

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



TRABAJO DE FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

**ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA IMPEDANCIA
HOMOPOLAR DEL TRANSFORMADOR**

Tutor: Juan Carlos Burgos Díaz

Autor: Conrado Watson Nsue

Leganés, Septiembre 2015

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	3
ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	9
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. ENTORNO SOCIO-ECONÓMICO.....	11
1.2. OBJETIVO DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO.....	16
1.3. ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO.....	17
CAPÍTULO 2: TRANSFORMADOR DE POTENCIA.....	18
2.1. HISTORIA DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA.....	18
2.2. INTRODUCCIÓN AL TRANSFORMADOR DE POTENCIA.....	19
2.3. CONSTITUCIÓN FÍSICA DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA.....	20
2.4. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA.....	22
2.5. CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR DE TRES ARROLLAMIENTOS.....	24
2.6. ESTUDIO DE CORTOCIRCUITOS ASIMÉTRICOS.....	25
2.7. CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA DE SECUENCIA DIRECTA	26
2.8. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE EL CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR.....	29
2.8.1. Fundamentos básicos sobre las impedancias homopolares sobre transformadores YNynd.....	29
2.8.2. Cálculo de la impedancia magnetizante homopolar.....	30
2.8.3. Cálculo de la impedancia homopolar entre arrollamientos.....	31
2.8.4. Cálculo de la impedancia homopolar cuando más de un arrollamiento lleva corriente.....	32

CAPÍTULO 3: MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.....34

3.1. INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.....	34
3.2. HISTORIA DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.....	35
3.3. DEFINICIÓN DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.....	36
3.4. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.....	36
3.5. FUNCIONES DE FORMA DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.....	39
3.5.1. Propiedades de forma.....	39
3.5.2. Criterio de la parcela.....	39
3.5.3. Tipos de funciones de forma.....	40
3.5.4. Integración numerica.....	40
3.5.5. Estimación del error y mallado adaptativo.....	43
3.5.5.1. Estimación del error.....	44
3.5.5.2. Mallado adaptativo.....	44

CAPÍTULO 4: CARACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR EN

ESTUDIO.....46

4.1. MODELADO EN ELEMETOS FINITOS.....	49
4.2. CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA DE SECUENCIA DIRECTA.....	52
4.3. OBTENCIÓN DE LA IMPEDANCIA DE SECUENCIA HOMOPOLAR DEL TRANSFORMADOR.....	54
4.3.1. Geometría del transformador en el cálculo de la impedancia de secuencia directa.....	56
4.3.2. Cálculo de los enlaces de flujo de los arrollamientos.....	58
4.3.3. Cálculo de la corriente del arrollamiento en cortocircuito.....	61
4.3.4. Cálculo de la impedancia de secuencia homopolar.....	63

CAPÍTULO 5: RESULTADOS.....65

5.1. INFLUENCIA DE LA ALTURA ENTRE ARROLLAMIENTOS.....	66
5.2. INFLUENCIA DE LA DISTANCIA ENTRE ARROLLAMIENTOS AT Y BT.....	69
5.3. INFLUENCIA DE LA DISTANCIA ENTRE EL ARROLLAMIENTO AR Y LA	

CUBA.....	72
5.4. INFLUENCIA DE LA DISTANCIA ENTRE EL ARROLLAMIENTO Y EL NÚCLEO.....	74
5.5. INFLUENCIA DEL ESPESOR DEL ARROLLAMIENTO DE AT.....	77
5.6. INFLUENCIA DEL ESPESOR DEL ARROLLAMIENTO DE BT.....	80
5.7. INFLUENCIA DEL ESPESOR DEL CANAL DE IDA DEL FLUJO MAGNÉTICO.....	82
5.8. ENERGIA ALMACENADA EN LA CUBA.....	85
CAPÍTULO 6: RESUMEN, CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	92
6.1. RESUMEN.....	92
6.2. CONCLUSIONES.....	94
6.3. TRABAJOS FUTUROS.....	96
CAPÍTULO 7: PRESUPUESTO.....	98
CAPÍTULO 8: BIBLIOGRAFIA.....	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Esquema del sistema eléctrico español que relaciona los distintos puntos en los que resulta necesario la utilización de transformadores con sus distintas actividades de negocio (Generación, Transporte y Distribución).....	13
Figura 2.1: Transformador de potencia.....	18
Figura 2.2: principales magnitudes de un transformador de potencia.....	22
Figura 2.3: circuito equivalente de un transformador de tres arrollamientos.....	25
Figura 2.4: circuito equivalente T de un transformador de potencia.....	26
Figura 2.5: Cortocircuito monofásico a tierra.....	26
Figura 2.6: Recorrido de una línea de campo magnético.....	27
Figura 2.7: Curva de evolución de H_x en cualquier punto de la ventana del transformador.....	28
Figura 2.8: circuito equivalente del método aproximado.....	30
Figura 3.1: Discretización de una malla (modelo de un transformador).....	34
Figura 3.2: Coordenadas del nodo definido por los vectores (i, j, m)	37
Figura 3.3: Tipos de nodos.....	40
Figura 3.4: Transformación geométrica a través de funciones de interpolación.....	40
Figura 3.5: Sistema de coordenadas locales η, ζ, ξ	41
Figura 3.6: Límites de integración de la función f	42
Figura 3.7: Integración Gauss-Legendre de la función f	43
Figura 4.1: Transformador trifásico de tres columnas.....	46
Figura 4.2: En la parte a) se muestra la conexión del transformador en las posiciones de regulación de tensión inferior a la asignada, en las que el arrollamiento de regulación gruesa está fuera de servicio. En la parte b) se muestra la conexión del transformador en las posiciones de tensión superior a la asignada, con el arrollamiento de regulación gruesa en servicio.....	46
Figura 4.3: Posicionamiento de los arrollamientos del transformador.....	47

