de la columna m^2 .

$l =$ Longitud de la bobina m .

Con respecto a la resistencia R se tiene información que no solo depende de factores como la resistividad, la sección transversal del conductor, y la longitud, sino que además surge un factor superficial o el llamado efecto pelicular al trabajar con corriente alterna, originado por el flujo de autoinducción en el cobre siendo este flujo una parte del total disperso. Por tanto se busca estudiar la influencia que el material del núcleo pueda tener en los parámetros característicos de la bobina.

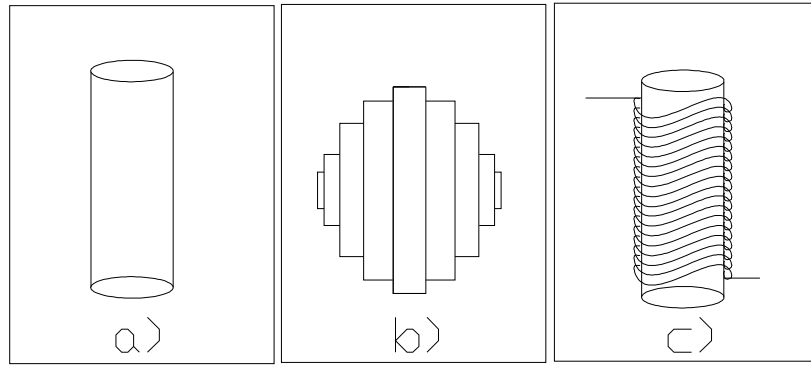


Figura 2.1: a) Columna del núcleo b) Sección transversal c) Bobina arrollada sobre el núcleo.

2.2.2.1. Bobinas con núcleo de madera

Se acoplan las bobinas primaria y secundaria en un molde de madera cuyas dimensiones corresponden a la sección transversal de la columna y longitud del núcleo de hierro. Energizando solo la bobina primaria registrando la tensión y la corriente para determinar los parámetros R_o y L_o empleando el método de Euler y la solución por mínimos cuadrados respectivamente:

$$V = iR_o + L_o \frac{di}{dt} \quad (2.9)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{V - iR_o}{L_o} \quad (2.10)$$

$$\frac{di}{dt} = \left(\frac{1}{L_o}\right)V - \left(\frac{R_o}{L_o}\right)i \quad (2.11)$$

$$\sigma = \frac{1}{L_o} \text{ y } b = -\frac{R_o}{L_o} \quad (2.12)$$

$$\frac{di}{dt} = \sigma V + bi \quad (2.13)$$

$$F(V, i) = \sigma V + bi \quad (2.14)$$

$$i_{t+1} = i_t + \Delta t F(V_t, i_t) \quad (2.15)$$

$$i_{t+1} = i_t + \Delta t (\sigma V_t + bi_t) \quad (2.16)$$

$$\frac{i_{t+1} - i_t}{\Delta t} = \sigma V_t + bi_t \quad (2.17)$$

$$K_t = \frac{i_{t+1} - i_t}{\Delta t} \quad (2.18)$$

Utilizando el analizador de redes, tomando un número de muestras. El problema se limita a encontrar σ y b del siguiente arreglo matricial, por lo que se utiliza la herramienta de mínimos cuadrados.

$$\begin{bmatrix} K_o \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ K_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_o & i_o \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ V_m & i_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma \\ b \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$A\bar{X} = B \quad (2.20)$$

$$\bar{X} = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (2.21)$$

Donde:

V = Tensión aplicada en la bobina primaria V .

i = Corriente en la bobina primaria A .

R_o = Resistencia de la bobina primaria con núcleo de aire Ω .

L_o = Inductancia de la bobina primaria con núcleo de aire H .

Δt = Paso del muestreo s .

\bar{X} = Vector de incógnitas σ y b .

A = Matriz correspondiente a las tensiones y corrientes muestreadas V_m y i_m .

B = Vector correspondiente a las muestras de la variable K .

Aplicando el método de la solución por mínimos cuadrados se determinan los parámetros R_o y L_o . Se realiza este estudio sin el núcleo ferromagnético para comparar que influencia puede tener el medio por donde se transporta el flujo magnético y la consecuente variación de la inductancia, en las pérdidas del cobre ($R_o i^2$). La bobina secundaria no se tiene en cuenta en este estudio, pero se deja porque este es el molde que se acoplará en el núcleo ferromagnético en donde se emplea para registrar la tensión inducida.

2.2.2.2. Bobinas con núcleo de hierro

Acoplando las bobinas primaria y secundaria en el núcleo ferromagnético se procede a conectar la fuente de tensión en la bobina primaria, tomando lecturas de las tensiones V_1 , V_2 y la corriente I_1 . Implementando el modelo T, ver figura 2.2, con el objetivo de determinar los parámetros Z_1 , Z_m . Como el secundario del transformador está en vacío, se considera que la tensión V_2 está aplicada directamente a la rama de magnetización.

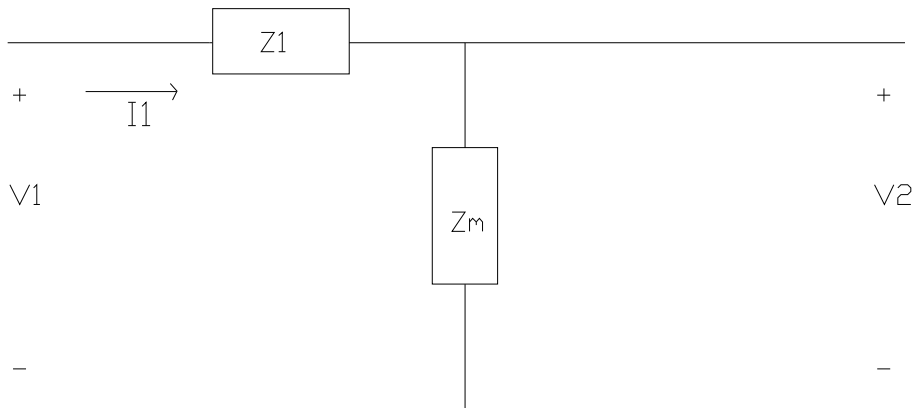


Figura 2.2: Modelo T en vacío

Como los parámetros se hallan partiendo de las señales discretizadas con el analizador de redes, se hace uso de la función FFT de Matlab, la cual permite conocer la componente de continua, fundamental y los armónicos asociados a cada señal. Para realizar la estimación de los parámetros solo se emplea la componente fundamental de las señales V_1 , V_2 y I_1 .

$$Z_m = \frac{V_2}{I_1} \quad (2.22)$$

$$Z_1 = \frac{V_1 - V_2}{I_1} \quad (2.23)$$

Donde:

Z_1 = Impedancia de la bobina primaria en Ω .

Z_m = Impedancia correspondiente a la rama de magnetización en Ω .

V_1 = Tensión en la bobina primaria en V .

V_2 = Tensión inducida en la bobina secundaria en V .

I_1 = Corriente en la bobina primaria en A .

2.2.2.2.1. Determinación de las pérdidas en el cobre y el hierro. Determinados los parámetros Z_1 y Z_m para diferentes valores de tensión se procede a cuantificar las pérdidas en el hierro y en el cobre, factores representativos del funcionamiento del transformador. Ver figura 2.3.

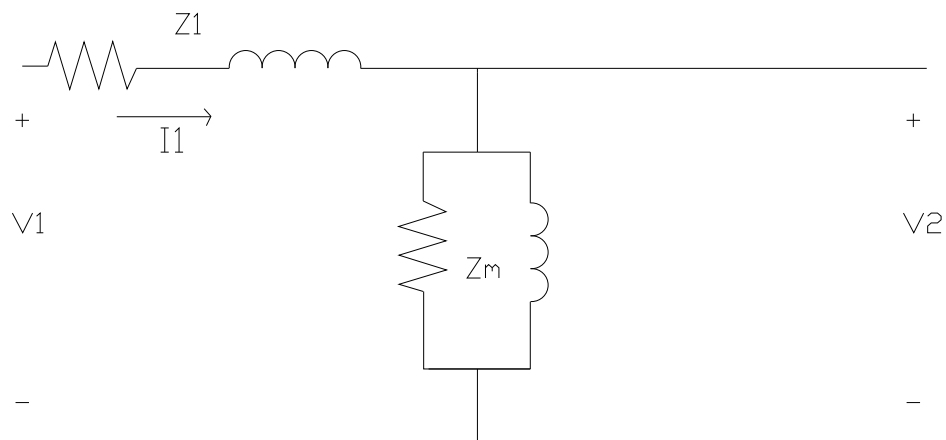


Figura 2.3: Parámetros Z_1 y Z_m del modelo T

2.2.2.2.1.1. Determinación de las pérdidas en el hierro. Para determinar las pérdidas en el hierro W_o se aplica la siguiente expresión.

$$W_o = \text{Real}(Z_m) * \|I_1\|^2 \quad (2.24)$$

2.2.2.2.1.2. Determinación de las pérdidas en el cobre. Para determinar las pérdidas en el cobre W_I se aplica la siguiente expresión.

$$W_I = Real (Z_1) * \|I_1\|^2 \quad (2.25)$$

2.2.3. Obtención del lazo de histéresis en forma experimental

Se obtiene la curva de histéresis magnética (Densidad de flujo magnético B contra intensidad de campo magnético H) del material que compone el núcleo del transformador. Esto a partir de la creación de la curva de la integral de tensión contra corriente para el transformador en vacío y de las características eléctricas y geométricas del transformador.

La curva en mención, se visualizará y registrará en un osciloscopio mediante la utilización de un integrador (con el cual se obtendrá la integral de la tensión) y de una resistencia serie ó la pinza amperimétrica con salida al osciloscopio [Ortíz H, Avendaño C y otros, 2002].

2.2.3.1. Intensidad magnética H

Aplicando la ley de Ampere y despejando H , se obtiene:

$$H = \frac{n i_e}{l_c} \quad (2.26)$$

Donde:

H = Intensidad de campo magnético $\frac{AV_u}{m}$.

n = Número de espiras V_u .

l_c = Longitud media del circuito magnético m .

i_e = Corriente de excitación A .

Conectando una resistencia R_s en serie con el transformador, se establece una relación directa entre su tensión en terminales y la intensidad magnética H .

$$H = \frac{n V_R}{R_s l_c} \quad (2.27)$$

$$V_R = i_e R_s \quad (2.28)$$

Donde:

V_R = Valor pico de la tensión en la resistencia serie en V .

R_s = Resistencia serie en Ω

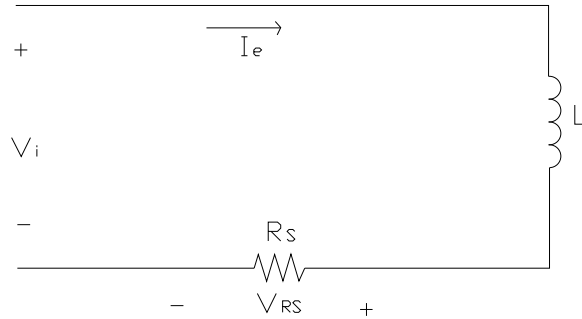


Figura 2.4: Rama de la resistencia serie

2.2.3.1.1. Diseño de la resistencia serie R_s . Uno de los métodos para poder registrar, en un osciloscopio una señal proporcional a la corriente de un circuito, teniendo en cuenta que en el osciloscopio solo se pueden registrar señales de tensión es utilizar una resistencia serie, como se muestra en la figura 2.4.

Para que la resistencia serie R_s , no modifique las condiciones del circuito en el cual se registrará la corriente se debe cumplir que:

$$R_s \ll X_B \quad (2.29)$$

siendo X_B la reactancia de la bobina, con lo cual :

$$i_e = \frac{V_R}{R_s} \quad (2.30)$$

2.2.3.2. Densidad magnética B

Aplicando la ley de inducción de Faraday y despejando B se obtiene:

$$B = \frac{1}{nS} \int V_i(t) dt \quad (2.31)$$

Donde:

B = Densidad de campo magnético en *Teslas*.

n = Número de espiras V_u .

S = Área de la columna en m^2 .

$V_i(t)$ = Tensión de alimentación en V .

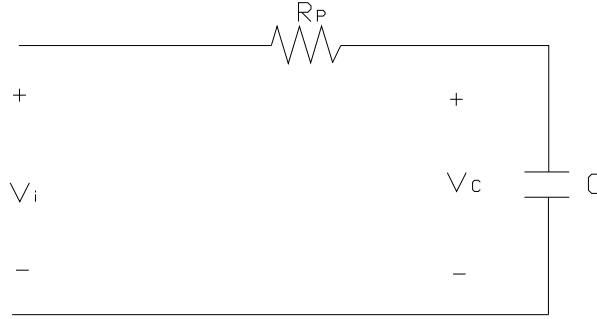


Figura 2.5: Circuito Integrador

De la rama en paralelo del circuito que emula la curva de magnetización. Ver figura 2.5.

$$V_i(t) = R_p C \frac{dV_c(t)}{dt} + V_c \quad (2.32)$$

Donde:

$$\int (V_i(t) - V_c(t)) dt = R_p C \int dV_c(t) \quad (2.33)$$

Si

$$V_c(t) \ll V_i(t) \quad (2.34)$$

Entonces

$$\int V_i(t) dt \approx R_p C V_c(t) \quad (2.35)$$

Sustituyendo la ecuación (2.31) en la (2.35) ,

$$B = \frac{C R_p V_c}{n S} \quad (2.36)$$

Donde:

R_p = Resistencia de la rama en paralelo Ω .

C = Condensador de la rama en paralelo en Faradios F .

V_c = Valor pico de la tensión en el condensador en V .

2.2.3.2.1. Diseño del circuito integrador. Para esto se utilizará un integrador discreto, conformado por un circuito RC serie, como se muestra en la figura 2.5.

Para obtener un integrador a partir de este circuito se debe cumplir la siguiente condición:

$$R_p \gg X_c \quad (2.37)$$

donde X_c es la reactancia capacitiva, así para ondas senoidales.

$$V_c(t) = K \int V_i(t) dt \quad (2.38)$$

Siendo,

$$K = \frac{1}{R_p C} \quad (2.39)$$

2.2.4. Determinación de pérdidas

Una vez acoplada la bobina al núcleo del transformador de distribución, se alimenta a una tensión determinada. Previamente se ubican los elementos de medida, tales como, voltímetro, amperímetro y wáttmetro. La potencia registrada por el wáttmetro será la correspondiente a la potencia de pérdidas en el cobre W_I , en la resistencia serie W_{RS} y en el hierro W_o .

$$W = W_I + W_{RS} + W_o \quad (2.40)$$

$$W_{RS} = R_s (i_e)^2 \quad (2.41)$$

2.2.4.1. Determinación de las pérdidas en el cobre

Considerando que las pérdidas en el cobre W_I , sean las pérdidas normales por efecto Joule en los devanados, y las pérdidas adicionales o por efecto superficial, dependientes unas y otras de la corriente [Corrales J, 1954].

r_{sc}, r_{pc} = Las resistencias respectivas del secundario y del primario en corriente continua en Ω .

$k_{\sim s}, k_{\sim p}$ = Los coeficientes de aumento por efecto superficial.

r_s, r_p = Las resistencias de los devanados en corriente alterna en Ω .

I_s, I'_s = Las corrientes de carga en A, secundaria y primaria, respectivamente.

Despreciando la corriente de excitación:

$$W_I = r_s I_s^2 + r_p I_s'^2 \quad (2.42)$$

En función de las resistencias de cortocircuito:

$$W_I = r_s I_s^2 + r_p I_s^2 \left(\frac{n_s}{n_p} \right)^2 = \left[r_s + r_p \left(\frac{n_s}{n_p} \right)^2 \right] I_s^2 = R_s I_s^2 \quad (2.43)$$

o bien:

$$W_I = r_s I_s'^2 \left(\frac{n_p}{n_s} \right)^2 + r_p I_s'^2 = \left[r_p + r_s \left(\frac{n_s}{n_p} \right)^2 \right] I_s'^2 = R_p I_s'^2 \quad (2.44)$$

En cuanto a las resistencias en c.a. en función de los valores en continua:

$$r_s = r_{75s} (1 + k_{\sim s}) \quad (2.45)$$

$$r_p = r_{75p} (1 + k_{\sim p}) \quad (2.46)$$

r_{75s}, r_{75p} = Son las resistencias secundaria y primaria a 75°C en continua, en Ω .

r_s, r_p = Las resistencias de los mismos devanados a 75°C y en corriente alterna en Ω .

$k_{\sim s}, k_{\sim p}$ = Los incrementos relativos por efecto pelicular.

Si, además,

ρ_{75} = Es la resistividad del material a 75°C en continua en $\mu\Omega \text{ cm}^2 / \text{cm}$.

n_s, n_p = Las espiras respectivas.

l_{ms}, l_{mp} = Las longitudes de las espiras medias en m .

S_{sc}, S_{pc} = Las secciones del conductor en mm^2 .

I_s, I_p = Las intensidades que los recorren en A .

δ_s, δ_p = Las densidades de corriente en A / mm^2 .

p_c = El peso específico de los conductores en kg / dm^3 .

G_s, G_p = Los pesos totales de uno y otro devanado en el transformador completo en kg .

$$W_I = \rho_{75} (l + k_{\sim s}) \frac{l_{ms} n_s}{100 S_{sc}} I_s^2 + \rho_{75} (l + k_{\sim p}) \frac{l_{mp} n_p}{100 S_{pc}} I_p^2 \quad (2.47)$$

Pero:

$$\frac{I_s}{S_{sc}} = \delta_s \quad \frac{I_p}{S_p} = \delta_p \quad (2.48)$$

$$G_s = p_c (l_{ms} * 10) \frac{S_{sc}}{10000} n_s \quad (2.49)$$

$$l_{ms} n_s = \frac{1000}{p_c} \frac{G_s}{S_{sc}} \quad (2.50)$$

$$G_p = p_c (l_{mp} * 10) \frac{S_{pc}}{10000} n_p \quad (2.51)$$

$$l_{mp}n_p = \frac{1000 G_p}{p_c S_{pc}} \quad (2.52)$$

Entonces:

$$W_I = \frac{10\rho_{75}}{p_c} [(1 + k_{\sim s}) G_s \delta_s^2 + (1 + k_{\sim p}) G_p \delta_p^2] \quad (2.53)$$

Es la fórmula de la que se hace uso más frecuente para el cálculo de las pérdidas en el devanado. Admitiendo un aumento de resistividad por corriente alterna del 10 %, $k_{\sim s} = k_{\sim p} = 0,1$ y siendo para el cobre $\rho_{75} = 2,16 \mu\Omega \text{ cm}^2/\text{cm}$, $p_c = 8,9 \text{ kg}/\text{dm}^3$, resulta el coeficiente:

$$\frac{10\rho_{75}}{p_c} = \frac{10 \cdot 2,16}{8,9} = 2,42 \text{ para el cobre.}$$

Esta es la expresión correspondiente a las pérdidas en el cobre:

$$W_I = 2,66 (G_s \delta_s^2 + G_p \delta_p^2) \quad (2.54)$$

Como se tiene solo una bobina correspondiente al devanado de baja tensión, la expresión anterior queda de la siguiente forma:

$$W_I = 2,66 (G_s \delta_s^2) \quad (2.55)$$

2.2.4.2. Determinación de las pérdidas en el hierro

Una vez conocida la potencia total consumida por la bobina y las pérdidas en el cobre se procede a determinar las pérdidas correspondientes al hierro.

$$W - W_I - W_{RS} = W_o \quad (2.56)$$

2.2.5. Circuito esquemático

Este circuito representa la conexión física de los elementos necesarios para el estudio de las pérdidas en el núcleo y el análisis del comportamiento del mismo ante variaciones de tensión. Ver figura 2.6.

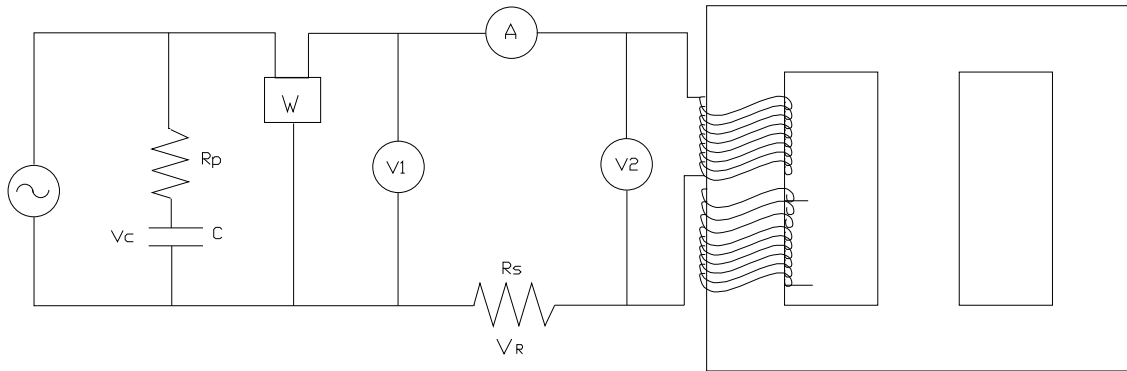


Figura 2.6: Conexión de elementos.

2.2.6. Comportamientos experimentales

Contempla las curvas representativas de estudio, esenciales para la determinación de las características y condiciones actuales de los núcleos usados.

2.2.6.1. Lazo de histéresis

La curva de histéresis se obtiene conectando los canales Y y X al osciloscopio. El canal Y debe conectarse al condensador C y el canal X a la resistencia serie R_s .

Siendo el canal Y el eje correspondiente a la densidad de campo magnético B y el canal X el eje correspondiente a la intensidad magnética H , observando los diferentes comportamientos ante las variaciones de tensión.

2.2.6.2. Curva densidad flujo magnético B contra intensidad de campo magnético H

Para obtener la curva se registran las diferentes tensiones en el condensador $V_c(t)$, contra las variaciones de corriente i_e representadas por la tensión V_R . De esta curva se puede determinar el valor de la densidad de flujo magnético B para el punto en el cual el núcleo alcanza la saturación, y así poder seleccionar de una manera práctica, si es viable o no la reparación del transformador, al compararla con la curva que representa un transformador nuevo.

$$B = \frac{C R_p V_c(t)}{n S} \quad (2.57)$$

Donde:

B = Flujo magnético en *Teslas*.

2.2.6.3. Curva permeabilidad relativa μ_r contra intensidad de campo magnético H .

Esta curva permite observar la inducción magnética producida en el núcleo por la fuerza de magnetización, generalmente la permeabilidad varía con la inducción aplicada.

2.2.6.4. Curva de densidad de flujo magnético B contra voltamperios por kilogramo $(va)_\mu$.

Esta curva permite observar y cuantificar el comportamiento de los voltamperios de magnetización en el núcleo ante las variaciones de la densidad de campo magnético. Esta gráfica se obtiene a partir de la siguiente expresión: [Corrales J, 1969].

$$(va)_\mu = \frac{Q_\mu}{G_h} = \frac{10^{-3} \pi \cdot f B^2}{\gamma \mu_0 \mu_r} \quad (2.58)$$

Donde:

$(va)_\mu$ = Voltamperios reactivos por kg *Var/kg*.

Q_μ = Voltamperios reactivos *Var*.

G_h = Peso del núcleo en *kg*.

f = Frecuencia en *Hz*.

γ = Peso específico de la chapa en *kg/dm³*.

B = Densidad de flujo magnético en *Teslas*.

μ_0 = Permeabilidad del aire $4\pi 10^{-7}$ *H/m*.

μ_r = Permeabilidad relativa.

2.2.6.5. Curva de la tensión aplicada en bornes de la bobina primaria V_i , tensión inducida V_{ind} contra corriente de excitación I_e .

A partir de esta curva se logra apreciar el valor de tensión aplicada para la cual el núcleo alcanza su punto de saturación. El valor de tensión que hace saturar el núcleo, trae asociada una corriente de excitación I_e , que al conocerse permitiría encontrar la densidad de flujo magnético B asociada a este comportamiento.

2.2.6.6. Curva de densidad de flujo magnético B contra pérdidas en el hierro W_o .

Esta curva relaciona el comportamiento de la potencia aplicada a la bobina, experimentando incrementos en la densidad de flujo magnético B y pérdidas en el hierro ante aumentos de la potencia,

representados en la tensión y corriente de excitación aplicada, esta gráfica permite conocer las pérdidas en el hierro en cada valor de B .

2.2.7. Comparación de las características del núcleo nuevo y usado

Para el estudio de las características del núcleo nuevo se recurre a las especificaciones técnicas de los fabricantes, en las cuales se especifica, las curvas referentes a los voltamperios de magnetización, necesarios para la determinación de la corriente de magnetización, la curva de pérdidas en el hierro por kilogramo y la permeabilidad del material. Dicha comparación se realiza con base en las condiciones experimentadas por el núcleo usado, referentes a la densidad de flujo magnético y la intensidad de campo magnético, la cual esta en función de la corriente de excitación. Se emplea como ejemplo ilustrativo las curvas correspondientes al material RG9 cuya lámina tiene un espesor de 0,30 mm, suministradas por la NIPPON STEEL CORPORATION [Nippon Steel, 1970].

2.2.7.1. Cálculo de la corriente de magnetización

La corriente de magnetización no excede casi nunca del 10 % de la plena carga, y en grandes transformadores baja hasta el 4 o 5 %. La exactitud de los cálculos relativos a la corriente de magnetización de un transformador, es de todos modos, siempre muy precaria. Una firma constructora garantiza sus valores con una tolerancia de $\pm 30\%$. [Corrales J, 1954].

La corriente de vacío, aproximadamente:

$$I_o \approx I\mu = \frac{(va)_\mu G_h}{U_p} \quad (2.59)$$

I_o = Corriente de vacío o de excitación.

$I\mu$ = Corriente de magnetización.

$(va)_\mu$ = Voltamperios por kilogramo.

G_h = Peso del núcleo en kilogramos.

U_p = Tensión aplicada en la bobina.

A partir de esta expresión se puede determinar la corriente de magnetización del transformador nuevo para diferentes valores de tensión, conociendo de antemano los voltamperios por kg y el respectivo peso del núcleo del transformador nuevo, cuyos datos se pueden obtener de las respectivas especificaciones técnicas suministradas por los fabricantes. Ver figura 2.7. Los voltamperios de magnetización dependerán del comportamiento de la densidad de flujo magnético en el núcleo usado al igual que la tensión U_p . Lo que se busca es apreciar el comportamiento de la corriente de magnetización en el núcleo nuevo al someterlo a las condiciones experimentadas por el núcleo usado.

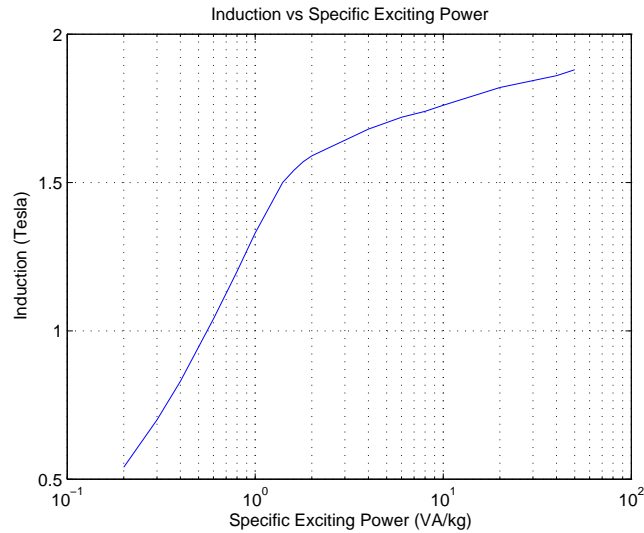


Figura 2.7: Inducción B Vs VA/kg. (Curva tomada de la NIPPON STEEL CORPORATION)

2.2.7.2. Determinación de las pérdidas en el hierro W_o

Para la determinación de las pérdidas en el hierro se emplea la curva de la densidad de flujo magnético B , contra las pérdidas en el hierro por kilogramo suministrada por los fabricantes, la determinación de estas pérdidas se realiza conociendo experimentalmente el comportamiento de la densidad de flujo magnético B del núcleo usado, logrando obtener una cuantificación de las pérdidas que experimentaría el núcleo nuevo al ser sometido al mismo comportamiento del núcleo usado. Ver figura 2.8.

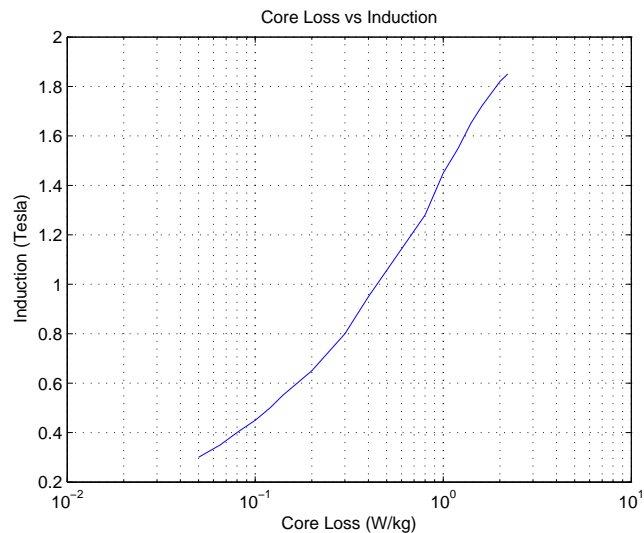


Figura 2.8: Inducción B Vs Pérdidas Fe. (Curva tomada de la NIPPON STEEL CORPORATION)

2.2.7.3. Determinación de la densidad de flujo magnético B

Se emplea la curva de la densidad de flujo magnético B , contra la intensidad de campo magnético H suministrada por los fabricantes, la determinación de B se realiza conociendo el comportamiento de la intensidad de campo magnético del núcleo usado la cual esta en función de la corriente de excitación . Ver figura 2.9.

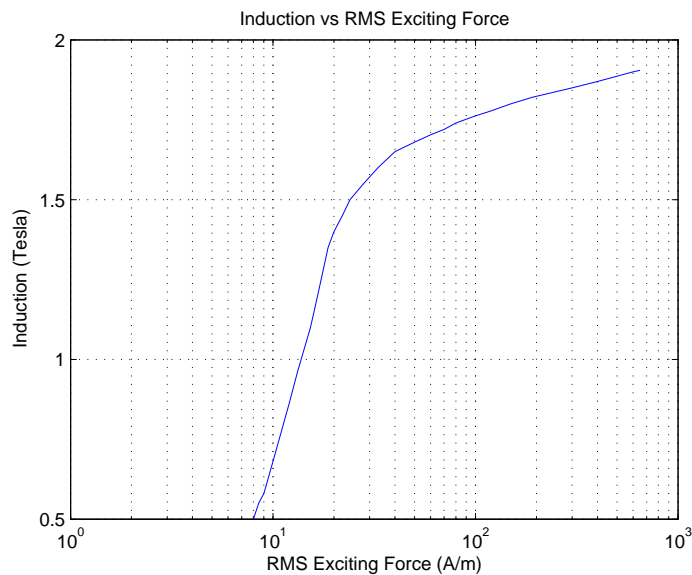


Figura 2.9: Inducción B Vs Intensidad H . (Curva tomada de la NIPPON STEEL CORPORATION)

2.3. Criterio para determinar la reparación del transformador

La norma técnica colombiana NTC 1954 establece los valores máximos de pérdidas con carga (P_c), pérdidas sin carga (P_o), corriente sin carga (I_o) y tensión de cortocircuito (U_z) para transformadores reparados o reconstruidos, monofásicos, autorrefrigerados e inmersos en liquido aislante, de 5 kVA a 333 kVA ; tensión de serie $15\text{ kV}/1,2\text{ kV}$ y transformadores reparados o reconstruidos trifásicos; autorrefrigerados en liquido aislante de 15 kVA a 1250 kVA ; tensión de serie $15\text{ kV}/1,2\text{ kV}$ [NTC 1954, 1996]. En base a esta norma se determina que el transformador puede ser reparado si al efectuar el proceso de evaluación el nivel de pérdidas en el hierro esta por debajo de los establecidos en los cuadros 2.1 y 2.2, si el transformador fue construido antes de 1996. Pero si el transformador fue construido a partir de 1996, al repararse parcial o totalmente debe cumplir con el valor de las pérdidas en el hierro que se establece en la primera de las siguientes ecuaciones:

$$P_o(a\ 85C) = P_o(\textit{original}) + 14\% \quad (2.60)$$

$$P_c(a\ 85C) = P_c(\textit{original}) + 7,5\% \quad (2.61)$$

$$I_o = I_o(\textit{original}) + 25\% \quad (2.62)$$

$$U_z = U_z(\textit{original}) \pm 15\% \quad (2.63)$$

Donde:

$P_o(\textit{original})$, $P_c(\textit{original})$, $I_o(\textit{original})$, y $U_z(\textit{original})$ corresponden a los valores registrados en el protocolo si estos están de acuerdo con lo establecido en las NTC 818 y NTC 819 con que fueron diseñados. Si no se posee el protocolo se toman los valores de las referencias [NTC 818, 1987] y [NTC 819, 1987].

Cuadro 2.1: Transformadores reparados parcial o totalmente, monofásico sumergidos en aceite serie 15/1,2 kV fabricados antes de 1996.

Potencia nominal [kVA]	P_o [W]	P_c [W]	I_o [% de I_N]	U_z [%]
5	40	110	3,5	3,15
10	69	165	3,3	3,15
15	98	225	3,3	3,15
25	144	345	2,8	3,15
37,5	190	490	2,8	3,15
50	230	620	2,8	3,15
75	293	890	2,1	3,15
100	379	1165	2,1	3,15
167,5	483	1660	2,1	3,15

Cuadro 2.2: Transformadores reparados parcial o totalmente, trifásicos sumergidos en aceite serie 15/1,2kV fabricados antes de 1996.

Potencia nominal [kVA]	P_o [W]	P_c [W]	I_o [% de I_N]	U_z [%]
15	110	385	5,9	3,3
30	185	620	4,7	3,3
45	245	860	4,7	3,3
75	355	1330	4	3,8
112,5	490	1920	3,7	3,8
150	600	2500	3,5	4,4
225	815	3680	2,9	4,4
300	975	4860	2,7	5,0
400	1190	6000	2,3	5,0
500	1395	7500	2,3	5,5
630	1630	9000	2,3	5,5
750	1780	11000	2,3	5,5
800	1930	11500	2,3	5,5
1000	2265	14000	2,3	5,5
1250	2645	16800	1,7	6,6

2.4. Comparación del transformador

Después de reparar el transformador de distribución es necesario determinar sus parámetros con el objetivo de cuantificar sus pérdidas, para compararlas con las estipuladas en los cuadros 2.1 y 2.2 donde se especifican los valores máximos para los transformadores construidos antes de 1996, pero si fue construido a partir de 1996 debe cumplir con lo estipulado en las ecuaciones (2.60), (2.61), (2.62) y (2.63). Si el transformador reparado cumple estas especificaciones se procede a realizar el estudio económico, donde lo que se busca es determinar la viabilidad económica de esta reparación. Esto se logra al someter ambos transformadores es decir el nuevo y el reparado, a unas mismas condiciones de operación.

2.4.1. Estimación de parámetros

El modelo que se utiliza para la estimación de los parámetros es el que se muestra en la figura 2.10, que corresponde al modelo T del transformador de distribución por fase, y cuyo objetivo es hallar los parámetros Z_1 , Z_m y Z_2 representativos del transformador.

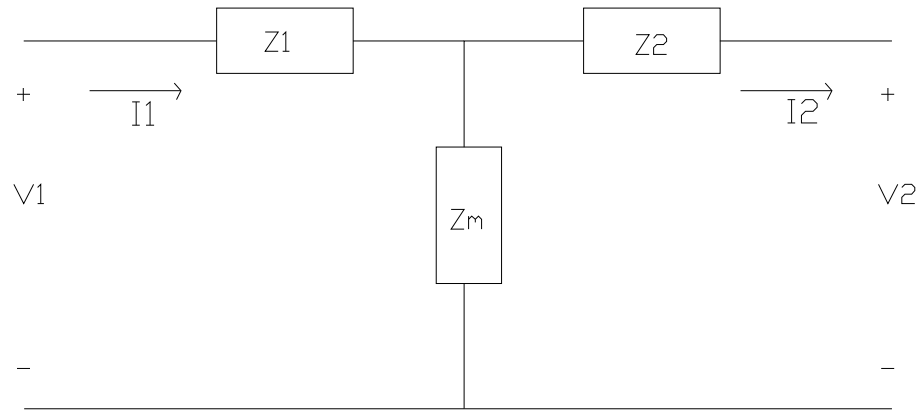


Figura 2.10: Modelo T.

A partir del conocimiento de las tensiones V_1 , V_2 y las corrientes I_1 , I_2 se pueden determinar los parámetros Z_1 , Z_2 y Z_m empleando las siguientes expresiones:

$$V_1 = (Z_1 + Z_m) * I_1 - Z_m * I_2 \quad (2.64)$$

$$V_2 = Z_m * I_1 - (Z_m + Z_2) * I_2 \quad (2.65)$$

Para resolver este sistema de ecuaciones es necesario conocer una de las incógnitas, realizando la prueba de vacío a tensión nominal al transformador reparado se determina el parámetro $(Z_1 + Z_m)$ empleando la siguiente expresión.

$$Z_1 + Z_m = \frac{V_1}{I_1}$$

Conociendo la impedancia $(Z_1 + Z_m)$ se determinan los parámetros Z_1 , Z_2 , y Z_m cuando el transformador esta operando bajo carga.

2.4.2. Determinación de las pérdidas en el hierro y el cobre para el transformador de distribución

Una vez determinados los parámetros Z_1 , Z_2 y Z_m es posible cuantificar las pérdidas en el hierro y el cobre, para los diferentes comportamientos experimentados por el transformador bajo carga. Ver figura 2.11.

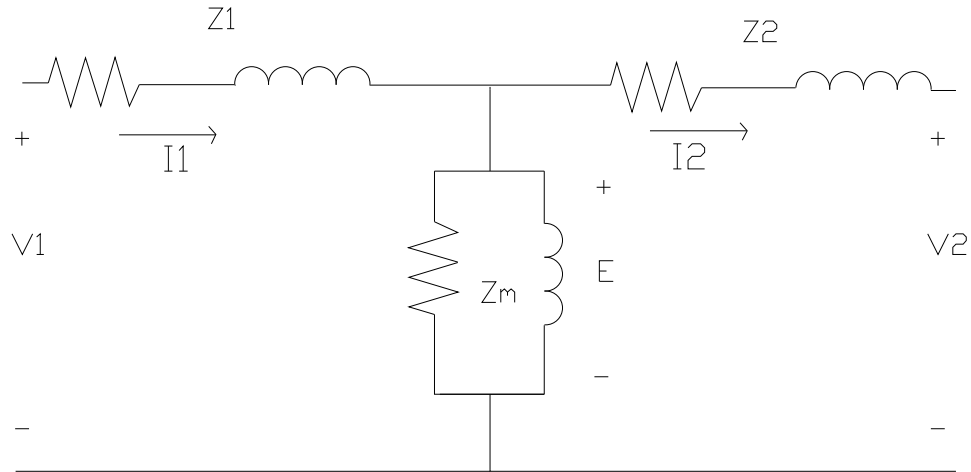


Figura 2.11: Circuito equivalente transformador por fase.

Donde :

Z_1 = Impedancia del devanado primario en Ω .

Z_2 = Impedancia del devanado secundario en Ω .

Z_m = Impedancia de la rama de magnetización en Ω .

2.4.2.1. Determinación de las pérdidas en el hierro

Para determinar las pérdidas en el hierro W_o se emplea la siguiente expresión.

$$W_o = \text{Real}(Z_m) * \|I_1 - I_2\|^2 \quad (2.66)$$

2.4.2.2. Determinación de las pérdidas en el cobre

Para determinar las pérdidas en el cobre W_I se emplea la siguiente expresión.

$$W_I = \text{Real}(Z_1) * \|I_1\|^2 + \text{Real}(Z_2) * \|I_2\|^2 \quad (2.67)$$

2.4.3. Estudio económico

Una vez determinadas las pérdidas en el hierro y en el cobre del transformador de distribución, en unos períodos de tiempos específicos, se procede a evaluar los costos asociados con las pérdidas energéticas.

Desde el punto de vista del consumo es importante conocer el rendimiento durante un ciclo de trabajo, entendiendo por tal ciclo los períodos sucesivos de tiempo durante los cuales se repiten íntegramente las condiciones de carga del transformador.

Después de establecidas las pérdidas energéticas por ciclo, se determinan los costos de estas pérdidas energéticas y se procede a capitalizarlos en un tiempo previsto.

A continuación se plantea el algoritmo.

Pa_{fe} = Pérdidas de energía en el hierro anuales.

Pa_{cu} = Pérdidas de energía en el cobre anuales.

p = Costo de la energía en kilovatio-hora en el lugar de la instalación.

τ = Período de amortización.

r = Tasa de interés compuesto.

C_D = Capitalización de pérdidas.

$Mant$ = Costo del mantenimiento anual del transformador.

C_M = Capitalización del costo de mantenimiento.

$$C_M = Mant \left[\frac{100}{r} \left(1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{r}{100}\right)^\tau} \right) \right] \quad (2.68)$$

$$C_D = Pa_{fe} p \left[\frac{100}{r} \left(1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{r}{100}\right)^\tau} \right) \right] + Pa_{cu} p \left[\frac{100}{r} \left(1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{r}{100}\right)^\tau} \right) \right] \quad (2.69)$$

2.4.4. Costo del transformador nuevo

$$C_N = C_{oN} + C_{DN} + C_{MN} \quad (2.70)$$

Donde:

C_N = Costo total del transformador nuevo en un tiempo determinado.

C_{oN} = Costo inicial del transformador nuevo.

C_{DN} = Capitalización de pérdidas del transformador nuevo.

C_{MN} = Capitalización del costo de mantenimiento del transformador nuevo.

2.4.5. Costo del transformador reparado

$$C_R = C_{oR} + C_{DR} + C_{MR} \quad (2.71)$$

Donde:

C_R = Costo total del transformador reparado en un tiempo determinado.

C_{oR} = Costo de reparación del transformador.

C_{DR} = Capitalización de pérdidas del transformador reparado.

C_{MR} = Capitalización del costo de mantenimiento del transformador reparado.

Capítulo 3

Pruebas y resultados

3.1. Introducción

Este capítulo trata sobre los procedimientos y resultados obtenidos al ejecutar lo planteado en el capítulo 2. Parte de estas pruebas se realizan a un transformador monofásico determinándose los comportamientos magnéticos y eléctricos que en la actualidad este núcleo presenta. De igual forma se emplea un transformador trifásico perteneciente al laboratorio de máquinas de la UIS, asumiendo que este transformador sea el reparado y por ende que aprobó las características básicas de funcionamiento, se utiliza para aplicar la metodología referente a la determinación de los parámetros al efectuar las respectivas pruebas en vacío y bajo carga.

3.2. Evaluación del núcleo

Se utilizó un núcleo monofásico de 2 *kVA*, con base en esta potencia y las dimensiones del núcleo se diseñaron sus dos bobinas empleando una relación uno a uno.

Se construyó una bobina equivalente pero con núcleo de madera conservando la geometría de la columna del núcleo de hierro. Se obtuvieron las curvas características del núcleo empleando lo planteado en el capítulo 2 (Ver numeral 2.2.6). Se determinaron las pérdidas en el núcleo a partir de lo contemplado en el numeral 2.2.4 y se compararon con los resultados empleando un analizador de redes (Ver numeral 2.2.2.2).

3.2.1. Especificaciones del núcleo utilizado

A continuación se especifican las dimensiones y características del núcleo monofásico. Ver figura 3.1.

l_c = Longitud media del circuito magnético.

$$l_c = (13,1 * 2 + 19,3 * 2) = 74,8 \text{ cm.}$$

$$Volumen = [(20,3 * 7 * 6,8) * 2 + (7,1 * 6,8 * 12,3) * 2] = 3120,248 \text{ cm}^3 = 3,12048 \text{ dm}^3.$$

S_{bruta} = Área bruta de la columna.

$$S_{bruta} = (7,1 * 6,8) = 48,28 \text{ cm}^2.$$

$$el = 0,35 \text{ mm}.$$

$$\text{Aislante Barniz} = 0,03 \text{ mm}.$$

f_u = Factor de espacio.

$$f_u = 0,92.$$

S = Sección transversal de la columna.

$$S = (48,28 * 0,92) = 44,4176 \text{ cm}^2.$$

G_h = Peso del núcleo en kg .

$$G_h = 19,04 \text{ kg}.$$

γ = Peso específico de la chapa en kg/dm^3 .

$$\gamma = 6,1016 \text{ kg/dm}^3.$$

Potencia = 2 kVA.

B = Densidad de flujo magnético en *Teslas*.

$$B = 1,1 \text{ T}.$$

f = Frecuencia 60 Hz.

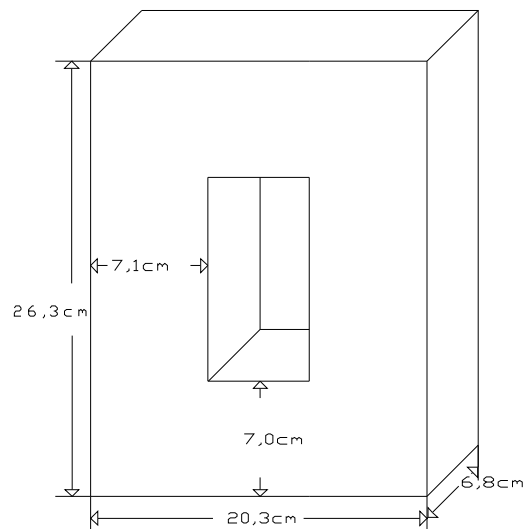


Figura 3.1: Núcleo monofásico de 2 kVA

3.2.2. Características de la bobina seleccionada

A partir de las especificaciones del núcleo del transformador monofásico y para una tensión de operación de 120 V.

Selección del número de espiras:

$$n = \frac{E 10^8}{4,44 f S B} = \frac{120 * 10^8}{4,44 * 60 * 44,4176 * 10^{-4} * 1,1 * 10^8} = 92,19 \approx 92 \text{ espiras}$$

Selección del calibre del alambre de la bobina:

$$I_n = \frac{S}{V} = \frac{2000}{120} = 16,666 \text{ A}$$

Las pruebas se realizan en vacío, por tanto se selecciona un calibre con un factor de utilización de 0,2 de la corriente nominal.

$$I_{conductor} = 0,2 * 16,666 = 3,333 \text{ A}$$

Se selecciona el calibre # 17 de capacidad de corriente 10 A, cuya área de sección transversal corresponde a $1,0387 \text{ mm}^2$. Debido a que en el momento de realizar la bobina no se tenía otro calibre de menor capacidad de corriente.

3.2.3. Curvas características del núcleo utilizado

Para la determinación de las curvas características del núcleo del transformador se utiliza el montaje de la figura 3.2, cuyos elementos se seleccionaron en base a las condiciones enunciadas en el numeral 2.2.3, para determinar la densidad de flujo magnético B y la intensidad de campo magnético H .

$$B = \frac{C R_p V_c}{n S} = \frac{10 \cdot 10^{-6} * 150000 * V_c}{92 * 44,4176 * 10^{-4}} = 3,6706 * V_c$$

$$H = \frac{n V_R}{R_s l_c} = \frac{92 * V_R}{0,235 * 0,748} = 523,3814 * V_R$$

Se realizaron incrementos de tensión de alimentación desde 0 hasta 130 V, registrando en cada paso los valores de tensión en el condensador, tensión en la resistencia serie, tensión en bornes de la bobina, tensión inducida en el secundario, corriente y potencia.

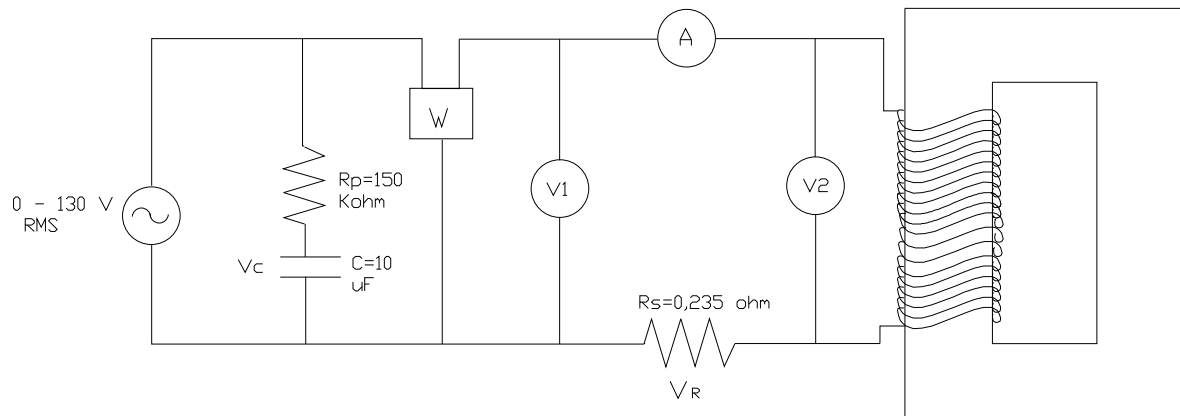


Figura 3.2: Montaje de elementos para encontrar las curvas características

3.2.3.1. Lazo de histéresis

Implementando el circuito de la figura 3.2, y empleando un osciloscopio se conectó el canal Y al condensador y el canal X a la resistencia serie, lográndose visualizar el ciclo de histéresis en cada uno de los incrementos de la tensión de alimentación. A continuación se presenta dicho comportamiento.