Figura 4.4: Sección longitudinal del núcleo magnético.....	48
Figura 4.5: Cuba del transformador.....	48
Figura 4.6: Módulos de Comsol multiphysics 3.5 ^a	49
Figura 4.7: Grafico en el que se basan los cálculos de Comsol.....	50
Figura 4.8: Planta del transformador.....	51
Figura 4.9: Corte en el alzado.....	52
Figura 4.10: Representación de las dimensiones del diámetro de los arrollamientos...	52
Figura 4.11: Geometría del transformador utilizada para el cálculo de la impedancia de secuencia directa.....	52
Figura 4.12: Trayectoria de los flujos de secuencia directa.....	56
Figura 4.13: Trayectoria de los flujos de secuencia homopolar.....	56
Figura 4.14: Trayectoria del campo magnético en la cuba.....	57
Figura 4.15: Geometría del transformador (impedancia de secuencia homopolar).....	58
Figura 4.16: Densidad de flujo mediante elementos finitos.....	59
Figura 4.17: división i del flujo i.....	60
Figura 4.18: Código Matlab para el cálculo del flujo concatenado por cada arrollamiento.....	61
Figura 4.19: Método de Newton Raphson.....	62
Figura 4.20: Código Matlab del Método de Newton Raphson.....	63
Figura 4.21: Código Matlab para la obtención de la impedancia porcentual.....	63
Figura 5.1: Diferentes caminos de la línea de flujo homopolar.....	66
Figura 5.2: Evolución de la impedancia homopolar según su altura.....	68
Figura 5.3: Curva de evolución de las impedancias A1A y B1A frente a la variación de la distancia del arrollamiento AT y cuba.....	70
Figura 5.4: Trayectorias del flujo homopolar en el caso B1A.....	71
Figura 5.5: Trayectorias del flujo homopolar en el caso B1A.....	71
Figura 5.6: Evolución de las impedancias homopolares A1A y B1A cuando se produce una variación en la distancia entre los arrollamientos AT-BT.....	73
Figura 5.7: Curva de evolución de las impedancias homopolares A1A y B1A cuando se produce un incremento en la distancia entre el arrollamiento de BT y el núcleo.....	76

Figura 5.8: Curva de evolución de las impedancia homopolar A1A y de la impedancia homopolar B1A cuando se produce un incremento del espesor del arrollamiento de AT.....	79
Figura 5.9: Curva de evolución de las impedancia homopolar A1A y de la impedancia homopolar B1A cuando se produce un incremento del espesor del arrollamiento de baja tensión.....	81
Figura 5.10: Evolución de las impedancia homopolar A1A en función de la distancia ponderada.....	83
Figura 5.11: Evolución de las impedancia homopolar B1A en función de la distancia ponderada.....	83
Figura 5.12: Imagen de los recintos de la cuba antes de realizar el ensayo.....	85
Figura 5.13: Imagen del reparto del flujo magnético en cada una de las partes de la cuba antes de analizar la influencia de los recintos según la energía que almacenan cada uno de ellos en el ensayo A1A.....	85
Figura 5.14: Forma de la cuba tras realizar las divisiones necesarias para realizar estudio de la energía en cada uno de los ensayos correspondientes (Impedancia homopolar A1A e Impedancia homopolar B1A).....	86
Figura 5.15: Distribución del flujo magnético en la cuba tras la formación de nuevos recintos.....	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Resumen de los costes computados de la tarifa eléctrica.....	13
Tabla 1.2: Relación entre las distintas instalaciones eléctricas de la red española con sus distintos niveles de tensión.....	14
Tabla 4.1: Características principales del transformador de potencia.....	47
Tabla 4.2: Dimensiones del transformador.....	48
Tabla 4.3: Conductividad y permeabilidad de los elementos del transformador.....	51
Tabla 4.4: Comparación entre valores de ensayo y valores reales.....	54
Tabla 4.5: Impedancia homopolar del ensayo vs Impedancia homopolar de fábrica.....	64
Tabla 5.1: Influencia de la altura A1A.....	67
Tabla 5.2: Influencia de la altura B1A.....	68
Tabla 5.3: sensibilidad de la influencia de la altura.....	69
Tabla 5.4: influencia de la distancia entre los arrollamientos AT-BT en la impedancia homopolar A1A del transformador.....	69
Tabla 5.5: influencia de la distancia entre los arrollamientos AT-BT en la impedancia homopolar B1A del transformador.....	69
Tabla 5.6: Sensibilidad de las impedancias A1A y B1A frente a la influencia de la distancia del arrollamiento AT y BT.....	72
Tabla 5.7: Porcentaje de variación de la impedancia homopolar A1A y la impedancia homopolar B1A con respecto al valor inicial de la impedancia homopolar cuando se produce una variación en la distancia del arrollamiento de AT y BT.....	72
Tabla 5.8: Influencia de la distancia entre el arrollamiento AT y la cuba en la impedancia homopolar A1A.....	73
Tabla 5.9: Influencia de la distancia entre el arrollamiento AT y la cuba en la impedancia homopolar B1A.....	75
Tabla 5.10: Sensibilidad de las impedancias A1A y B1A frente a la influencia de la distancia del arrollamiento AT y la cuba.....	75
Tabla 5.11: influencia de la distancia entre el arrollamiento de BT y el núcleo en la impedancia homopolar A1A.....	75

Tabla 5.12: influencia de la distancia entre el arrollamiento de BT y el núcleo en la impedancia homopolar B1A.....	76
Tabla 5.13: Variación en porcentaje de la impedancia homopolar A1A y la impedancia homopolar B1A con respecto a sus respectivos caso base.....	78
Tabla 5.14: Porcentaje de sensibilidad de la influencia de la distancia entre el arrollamiento de BT y el núcleo en la impedancia homopolar A1A y la impedancia homopolar B1A del transformador de potencia.....	78
Tabla 5.15: Influencia del espesor del arrollamiento de alta tensión en el valor porcentual de la impedancia homopolar A1A.....	78
Tabla 5.16: Influencia del espesor del arrollamiento de alta tensión en el valor porcentual de la impedancia homopolar A1A.....	79
Tabla 5.17: Porcentaje de variación del valor porcentual de la impedancia homopolar A1A con respecto al valor del caso base y Porcentaje de variación del valor porcentual de la impedancia homopolar B1A con respecto al valor del caso base.....	80
Tabla 5.18: Porcentaje de sensibilidad de la influencia del espesor del arrollamiento de alta tensión en la impedancia homopolar A1A y en la impedancia homopolar B1A.....	80
Tabla 5.19: Influencia del espesor del arrollamiento de baja tensión en el valor porcentual de la impedancia homopolar A1A.....	81
Tabla 5.20: Influencia del espesor del arrollamiento de baja tensión en el valor porcentual de la impedancia homopolar B1A.....	81
Tabla 5.21: Dimensiones de los recintos iniciales de la cuba antes de realizar el ensayo.....	84
Tabla 5.22: Dimensiones de los nuevos rectángulos obtenidos tras la división de la forma inicial de la cuba.....	87
Tabla 5.23: Número y significado de cada uno de los subdominios de que consta la cuba del transformador de potencia.....	89
Tabla 5.24: Energía magnética almacenada en los distintos subdominios del transformador según el ensayo de la impedancia homopolar B1A.....	89
Tabla 5.25: Energía magnética almacenada en los distintos subdominios del transformador según el ensayo de la impedancia homopolar A1A.....	90
Tabla 6.1: Sensibilidad de las impedancias homopolares a las variaciones de las dimensiones.....	96
Tabla 8.1: Presupuesto del trabajo.....	98

CAPÍTULO 1:

INTRODUCCIÓN

1.1. ENTORNO SOCIO-ECONÓMICO

En la era actual, denominada era de la informática, el consumo de electricidad se ha visto incrementado notablemente, pero este crecimiento se verá reducido en los próximos años.

[MIT11] El consumo energético es función del crecimiento económico, y de la intensidad energética de la economía. A su vez, la intensidad energética depende del consumo energético de los sectores productivos y de los sectores consumidores que no contribuyen al PIB, como el sector residencial y el transporte privado.

Si tenemos en consideración los años anteriores a la crisis económica actual en España, entre los años 1990-2008, se registró un crecimiento medio anual del PIB de un 2.9%, sin embargo, en el intervalo de este periodo, entre los años 1993-2007, la media de crecimiento del PIB fue de un 3.5%. Por su parte, en estas mismas fechas se registró un crecimiento anual medio de un 4.4% en la demanda eléctrica, pero desde entonces hasta la fecha este crecimiento ha sido de un 0.5% anual. Estas altas tasas de crecimiento tienen como causa la actividad económica que ha ido ganando la intensidad eléctrica; y ello a pesar de la mejora de la eficiencia de los nuevos equipos eléctricos.

En la estructura del consumo energético final por fuentes, para usos energéticos, la electricidad sigue aumentando su penetración de manera continua a una tasa media próxima al 2% anual, pasando del 19.1% en 2004 al 21.4% en 2010.

[GRE15] Actualmente España cuenta con un sistema de suministro de electricidad basado en un servicio público y de interés general en régimen de monopolio, pero regulado por el estado. El estado tiene el papel de vigilar que el suministro de electricidad se desarrolle al mínimo coste posible pero con una calidad aceptable.

En los años 90 se inició un debate sobre la electricidad en España: ¿la electricidad es un servicio o es un producto?, uno de los resultados de este debate fue el crecimiento de la confianza en las reglas del mercado sobre la confianza en la intervención estatal, lo que a su vez abrió un amplio debate que provocó el abandono del monopolio regulado y desarrolló un nuevo entorno basado en las fuerzas del mercado. El debate de la electricidad concluyó con la definición de la electricidad como dos actividades distintas:

- La electricidad es un producto (energía), cuya producción y venta está sometida a las reglas del mercado.
- La electricidad es un servicio (redes) del transporte y distribución realizado a través de las redes eléctricas con connotaciones de monopolio y consecuentemente regulado.

Tras definir la electricidad como dos actividades distintas (producto y servicio), se estableció el actual principio básico de la electricidad en España:

- Separación de actividades
- Introducción de la competencia en generación
- Acceso regulado a terceros en la red (ATR)
- Capacidad de elegir el propio suministro
- Transición gradual y respeto a los compromisos existentes (CTCs)

Según el principio básico de la electricidad, la administración tiene como objeto, limitarse a velar por el correcto funcionamiento del mercado eléctrico, planificando una red adecuada para que pueda ser utilizada por los agentes al mismo tiempo que garantiza la calidad del suministro eléctrico. En dicho principio se basa la **Directiva 96/92/EC de la Ley 54/1997** [BOE09]:

- Establece la Regulación del Sector Eléctrico con el triple objetivo de garantizar la calidad de suministro eléctrico, la seguridad de dicho suministro, y que esta se lleve a acabo al menor coste posible.
- Establece como actividades claramente diferenciadas la generación, el transporte, la distribución y la comercialización de la electricidad.
- Establece como actividades de carácter liberalizado la generación y la comercialización de la energía, y como actividades de carácter regularizado el transporte y la distribución.

El sistema eléctrico español consta de dos operadores: el Operador del Mercado (OMEL) que se encarga de la gestión económica del mercado de producción, y el Operador del Sistema (OS) que tiene su base en la Red Eléctrica de España (REE) y se encarga de la gestión técnica del sistema eléctrico. Como reguladores del sistema eléctrico español destacan el Ministerio de Industria, Comercio y Turismo que garantiza la seguridad de suministro energético, la competitividad en los mercados de energía y la protección del medio ambiente; y la Comisión Nacional de Energía (CNE) que tiene por objeto velar por la competencia efectiva en los sistemas energéticos y por la objetividad y transparencia de su funcionamiento, en beneficio de todos los sujetos que operan en dichos sistemas y de los consumidores.