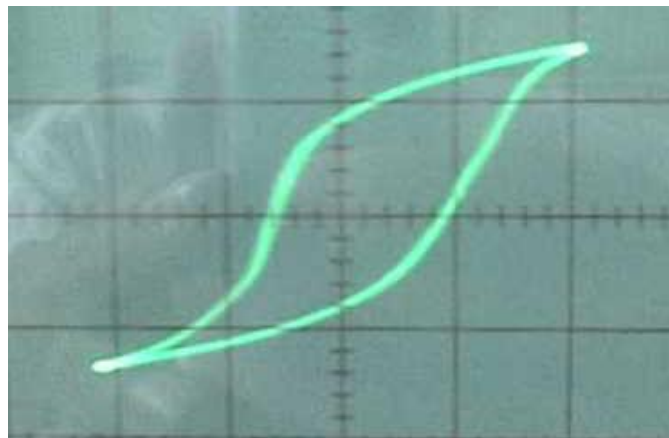


Figura 3.3: Ciclo de histéresis 80,4 V

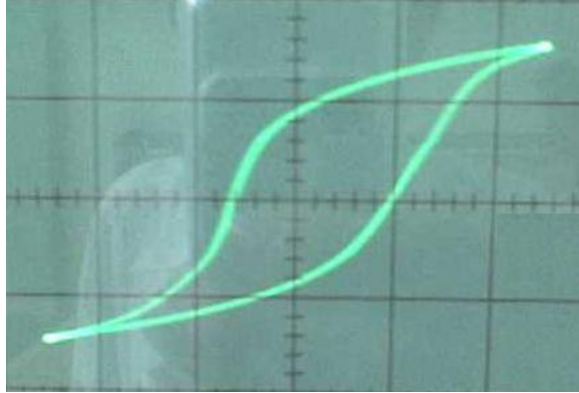


Figura 3.4: Ciclo de histéresis 85,3 V

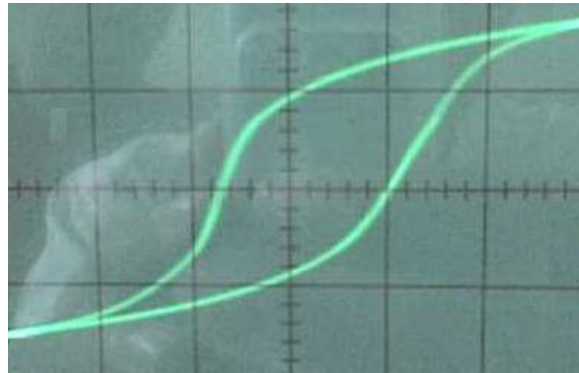


Figura 3.5: Ciclo de histéresis 90,4 V

Análisis del lazo de histéresis para 80,4 V. Cuando la tensión aplicada en bornes de la bobina primaria alcanza los 80,4 V, se registra una tensión en el condensador de $V_c = 135 \text{ mV}$ y una tensión en la resistencia serie de $V_R = 147 \text{ mV}$, en base a estos valores se obtiene un valor de $B = 0,7008 \text{ T}$ y un valor de $H = 108,8055 \text{ AVuelta/m}$.

Visualmente se aprecia que el núcleo comienza a saturarse para una densidad de flujo magnético inferior a los 1,1 T, y una tensión inferior a los 120 V de diseño.

Análisis del lazo de histéresis para 90,4 V. Cuando la tensión aplicada en bornes de la bobina primaria alcanza los 90,4 V, se registra una tensión en el condensador de $V_c = 152 \text{ mV}$ y una tensión en la resistencia serie de $V_R = 195 \text{ mV}$, en base a estos valores se obtiene un valor de $B = 0,7891 \text{ T}$ y un valor de $H = 144,338 \text{ AVuelta/m}$.

Visualmente se aprecia que el núcleo ya está saturado.

3.2.3.2. Curva densidad de flujo magnético B contra intensidad de campo magnético H .

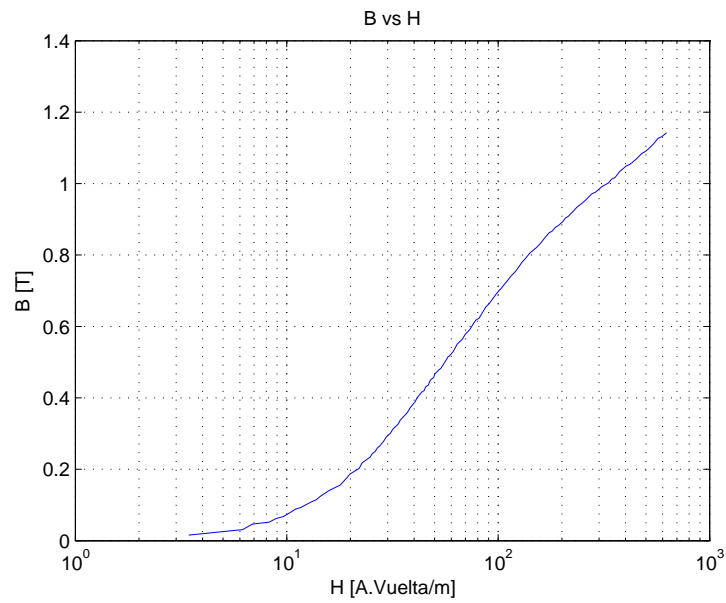


Figura 3.6: B vs H

3.2.3.3. Curva permeabilidad relativa μ_r contra intensidad de campo magnético H .

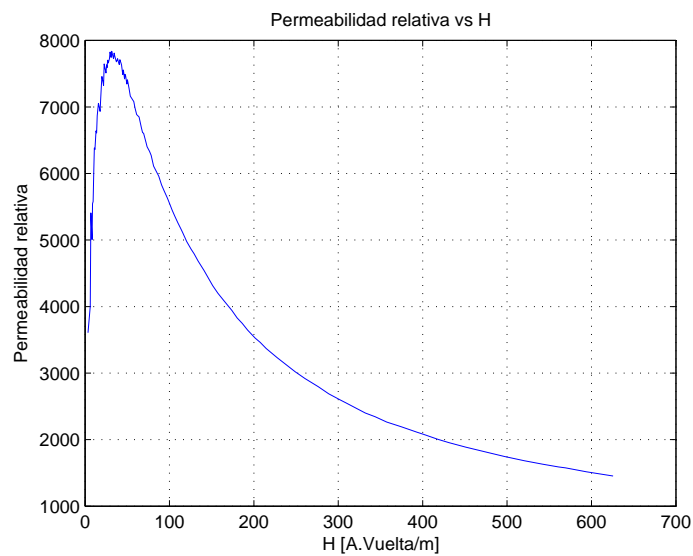


Figura 3.7: Permeabilidad relativa vs H

3.2.3.4. Curva de densidad de flujo magnético B contra voltamperios por kilogramo $(va)_u$ en $[VA/kg]$.

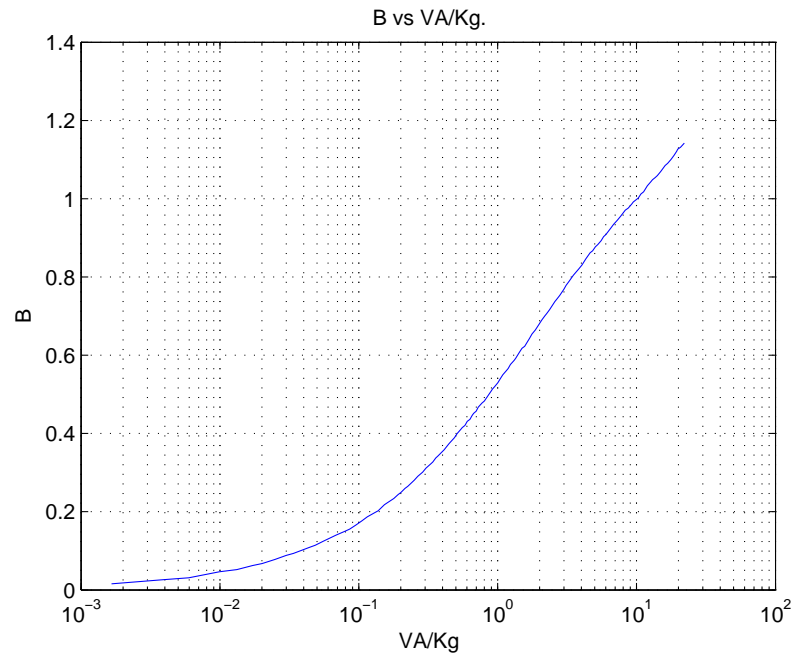


Figura 3.8: B vs VA/kg .

3.2.3.5. Curva de la tensión aplicada en bornes de la bobina primaria V_i , tensión inducida V_{ind} contra corriente de excitación I_e .

En la figura 3.9 se puede apreciar que el núcleo alcanza el punto de saturación alrededor de los 80 V verificando lo expuesto en el análisis del numeral 3.2.3.1. Gráficamente se puede apreciar el codo que corresponde a la región donde la curva deja de ser lineal.

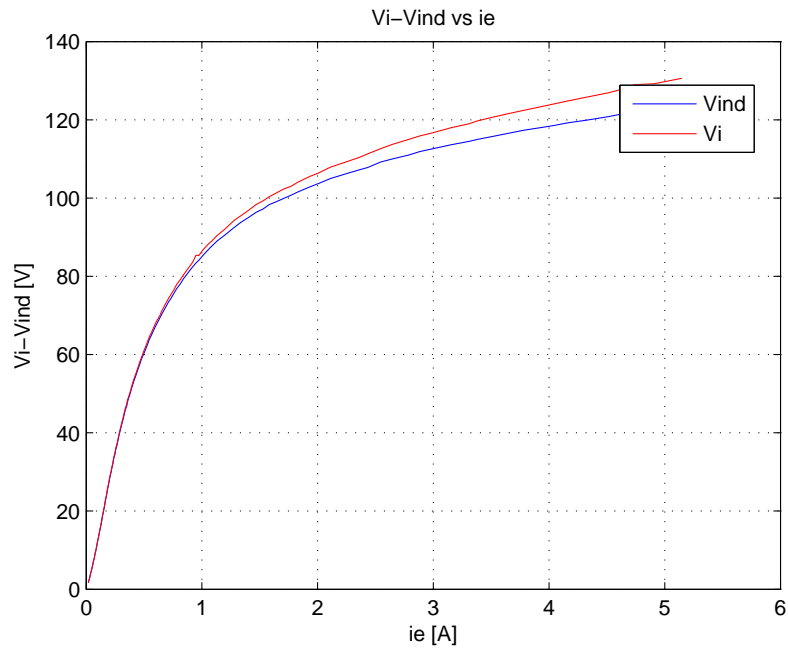


Figura 3.9: Vi - Vind vs Ie

3.2.3.6. Curva de densidad de flujo magnético B contra pérdidas en el hierro W_o .

Esta curva se determinó empleando el circuito esquemático de la figura 3.2 y registrando los comportamientos de las tensiones, corrientes y potencia del circuito.

Donde:

$$W_o = W - W_I - W_{RS} \quad (3.1)$$

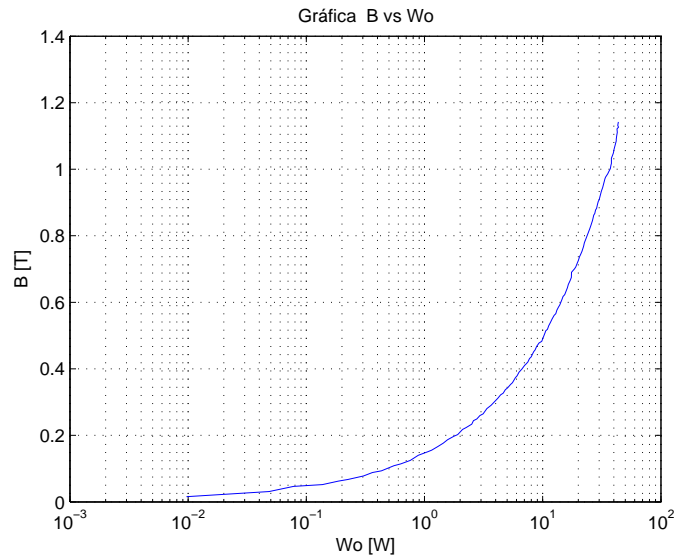


Figura 3.10: B vs Wo

3.2.4. Estimación de parámetros para el núcleo de hierro y el núcleo de madera.

Utilizando el analizador de redes se estiman los valores de R y L tanto de la bobina devanada en el núcleo de madera, como en el núcleo de hierro. Previo a este análisis se realiza un estudio de los parámetros del núcleo de madera para corriente continua y corriente alterna.

3.2.4.1. R y L del núcleo de madera para corriente alterna y corriente continua

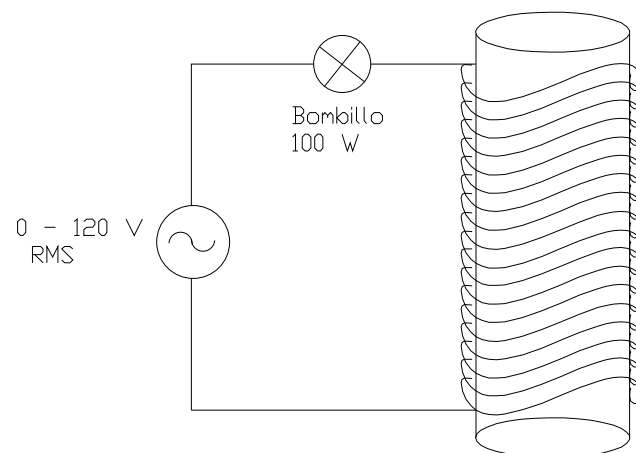
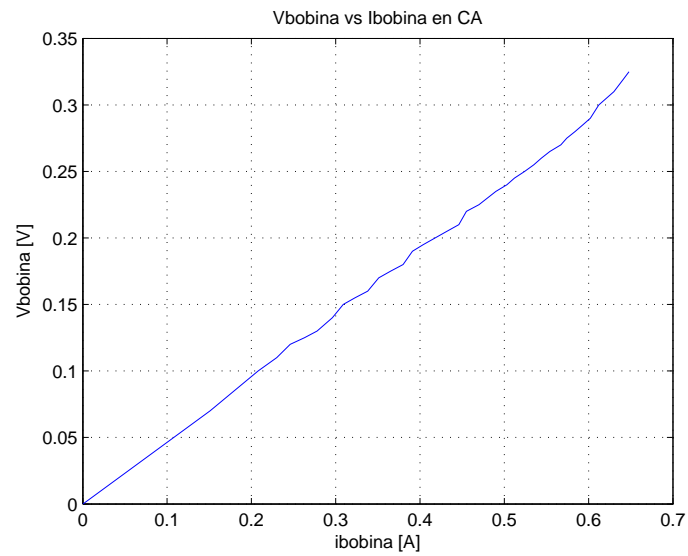
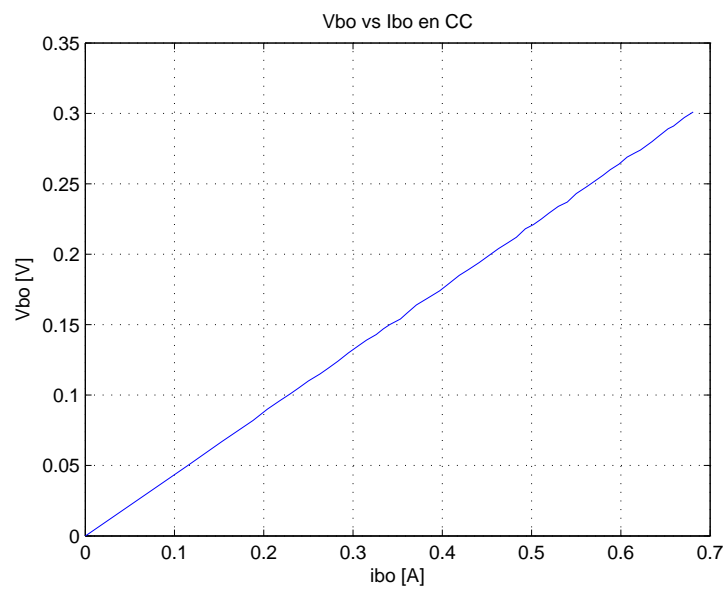


Figura 3.11: Montaje de bobina con núcleo de madera

Figura 3.12: V_{bobina} vs I_{bobina} en C.A

Cambiando la fuente de alimentación de C.A de la figura 3.11 por una fuente de C.C se obtiene el siguiente comportamiento.

Figura 3.13: V_{bobina} vs I_{bobina} en C.C

A partir de la pendiente de la figura 3.13 se determina el valor de la resistencia en C.C ($R_{cc} = 0,44 \Omega$). De igual forma la pendiente de la figura 3.12 representa la impedancia ($Z = 0,48 \Omega$) de la bobina alimentada con C.A .

$$Z = \sqrt{(R)^2 + (WL)^2} \quad (3.2)$$

Asumiendo que la resistencia en corriente alterna R_{ca} es equivalente al valor de la resistencia en corriente continua ($R_{cc} = 0,44 \Omega$) corregida por un factor de (1,02) que representa el efecto pelicular al ser alimentada la bobina con corriente alterna:

$$R_{ca} = 0,44 * 1,02 = 0,4488 \Omega$$

$$WL = \sqrt{(Z)^2 - (R_{ca})^2} = \sqrt{(0,48)^2 - (0,4488)^2} = 0,170230 \Omega$$

Donde:

$$L = \frac{0,170230}{120 * \pi} = 451,55 \mu H$$

3.2.4.2. R y L del núcleo de madera empleando el analizador de redes

Empleando la herramienta de Matlab se encontró la solución al sistema matricial de lo establecido en el numeral 2.2.2.1. Logrando determinar los parámetros del núcleo de madera para valores de tensión desde 5 hasta 120 V .

Cuadro 3.1: Datos de R y L para algunas tensiones inferiores e iguales a 120 V

Tensión (V)	$R(\Omega)$	$L (\mu H)$
10	0,515	431,66
40	0,482	412,47
100	0,4693	371,25
110	0,4588	446,51
120	0,4482	413,75

Los valores R y L encontrados son del orden de los determinados con el método anterior.

3.2.4.3. Parámetros con núcleo de hierro

Variando la tensión en bornes del transformador para valores desde 5 hasta 120 V, se encuentran los parámetros que representan la bobina primaria y la rama de magnetización a cada nivel de tensión. Estas medidas se realizaron con el analizador de redes y posteriormente se utilizó la herramienta de

Matlab para hallar dichos parámetros, igualmente se usó la función FFT de Matlab para separar la componente fundamental (60 Hz) de la componente de C.C y de los armónicos restantes de cada señal medida. Ver numeral 2.2.2.2.

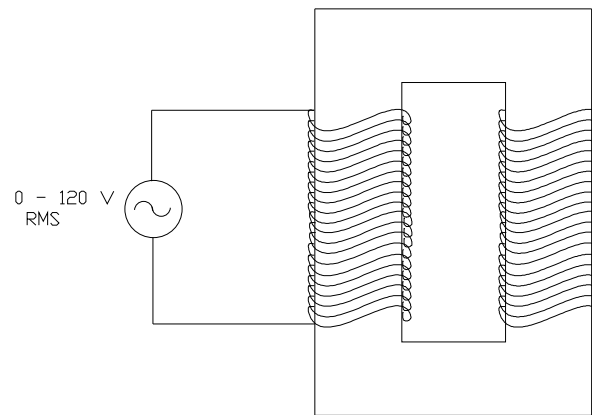


Figura 3.14: Montaje de bobina con núcleo de hierro

Cuadro 3.2: Z_1 y Z_m para diferentes tensiones aplicadas en bornes del transformador monofásico

Tensión [V]	$Z_1[\Omega]$	$Z_m[\Omega]$
5	0,7041 + 0,5222 i	74,7630 + 106,780 i
10	0,5503 + 0,3626 i	98,1260 + 118,340 i
15	0,3847 + 0,3277 i	112,070 + 122,990 i
20	0,3883 + 0,3045 i	132,680 + 136,030 i
25	0,4016 + 0,2538 i	146,750 + 146,670 i
30	0,2886 + 0,1788 i	150,840 + 151,130 i
35	0,2397 + 0,1402 i	149,890 + 151,850 i
40	0,2961 + 0,1761 i	145,170 + 152,440 i
45	0,3431 + 0,1750 i	137,940 + 151,750 i
50	0,3294 + 0,1368 i	129,140 + 150,270 i
55	0,3729 + 0,0565 i	120,180 + 148,360 i
60	0,3608 + 0,1390 i	109,430 + 144,920 i
65	0,3492 + 0,1005 i	98,8360 + 141,340 i
70	0,4454 + 0,1991 i	87,7000 + 136,460 i
75	0,4936 + 0,2686 i	78,0850 + 131,170 i
80	0,5155 + 0,2859 i	67,7870 + 124,380 i
85	0,5711 + 0,3882 i	58,3070 + 117,000 i
90	0,6183 + 0,4791 i	49,1840 + 108,700 i
95	0,6557 + 0,5809 i	40,6368 + 99,4698 i
100	0,6550 + 0,6128 i	32,7458 + 89,1786 i
105	0,6722 + 0,6863 i	26,3059 + 79,1733 i
110	0,6907 + 0,8142 i	20,4900 + 68,8340 i
115	0,6983 + 0,8249 i	15,9068 + 59,3894 i
120	0,7061 + 0,9876 i	12,4781 + 51,1733 i

En el cuadro 3.2 se muestra el comportamiento de los parámetros del núcleo de hierro para cada nivel de tensión, nótese que las impedancias luego de determinado valor de tensión tienden a disminuir, siendo notorio sobre todo a valores que sobrepasan el punto de saturación ($\approx 80 V$).

3.2.5. Determinación de pérdidas

$$W_o = \text{Real}(Z_m) * \|I_1\|^2 \quad (3.3)$$

$$W_I = \text{Real}(Z_1) * \|I_1\|^2 \quad (3.4)$$

Cuadro 3.3: Pérdidas de hierro y cobre para el transformador en estudio.

Tensión [V]	W_o [W]	W_I [W]
5	0,1011	0,00095
10	0,3838	0,00220
15	0,8354	0,00290
20	1,3783	0,00400
25	1,9909	0,00540
30	2,7832	0,00530
35	3,7890	0,00610
40	4,9837	0,01020
45	6,3253	0,01570
50	7,8488	0,02000
55	9,5436	0,02960
60	11,4536	0,03780
65	13,4533	0,04750
70	15,7372	0,07990
75	18,1943	0,11500
80	21,0657	0,16020
85	24,0418	0,23550
90	27,4658	0,34530
95	31,2320	0,50390
100	35,9447	0,71900
105	41,0318	1,04840
110	47,6118	1,60500
115	55,1373	2,42040
120	63,8539	3,61360

3.3. Estimación de parámetros del transformador

3.3.1. Especificación del transformador utilizado

Se utilizó un transformador trifásico perteneciente al laboratorio de máquinas de la UIS.

$Potencia = 8 \text{ kVA}$.

$V_L \text{ alta} = 380 \text{ kV}$.

$V_L \text{ baja} = 220 \text{ kV}$.

3.3.2. Parámetros del transformador

A partir de la prueba en vacío del transformador alimentado a tensión nominal se encontraron los parámetros, utilizando la siguiente expresión.

$$Z_1 + Z_m = \frac{V_1}{I_1} \quad (3.5)$$

Siendo:

V_1 = Tensión en la bobina primaria en V .

I_1 = Corriente en la bobina primaria en A .

$$Z_{1m} = Z_1 + Z_m = 208,31 + 394,49 i \text{ } [\Omega] \quad (3.6)$$

Conociendo la impedancia ($Z_1 + Z_m$) se determinan los parámetros Z_1 , Z_2 , y Z_m cuando el transformador está operando bajo carga. Para esto se aplica el método enunciado en el numeral 2.4.1.