En España, los agentes eléctricos ven retribuidos sus servicios a través de tarifas eléctricas (instrumento mediante el cual los agentes del sector eléctrico recuperan los costes previstos destinados a retribuir los servicios de energía eléctrica).

Según datos elaborados por Unión Fenosa en 2008 y según la **Orden ITC/3860/2007**, en la siguiente Tabla se recoge el resumen de todos los costes computados en la tarifa eléctrica en España [GRE15]:

RESUMEN DE COSTES COMPUTADOS EN LA TARIFA ELÉCTRICA (*)

(Millones de Euros)

COSTES DE GENERACIÓN	19.982	68.5 %
COSTES DE TRANSPORTE	1.217	4.2 %
COSTES DE DISTRIBUCIÓN	4.696	16.1 %
COSTES DE GEST. COMERCIAL	313	1.1 %
COSTES PERMANENTES	2.880	9.8 %
COSTES DE DIVERSIFICACIÓN Y SEGURIDAD DE ABASTEC.	83	0.3 %
COSTE TOTAL	29.171	100 %

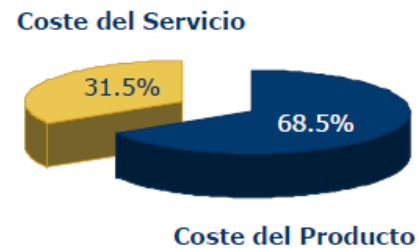


Tabla 1.1: Resumen de los costes computados de la tarifa eléctrica.

El transformador de potencia resulta fundamental en la realización de tres de las cuatro actividades (generación, transporte y distribución) que definen el concepto de electricidad como servicio y producto.[IEC93] la **IEC Standard 60076-1** define cómo transformador de potencia, una máquina estática con dos o más arrollamientos, los cuáles por inducción electromagnética transforman un sistema de tensión y corriente alterna en otro sistema de tensión y corriente también alterna pero de distinta magnitud pero misma frecuencia, para un determinado propósito de transmisión de potencia eléctrica.

En la siguiente figura [GRE15], se ilustra la estructura de la red eléctrica en la que se llevan a cabo las actividades de generación, transporte y distribución, y los puntos en los que resulta necesario utilizar transformadores:

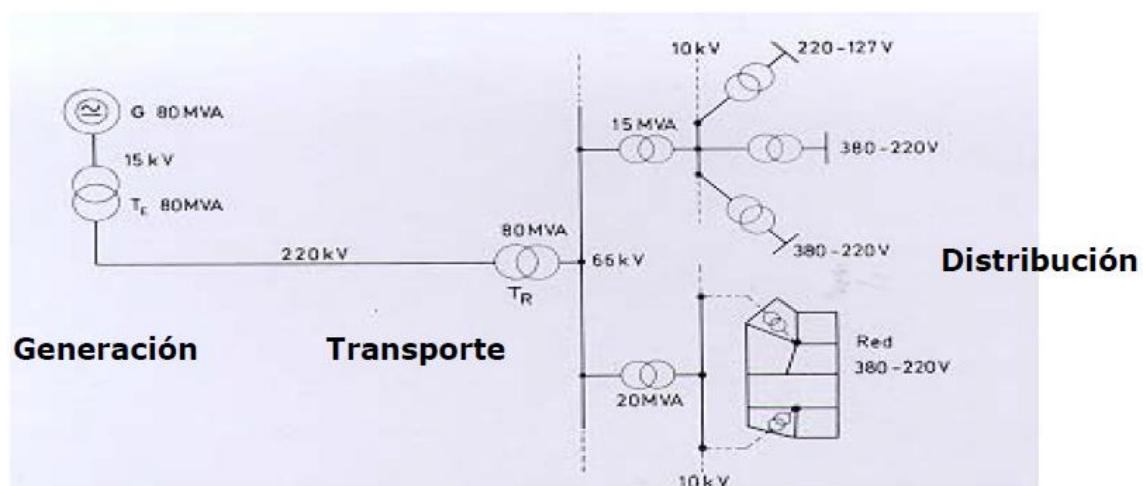


Figura 1.1: Esquema del sistema eléctrico español que relaciona los distintos puntos en los que resulta necesario la utilización de transformadores con sus distintas actividades de negocio (Generación, Transporte y Distribución).

Las instalaciones que intervienen en las redes eléctricas de transporte y de distribución son las siguientes [GRE15]:

Central de generación		6-10-20 kV
Subestación elevadora de central	Transformador GSU	
Líneas de transporte		220 y 400 kV (132 kV)
Subestaciones de interconexión	(Auto)Transformadores de interconexión (MAT/AT)	
Líneas de reparto		66-45 kV (132 kV)
Subestaciones de distribución	Transformadores de potencia (AT/MT)	
Líneas de distribución		25-20-15 kV
Centros de transformación	Transformadores de distribución (MT/BT)	
Consumidor final		400/230 V

Tabla 1.2: Relación entre las distintas instalaciones eléctricas de la red española con sus distintos niveles de tensión.

Según fuentes del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (MITyC), estos son los cinco mayores agentes de distribución eléctrica de un total de 318 distribuidoras en España:

- Electra de Viesgo de Distribución
- Endesa Distribución Eléctrica
- Hidrocantábrico Distribución Eléctrica
- Iberdrola Distribución Eléctrica
- Unión Fenosa Distribución

En un sistema eléctrico, tanto el generador como el transformador son los equipos más importantes. Los transformadores hacen posible de forma práctica y económica el transporte de grandes cantidades de energía de un punto a otro separados por medio de grandes distancias.

Según el Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, en el año 2004 el sistema eléctrico español contaba con una cantidad de 883.410 Km en líneas eléctricas y con un total de transformadores de 318.004 con una capacidad total de 151.000 MVA en instalaciones de distribución eléctrica tanto aéreas como en subterráneas

Transmitir energía eléctrica desde los centros de generación de electricidad hasta los puntos de consumo resulta mucho más económico cuanto mayor tensión se tenga en las líneas, pues a mayor tensión en las líneas menor corriente circula por los conductores lo que se traduce en la necesidad de conductores con menor sección. Cuanta menos sección en los conductores más ahorro económico.