Cuadro 3.4: Parámetros del transformador trifásico de 8 kVA

$Z_1[\Omega]$	$Z_m[\Omega]$	$Z_2[\Omega]$
$0,2839 + 0,1823 i$	$208,03 + 394,31 i$	$0,273 + 0,1517 i$

Capítulo 4

Estudio económico del transformador en funcionamiento

4.1. Introducción

Para el estudio económico del transformador de distribución se emplean las curvas de demanda diaria que corresponden a los estratos residenciales suministrados por la norma [ESSA, 2005]. Para este estudio se estimaron los parámetros de un transformador trifásico de 8 kVA , con el objeto de determinar las pérdidas en el hierro y en el cobre experimentadas por el transformador en el ciclo de trabajo. Después de establecidas las pérdidas energéticas por período de operación, se determinan los costos de estas pérdidas energéticas y se procede a capitalizarlos en un tiempo previsto.

4.2. Curvas de demanda diaria

Las siguientes curvas representan las demandas promedio por hora de los sectores residenciales correspondientes a los estratos 1, 2, 3, 4, 5 y 6 suministradas por la norma [ESSA, 2005]. Estas gráficas son las empleadas para analizar el probable comportamiento de las pérdidas energéticas experimentadas por el transformador de distribución al ser sometido a estas variaciones de carga. Es necesario recordar que el transformador empleado es utilizado para aplicar la metodología propuesta, debido a que la selección del transformador depende del estrato al considerar en cada uno de estos los factores de demanda y diversidad respectivamente.

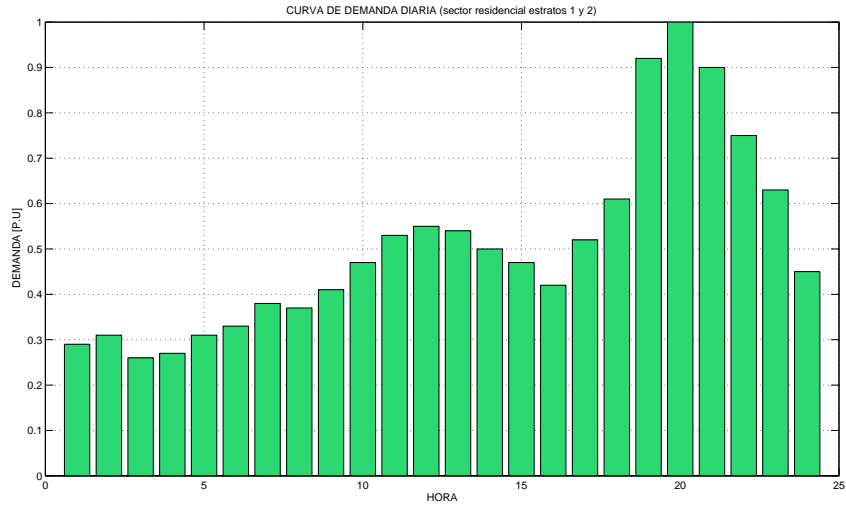


Figura 4.1: Curva de demanda diaria (Sector residencial estratos 1 y 2)

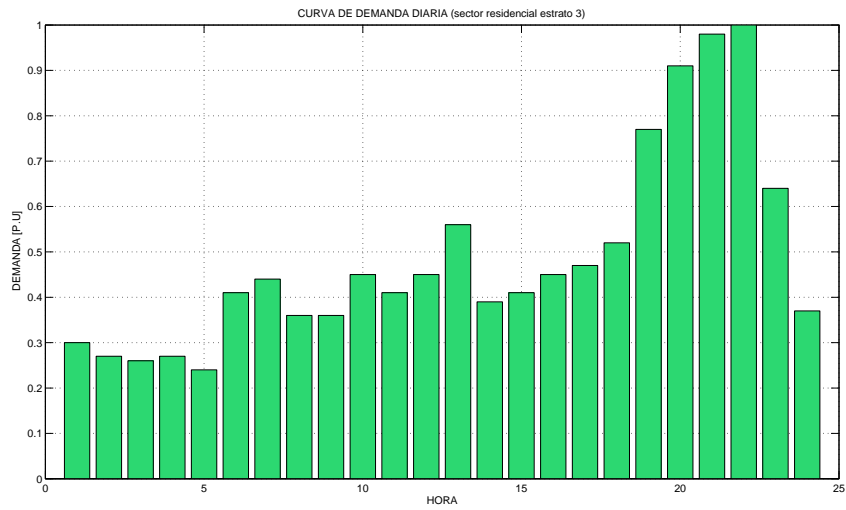


Figura 4.2: Curva de demanda diaria (Sector residencial estrato 3)

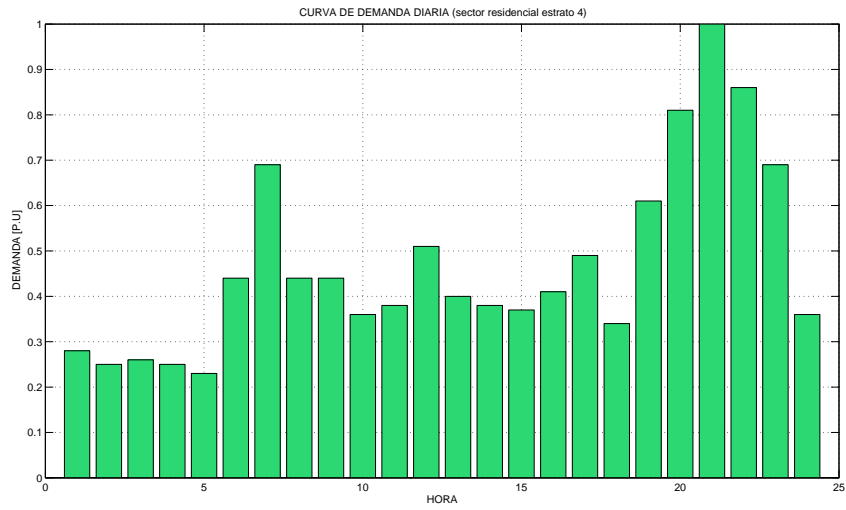


Figura 4.3: Curva de demanda diaria (Sector residencial estrato 4)

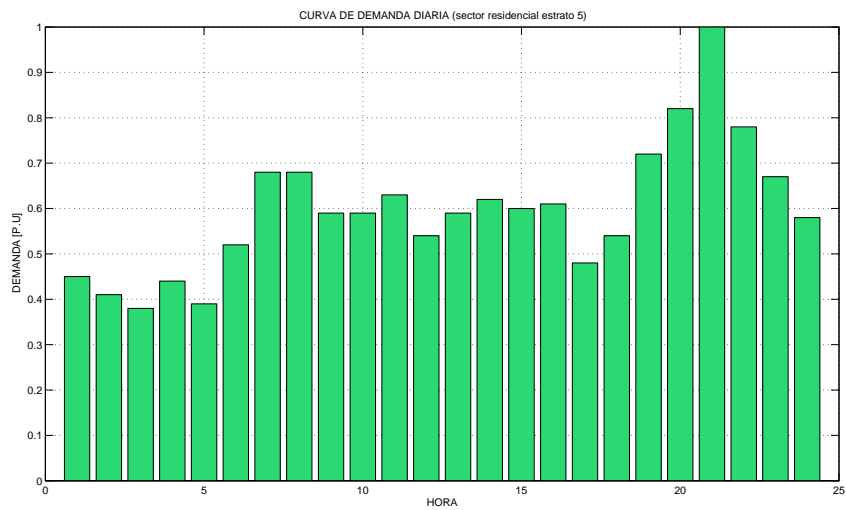


Figura 4.4: Curva de demanda diaria (Sector residencial estrato 5)

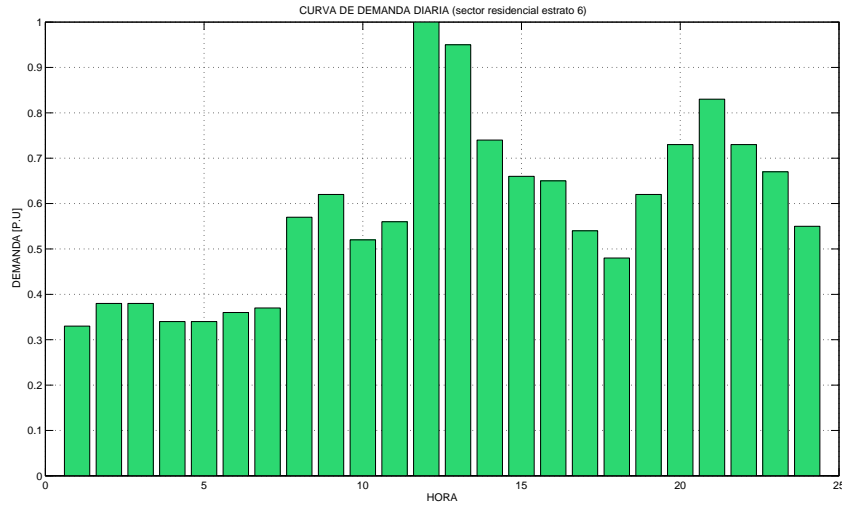


Figura 4.5: Curva de demanda diaria (Sector residencial estrato 6)

A partir de los parámetros hallados en la sección 3.3.2 se realiza el estudio que cuantifica las pérdidas energéticas diarias para un día típico de trabajo y para un día cualquiera festivo (se asume que equivale a 0,6 veces la demanda de energía de un día de trabajo típico). Para el cálculo de las pérdidas y costos anuales se toman 245 días laborales y 119 días festivos o no laborales, se emplea un factor de potencia de 0,9 en atraso y 120 V, como tensión de operación en el punto de carga. Las siguientes expresiones representan la forma de hallar las pérdidas, tanto en el hierro como en el cobre para un período de trabajo establecido.

$$ang = \arccos(FP) \quad (4.1)$$

$$S = S_t (\cos(ang) + i \sin(ang)) \quad (4.2)$$

$$I_2 = \text{conj}\left(\frac{S}{a V_2}\right) \quad (4.3)$$

$$E = I_2 Z_2 + V_2 \quad (4.4)$$

$$I_m = \frac{E}{Z_m} \quad (4.5)$$

$$I_1 = I_2 + I_m \quad (4.6)$$

$$W_o = Real (Z_m) \|I_m\|^2 \quad (4.7)$$

$$W_o t = \left[\sum_{i=1}^{24} (W_{oi}) \right] \quad (4.8)$$

$$Pa_{fe} = W_o \text{ anual} = (N_t)(W_o t) + (N_f)(W_o f) \quad (4.9)$$

$$W_I = Real (Z_1) \|I_1\|^2 + Real (Z_2) \|I_2\|^2 \quad (4.10)$$

$$W_I t = \left[\sum_{i=1}^{24} (W_{Ii}) \right] \quad (4.11)$$

$$Pa_{cu} = W_I \text{ anual} = (N_t)(W_I t) + (N_f)(W_I f) \quad (4.12)$$

$$P \text{ anuales} = Pa_{fe} + Pa_{cu} \quad (4.13)$$

Donde:

ang = Ángulo.

FP = Factor de potencia.

S_t = Vector representativo de las demandas diarias dependientes del estrato VA .

S = Vector representativo de las componentes activas y reactivas de las demandas diarias dependientes del estrato VA .

a = Relación de transformación del transformador.

I_2 = Corriente en el lado de baja tensión (secundario, suministro de carga) A .

I_1 = Corriente en el lado de alta tensión (primario) A .

I_m = Corriente en la rama de magnetización A .

E = Tensión inducida V .

V_2 = Tensión de operación vista por la carga V .

Z_1 = Impedancia del devanado primario Ω .

Z_2 = Impedancia del devanado secundario Ω .

Z_m = Impedancia de la rama de magnetización Ω .

Pa_{cu} = Pérdidas anuales en el cobre.

Pa_{fe} = Pérdidas anuales en el hierro.

P anuales = Pérdidas anuales.

W_o = Vector representativo de las pérdidas en el hierro W .

$W_o t$ = Pérdidas en el hierro experimentadas en el transformador durante un día laboral W .

$W_o f$ = Pérdidas en el hierro experimentadas en el transformador durante un día no laboral W .

W_I = Vector representativo de las pérdidas en el cobre W .

$W_I t$ = Pérdidas en el cobre experimentadas en el transformador durante un día laboral W .

$W_I f$ = Pérdidas en el cobre experimentadas en el transformador durante un día no laboral W .

N_t = Número de días laborales en un año.

N_f = Número de días no laborales en un año.

El cuadro 4.1 contiene el comportamiento de las pérdidas anuales experimentadas en el transformador reparado, en cada uno de los estratos residenciales contemplados en la norma [ESSA, 2005].

Cuadro 4.1: Pérdidas de energía en el hierro, cobre y totales para el transformador en estudio.

ESTRATO	$kW - H$ anual Cu	$kW - H$ anual Fe	$kW - H$ total anual
1-2	653,791	1215,23	1869,02
3	620,518	1213,98	1834,5
4	570,825	1212,88	1783,71
5	813,489	1220,38	2033,87
6	808,836	1219,54	2028,38

De las pérdidas anuales en el transformador establecidas en el anterior cuadro, se procede a la determinación de los costos de estas pérdidas para diferentes años de amortización (Ver cuadro 4.2). Para la evaluación de los costos de estas pérdidas se emplea una tasa de interés compuesto anual del 24% y el costo del kilovatio hora de 200 pesos. De lo contemplado en el numeral 2.4.3 se emplea la siguiente expresión:

$$C_{DR} = Pa_{feR} p \left[\frac{100}{r} \left(1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{r}{100}\right)^\tau} \right) \right] + Pa_{cuR} p \left[\frac{100}{r} \left(1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{r}{100}\right)^\tau} \right) \right] \quad (4.14)$$

Donde:

C_{DR} = Capitalización de pérdidas del transformador reparado.

Pa_{feR} = Pérdidas de energía en el hierro anuales del transformador reparado.

Pa_{cuR} = Pérdidas de energía en el cobre anuales del transformador reparado.

r = Tasa de interés compuesto anual.

p = Costo de la energía en pesos por kilovatio-hora en el lugar de la instalación.

τ = Período de amortización en años.

Cuadro 4.2: Costos en miles de pesos de las pérdidas de energía para diferentes años de amortización en el transformador reparado.

ESTRATO	AÑO 1	AÑO 3	AÑO 6	AÑO 9	AÑO 12	AÑO 15
1-2	301,455	740,618	1129,06	1332,80	1439,65	1495,70
3	295,887	726,940	1108,21	1308,18	1413,07	1468,08
4	287,695	706,813	1077,53	1217,96	1373,94	1427,43
5	328,044	805,944	1228,65	1450,36	1566,64	1627,62
6	327,158	803,767	1225,33	1446,44	1562,41	1623,23

Para la determinación de los costos totales de la operación del transformador reparado, se aplica lo contemplado en el numeral 2.4.5 empleándose las siguientes expresiones:

$$C_{MR} = MantR \left[\frac{100}{r} \left(1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{r}{100}\right)^{\tau}} \right) \right] \quad (4.15)$$

$$C_R = C_{oR} + C_{DR} + C_{MR} \quad (4.16)$$

Donde:

C_{MR} = Capitalización del costo de mantenimiento del transformador reparado.

$MantR$ = Costo del mantenimiento anual del transformador reparado.

C_{DR} = Capitalización de pérdidas del transformador reparado.

C_{oR} = Costo de reparación del transformador.

C_R = Costo total del transformador reparado en un tiempo determinado.

Para la evaluación de los costos totales se establece que el transformador reparado tiene un valor de 1,500,000 pesos y los costos de mantenimiento anual en 200,000 pesos. (Ver cuadro 4.3).

Cuadro 4.3: Costos totales en millones de pesos del transformador reparado para diferentes años de amortización.

ESTRATO	AÑO 1	AÑO 3	AÑO 6	AÑO 9	AÑO 12	AÑO 15
1-2	1,9228	2,6125	3,1960	3,5020	3,6626	3,7467
3	1,9477	2,6001	3,1771	3,4797	3,6384	3,7217
4	1,9403	2,5818	3,1493	3,4469	3,6630	3,6848
5	1,9769	2,67181	3,2864	3,6087	3,7778	3,8665
6	1,9761	2,6698	3,2833	3,6051	3,7739	3,8624

4.3. Viabilidad económica

Para el estudio de la viabilidad económica se toma el cuadro 4.1. Hay se estipula el comportamiento de las pérdidas de energía anuales tanto en el hierro como en el cobre para el transformador supuesta-

mente reparado, como lo que se busca es compararlo con uno nuevo se asume que el comportamiento energético que experimentaría este transformador equivale al 50 % menos de las pérdidas de energía en el hierro y 17 % menos de las pérdidas en el cobre, de las estipuladas en el cuadro 4.1.

Cuadro 4.4: Pérdidas de energía en el hierro, cobre y totales para el transformador nuevo.

ESTRATO	$kW - H$ anual Cu	$kW - H$ anual Fe	$kW - H$ total anual
1-2	542,646	607,615	1150,261
3	515,029	606,99	1122,019
4	473,784	606,44	1080,224
5	675,195	610,19	1285,385
6	671,333	609,77	1281,103

De las pérdidas anuales en el transformador establecidas en el anterior cuadro, se procede a la determinación de los costos de estas pérdidas para diferentes años de amortización (Ver cuadro 4.5). Para la evaluación de los costos de estas pérdidas se emplea una tasa de interés compuesto anual del 24 % y el costo del kilovatio hora en 200 pesos. De lo contemplado en el numeral 2.4.3 se emplea la siguiente expresión:

$$C_{DN} = Pa_{feN} p \left[\frac{100}{r} \left(1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{r}{100}\right)^\tau} \right) \right] + Pa_{cuN} p \left[\frac{100}{r} \left(1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{r}{100}\right)^\tau} \right) \right] \quad (4.17)$$

Donde:

C_{DN} = Capitalización de pérdidas del transformador nuevo.

Pa_{feN} = Pérdidas de energía en el hierro anuales del transformador nuevo.

Pa_{cuN} = Pérdidas de energía en el cobre anuales del transformador nuevo.

r = Tasa de interés compuesto anual.

p = Costo de la energía en pesos por kilovatio-hora en el lugar de la instalación.

τ = Período de amortización en años.

Cuadro 4.5: Costos en miles de pesos de las pérdidas de energía para diferentes años de amortización en el transformador nuevo.

ESTRATO	AÑO 1	AÑO 3	AÑO 6	AÑO 9	AÑO 12	AÑO 15
1-2	177,831	436,898	666,045	786,230	849,265	882,326
3	173,679	426,697	650,494	767,873	829,436	861,726
4	167,556	411,655	627,563	740,804	800,198	831,349
5	197,674	485,649	740,366	873,962	944,031	980,782
6	197,025	484,053	737,933	871,090	940,929	977,558

Para la determinación de los costos totales de la operación del transformador nuevo, se aplica lo contemplado en el numeral 2.4.5 empleandose las siguientes expresiones:

$$C_{MN} = MantN \left[\frac{100}{r} \left(1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{r}{100}\right)^\tau} \right) \right] \quad (4.18)$$

$$C_N = C_{oN} + C_{DN} + C_{MN} \quad (4.19)$$

Donde:

C_{MN} = Capitalización del costo de mantenimiento del transformador nuevo.

$MantN$ = Costo del mantenimiento anual del transformador nuevo.

C_{DN} = Capitalización de pérdidas del transformador nuevo.

C_{oN} = Costo de compra del transformador.

C_N = Costo total del transformador nuevo en un tiempo determinado.

Para la evaluación de los costos totales se establece que la compra del transformador tuvo un valor de 3,000,000 pesos y los costos de mantenimiento anual en 100,000 pesos. (Ver cuadro 4.6).

Cuadro 4.6: Costos totales en millones de pesos del transformador nuevo para diferentes años de amortización.

ESTRATO	AÑO 1	AÑO 3	AÑO 6	AÑO 9	AÑO 12	AÑO 15
1-2	3,2584	3,6350	3,9680	4,1427	4,2344	4,2824
3	3,2543	3,6248	3,9525	4,1244	4,2145	4,2618
4	3,2482	3,6097	3,9296	4,0973	4,1853	4,2314
5	3,2783	3,6837	4,0424	4,2305	4,3291	4,3809
6	3,2776	3,6821	4,0399	4,2276	4,3260	4,3776

Los porcentajes de costos que en la actualidad se manejan entre los transformadores reparados y los nuevos están en promedio del 50 %, adicionalmente si estos transformadores cumplen con las especificaciones técnicas de la NTC 1954, permite establecer que la viabilidad económica de estos transformadores supera los 15 años. Este estudio nos permite establecer que las normas establecidas para los transformadores reparados más que determinantes en la viabilidad lo que buscan es un uso racional de la energía.

Capítulo 5

Implementación de la herramienta software

5.1. Introducción

En este capítulo se presenta la herramienta en Matlab de la metodología propuesta para el proceso de evaluación y reparación. El objetivo es representar de manera confiable el comportamiento de las pérdidas en el momento de operación. También se describe detalladamente cada una de las funciones utilizadas en la metodología y las funciones utilizadas en la interfaz gráfica del usuario.

5.2. Esquema del proceso

Las figuras 5.1 y 5.2 muestran la secuencia a seguir en el proceso de reparar un transformador, partiendo de la evaluación y llegando a la cuantificación de costos que se asumen al reparar el mismo si es que se lleva a cabo.

Se implementó la herramienta en Matlab porque este software tiene funciones muy completas que permiten realizar análisis de las señales que se manejan. También tiene opción para el desarrollo de interfaz gráfica, lo cual hace posible una interacción más amena entre el usuario y la aplicación.



Figura 5.1: Esquema de evaluación del núcleo

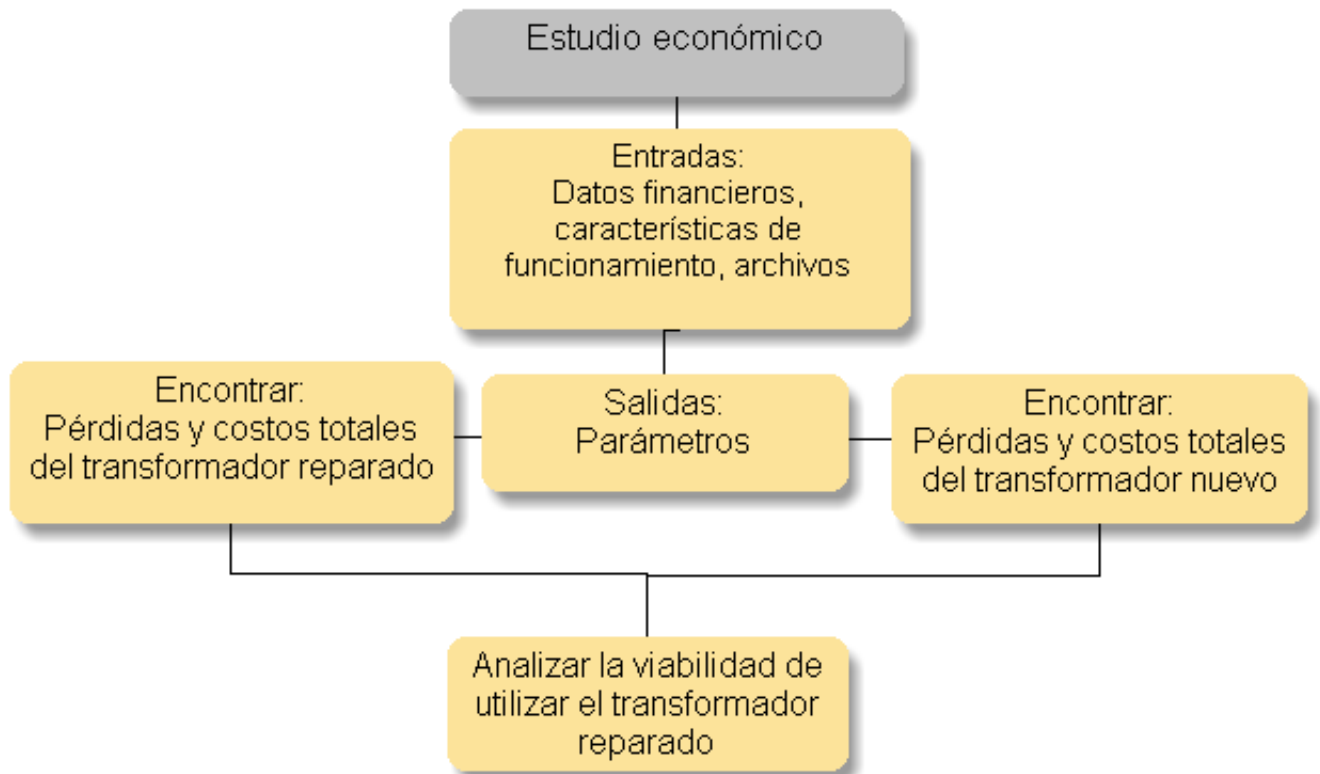


Figura 5.2: Esquema del proceso económico

5.3. Funciones

Esta sección muestra de forma detallada las funciones utilizadas que plasman de forma automática la metodología propuesta.