En los centros de generación de electricidad, no se pueden obtener valores de tensión de cualquier dimensión, pues estos valores están limitados por especificaciones tecnológicas a los siguientes valores: 6-10-20 KV. Estos valores de tensión son de una magnitud inferior a las tensiones deseadas en las líneas de transporte y en las líneas de distribución (tabla 1.2 [GRE15]). Sin embargo los valores de tensión (220 y 400 KV) que se obtienen como consecuencia de la transformación realizada en las subestaciones elevadoras de la central de las líneas de transporte son excesivas, hecho que impide utilizar esta energía eléctrica de forma inmediata en los puntos de consumo, pues los dispositivos o equipos eléctricos que se utilizan en estos puntos requieren valores de tensión bastante inferiores (400 y 230 V). Por este motivo es necesario la utilización de transformadores de potencia al final de las líneas de reparto, pues estos reducen la tensión hasta valores de tensión útiles para el consumidor final (se trata de valores de tensión que reducen la necesidad de grandes equipos de aislamiento y por tanto permiten utilizar equipos más económicos al mismo tiempo que garantizan la seguridad en los puntos de consumo).

Las exigencias y requerimientos de los sistemas eléctricos en cuestiones de calidad en el suministro eléctrico, y en redes malladas y de gran potencia implican imposiciones en cuanto a la actuación de cortocircuitos se refiere.

En un estudio de cortocircuitos en la red de alimentación, es de vital importancia realizar un análisis de las corrientes presentes. Pues estas corrientes pueden ser de una magnitud elevada, y está comprobado que corrientes de magnitudes levadas son capaces de producir esfuerzos térmicos y electrodinámicos en los equipos por los que circulan, lo que se traduce en una reducción de la vida útil de los mismos y por tanto en una mayor inversión en términos económicos.

Los cortocircuitos que se deben estudiar son los cortocircuitos trifásicos y los cortocircuitos asimétricos, pero el más importante es el cortocircuito monofásico a tierra.

En el análisis del transformador en condiciones equilibradas, y en especial, en el cálculo de las corrientes de cortocircuito trifásico, se hace necesario disponer de las impedancias de secuencia directa. Pero para el estudio del transformador en condiciones de desequilibrio, es necesario realizar un estudio en el que se tengan en cuenta el sistema de componentes simétricas, que define las intensidades de cortocircuito como una suma de tres sistemas equilibrados: intensidad de secuencia directa, intensidad de secuencia inversa y por último, intensidad de secuencia homopolar. Por este motivo es necesario disponer de una impedancia de secuencia homopolar que permita hallar el valor de la tensión y de la corriente al producirse cortocircuitos asimétricos en la red.

La impedancia homopolar rige la magnitud de las perturbaciones asimétricas, por ese motivo resulta necesario conocer el valor de las impedancias homopolares con exactitud. Pero ese hecho resulta, prácticamente imposible, pues en los estudios de red, la impedancia homopolar del transformador suelen estimarse habitualmente, pues la

normativa no define con exactitud los ensayos a realizar para la obtención de la misma. Motivo por el cual es habitual que se beneficien algunos fabricantes para proveer a los clientes un conjunto incompleto de ensayos para la obtención de la impedancia homopolar.

También es conocido que la impedancia homopolar del transformador está sometida a dos intereses contrastantes [DeL09], que las caídas de tensión sean moderadas (necesidad de una impedancia homopolar reducida), y que las corrientes de cortocircuito sean limitadas (necesidad de una impedancia homopolar elevada). Alcanzar una relación adecuada para ambos casos se hace más difícil cuanto mayor es la potencia del transformador. En el presente Trabajo de Fin de Grado se va a estudiar los distintos factores que influyen en el valor de la impedancia homopolar del transformador.

1.2 OBJETIVO DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO.

El objetivo principal del presente Trabajo de fin de Grado, es analizar y documentar los distintos factores que influyen en la impedancia homopolar de un transformador.

Para ello se diseña en primer lugar, el modelo real del transformador a través del método de los elementos finitos usando el software Comsol Multiphysics 3.5a, y por último se redacta un código Matlab que permita obtener los resultados. Los resultados obtenidos mediante Matlab se comparan con los resultados obtenidos mediante ensayos de fábrica, se trata de ensayos realizados con respecto a la norma **ANSI- EEE C 57.12.90** [IEE10]: Todos los ensayos para la recepción y comprobación de las características técnicas garantizadas por el fabricante deberán ser realizados en presencia de representantes de la empresa COMPAÑÍA ENERGÉTICA DE OCCIDENTE S.A. E.S.P. así mismo se realizarán en las instalaciones del proveedor quien debe asumir su costo y proporcionar el material, equipos y personal necesario para tal fin. Si los resultados de los ensayos o los equipos de prueba no son confiables, estas igualmente podrán ser realizadas o repetidas a costa del proveedor en laboratorios oficiales o particulares reconocidos por la COMPAÑÍA ENERGÉTICA DE OCCIDENTE S.A. E.S.P.

Los ensayos de cortocircuito que se realizan en fábrica, se llevan a cabo mediante mediciones del correspondiente arrollamiento en alimentación, con lo cual el análisis del circuito equivalente del transformador obtenido a partir de los ensayos realizados en este Trabajo se llevarán a cabo mediante métodos que permitan calcular la corriente a partir de arrollamientos en cortocircuito.

1.3 ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO

En el presente Trabajo de Fin de Grado, se han redactado un total de 8 capítulos:

El capítulo 1 trata de una breve introducción sobre el Trabajo, donde se relaciona la electricidad y su importancia en la economía española además de la importancia del transformador de potencia en el sistema eléctrico-económico actual. También se habla del objetivo del presente Trabajo de Fin de Grado y la estructura que presenta.

En el capítulo 2, se habla de manera más detallada del transformador de potencia: se abordan temas referidos a su historia, al principio de funcionamiento del transformador de potencia, de su constitución física, además del estudio de los cortocircuitos asimétricos más habituales que pueden afectar al transformador. También se habla sobre la impedancia homopolar y del método adecuado para determinar su valor.

El capítulo 3, por su parte, trata sobre el método adecuado para el cálculo de la impedancia de secuencia homopolar: Método de los elementos finitos. También se comenta sobre las diferentes bibliografías analizadas y que han influido sobre la elección de este método.

En el capítulo 4, se define la manera más adecuada en la que se puede modelar el transformador de potencia, de tal forma que se puedan obtener los resultados deseados en el cálculo de la impedancia de secuencia directa y como no, en el cálculo del valor de la impedancia homopolar del transformador en estudio. También se explica los resultados obtenidos.

En el capítulo 5, se analizan la influencia de los distintos factores que afectan al valor de la impedancia homopolar del transformador. También se comenta la influencia que tiene la energía almacenada en los recintos de que consta la cuba (arrollamientos, espacio entre arrollamientos y el núcleo) sobre la magnitud de los resultados obtenidos.

En el capítulo 6, se explica el porqué de los resultados obtenidos en el capítulo 5, y se realizan sugerencias sobre trabajos futuros relacionados con la impedancia homopolar del transformador de potencia.

En el capítulo 7, penúltimo capítulo del presente Trabajo de Fin de Grado, se realiza un desglose de tanto las horas invertidas en este trabajo como de presupuesto económico invertido.

El último capítulo, capítulo 8, revela la bibliografía examinada para poder elaborar con éxito todos los capítulos anteriormente mencionados y por tanto para elaborar este Trabajo.

CAPÍTULO 2:

EL TRANSFORMADOR DE POTENCIA

2.1. HISTORIA DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA

Históricamente ha habido grandes inventos que han destacado sobre los demás, pero que también han servido de base sobre otros muchos en el desarrollo de la sociedad moderna. El transformador de potencia es uno de estos destacados inventos que posiblemente no sea tan popular como son el internet o los sistemas de comunicación, sin embargo fundamental en el transporte de energía a gran escala por medio de largas distancias.

Actualmente cuando se habla de la historia del transformador de potencia, se remonta hasta la época de Thomas Edison y George Westinghouse, cuyas ideas (DC y AC) compitieron por el dominio del sistema de transmisión de energía eléctrica del futuro.

Durante la década de 1880 las instalaciones eléctricas eran locales, pues las distancias entre los centros de generación y consumo eran bastante cortas. Sin embargo la demanda de energía en las ciudades de crecimiento rápido exigió un aumento en la capacidad de transmisión de energía. Este hecho suponía un aumento de la capacidad de los centros de transformación. Los niveles de tensión se vieron incrementados con el objetivo de conservar las corrientes deseadas en las líneas de alta tensión reduciendo así las pérdidas y las caídas de tensión. En este momento aparece un componente vital y nuevo para el mundo de la electricidad: el transformador de potencia (figura 2.1 [SEI13]).

El transformador de potencia nace con el objetivo de transformar un nivel de tensión a otro, clave en los sistemas de transmisión y distribución de corriente alterna (trabajan a 50 o 60 Hz, alcanzando así un compromiso entre la percepción humana y la conmutación segura de los equipos).



Figura 2.1: Transformador de potencia.

2.2. INTRODUCCIÓN AL TRANSFORMADOR DE POTENCIA

El transformador es una máquina eléctrica estática, destinada a funcionar con corriente alterna, constituida por dos arrollamientos, primario y secundario, que permite transformar la energía eléctrica con unas magnitudes tensión- corriente determinadas, a otros con valores en general diferentes.

La importancia de los transformadores, se debe, a que gracias a ellos ha sido posible el enorme desarrollo de la industria eléctrica a grandes distancias. Téngase en cuenta que el transporte de la energía desde los lugares de producción (centrales), hasta los centros de consumo, es tanto más económica cuanto más alta es la tensión en las líneas, puesto que para cierta potencia a transportar al elevar la tensión en la red de transporte, disminuye la corriente que circula por los conductores de la línea, y como quiera que las pérdidas por efecto Joule son proporcionales al cuadrado de la corriente que circula por los conductores, se reducen estas pérdidas aumentando con ello el rendimiento del transporte de la energía eléctrica.

Sin embargo hay que tener en cuenta que las tensiones generadas en los alternadores de las Centrales Eléctricas están limitadas, por consideraciones tecnológicas, a valores que oscilan entre los 15 y 30 KV, que son insuficientes para alcanzar tal objetivo; por otro lado, salvo casos sumamente raros, la corriente a alta tensión no puede enviarse directamente a los aparatos de distribución, porque estos requieren normalmente tensiones más bajas. Los transformadores permiten conciliar de una forma idónea esas necesidades opuestas, de tal forma que para reducir las pérdidas en las línea se realiza una primera transformación que eleva la tensión de salida de los alternadores a valores del orden de 400 KV (y que en algunos países por su extensión, se ha llegado a sobrepasar los 1000 KV), a los cuales se realiza el transporte de energía; existiendo en los centros receptores otros transformadores que realizan el proceso inverso, reduciendo la tensión hasta los niveles que se consideren convenientes para la distribución y consumo de la energía.

El arrollamiento de mayor tensión recibe el nombre de devanado de alta tensión (AT) y el de menor tensión se denomina devanado de baja tensión (BT). Como se verá posteriormente, el cociente de las tensiones de los arrollamientos depende del cociente entre el número de espiras respectivas; cuando se quiere variar la tensión de uno de los lados del transformador manteniendo la otra tensión en un valor constante hay que añadir o reducir espiras a uno de los arrollamientos. Por esa razón el arrollamiento de AT puede disponer de uno o dos arrollamientos adicionales.