Estas se muestran de la forma $[Salidas]=Función[Entradas]$, debido a que es el formato que maneja Matlab.

5.3.1. Función *calibre*

Esta función permite la selección del número de espiras para diseñar las bobinas que se adaptan al núcleo del transformador en el proceso de evaluación. Adicionalmente se calcula el valor de la corriente que la bobina debe soportar para posteriormente seleccionar el calibre.

Sintaxis: $[n_s \ I_n] = calibre(S_n, S_m, B)$

De las entradas:

- S_n es el área de la sección transversal de la columna en m^2 .
- Sm es la potencia monofásica en kVA .
- B es la densidad de flujo magnético en *Teslas*.

Las salidas de esta función son el número de espiras n_s calculadas y la capacidad de corriente In que debe soportar esta bobina.

5.3.2. Función *curvas*

Esta función halla las diferentes características magnéticas y las pérdidas, necesarias para mostrar las curvas que se utilizan en el proceso de evaluación del núcleo.

Sintaxis: [$H B W_o Wi Var Ur$] = calibre($C, r_p, n_s, S_n, V_c, l_c, V_r, r_s, I_e, G_s, G, S_c, W$)

Las entradas son:

- C es el valor de la capacitancia de la rama en paralelo en Faradios F .
- r_p es el valor de la resistencia de la rama en paralelo Ω .
- n_s es el número de espiras V_u .
- S_n es el área de la columna en m^2 .
- V_c es un vector de longitud equivalente al número de datos registrados que representa el valor pico de la tensión en el condensador en V .
- V_r es un vector de longitud equivalente al número de datos registrados que representa el valor pico de la tensión en la resistencia serie en V .
- l_c la longitud media del circuito magnético.
- r_s resistencia serie Ω .
- I_e es un vector de longitud equivalente al número de datos registrados que representa la corriente de excitación A .
- S_c la sección del conductor en mm^2 .
- G_s peso total del devanado alojado en el núcleo del transformador en kg .
- G peso específico de la chapa kg/dm^3 .
- W es un vector de longitud equivalente al número de datos registrados que representa la potencia consumida por el circuito montado para la evaluación en W .

Las salidas son:

- H es un vector de longitud equivalente al número de datos registrados que representa la intensidad de campo magnético $\frac{AV_u}{m}$.
- B es un vector de longitud equivalente al número de datos registrados que representa la densidad de flujo magnético en *Teslas*.
- W_o es un vector de longitud equivalente al número de datos registrados que representa las pérdidas en el hierro en W .
- W_i es un vector de longitud equivalente al número de datos registrados que representa las pérdidas en el cobre en W .
- Ur es un vector de longitud equivalente al número de datos registrados que representa la permeabilidad relativa.
- Var es un vector de longitud equivalente al número de datos registrados que representa los voltamperios por kilogramo VA/kg .

5.3.3. Función *graficasal*

Esta función permite seleccionar la curvas correspondientes al comportamiento magnético o eléctrico que el usuario desee visualizar.

Sintaxis: [*Vargout*] = *graficasal*(*Vargin*)

Las entradas:

- En *Vargin* se almacenan todas las señales $H B W W_I Ur Var$, las cuales son salida de la función *curvas*

Las salidas son:

Con *Vargout* se logra tener como salida los datos a graficar.

- Curva densidad de flujo magnético B contra intensidad de campo magnético H .
- Curva de densidad de flujo magnético B contra voltamperios por kilogramo $(va)_u$ en $[VA/kg]$.
- Curva de la tensión aplicada en bornes de la bobina primaria V_i , tensión inducida V_{ind} contra corriente de excitación I_e
- Curva permeabilidad relativa μ_r contra intensidad de campo magnético H .
- Curva de densidad de flujo magnético B contra pérdidas en el hierro W_o .
- Curva de densidad de flujo magnético B contra pérdidas en el cobre W_I .

5.3.4. Función *perdidas1phi*

Esta función halla los parámetros para valores de tensión en bornes del transformador de 0 a 120 V, a partir de los archivos de datos de tensiones y corrientes adquiridas con el analizador de redes. Luego se hallan los valores de pérdidas de cobre y hierro para cada tensión de alimentación.

Sintaxis: [*Zm Z1 Wo Wi*] = *perdidas1phi*(*ruta2, datos, numero, tmp*)

Las entradas:

- En *ruta2* se busca la ruta seguida para encontrar la carpeta en el que se archivan los datos adquiridos por el analizador para cada tensión.
- *datos* busca cada uno de los archivos registrado para cada tensión de forma ordenada y lo carga para procesar.
- *numero* es una valor que representa el número de archivos de datos que se deben procesar, es decir el número de tensiones que se registraron de 0 a 120 V.

Las salidas son:

Con *Vargout* se logra tener como salida los datos a graficar.

- *Zm* es la impedancia serie de magnetización en Ω .
- *Z1* es la impedancia que representa la bobina primaria del transformador Ω .
- *Wo* es un vector de longitud equivalente al número de datos registrados con el analizador que representa las pérdidas en el cobre en *W*.
- *Wi* es un vector de longitud equivalente al número de datos registrados con el analizador que representa las pérdidas en el hierro en *W*.

5.3.5. Función *vacio3phi*

Esta función halla el valor de la impedancia $Z1+Zm$, representada como *Z1m*. Esta se encuentra a partir de los datos adquiridos por el analizador de redes al transformador trifásico en vacío y empleando solamente la componente fundamental de estas señales mediante el estudio de las series de Fourier.

Sintaxis: [*Z1m*] = *vacio3phi*(*V1, I1*)

Las entradas:

- *V1* es el valor de tensión registrado en el primario.
- *I1* es el valor de corriente registrado en el primario.

La salida es:

- $Z1m$ es la impedancia $Z1+Zm$ vista en vacío.

5.3.6. Función *carga3phi*

Esta función halla el valor de las impedancias $Z1$, $Z2$ y Zm partiendo de la impedancia $Z1m$ de salida de la función *vacio3phi* y de los datos adquiridos por el analizador de redes al transformador trifásico bajo carga en conjunto con el estudio de las series de Fourier, para determinar la componente fundamental de las ondas relacionadas en este comportamiento.

Sintaxis: [$Z1$ $Z2$ Zm] = *vacio3phi*($V1$, $V2$, $I1$, $I2$, $Z1m$)

Las entradas:

- $V1$ es el valor de tensión registrado en el primario.
- $I1$ es el valor de corriente registrado en el primario.
- $V2$ es el valor de tensión registrado en el secundario referido al primario.
- $I2$ es el valor de corriente registrado en el secundario referida al primario.
- $Z1m$ es la impedancia $Z1+Zm$ vista en vacío para el mismo transformador.

Las salidas son:

- $Z1$ es la impedancia correspondiente a la bobina primaria.
- $Z2$ es la impedancia correspondiente a la bobina secundaria y referida al primario.
- Zm es la impedancia serie de magnetización.

5.3.7. Función *perdidasanuales*

Esta función *perdidasanuales* halla el valor de pérdidas de energía anuales en el hierro, cobre y totales para el transformador reparado, al igual que el costo que estas generan para un período de amortización de t años. Para ésto es necesario partir del vector que incluye el valor de potencia en por unidad para cada estrato tomado de la norma [ESSA, 2005].

Sintaxis: [$PaCu$ $PaFe$ Pa C $C2$] = *perdidasanuales*(S , ang , a , Vb , Zm , $Z1$, $Z2$, Int , $CkWh$, t)

Las entradas:

- ang es el ángulo de la potencia aparente.
- S es el vector representativo de las demandas diarias dependientes del estrato VA .

- a es la relación de transformación del transformador.
- Int es la tasa de interés compuesto anual.
- $CkWh$ es el costo de la energía en pesos por kilovatio-hora en el lugar de la instalación.
- t es el período de amortización en años.
- $Z1$ es la impedancia correspondiente a la bobina primaria.
- $Z2$ es la impedancia correspondiente a la bobina secundaria y referida al primario.
- Zm es la impedancia serie de magnetización.
- $mant$ es el valor del mantenimiento durante un año.
- $inver$ es el costo de reparación del transformador.

Las salidas son:

- $PaCu$ son las pérdidas anuales en el cobre (para el transformador reparado).
- $PaFe$ son las pérdidas anuales en el hierro (para el transformador reparado).
- Pa es el valor de pérdidas anuales (para el transformador reparado).
- C es el costo generado por las pérdidas de energía capitalizado a t años (para el transformador reparado).
- $C2$ es el costo total generado por el transformador incluyendo: Pérdidas de energía, inversión y mantenimiento (para el transformador reparado).

5.3.8. Función *perdidasanuales2*

Esta función *perdidasanuales2* halla el valor de pérdidas de energía anuales en el hierro, cobre y totales para el transformador nuevo, al igual que el costo que estas generan para un periodo de amortización de t años. Para ésto es necesario partir del vector que incluye el valor de potencia en por unidad para cada estrato, tomado de la norma de la ESSA.

Sintaxis: [$PaCu PaFe Pa C C2$] = *perdidasanuales2*($S, ang, a, Vb, Zm, Z1, Z2, Int, CkWh, t, mant, inver$)

Las entradas:

- ang es el ángulo de la potencia aparente.
- S es el vector representativo de las demandas diarias dependientes del estrato VA .

- a es la relación de transformación del transformador.
- Int es la tasa de interés compuesto anual.
- $CkWh$ es el costo de la energía en pesos por kilovatio-hora en el lugar de la instalación.
- t es el período de amortización en años.
- $Z1$ es la impedancia correspondiente a la bobina primaria.
- $Z2$ es la impedancia correspondiente a la bobina secundaria y referida al primario.
- Zm es la impedancia serie de magnetización.
- $mant$ es el valor del mantenimiento durante un año (para el transformador nuevo).
- $inver$ es el costo del transformador nuevo.

Las salidas son:

- $PaCu$ son las pérdidas anuales en el cobre (para el transformador nuevo).
- $PaFe$ son las pérdidas anuales en el hierro (para el transformador nuevo).
- Pa es el valor de pérdidas de energía al año (para el transformador nuevo).
- C es el costo generado por las pérdidas de energía, capitalizado a t años (para el transformador nuevo).
- $C2$ es el costo total generado por el transformador incluyendo: Pérdidas de energía, inversión y mantenimiento (para el transformador nuevo).

5.4. Ejercicio tipo

A continuación se presenta un ejemplo paso a paso que representa el procedimiento a seguir en la evaluación del núcleo y la cuantificación de costos para el transformador en funcionamiento. Para ello se utilizaron los datos y archivos de pruebas, tanto al núcleo como al transformador, estudiados en los capítulos 3 y 4 respectivamente. En el apéndice C (manual del usuario) se explica como guardar los archivos y correr cada uno de los programas de esta herramienta.

5.4.1. Diseño de la bobina

Las entradas necesarias son:

- $S_n = \text{Área de la sección transversal de la columna} = 44,4176 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$.

- $S_m =$ Potencia monofásica = 2000 VA.
- $B =$ Densidad de flujo magnético = 1,1 *Teslas*.

Las salidas obtenidas son:

- $n_s =$ Número de espiras = 92 V_u .
- $I =$ Capacidad de corriente que debe soportar el conductor de la bobina = 3,33 A.

The screenshot shows a software window titled "Primera" with a blue border. Inside, there are several input fields and a button. The fields are arranged in two rows. The first row contains: "Sn" with a value of ".4176e-4" and unit "m^2"; "Sm" with a value of "2000" and unit "VA"; "B" with a value of "1.1" and unit "T". The second row contains: "I" with a value of "3.33333" and unit "A"; "ns" with a value of "92". To the right of these fields is a yellow button labeled "Continuar".

Figura 5.3: Corriente y número de espiras para el diseño de la bobina

La corriente nominal es de 16,67 A y el número de espiras a utilizar es de 92 vueltas (Ver figura 5.3) y como las pruebas se realizan en vacío se podría trabajar a partir del 20 % de la corriente nominal (3.33 A), además hay que trabajar con los conductores que se consigan en el mercado. Para este caso se seleccionó el calibre # 17 con la ayuda de la tabla que se encuentra al final de la ventana "primera". Ver figura 5.4.

	Calibre	Área[mm ²]	Tensión[kg]	Capacidad[A]
9	14	2.08	12.4	21
10	15	1.65	9.87	16
11	16	1.31	7.82	13
12	17	1.04	6.22	10
13	18	0.823	4.92	8.1

Figura 5.4: Tabla de selección del calibre del conductor

5.4.2. Evaluación del núcleo utilizando la herramienta "Primera"

Ahora de acuerdo a la bobina seleccionada, al circuito montado en el laboratorio y al núcleo empleado. Las entradas son:

- $S_n =$ Área de la sección transversal de la columna = $44,4176 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$.
- $r_p =$ Resistencia de la rama en paralelo = $150000 \text{ } \Omega$.
- $r_s =$ Resistencia en serie = $0,235 \text{ } \Omega$.
- $C =$ Capacitancia de la rama en paralelo = $10 \cdot 10^{-6} \text{ F}$.
- $l_c =$ Longitud media del circuito magnético = $0,748 \text{ m}$.
- $n_s =$ Número de espiras = 92 Vu .
- $S_{cu} =$ Sección del conductor = $1,0387 \text{ mm}^2$.
- $G_s =$ Peso total de la bobina arrollada sobre el núcleo = $0,3 \text{ kg}$.
- $G =$ Peso específico de la chapa = $6,1016 \text{ kg/dm}^3$.

Sn m² **Sm** VA **B** T

I A **ns**

rp Ohm **lc** m **Gs** kg

rs Ohm **Sn** m² **SCu** mm²

c F **G** kg/dm³ **ns**

	Calibre	Área[mm ²]	Tensión[kg]	Capacidad[A]
9	14	2.08	12.4	21
10	15	1.65	9.87	16
11	16	1.31	7.82	13
12	17	1.04	6.22	10
13	18	0.823	4.92	8.1

Figura 5.5: Ventana principal para la evaluación del núcleo

En la ventana "graficasa1" de la figura 5.6. se escoge la curva característica del núcleo que se desee visualizar.

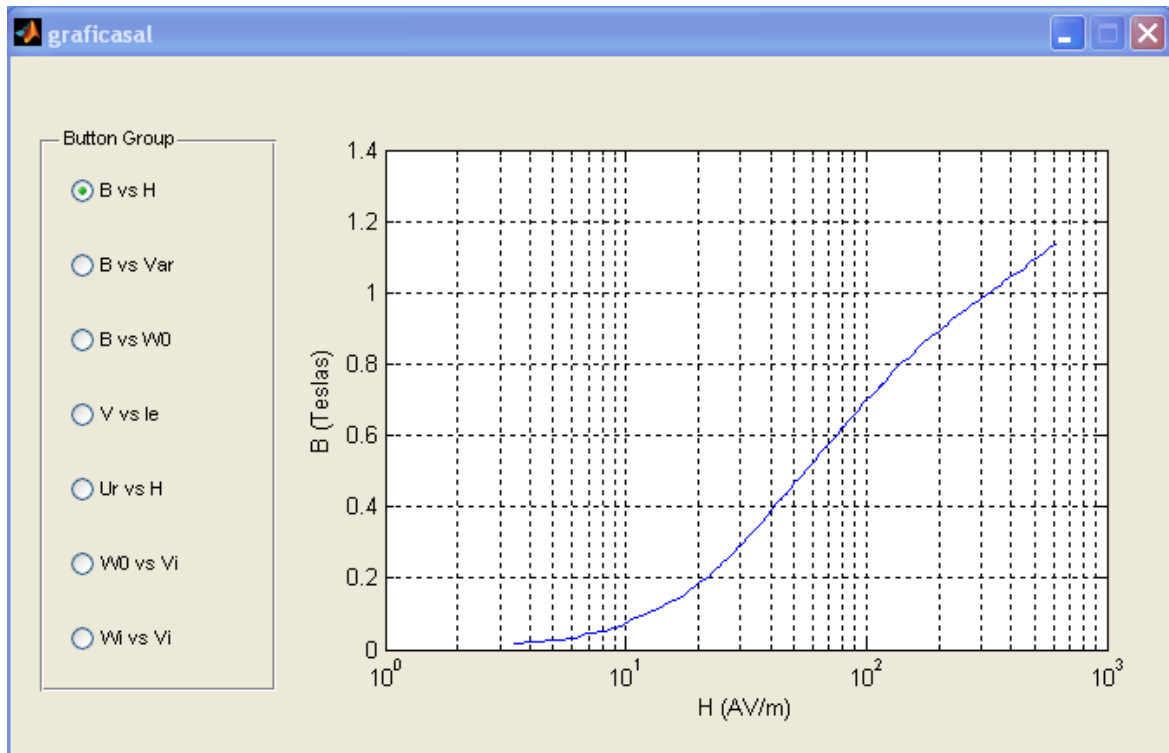


Figura 5.6: Ventana para la visualización de las gráficas en el proceso de evaluación del núcleo

5.4.3. Evaluación del núcleo utilizando la herramienta "Parametrosal"

Partiendo de los archivos de datos obtenidos con el analizador se encuentran los parámetros del modelo T y luego las pérdidas de energía respectivamente.

La única entrada necesaria es el archivo "vacío evaluación" que se busca desde la barra de la parte superior de la ventana "parametrosal". Ver figura 5.7.

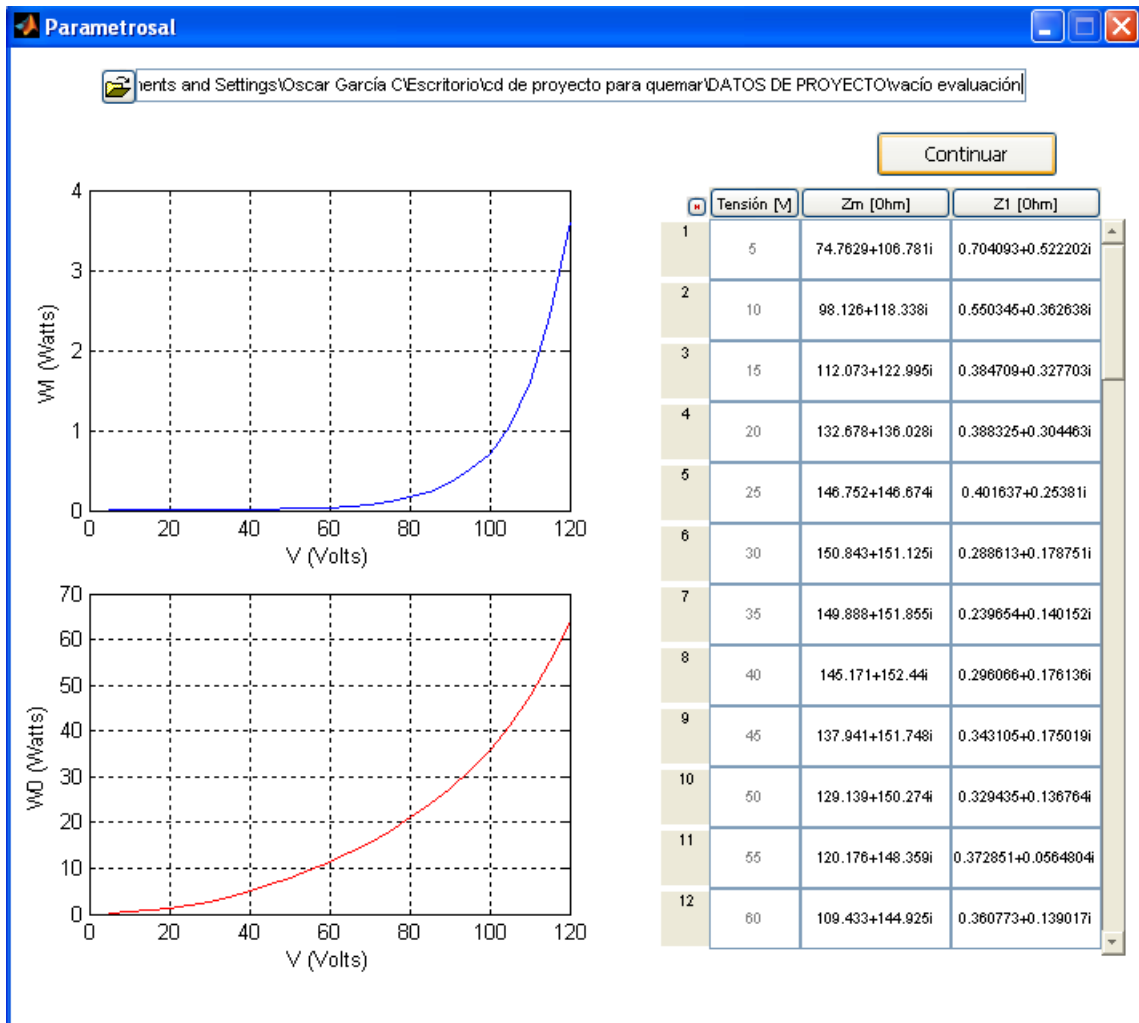


Figura 5.7: Interfaz para la evaluación del núcleo mediante el modelo T

Luego de actualizar las salidas (dar click a continuar) se logra conocer los parámetros del modelo T que se registran en el cuadro 5.1.

Cuadro 5.1: Z_1 y Z_m para diferentes tensiones aplicadas en bornes del transformador monofásico

Tensión [V]	$Z_1[\Omega]$	$Z_m[\Omega]$
5	0,7041 + 0,5222 i	74,7630 + 106,780 i
10	0,5503 + 0,3626 i	98,1260 + 118,340 i
15	0,3847 + 0,3277 i	112,070 + 122,990 i
20	0,3883 + 0,3045 i	132,680 + 136,030 i
25	0,4016 + 0,2538 i	146,750 + 146,670 i
30	0,2886 + 0,1788 i	150,840 + 151,130 i
35	0,2397 + 0,1402 i	149,890 + 151,850 i
40	0,2961 + 0,1761 i	145,170 + 152,440 i
45	0,3431 + 0,1750 i	137,940 + 151,750 i
50	0,3294 + 0,1368 i	129,140 + 150,270 i
55	0,3729 + 0,0565 i	120,180 + 148,360 i
60	0,3608 + 0,1390 i	109,430 + 144,920 i
65	0,3492 + 0,1005 i	98,8360 + 141,340 i
70	0,4454 + 0,1991 i	87,7000 + 136,460 i
75	0,4936 + 0,2686 i	78,0850 + 131,170 i
80	0,5155 + 0,2859 i	67,7870 + 124,380 i
85	0,5711 + 0,3882 i	58,3070 + 117,000 i
90	0,6183 + 0,4791 i	49,1840 + 108,700 i
95	0,6557 + 0,5809 i	40,6368 + 99,4698 i
100	0,6550 + 0,6128 i	32,7458 + 89,1786 i
105	0,6722 + 0,6863 i	26,3059 + 79,1733 i
110	0,6907 + 0,8142 i	20,4900 + 68,8340 i
115	0,6983 + 0,8249 i	15,9068 + 59,3894 i
120	0,7061 + 0,9876 i	12,4781 + 51,1733 i

En la ventana "parametrosal" se puede visualizar de forma gráfica el comportamiento de las pérdidas para diferentes niveles de tensión y en el cuadro 5.2. se registran numericamente.

Cuadro 5.2: Pérdidas de hierro y cobre para el transformador en estudio.

Tensión [V]	W_o [W]	W_I [W]
5	0,1011	0,00095
10	0,3838	0,00220
15	0,8354	0,00290
20	1,3783	0,00400
25	1,9909	0,00540
30	2,7832	0,00530
35	3,7890	0,00610
40	4,9837	0,01020
45	6,3253	0,01570
50	7,8488	0,02000
55	9,5436	0,02960
60	11,4536	0,03780
65	13,4533	0,04750
70	15,7372	0,07990
75	18,1943	0,11500
80	21,0657	0,16020
85	24,0418	0,23550
90	27,4658	0,34530
95	31,2320	0,50390
100	35,9447	0,71900
105	41,0318	1,04840
110	47,6118	1,60500
115	55,1373	2,42040
120	63,8539	3,61360

5.4.4. Estudio económico utilizando la herramienta "estudioEconomico"

A continuación se enuncian las características del transformador trifásico y las demás entradas que la herramienta necesita para el proceso de cuantificación de pérdidas.

- FP = Factor de potencia = 0,9.
- Pm = Potencia = 8 kVA .
- $Valta$ = Tensión de línea en alta del transformador = 381,05 V.
- $Vbaja$ = Tensión de línea en baja del transformador = 220 V.
- Vb = Tensión de operación de la carga = 120 V.
- Int = Interés compuesto anual.
- $Costo$ = Costo de la energía en pesos por kilovatio-hora en el lugar de la instalación = 200 pesos.

- $Tiempo = 1$ año (se varía hasta el año en el cual se deseen conocer los costos de funcionamiento).

Adicionalmente se utilizan los 2 archivos obtenidos con el analizador y que son necesarios para encontrar los parámetros. Estos se guardaron como "vacío" y "carga" respectivamente, en el orden en que se deben examinar. Ver figura 5.8.

Valores

FP: 0.9, Pm: 8000, Vb: 120, Valta: 381.05, Vbaja: 220, Int: 24, Costo: 200, Tiempo: 8, Inversión: 3e6, Mant. N: 1e5, Reparación: 1.5e6, Mant. R: 2e5

Parámetros

Z1: 0.28402+0.18289i, Z2: 0.27323+0.15106i, Z1m: 208.3127+394.488i, Zm: 208.0287+394.3051i

Análisis del Transformador Reparado

	Estrato	KW-H Anual Cu	KW-H Anual Fe	KW-H Total Anual	Costos Perdidas	Costos Totales
1	1	602.315	1205.26	1807.58	1.23682e+006	3.42107e+006
2	2	602.315	1205.26	1807.58	1.23682e+006	3.42107e+006
3	3	571.8	1204.43	1776.23	1.21537e+006	3.39962e+006
4	4	526.509	1203.69	1730.2	1.18388e+006	3.36813e+006
5	5	748.467	1208.71	1957.17	1.33918e+006	3.52343e+006
6	6	743.953	1208.14	1952.1	1.33571e+006	3.51996e+006

Análisis del Transformador Nuevo

	Estrato	KW-H Anual Cu	KW-H Anual Fe	KW-H Total Anual	Costos Perdidas	Costos Totales
1	1	499.921	602.63	1102.55	754415	4.09654e+006
2	2	499.921	602.63	1102.55	754415	4.09654e+006
3	3	474.594	602.215	1076.81	736800	4.07892e+006
4	4	437.003	601.847	1038.85	710827	4.05295e+006
5	5	621.228	604.353	1225.58	838697	4.18072e+006
6	6	617.481	604.072	1221.55	835841	4.17796e+006

Figura 5.8: Ventana del estudio económico

Los parámetros del transformador se ven en el cuadro 5.3. Las pérdidas de energía en el hierro, en el cobre y totales encontradas partiendo del modelo T se observan en el cuadro 5.4.

Cuadro 5.3: Parámetros del transformador trifásico de 8 kVA

$Z_1[\Omega]$	$Z_m[\Omega]$	$Z_2[\Omega]$
0,2839 + 0,1823 i	208,03 + 394,31 i	0,273 + 0,1517 i

Cuadro 5.4: Pérdidas de energía en el hierro, en el cobre y totales para el transformador reparado.

ESTRATO	$kW - H$ anual Cu	$kW - H$ anual Fe	$kW - H$ total anual
1-2	653,791	1215,23	1869,02
3	620,518	1213,98	1834,5
4	570,825	1212,88	1783,71
5	813,489	1220,38	2033,87
6	808,836	1219,54	2028,38

Cuadro 5.5: Costos totales en millones de pesos del transformador reparado para diferentes años de amortización.

ESTRATO	AÑO 1	AÑO 3	AÑO 6	AÑO 9	AÑO 12	AÑO 15
1-2	1,9228	2,6125	3,1960	3,5020	3,6626	3,7467
3	1,9477	2,6001	3,1771	3,4797	3,6384	3,7217
4	1,9403	2,5818	3,1493	3,4469	3,6630	3,6848
5	1,9769	2,67181	3,2864	3,6087	3,7778	3,8665
6	1,9761	2,6698	3,2833	3,6051	3,7739	3,8624

Como se cuenta con un transformador nuevo para realizar el estudio se asumió una cantidad de pérdidas que cumpliera con las normas de reparación, como se enuncia en la sección 4.3. Ante lo anterior se muestran los resultados en el cuadro 5.6.

Cuadro 5.6: Costos totales en millones de pesos del transformador nuevo para diferentes años de amortización.

ESTRATO	AÑO 1	AÑO 3	AÑO 6	AÑO 9	AÑO 12	AÑO 15
1-2	3,2584	3,6350	3,9680	4,1427	4,2344	4,2824
3	3,2543	3,6248	3,9525	4,1244	4,2145	4,2618
4	3,2482	3,6097	3,9296	4,0973	4,1853	4,2314
5	3,2783	3,6837	4,0424	4,2305	4,3291	4,3809
6	3,2776	3,6821	4,0399	4,2276	4,3260	4,3776

Capítulo 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

- Se plantea la metodología para evaluar la viabilidad de reparar transformadores de distribución usados.
- Esta metodología permite determinar la viabilidad de la reparación de un transformador de distribución, observando los comportamientos magnéticos y el nivel de pérdidas en el hierro que presenta el núcleo del transformador en estudio.
- Se establece el procedimiento para cuantificar los costos de operación del transformador reparado a partir de su modelo.
- La herramienta software recopila la metodología planteada, permitiendo al usuario observar e interpretar los resultados para determinar la reparación y su posterior estudio económico.
- Un parámetro mínimo para garantizar la viabilidad de la reparación es el cumplimiento de los niveles máximos de pérdidas establecidos por las normas.
- Se recomienda que para determinar los parámetros del transformador bajo carga, la prueba se realice para las condiciones más desfavorables.
- Implementar equipos de mayor sensibilidad para la toma de medidas.

6.1. PARA TRABAJOS FUTUROS SE RECOMIENDA :

- Diseñar una bobina práctica de fácil adecuación a las columnas del transformador, para hacer más rápido y económico el proceso de evaluación.

- Complementar la metodología con un modelo que incluya la no linealidad del transformador y la influencia de la temperatura.
- Implementar la metodología en transformadores de distribución, para crear una base de datos que registren las condiciones mínimas que deben cumplir los transformadores reparados para su óptimo funcionamiento.

Bibliografía

- [Corrales J, 1954] CORRALES MARTÍN, JUAN. Teoría, Cálculo y Construcción de Transformadores. TOMO VII , Editorial Labor, 1954.
- [Schaum M, 1990] SCHAUM G, MILTON. Fundamentos de electricidad.
- [Corrales J, 1978] CORRALES MARTÍN, JUAN. Cálculo Óptimo de Transformadores. MARCOMBO, 1978.
- [López R, 2000] LÓPEZ GARCÍA, RICARDO. Desarrollo y Validación de Modelos de Transformadores Monofásicos y Trifásicos con Saturación, para el Análisis de Armónicos en Sistemas de Potencia UPC, 2000.
- [Blas A, 2005] BLAS DEL HOYO, ALFREDO. Modelización de la Histéresis Magnética y su Aplicación al Cálculo Numérico en Máquinas Eléctricas, UPC, 2005.
- [Díaz Á, 2005] DÍAZ PÉREZ, ÁNGEL. Pérdidas en los Transformadores de Distribución, DISAIC.
- [Sánchez O, 2006] SÁNCHEZ M, OLGA L. Diseño de una Aplicación para la Gestión de Carga en Transformadores de Distribución, UNC.
- [Martín U, 2004] MARTÍN A, UMAN. Energy Losses, IEEE, 2004.
- [Philip L, 2004] PHILIP J, A LING. Overcoming Transformer Losses. Power-smiths Corp, 2004.
- [UTN, 1998] Universidad Tecnológica Nacional. Mediciones Magnéticas, 1998.
- [Ortiz H, Avendaño C y otros, 2002] ORTÍZ SUÁREZ, HELMUTH. AVENDAÑO AVENDAÑO, CARLOS. IBÁÑEZ OLAYA, HENRY. Conversión Electromagnética, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2002.

- [Nippon Steel, 1970] Nippon Steel Corporation. Grain Oriente, Electrical Sheet Steel, 1970.
- [KaroZ A, 1970] KAROZ, ANDRÉS M. Introducción a la Tecnología Eléctrica, Elementos de los Circuitos Magnéticos, EUDEBA, 1970.
- [Corrales J, 1969] CORRALES MARTÍN, JUAN. Cálculo Industrial de Máquinas Eléctricas, Tomo I, Fundamentos del Cálculo. MARCOMBO.
- [ESSA, 2005] ELECTRIFICADORA DE SANTANDER S.A E.S.P , Normas para cálculo y diseño de sistemas de distribución, 2005.
- [NTC 1954, 1996] NORMA TÉCNICA COLOMBIANA, NTC 1954, Electrotecnia. Transformadores Reconstruidos y Reparados.Requisitos, 1996.
- [NTC 818, 1987] NORMA TÉCNICA COLOMBIANA, NTC 818,Transformadores. Transformadores Monofásicos Autorrefrigerados y Sumergidos en Líquido. Corriente sin Carga, Pérdidas y Tensión de Cortocircuito, 1987.
- [NTC 819, 1987] NORMA TÉCNICA COLOMBIANA, NTC 819, Transformadores. Transformadores Trifásicos Autorrefrigerados y Sumergidos en Líquido. Corriente sin Carga, Pérdidas y Tensión de Cortocircuito, 1987.
- [CREG 024, 2008] COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS, Resolución 024 del 2008

Apéndice A

Especificaciones del sistema de prueba.

A.1. Introducción

En este apéndice se anexan los datos de tensiones y corrientes registrados en el desarrollo de cada una de las pruebas. Igualmente se presentan los valores de densidad de flujo magnético B , intensidad de campo magnético H , pérdidas en el hierro W_o y en el cobre W_I .

A.2. Cuadros de datos

Cuadro A.1: Datos de tensión y corriente C.A. en la bobina con núcleo de madera

Tensión bobina (V)	Corriente (A)	Tensión fuente (V)	Corriente (A)
0	0	0,22	0,455
0,07	0,151	0,225	0,470
0,09	0,189	0,23	0,480
0,1	0,208	0,235	0,490
0,11	0,23	0,24	0,503
0,12	0,246	0,245	0,512
0,125	0,263	0,25	0,524
0,13	0,278	0,255	0,535
0,14	0,296	0,26	0,544
0,15	0,309	0,265	0,554
0,155	0,323	0,27	0,567
0,16	0,338	0,275	0,574
0,17	0,351	0,28	0,584
0,175	0,365	0,285	0,593
0,18	0,380	0,29	0,602
0,19	0,391	0,30	0,612
0,195	0,404	0,305	0,621
0,2	0,418	0,31	0,630
0,205	0,432	0,32	0,642
0,21	0,446	0,325	0,648

Cuadro A.2: Datos de tensión y corriente C.C. en la bobina con núcleo de madera

Tensión (V)	Corriente (A)	Tensión (V)	Corriente (A)
0	0	0,194	0,441
0,050	0,115	0,199	0,452
0,067	0,153	0,204	0,463
0,082	0,188	0,208	0,473
0,090	0,204	0,212	0,483
0,096	0,218	0,218	0,493
0,101	0,230	0,221	0,502
0,105	0,239	0,225	0,511
0,110	0,250	0,229	0,519
0,115	0,263	0,234	0,530
0,119	0,272	0,237	0,540
0,124	0,283	0,243	0,550
0,130	0,295	0,248	0,562
0,135	0,306	0,252	0,571
0,139	0,315	0,256	0,580
0,143	0,326	0,260	0,588
0,147	0,334	0,264	0,598
0,150	0,341	0,269	0,607
0,154	0,353	0,272	0,616
0,158	0,360	0,274	0,622
0,164	0,371	0,280	0,635
0,169	0,384	0,283	0,641
0,174	0,397	0,289	0,653
0,178	0,405	0,291	0,659
0,185	0,419	0,297	0,671
0,189	0,429	0,301	0,681

Cuadro A.3: Datos de tensiones, corriente y potencia en C.A para el núcleo en estudio

Tensión V_i (V)	V_{ind} (V)	V_c (mV)	V_r (mV)	I_e (mA)	Potencia (W)
1,6870	1,66	3	5	13	0,01
4,2200	4,16	6	9	28	0,05
5,0500	4,99	9	10	33	0,08
6,2300	6,16	10	12	40	0,14
7,1500	7,09	12	13	44	0,19
8,0000	7,92	13	14	49	0,23
9,2800	9,19	15	15	55	0,31
10,0000	9,93	17	16	59	0,37
10,9800	10,87	18	17	64	0,44
12,4500	12,33	21	19	70	0,56
13,4700	13,36	22	20	75	0,64
14,7200	14,59	24	21	81	0,77
16,0000	15,86	27	23	87	0,90
17,6900	17,52	29	25	95	1,08
18,3800	18,22	30	26	97	1,17
19,4600	19,3	32	27	103	1,31
20,6300	20,45	34	28	108	1,46
21,5200	21,32	36	29	112	1,59
23,0000	22,81	38	31	118	1,8
23,9900	23,79	39	32	123	1,94
25,1400	24,91	42	33	128	2,13
26,1000	25,87	43	34	132	2,28
27,6700	27,43	45	36	140	2,55
28,2000	27,97	47	37	142	2,63
29,1500	28,9	48	38	146	2,81
30,0800	29,82	50	39	152	2,99
31,0500	30,79	51	40	156	3,18
32,2200	31,97	54	42	162	3,42
33,6500	33,37	56	43	168	3,71
34,8400	34,53	58	45	175	3,96
36,0800	35,78	60	46	181	4,23
37,2200	36,88	62	48	188	4,48
38,1200	37,82	63	49	193	4,71
39,0100	38,67	65	50	197	4,9
39,8600	39,54	66	51	202	5,12
41,2000	40,74	68	53	209	5,43
41,9000	41,6	69	54	214	5,64
43,2000	42,8	72	56	221	5,97
44,0000	43,6	73	57	226	6,17
44,9000	44,4	75	59	231	6,39
46,2000	45,8	77	60	239	6,78

Cuadro A.4: Datos de tensiones, corriente y potencia en C.A para el núcleo en estudio

Tensión V_i (V)	V_{ind} (V)	V_c (mV)	V_r (mV)	I_e (mA)	Potencia (W)
47,4000	46,9	79	62	248	7,13
48,3000	47,8	80	63	252	7,4
49,1000	48,7	81	65	258	7,61
49,9000	49,5	83	66	265	7,86
50,8000	50,4	84	68	271	8,14
51,7000	51,3	86	69	277	8,4
52,2000	51,7	87	70	280	8,54
52,9000	52,4	88	72	285	8,79
53,8000	53,3	90	73	292	9,04
55,4000	54,9	92	76	306	9,5
56,5000	56	93	78	314	10
58,7000	58,1	98	83	332	10,7
59,0000	58,6	99	84	335	10,8
60,1000	59,5	100	86	345	11,2
61,2000	60,5	102	89	355	11,5
62,2000	61,5	104	91	364	11,9
63,4000	62,7	106	93	375	12,3
64,7000	64	108	97	387	12,8
65,6000	64,9	109	99	398	13,2
66,5000	65,8	111	101	408	13,5
67,7000	66,9	113	105	420	14
68,5000	67,7	114	107	430	14,3
70,0000	69,4	117	111	450	14,9
71,0000	70,2	119	114	460	15,3
72,3000	71,4	120	118	476	15,8
74,4000	73,5	124	124	504	16,7
75,2000	74,2	126	127	516	17
76,5000	75,6	128	132	535	17,6
77,9000	76,8	130	136	553	18,1
79,2000	78,1	133	142	575	18,2
80,4000	79,4	135	147	595	19,3
81,4000	80,3	136	150	612	19,8
82,4000	81,3	138	155	630	20,3
83,6000	82,4	140	160	650	20,9
85,4000	83,4	142	165	671	21,4
85,3000	84,1	143	168	688	21,8
86,9000	85,5	145	175	716	22,5
88,4000	87	148	183	750	23,3
89,0000	87,7	150	188	768	23,7
90,4000	89	152	195	799	24,4
92,0000	90,5	155	205	846	25,4
94,3000	92,5	158	220	905	26,6
95,5000	93,8	160	229	946	27,3

Cuadro A.5: Datos de tensiones, corriente y potencia en C.A para el núcleo en estudio

Tensión V_i (V)	V_{ind} (V)	V_c (mV)	V_r (mV)	I_e (mA)	Potencia (W)
96,8000	95	163	240	990	28,3
98,4000	96,4	166	253	1040	29,2
99,3000	97,2	167	262	1082	29,9
100,3000	98,3	169	271	1117	30,5
101,2000	99	170	280	1158	31,2
102,3000	99,9	172	293	1207	31,9
103,0000	100,7	174	302	1251	32,6
104,1000	101,6	175	312	1295	33,4
105,6000	102,9	178	331	1370	34,6
106,4000	103,7	180	344	1420	35,4
107,9000	105	182	362	1492	36,6
109,0000	106	184	379	1570	37,6
110,4000	107,2	187	402	1669	39,1
111,3000	107,8	188	420	1720	39,9
112,6000	109,2	190	440	1800	42
113,7000	110	191	450	1870	43
115,0000	111	193	483	1970	45
115,9000	111,9	195	500	2040	46
116,7000	112,6	196	520	2120	47
118,0000	113,6	199	545	2230	48
119,0000	114,5	201	572	2340	50
119,7000	115	202	584	2390	51
120,6000	115,7	203	608	2480	52
121,3000	116,3	204	627	2550	53
122,4000	117,3	206	656	2670	55
124,0000	118,5	209	697	2850	58
124,8000	119,2	210	723	2940	59
125,9000	120	212	757	3070	61
126,9000	120,8	214	789	3190	63
128,0000	121,6	216	816	3290	64
129,0000	122	217	828	3350	66
129,2000	122,6	218	864	3470	67
130,6000	123,7	220	910	3640	70

Cuadro A.6: Datos del comportamiento magnético y pérdidas asociadas.

Vi (V)	B [Teslas]	H [A.Vuelta/m]	$\mu_r * 10^3$	Wi [W]	Wo [W]
1,6870	0,0156	3,7009	3,3487	0,0002	0,0097
4,2200	0,0311	6,6616	3,7207	0,0012	0,0485
5,0500	0,0467	7,4017	5,0230	0,0016	0,0779
6,2300	0,0519	8,8821	4,6509	0,0024	0,1369
7,1500	0,0623	9,6223	5,1518	0,0029	0,1862
8,0000	0,0675	10,3624	5,1825	0,0036	0,2253
9,2800	0,0779	11,1026	5,5811	0,0045	0,3041
10,0000	0,0882	11,8428	5,9299	0,0051	0,3632
10,9800	0,0934	12,5829	5,9094	0,0061	0,4320
12,4500	0,1090	14,0633	6,1686	0,0072	0,5504
13,4700	0,1142	14,8035	6,1392	0,0083	0,6290
14,7200	0,1246	15,5436	6,3784	0,0097	0,7572
16,0000	0,1402	17,0240	6,5517	0,0112	0,8852
17,6900	0,1505	18,5043	6,4741	0,0134	1,0624
18,3800	0,1557	19,2445	6,4397	0,0139	1,1517
19,4600	0,1661	19,9847	6,6146	0,0157	1,2893
20,6300	0,1765	20,7249	6,7771	0,0173	1,4373
21,5200	0,1869	21,4650	6,9283	0,0186	1,5655
23,0000	0,1973	22,9454	6,8414	0,0206	1,7729
23,9900	0,2025	23,6855	6,8020	0,0224	1,9105
25,1400	0,2180	24,4257	7,1032	0,0242	2,0981
26,1000	0,2232	25,1659	7,0585	0,0258	2,2460
27,6700	0,2336	26,6462	6,9764	0,0290	2,5118
28,2000	0,2440	27,3864	7,0895	0,0298	2,5907
29,1500	0,2492	28,1266	7,0498	0,0315	2,7684
30,0800	0,2596	28,8668	7,1553	0,0342	2,9450
31,0500	0,2647	29,6069	7,1159	0,0360	3,1326
32,2200	0,2803	31,0873	7,1757	0,0388	3,3688
33,6500	0,2907	31,8274	7,2684	0,0418	3,6550
34,8400	0,3011	33,3078	7,1934	0,0453	3,9003
36,0800	0,3115	34,0480	7,2797	0,0485	4,1661
37,2200	0,3219	35,5283	7,2089	0,0523	4,4111
38,1200	0,3270	36,2685	7,1757	0,0551	4,6374
39,0100	0,3374	37,0087	7,2554	0,0574	4,8244
39,8600	0,3426	37,7488	7,2226	0,0604	5,0405
41,2000	0,3530	39,2292	7,1607	0,0646	5,3449
41,9000	0,3582	39,9694	7,1314	0,0677	5,5507
43,2000	0,3738	41,4497	7,1757	0,0722	5,8748
44,0000	0,3790	42,1899	7,1477	0,0756	6,0704
44,9000	0,3893	43,6702	7,0946	0,0789	6,2860
46,2000	0,3997	44,4104	7,1624	0,0845	6,6687
47,4000	0,4101	45,8907	7,1114	0,0910	7,0101
48,3000	0,4153	46,6309	7,0871	0,0939	7,2762

Cuadro A.7: Datos del comportamiento magnético y pérdidas asociadas.

Vi (V)	B [Teslas]	H [A.Vuelta/m]	$\mu_r * 10^3$	Wi [W]	Wo [W]
49,1000	0,4205	48,1113	6,9549	0,0985	7,4802
49,9000	0,4309	48,8514	7,0187	0,1039	7,7231
50,8000	0,4361	50,3318	6,8943	0,1086	7,9968
51,7000	0,4464	51,0720	6,9562	0,1135	8,2504
52,2000	0,4516	51,8121	6,9365	0,1160	8,3872
52,9000	0,4568	53,2925	6,8213	0,1202	8,6317
53,8000	0,4672	54,0326	6,8808	0,1261	8,8738
55,4000	0,4776	56,2532	6,7561	0,1385	9,3175
56,5000	0,4828	57,7335	6,6544	0,1459	9,8078
58,7000	0,5087	61,4344	6,5897	0,1631	10,4851
59,0000	0,5139	62,1746	6,5777	0,1660	10,5812
60,1000	0,5191	63,6549	6,4897	0,1761	10,9680
61,2000	0,5295	65,8754	6,3963	0,1864	11,2543
62,2000	0,5399	67,3558	6,3784	0,1960	11,6417
63,4000	0,5503	68,8361	6,3613	0,2080	12,0259
64,7000	0,5606	71,7968	6,2140	0,2216	12,5081
65,6000	0,5658	73,2771	6,1449	0,2343	12,8912
66,5000	0,5762	74,7575	6,1337	0,2462	13,1755
67,7000	0,5866	77,7182	6,0063	0,2609	13,6561
68,5000	0,5918	79,1985	5,9462	0,2735	13,9396
70,0000	0,6074	82,1592	5,8828	0,2996	14,5053
71,0000	0,6177	84,3797	5,8259	0,3130	14,8875
72,3000	0,6229	87,3404	5,6757	0,3352	15,3583
74,4000	0,6437	91,7815	5,5811	0,3758	16,2048
75,2000	0,6541	94,0020	5,5372	0,3939	16,4810
76,5000	0,6645	97,7029	5,4120	0,4234	17,0421
77,9000	0,6748	100,6636	5,3349	0,4524	17,5039
79,2000	0,6904	105,1046	5,2274	0,4891	17,5555
80,4000	0,7008	108,8055	5,1255	0,5237	18,6099
81,4000	0,7060	111,0260	5,0602	0,5541	19,0699
82,4000	0,7164	114,7268	4,9690	0,5871	19,5263
83,6000	0,7268	118,4277	4,8835	0,6250	20,0764
85,4000	0,7371	122,1286	4,8031	0,6660	20,5224
85,3000	0,7423	124,3491	4,7506	0,7002	20,8773
86,9000	0,7527	129,5303	4,6243	0,7584	21,5007
88,4000	0,7683	135,4517	4,5137	0,8321	22,2035
89,0000	0,7787	139,1526	4,4530	0,8725	22,5503
90,4000	0,7891	144,3338	4,3504	0,9444	23,1556
92,0000	0,8046	151,7355	4,2199	1,0587	24,0049
94,3000	0,8202	162,8381	4,0082	1,2116	25,0035
95,5000	0,8306	169,4997	3,8995	1,3238	25,5556
96,8000	0,8462	177,6416	3,7905	1,4498	26,3895
98,4000	0,8617	187,2638	3,6619	1,6000	27,0917

Cuadro A.8: Datos del comportamiento magnético y pérdidas asociadas.