El proceso de transformación tiene un gran rendimiento al no disponer la máquina de órganos móviles, pudiéndose llegar en los grandes transformadores a valores del orden del 99.7% [Mor03].

2.3. CONSTITUCIÓN FÍSICA

El transformador consta de las siguientes partes principales: núcleo, arrollamientos, sistema de refrigeración y aisladores pasatapas de salida.

- **Núcleo:**

El núcleo magnético del transformador tiene como misión canalizar el flujo magnético de un arrollamiento al otro, reduciendo el flujo que concatena a uno solo de los arrollamientos (flujo disperso) y reduciendo la corriente precisa para crear el flujo común. El núcleo magnético está constituido por chapas de acero al silicio laminadas en frío (grano orientado).

El circuito magnético está compuesto por columnas, que son las partes donde se montan los arrollamientos (también llamados devanados), y las culatas, que son las partes que realizan la unión entre las columnas. Los espacios entre las columnas y las culatas, por los cuales pasan los devanados, se llaman ventanas de núcleo.

Según sea la posición relativa entre el núcleo y los devanados, los transformadores se clasifican en acorazados, en los que, los devanados están en su mayor parte abrazados por el núcleo magnético, y de columnas, en los que son los devanados los que rodean casi por completo el núcleo magnético. Las uniones de las columnas con las culatas se denominan juntas, y deben tener un espesor lo más pequeño posible con objeto de reducir al máximo la reluctancia del circuito magnético. En los transformadores de gran potencia, para mejorar la evacuación de calor se intercalan canales de ventilación entre los paquetes de chapas. El conjunto de las chapas debe ser finalmente apretado por medio de bridas de madera o de perfiles de hierro con la ayuda de bulones aislados; de esta forma se consigue dar rigidez mecánica al conjunto y se evitan vibraciones.

- **Arrollamientos:**

Constituyen el circuito eléctrico del transformador; se realizan por medio de conductores de cobre, en forma de hilos redondos (para diámetros inferiores a 4 mm) o de sección rectangular (pletinas de cobre) cuando se requieren secciones mayores. Los conductores están recubiertos por una capa aislante, que suele ser de barniz en los pequeños transformadores y que en el caso de pletinas está formada por una o varias capas de fibra de algodón o cinta de papel.

Según sea la disposición relativa entre los arrollamientos de AT y BT, los devanados pueden ser concéntricos o alternados. En los devanados concéntricos los bobinados tienen forma de cilindros concéntricos; generalmente se coloca más cerca de la columna el arrollamiento de BT, ya que es más fácil de aislar que el devanado de AT, y que entre ambos bobinados se intercala un cilindro aislante de cartón o papel baquelizado.

Un procedimiento constructivo para mejorar el comportamiento de un transformador frente a las sobretensiones atmosféricas es colocar un apantallamiento electrostático en la parte superior del arrollamiento de alta

tensión y unido a la línea (y que consiste en una lámina de material aislante cuya superficie externa está metalizada), con ello se consigue crear una distribución uniforme de las sobretensiones atmosférica sobre todas las espiras de este devanado, dando lugar a los denominados transformadores anti resonantes.

En un transformador trifásico los arrollamientos pueden unirse en estrella (símbolo Y) o en triángulo (símbolo D). De esta forma surgen los diferentes grupos de conexión **Yy, Yd, Dy o Dd**. El comportamiento del transformador **Yy** es insatisfactorio en determinadas circunstancias (básicamente en los cortocircuitos desequilibrados) y para mejorar este comportamiento es práctica habitual el introducir un tercer arrollamiento conectado en triángulo llamado habitualmente *terciario*. Surgen así los transformadores **Yyd**.

- **Sistemas de refrigeración:**

En un transformador, como en cualquier otro tipo de máquina eléctrica, existen una serie de pérdidas que se transforman en calor y que contribuyen al calentamiento de la máquina. Para evitar que se alcancen altas temperaturas que puedan afectar la vida de los aislamientos de los devanados es preciso dotar al transformador de un sistema de refrigeración adecuado. Para potencias pequeñas, la superficie externa de la máquina es suficiente para lograr la evacuación de calor necesaria, lo que da lugar a los llamados transformadores en seco. Para potencias elevadas se emplea como medio refrigerante el aceite. El aceite tiene una doble misión de refrigerante y aislante, ya que tiene una capacidad térmica y una rigidez dieléctrica superior a la del aire.

- **Aisladores pasatapas y otros elementos:**

Los bornes de los transformadores de media tensión se llevan al exterior de la cuba mediante unos aisladores pasantes (pasatapas) de porcelana, bien sean macizos (de resina) o rellenos de aire o aceite. Cuando se utilizan altas tensiones aparece un fuerte campo eléctrico entre el conductor terminal del aislador y las partes puestas a tierra, y para evitar la perforación del aislador, este se realiza con una serie de cilindros que rodean la borna metálica dentro del espacio cerrado que contiene el aceite. Los pasatapas de AT y BT en un transformador se distinguen por su altura, siendo tanto más altos cuanto mayor es la tensión.

Otro elemento que suelen llevar los transformadores de gran potencia es el llamado relé de gas o relé Buchholz, que detecta averías internas en el transformador a partir de los gases generados por la descomposición del aceite. Este relé se coloca en el tubo que une la cuba principal con el depósito de expansión, y funciona por el movimiento del vapor de aceite producido por un calentamiento anómalo del transformador que hace bascular un sistema de dos flotadores: el primero es sensible a las sobrecargas ligeras, y al descender provoca la activación de una alarma acústica; el segundo es sensible a las sobrecargas elevadas, que dan lugar a una formación tumultuosa de gas en la cuba principal, que al empujar al flotador provoca el cierre del circuito de unos

relés que controlan el disparo de los disyuntores de entrada y salida del transformador.