Vi (V)	B [Teslas]	H [A.Vuelta/m]	$\mu_r * 10^3$	Wi [W]	Wo [W]
99,3000	0,8669	193,9254	3,5574	1,7318	27,6179
100,3000	0,8773	200,5869	3,4805	1,8457	28,0679
101,2000	0,8825	207,2485	3,3885	1,9837	28,5861
102,3000	0,8929	216,8708	3,2763	2,1551	29,0602
103,0000	0,9033	223,5323	3,2156	2,3151	29,5494
104,1000	0,9085	230,9340	3,1304	2,4808	30,1310
105,6000	0,9240	244,9973	3,0013	2,7765	30,9414
106,4000	0,9344	254,6169	2,9203	2,9828	31,4695
107,9000	0,9448	267,9427	2,8060	3,2930	32,2608
109,0000	0,9552	280,5256	2,7096	3,6463	32,7952
110,4000	0,9707	297,5496	2,5962	4,1206	33,6701
111,3000	0,9759	310,8728	2,4982	4,3763	34,1332
112,6000	0,9863	325,6762	2,4100	4,7929	35,6843
113,7000	0,9915	333,0779	2,3689	5,1729	36,1835
115,0000	1,0019	357,5037	2,2301	5,7410	37,4350
115,9000	1,0123	370,0866	2,1766	6,1562	37,8878
116,7000	1,0175	384,8901	2,1036	6,6485	38,2391
118,0000	1,0330	403,3944	2,0379	7,3563	38,3064
119,0000	1,0434	423,3791	1,9612	8,1000	39,3265
119,7000	1,0486	432,2612	1,9305	8,4498	39,8655
120,6000	1,0538	450,0253	1,8634	9,0982	40,0111
121,3000	1,0590	464,0886	1,8159	9,6191	40,3248
122,4000	1,0694	485,5536	1,7526	10,5457	41,1037
124,0000	1,0849	515,9007	1,6735	12,0155	42,1669
124,8000	1,0901	535,1452	1,6211	12,7864	42,1511
125,9000	1,1005	560,3111	1,5630	13,9421	42,6282
126,9000	1,1109	583,9967	1,5138	15,0534	43,1639
128,0000	1,1213	603,9813	1,4774	16,0120	42,9007
129,0000	1,1265	612,8634	1,4627	16,6013	44,1241
129,2000	1,1317	639,5097	1,4082	17,8120	43,5288
130,6000	1,1421	673,5576	1,3493	19,6000	44,1727

Apéndice B

Análisis de las señales de prueba

B.1. Introducción

Este apéndice contempla la adecuación de las señales adquiridas, la representación de las ondas de trabajo referentes a las corrientes y tensiones de las pruebas realizadas al transformador monofásico y trifásico, y un registro de sus armónicos.

B.2. Adecuación de las señales adquiridas.

Para obtener un resultado acorde al esperado se hace necesario realizar un análisis detallado de las señales adquiridas. Para ello el proceso a seguir es el siguiente:

- Se toma la señal y se mide el valor rms con el Fluke en el momento de adquirir los datos.
- Se hallan las magnitudes de los 8 primeros armónicos, utilizando la función FFT de Matlab.
- Se halla el valor rms de los datos adquiridos con el analizador.
- Se encuentra el valor K por el cual hay que multiplicar la señal adquirida para representar su verdadero valor.

Cuadro B.1: Factores de escala K para las diferentes señales

SEÑAL	$rmsVM = \text{rms con Fluke}$	$rmsVA = \text{rms con el analizador}$	$K = \sqrt{2} \frac{rmsVM}{rmsVA}$
V_1	223,320	6,4857	48,695207
V_2	127,98	3,6745	49,258228
I_1	2,9289	0,3528	11,747752
I_2	4,5851	0,5588	11,604006

En la figura B.1. Se muestran los armónicos de la señal adquirida por el analizador utilizando la función FFT de Matlab, de ahí se puede notar que con los 8 primeros armónicos es suficiente para

representar la señal. A partir de la ecuación B.1 se halla el valor rms de la señal adquirida por el analizador.

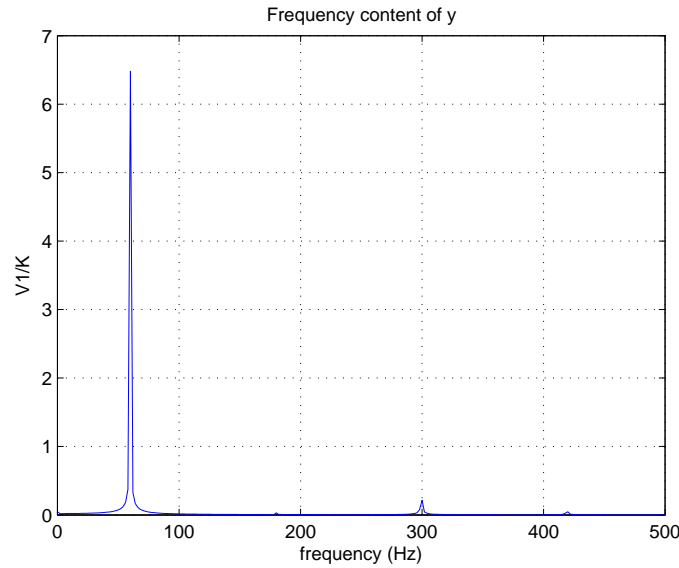


Figura B.1: Análisis de Fourier para la señal V_1 adquirida con el analizador de redes

$$rmsVA = rms \text{ del analizador} = \sqrt{((A_1)^2 + (A_2)^2 + (A_3)^2 + \dots + (A_8)^2)} \quad (\text{B.1})$$

Igualmente el adquisidor presentó un error de fase, para realizar esta corrección se colocaron las 4 terminales de tensión y las 4 ondas de corriente al adquirir la misma señal (carga resistiva). Como se adquiere la señal en el mismo tiempo se corrige para que estén en fase. A continuación se presentan los desfases que se ajustan para las 4 señales adquiridas en el estudio del transformador trifásico bajo carga, tomando la señal V_1 como referencia.

$$\delta = \delta_{adquirido} + \delta_{ajuste} \quad (\text{B.2})$$

Cuadro B.2: Ajuste de fase para la señales de tensión y corriente en el transformador trifásico

SEÑAL	V_1	V_2	I_1	I_2
δ_{ajuste} [grados]	0	-0,6187	-0,8187	-1,478

B.3. Representación de las señales de trabajo.

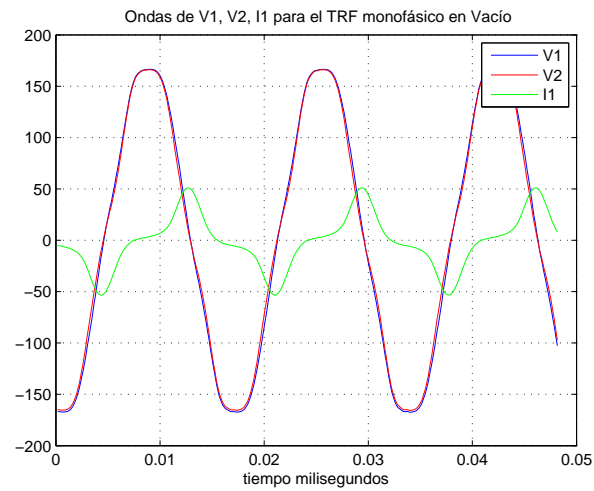
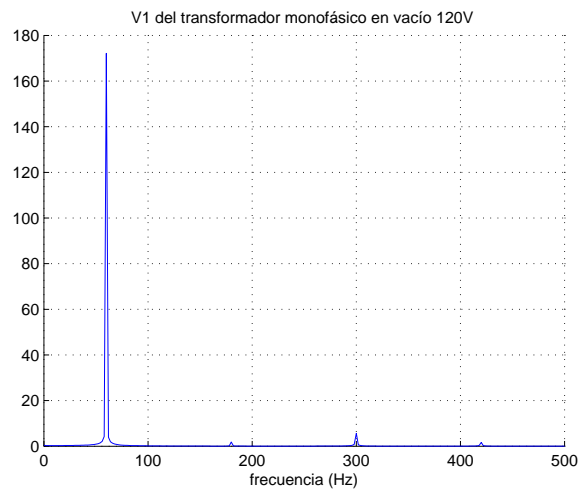
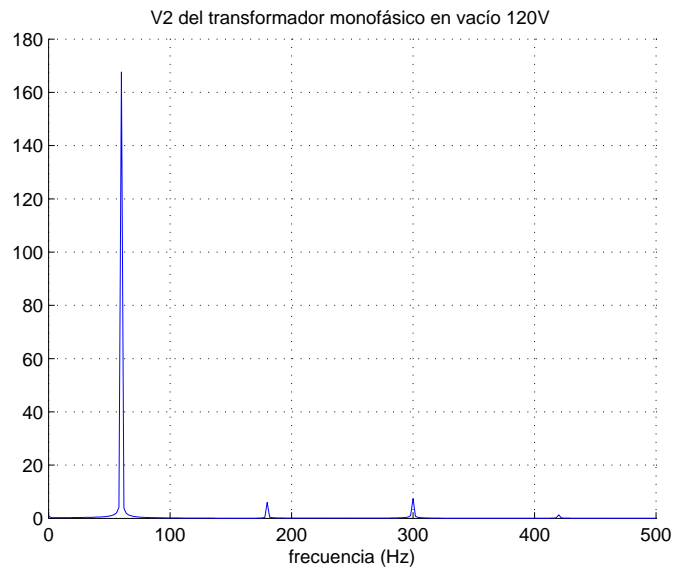


Figura B.2: Ondas de V1, V2, I1 para el transformador monofásico en vacío 120V

Figura B.3: Análisis de Fourier para la señal V_1 adquirida con el analizador de redes a 120V

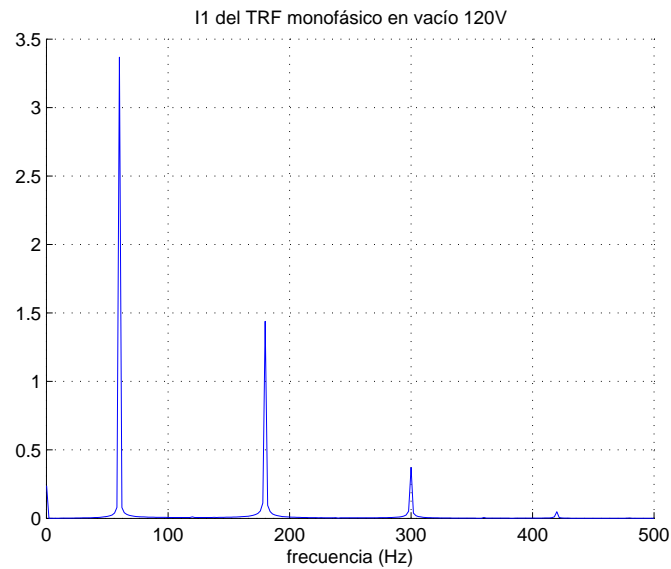
Cuadro B.3: Magnitudes de los Armónicos de la onda V_1 del transformador monofásico para incrementos de 0-120V

V_1 (V)	1	2	3	4	5	6	7	8
10	14,7180	0,0380	0,0831	0,0218	0,4188	0,0079	0,1022	0,0067
20	29,6016	0,0470	0,1566	0,0084	0,8673	0,0143	0,2493	0,0107
30	44,2853	0,0994	0,2061	0,0427	1,2104	0,0175	0,3617	0,0180
40	59,5546	0,0942	0,2921	0,0402	1,7063	0,0257	0,5626	0,0221
50	74,5891	0,0532	0,4104	0,0195	2,1540	0,0074	0,7076	0,0010
60	89,7291	0,2236	0,4290	0,0971	2,3588	0,0325	0,6700	0,0274
70	105,019	0,1442	0,7436	0,0458	3,0126	0,0186	0,9136	0,0180
80	120,811	0,1107	0,9012	0,0528	3,4679	0,0541	1,0125	0,0188
90	136,713	0,2984	0,9721	0,1356	3,8445	0,0370	1,1186	0,0616
100	153,020	0,2383	1,2771	0,0990	4,4365	0,0312	1,3480	0,0435
110	169,175	0,0919	1,5736	0,0658	5,1890	0,0308	1,5183	0,0228
120	185,543	0,0784	1,8114	0,0543	5,6481	0,0261	1,6378	0,0066

Figura B.4: Análisis de Fourier para la señal V_2 adquirida con el analizador de redes a 120V

Cuadro B.4: Magnitudes Armónicas de la onda V_2 del transformador monofásico para incrementos de 0-120V

Tensión V_1 (V)	1	2	3	4	5	6	7	8
10	13,5270	0,0427	0,0910	0,0244	0,4132	0,0119	0,0999	0,0096
20	27,2475	0,0518	0,1699	0,0225	0,8634	0,0208	0,2449	0,0094
30	40,8052	0,0968	0,2226	0,0480	1,2043	0,0219	0,3593	0,0273
40	54,8731	0,0936	0,3332	0,0362	1,7014	0,0172	0,5544	0,0168
50	68,7236	0,0491	0,5070	0,0146	2,1529	0,0036	0,7013	0,0074
60	82,6564	0,2170	0,5690	0,1014	2,3728	0,0348	0,6621	0,0294
70	96,6729	0,1243	1,0521	0,0468	3,0527	0,0183	0,8994	0,0210
80	111,099	0,1337	1,4058	0,0544	3,5531	0,0528	0,9819	0,0140
90	125,437	0,2932	1,7099	0,1288	4,0338	0,0381	1,0468	0,0587
100	140,032	0,2301	2,6217	0,0914	4,9182	0,0332	1,1422	0,0424
110	154,023	0,1200	4,0954	0,0690	6,2313	0,0432	1,1715	0,0225
120	167,635	0,1014	5,9674	0,0736	7,4314	0,0241	1,3182	0,0017

Figura B.5: Análisis de Fourier para la señal I_1 adquirida con el analizador de redes a 120V

Cuadro B.5: Magnitudes Armónicas de la onda I_1 del transformador monofásico para incrementos de 0-120V

Tensión V_1 (V)	1	2	3	4	5	6	7	8
10	0,1004	0,0007	0,0020	0,00079	0,0011	0,00028	0,00035	0,000098
20	0,1636	0,0121	0,0128	0,0074	0,0051	0,0043	0,0036	0,0018
30	0,2180	0,0191	0,0155	0,0033	0,0085	0,0047	0,00076	0,0019
40	0,2973	0,0176	0,0233	0,0089	0,0081	0,0023	0,0061	0,0026
50	0,3956	0,0132	0,0413	0,0097	0,0045	0,0055	0,0057	0,0016
60	0,5192	0,0119	0,0685	0,0089	0,0054	0,0051	0,0025	0,0028
70	0,6798	0,0074	0,1124	0,0081	0,0112	0,0054	0,0021	0,0044
80	0,8946	0,0081	0,1800	0,0061	0,0213	0,0058	0,0027	0,0047
90	1,1992	0,0058	0,2899	0,0051	0,0426	0,0043	0,0082	0,0037
100	1,6813	0,0064	0,4981	0,0045	0,0992	0,0056	0,0225	0,0028
110	2,4462	0,0082	0,8642	0,0023	0,2117	0,0062	0,0431	0,0027
120	3,6302	0,0104	1,4386	0,0019	0,3705	0,0063	0,0487	0,0032

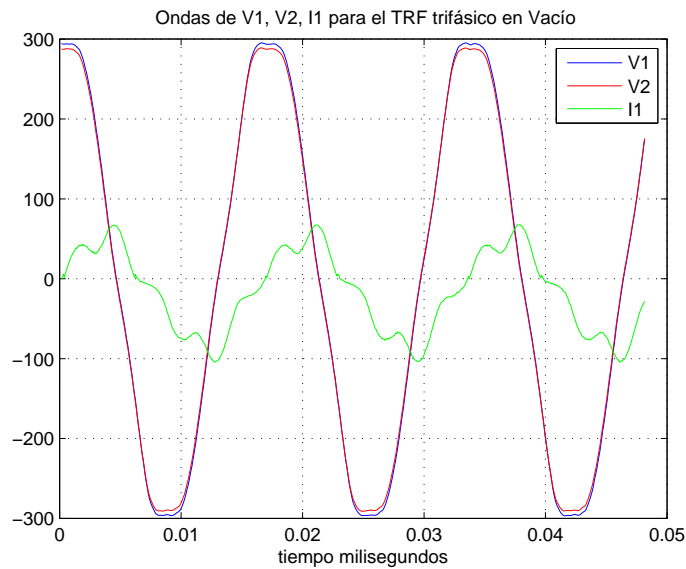


Figura B.6: Ondas de V1, V2, I1 para el transformador trifásico en vacío 220V

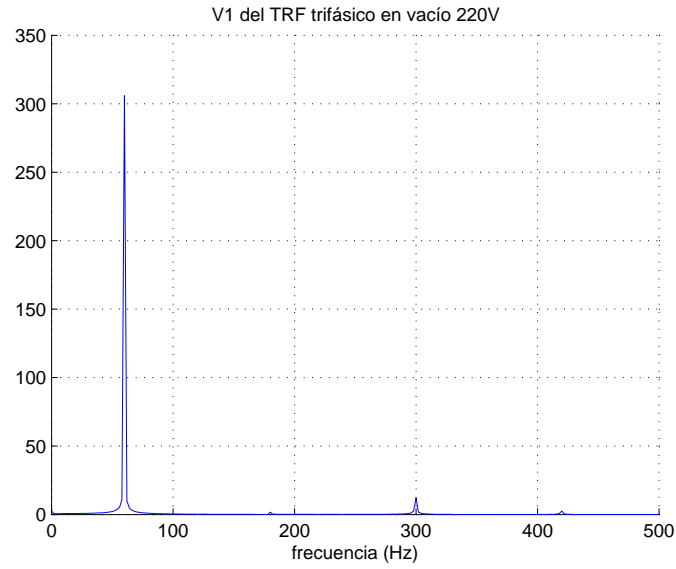


Figura B.7: Análisis de Fourier para la señal V_1 adquirida con el analizador de redes a 220V

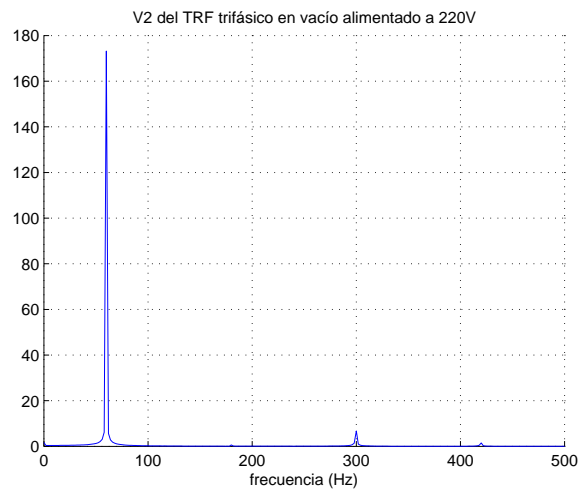


Figura B.8: Análisis de Fourier para la señal V_2 adquirida con el analizador de redes a 220V

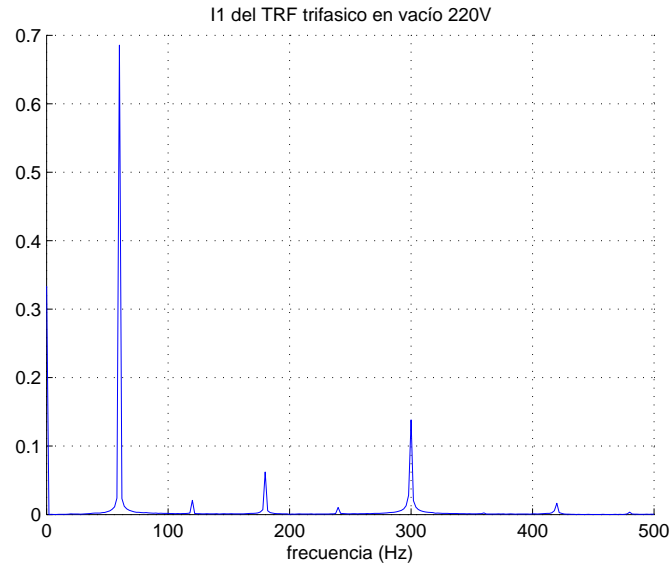


Figura B.9: Análisis de Fourier para la señal I_1 adquirida con el analizador de redes a 220V

Cuadro B.6: Magnitudes Armónicas de las ondas V_1 , V_2 , I_1 en vacío del transformador trifásico para 220V

Magnitud del Armónico	1	2	3	4	5	6	7	8
$V_1(V)$	329,7015	0,2261	1,8070	0,0504	12,1507	0,0374	2,5780	0,0316
$V_2(V)$	186,6810	0,1309	0,6374	0,0322	6,7309	0,0170	1,4725	0,0169
$I_1(A)$	0,7391	0,0207	0,0620	0,0103	0,1384	0,0024	0,0165	0,0035

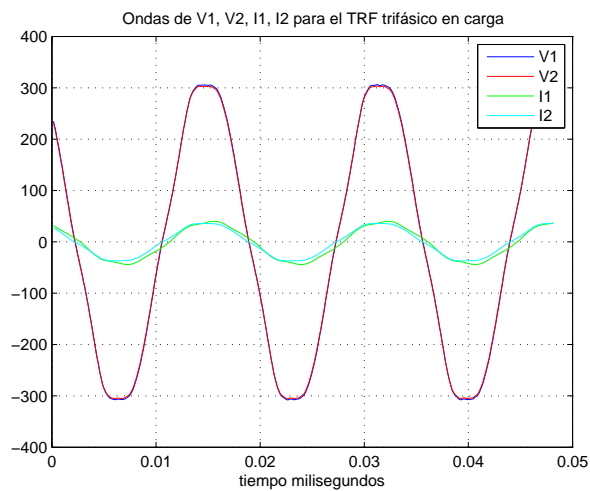


Figura B.10: Ondas de V_1 , V_2 , I_1 , I_2 para el transformador trifásico en carga

Apéndice C

Manual del usuario

C.1. Introducción

La herramienta computacional es una aplicación desarrollada en Matlab, mediante una interfaz de usuario que plantea inicialmente la evaluación del núcleo de un transformador candidato a ser reparado, para ello se presenta la opción de ver las diferentes curvas características del núcleo y adicionalmente se determinan las pérdidas de energía, teniendo en cuenta que se hallan los parámetros del transformador en vacío para la configuración del modelo T.

Como una segunda aplicación simulando el comportamiento del transformador una vez reparado, la herramienta le permite al usuario realizar una estimación de los parámetros del transformador bajo carga, y a partir de estos se realiza una cuantificación de los costos generados por las pérdidas de energía experimentadas por los mismos, para un período de amortización acorde al número de años que el usuario desee.

C.2. Requerimientos

Los requerimientos mínimos de hardware para utilizar esta herramienta son:

- Procesador Pentium III, Athlon 2000 o superiores.
- Microsoft Windows XP, Mac OS, Linux (Ubuntu), o versiones siguientes.
- Memoria RAM de 128 MB
- Tarjeta gráfica de 16 Bits
- 500 MB de espacio en disco duro.

C.3. Instalación

Para utilizar este software, inicialmente se necesita guardar la carpeta llamada "programa" en el equipo, el cual debe tener instalado Matlab 7.0. Para ello:

1. Seleccione desde el CD del software la carpeta "programa" y guárdela en el escritorio del PC que desee utilizar.
2. Seguidamente puede continuar con el proceso de ejecución.

Nota: En la carpeta "programa" debe almacenar los ejecutables: primera, parametrosal, estudioEconomico y otros archivos requeridos para su ejecución. Es necesario que los archivos bases de la herramienta no sean retirados de la carpeta para garantizar el correcto funcionamiento.

C.4. Ejecución

Para ejecutar el programa se le solicita al usuario:

- Conocer las características del núcleo en el proceso de evaluación.
- Guardar los datos obtenidos en las pruebas previas de laboratorio en un archivo de Excel. Se recomienda almacenar este archivo en una carpeta llamada "resultado de pruebas" y guardarla en el escritorio del PC a utilizar.
- Guardar los archivos (*.mat) obtenidos en el proceso de evaluación con el adquisidor de señales en una carpeta y la misma guardarla en la carpeta "resultado de pruebas".
- Guardar los archivos (*.mat) obtenidos con el adquisidor de señales en el proceso de cuantificación de pérdidas, tanto en vacío, como bajo carga en la carpeta "resultado de pruebas".

C.4.1. Ejecución primera

Para su ejecución inicie abriendo Matlab, desde allí vaya al menú archivo y abra el ejecutable "primera" que se encuentra en la carpeta "programa". Luego pulse F5 para correrlo y espere a que se abra la ventana "primera". Ver figura C.1. Esta ventana se divide en cuatro áreas para facilitar su interpretación.

Área A: Selección de la bobina de acople

Inicie seleccionando el conductor y el número de espiras, para ello en el área A modifique las entradas, seguidamente de click en continuar y espere a que se actualicen las salidas.

Entradas Escritas

- S_n es el área de la sección transversal de la columna en m^2 .
- S_m es la potencia monofásica en VA .
- B es la densidad de flujo magnético en *Teslas*.

Salidas

- n_s es el número de espiras V_u .
- I es la capacidad de corriente que debe soportar el conductor de la bobina en A .

En base a la salida I , seleccione en la tabla que se muestra en el área D el calibre del conductor a utilizar.

The screenshot shows a software window titled "Primera" with several input fields and a table. The fields are organized into four areas:

- Área A:** Contains input fields for S_n (value: .4176e-4 m^2), S_m (value: 2000 VA), B (value: 1.1 T), I (value: 3.33333 A), and n_s (value: 92). A "Continuar" button is also present.
- Área B:** Contains input fields for r_p (value: 150e3 Ohm), l_c (value: 0.748 m), G_s (value: 0.3 kg), r_s (value: 0.253 Ohm), S_n (value: .4176e-4 m^2), S_{Cu} (value: 1.0387 mm^2), c (value: 10e-6 F), G (value: 6.1016 kg/dm^3), and n_s (value: 92). A "Continuar" button is also present.
- Área C:** Contains an "Examinar..." button and a text field with the path "js\Oscar García C\Escritorio\cd de proyecto para quemar\DATOS DE PROYECTO\". A "Continuar" button is also present.
- Área D:** Contains a table with the following data:

Calibre	Área[mm^2]	Tensión[kg]	Capacidad[A]	
12	17	1.04	6.22	10
13	18	0.823	4.92	8.1
14	19	0.653	3.91	6.4
15	20	0.519	3.1	5.1
16	21	0.411	2.46	4.1

Figura C.1: Ventana que representa la función PRIMERA

Área B: Entradas para la evaluación

Actualice en el área B las características del núcleo a evaluar y los parámetros del circuito eléctrico.

- r_p es el valor de la resistencia de la rama en paralelo Ω .
- r_s resistencia en serie Ω .
- C es el valor de la capacitancia de la rama en paralelo en Faradios F .
- l_c la longitud media del circuito magnético.
- n_s es el número de espiras V_u .
- S_{cu} la sección del conductor en mm^2 .
- G_s peso total de la bobina arrollada sobre el núcleo en kg .
- G peso específico de la chapa kg/dm^3 .

Área C: Barra de direcciones

Ahora seleccione el archivo de Excel que ha sido guardado previamente. Ver figura C.3. Para ello de click en examinar y espere a que se abra la ventana "Archivo de datos con que desea trabajar" y seleccione el archivo. Ver figura C.2.

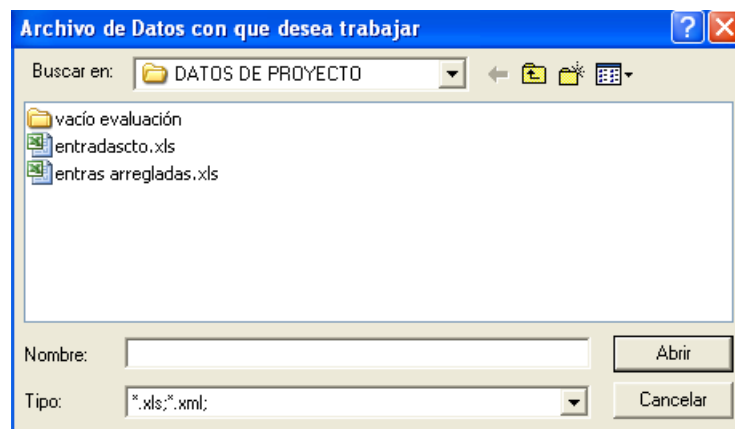


Figura C.2: Selección del archivo de datos para el proceso de evaluación

V_i [V]	V_{ind} [V]	V_c [mV]	V_r [mV]	I_e [mA]	w [W]
1,69	1,66	3,00	5,00	13,00	0,01
4,22	4,16	6,00	9,00	28,00	0,05
5,05	4,99	9,00	10,00	33,00	0,08
6,23	6,16	10,00	12,00	40,00	0,14
7,15	7,09	12,00	13,00	44,00	0,19
8,00	7,920	13,00	14,00	49,00	0,23
9,28	9,190	15,00	15,00	55,00	0,31
10,00	9,930	17,00	16,00	59,00	0,37
10,98	10,870	18,00	17,00	64,00	0,44
12,45	12,330	21,00	19,00	70,00	0,56
13,47	13,360	22,00	20,00	75,00	0,64
14,72	14,590	24,00	21,00	81,00	0,77
16,00	15,860	27,00	23,00	87,00	0,90
17,69	17,520	29,00	25,00	95,00	1,08
18,38	18,220	30,00	26,00	97,00	1,17
19,46	19,300	32,00	27,00	103,00	1,31
20,63	20,450	34,00	28,00	108,00	1,46
21,52	21,320	36,00	29,00	112,00	1,59
23,00	22,810	38,00	31,00	118,00	1,8
23,99	23,790	39,00	32,00	123,00	1,94

Figura C.3: Datos adquiridos en las pruebas y entrada como archivo a la función primera

Luego de click en continuar, espere a que se abra la ventana "graficasal" donde puede seleccionar la curva que desea visualizar. Ver figura C.4.

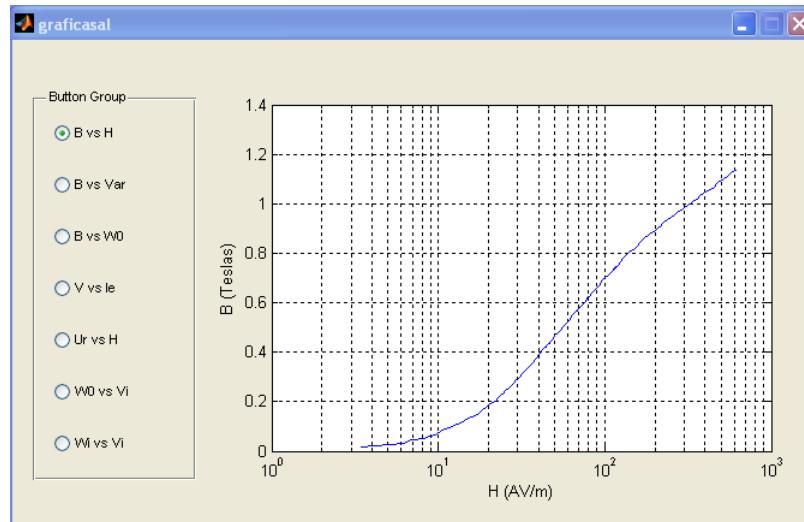


Figura C.4: Ventana para la selección de gráficas a visualizar

C.4.2. Ejecución Parametrosal

Para ejecutar este programa primero debe abrir desde Matlab el ejecutable "parametrosal" que se encuentra en la carpeta "programa".

Luego oprima F5 para correr el programa y espere a que se abra la ventana "parametrosal". Ver figura C.5.

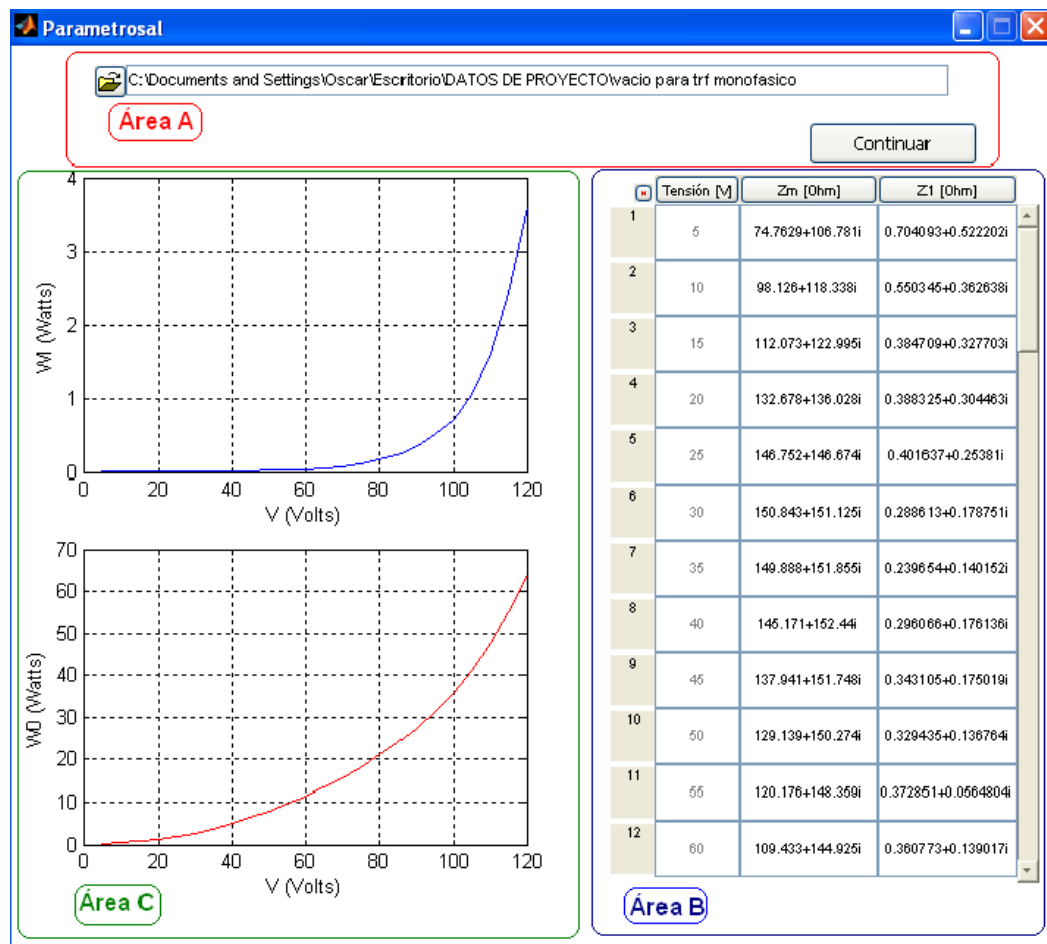


Figura C.5: Ventana de la función parametrosal dividida en áreas

Área A: Barra de direcciones

En esta área pulse examinar, espere a que se abra la ventana "buscar carpeta". Ver figura C.6. Seleccione la carpeta "vacío evaluación" guardada previamente en la carpeta "resultado de pruebas" y de click en continuar.

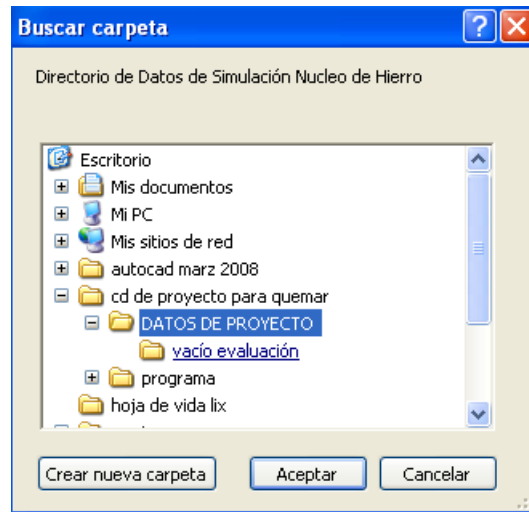


Figura C.6: Ventana en la que se selecciona el archivo, en donde se han almacenado los datos del adquisidor de señales

Área B: Parámetros de salida del modelo T

Seguidamente en esta área se actualizan automáticamente los valores de impedancia del modelo planteado para la evaluación.

- Z_m es la impedancia en serie de magnetización..
- Z_1 es la impedancia que representa la bobina primaria del transformador.

Área C: Gráficas de pérdidas

En esta área se presentan las gráficas de pérdidas en el hierro y cobre para cada tensión en bornes del devanado primario.

C.4.3. Ejecución estudioEconomico

Debe abrir desde Matlab el ejecutable "estudioEconomico" que se encuentra en la carpeta "programa". Luego oprima F5 y espere a que se abra la ventana " estudioEconomico". Ver figura C.7.

EstudioEconomico

Valores

FP: 0.9 Vbaja: 220 Inversión: 3e6
Pm: 8000 Int: 24 Mant. N: 1e5
Vb: 120 Costo: 200 Reparación: 1.5e6
Área A: 381.05 Tiempo: 8 Mant. R: 2e5

Parámetros: Área D

Z1: 0.28402+0.18289i
Z2: 0.27323+0.15106i
Z1m: 208.3127+394.488i
Zm: 208.0287+394.3051i

Examinar... C:\Documents and Settings\Oscar García C\Escritorio\cd de proyecto para quemar\DA1
Examinar... C:\Documents and Settings\Oscar García C\Escritorio\cd de proyecto para quemar\DA1
Continuar **Área B**

Análisis del Transformador Reparado

	Estrato	KW-H Anual Cu	KW-H Anual Fe	KW-H Total Anual	Costos Perdidas	Costos Totales
1	1	602.315	1205.26	1807.58	1.23682e+006	3.42107e+006
2	2	602.315	1205.26	1807.58	1.23682e+006	3.42107e+006
3	3	571.8	1204.43	1776.23	1.21537e+006	3.39962e+006
4	4	526.509	1203.69	1730.2	1.18388e+006	3.36813e+006
5	5	748.467	1208.71	1957.17	1.33918e+006	3.52343e+006
6	6	743.953	1208.14	1952.1	1.33571e+006	3.51996e+006

Área C

Análisis del Transformador Nuevo

	Estrato	KW-H Anual Cu	KW-H Anual Fe	KW-H Total Anual	Costos Perdidas	Costos Totales
1	1	499.921	602.63	1102.55	754415	4.09654e+006
2	2	499.921	602.63	1102.55	754415	4.09654e+006
3	3	474.594	602.215	1076.81	736800	4.07892e+006
4	4	437.003	601.847	1038.85	710827	4.05295e+006
5	5	621.228	604.353	1225.58	838597	4.18072e+006
6	6	617.481	604.072	1221.55	835841	4.17796e+006

Figura C.7: Ventana para realizar el estudio económico de un transformador reparado

En esta ventana actualice primero las entradas ubicadas en el área A.

Área A: Entradas

En esta área registre las entradas para el proceso de cuantificación de pérdidas que se enuncian a continuación:

- FP es el factor de potencia.
- Pm es la potencia VA .
- $Valta$ es la tensión de línea en alta del transformador.

- V_{baja} es la tensión de línea en baja del transformador.
- Int es la tasa de interés compuesto anual.
- $Costo$ es el costo de la energía en pesos por kilovatio-hora en el lugar de la instalación.
- $Tiempo$ es el período de amortización en años.
- $mant R$ es el valor del mantenimiento durante un año (para el transformador reparado).
- $inversión$ es el costo del transformador nuevo.
- $mant Nes$ es el valor del mantenimiento durante un año (para el transformador nuevo).
- $Reparación$ es el costo de reparación del transformador.

Área B: Barra de direcciones

En esta área debe dar click a los botones examinar, para buscar los archivos de pruebas en vacío y bajo carga respectivamente. Una vez se abra la ventana "archivo datos con que desea trabajar" ver figura C.7, debe seleccionar los archivos (*.mat) en donde se han almacenado los datos adquiridos en el proceso de pruebas y dar click en el botón continuar.

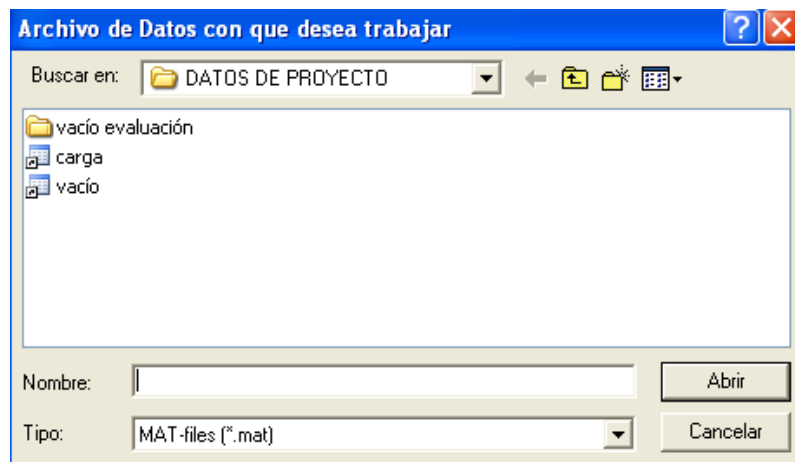


Figura C.8: Ventana para selección de datos con que se desea trabajar

Área C: Tabla de pérdidas y cuantificación de costos

Ahora automáticamente se actualiza la tabla de pérdidas anuales en el hierro y cobre para cada estrato, utilizando el transformador nuevo y el reparado. Igualmente en la tabla se presenta el costo de dichas pérdidas capitalizadas al año que el usuario desee y el costo total asumido incluyendo a este el costo de mantenimiento y el costo de inversión o reparación.

Área D: Salida de los parámetros del transformador

En esta área puede visualizar los parámetros del transformador que se han encontrado durante la ejecución del programa.

- $Z1$ es la impedancia correspondiente a la bobina primaria.
- $Z2$ es la impedancia correspondiente a la bobina secundaria y referida al primario.
- Zm es la impedancia serie de magnetización.
- $Z1m$ es la impedancia $Z1+Zm$ vista en vacío para el mismo transformador.

Apéndice D

Imágenes de los montajes de laboratorio

D.1. Introducción

Este apéndice recopila las imágenes de las pruebas realizadas en el laboratorio para el desarrollo de este proyecto.

D.2. Imágenes

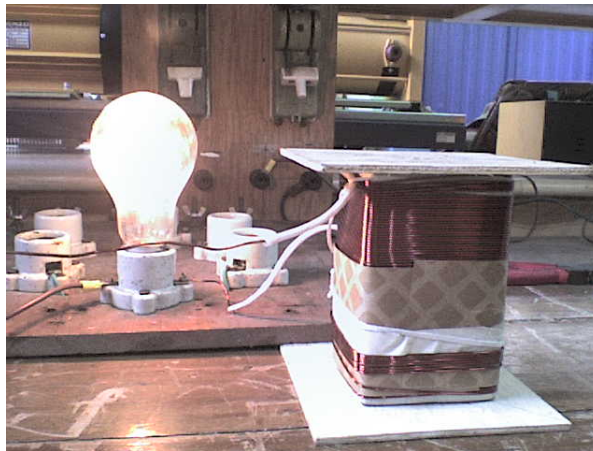


Figura D.1: Estudio de la bobina con núcleo de madera

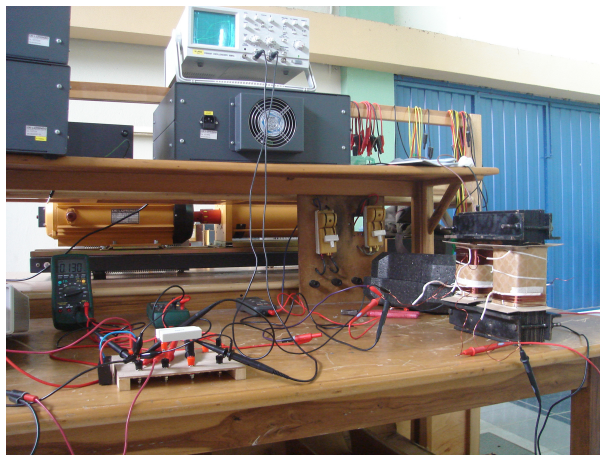


Figura D.2: Montaje del circuito para adquirir la curva de histéresis



Figura D.3: Núcleo monofásico usado en el estudio



Figura D.4: Adquisición de datos para el núcleo en estudio

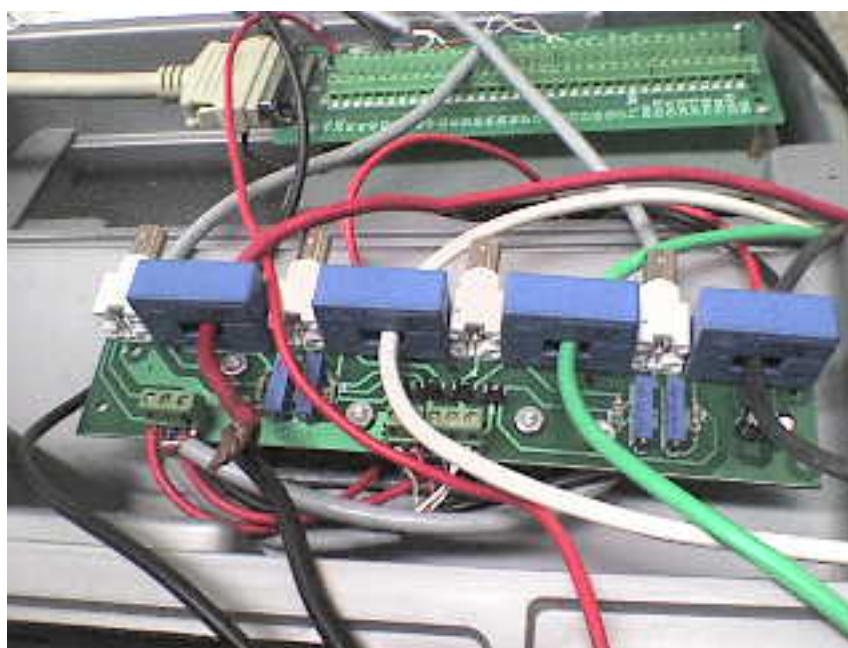


Figura D.5: Adquisición de las ondas de corriente

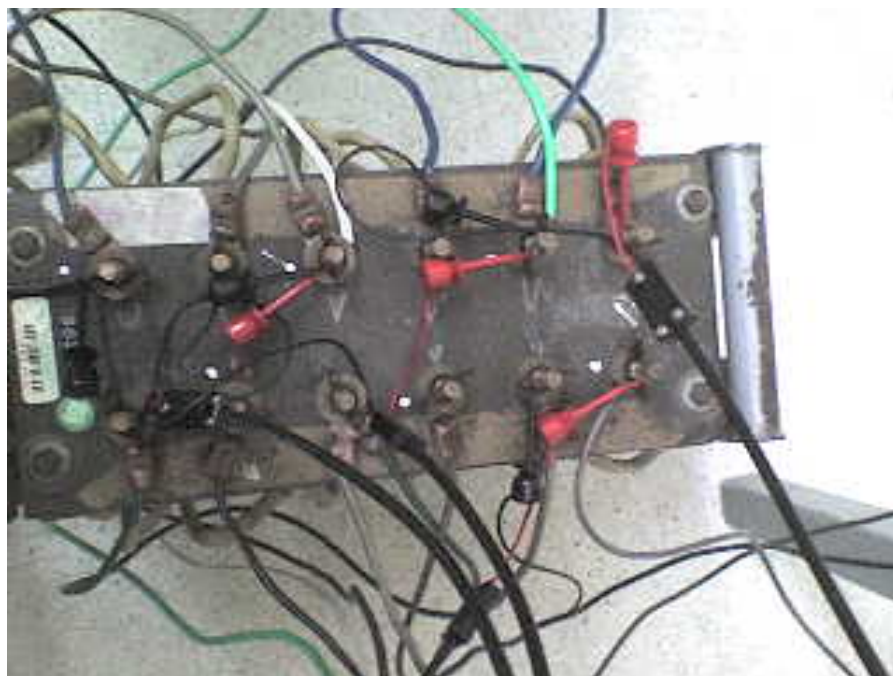


Figura D.6: Adquisición de las ondas de tensión



Figura D.7: Transformador trifásico de 8 kVA utilizado

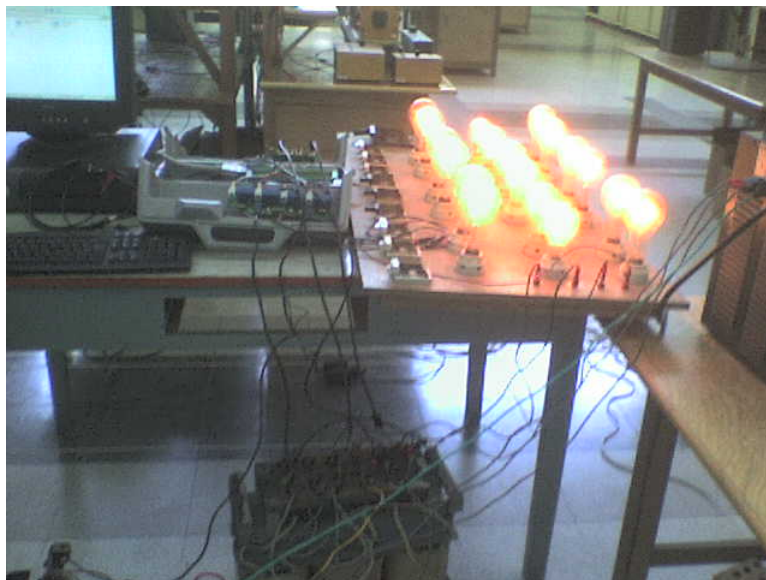


Figura D.8: Adquisición de datos para el transformador trifásico bajo carga