- **Placa de características del transformador.**

La placa de características de un transformador es una cartulina metálica serigrafiada que incluye los datos de potencia asignada, tensiones asignadas, frecuencia e impedancia equivalente en tanto por ciento, o caída de tensión relativa de cortocircuito. Si el transformador tiene tomas para la regulación de tensión se incluyen asimismo las tensiones de las diferentes derivaciones. También se indica el esquema de conexiones internas, las especificación del tipo de transformador, clase de refrigeración, nombre del fabricante, serie, código y en algunos casos referencias sobre instrucciones de funcionamiento [Mor04].

2.4. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Para poder comprender el funcionamiento del transformador se va a analizar un transformador de construcción elemental como el que se ilustra en la figura 2.2 derecha [Gal13]:

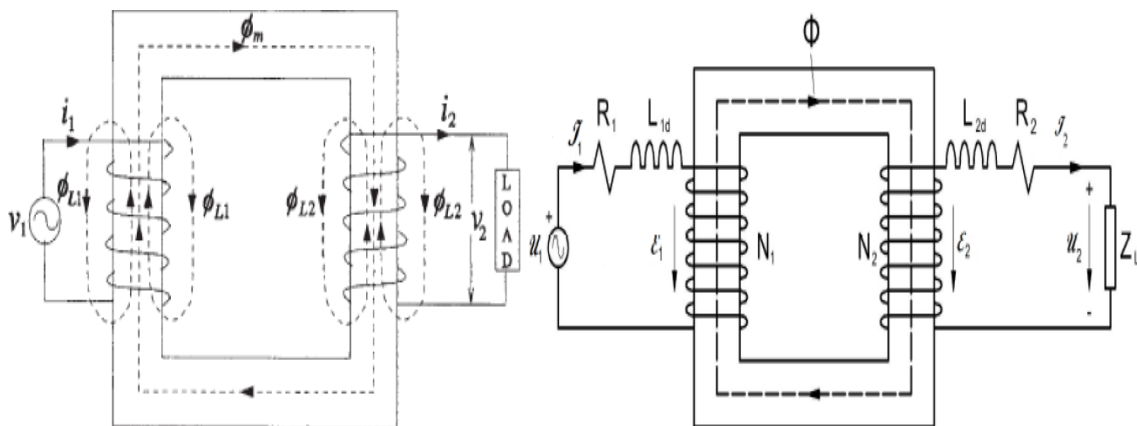


Figura 2.2: principales magnitudes de un transformador de potencia

Se trata de un circuito magnético simple, formado por dos columnas y dos culatas en el que han sido arrollados dos circuitos eléctricos:

1. Uno constituido por una bobina de N_1 espiras. Este circuito es conectado a una fuente de corriente alterna y recibe el nombre de primario
2. Otro constituido por un bobinado de N_2 espiras. Este circuito permite conectar a sus bornes un circuito eléctrico de utilización (carga) y recibe el nombre de secundario.

Aplicando la ley de Ampere a la figura se obtiene la siguiente ecuación:

$$\oint \vec{H}_m d\vec{l} = N_1 i_1 - N_2 i_2 \quad (2.1)$$

Donde

$\vec{l}$, representa la distancia recorrida por el campo magnético en metros y $\vec{H}_m$ es el vector de campo magnético común (amperios*vuelta/metro), i_1 es el valor de la corriente que circula por el arrollamiento primario (amperios) e i_2 es el valor de la corriente que circula por el arrollamiento secundario.

Si se alimenta el arrollamiento primario con una fuente de tensión alterna, por él circulará una corriente eléctrica de valor i_1 , que a su vez produce una fuerza magnetomotriz que provoca el establecimiento de un flujo alternativo (ϕ_m) en el circuito magnético del transformador.

El flujo ϕ_m se halla canalizado en el núcleo. Esta canalización provoca que aparezca en las espiras del bobinado secundario una fuerza electromotriz (E_2).

Las espiras del arrollamiento primario también están bajo la influencia del ϕ_m . Debido a este hecho, en el arrollamiento primario se va a inducir una fuerza contra-electromotriz (E_1), que se opone a la tensión de alimentación dando como resultado una disminución de la intensidad de corriente i_1

$$E_1 = 4.44f\phi_m N_1 \quad (2.2)$$

$$E_2 = 4.44f\phi_m N_2 \quad (2.3)$$

Cuando se aplica carga al bobinado secundario, circula por él una corriente eléctrica i_2 . Esta corriente tiende a reducir el flujo resultante en el núcleo dando como resultado que la fuerza contra-electromotriz disminuya y la intensidad de corriente i_1 aumente.

Se puede observar cómo un aumento de corriente en el secundario (i_2), produce un aumento de la corriente en el primario (i_1), sin que exista conexión eléctrica entre ambos arrollamientos.

La potencia es transmitida de un arrollamiento a otro por medio del flujo magnético del núcleo. El bobinado primario absorbe la potencia y el secundario cede potencia.

En un transformador real, las líneas del flujo magnético no están configuradas enteramente en el hierro, sino que algunas de ellas se cierran a través del aire (figura 2.2 izquierda [UM15]):

- La parte del flujo que atraviesa todos los arrollamientos se conoce como flujo común o flujo útil (ϕ_m).
- La parte del flujo que se cierra a través del aire se denomina flujo de dispersión (ϕ_L en la figura 2.2 a). Este flujo discurre parcialmente por el aire o por los elementos estructurales del transformador.

El cociente entre las fuerzas electromotrices inducidas por el arrollamiento primario y secundario se conoce como relación de transformación:

$$r_t = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{N_1}{N_2} \quad (2.4)$$

La potencia que se obtiene del transformador es inferior a la potencia que este suministra debido a lo siguiente:

- Pérdidas en el cobre: pérdidas en forma de calor que se producen por efecto joule en la resistencia (R) de los arrollamientos primario y secundario.
- Pérdidas en el hierro: pérdidas por histéresis y corrientes de Foucault en el núcleo.

Es posible reducir la histéresis si se emplea hierro con un ciclo de histéresis estrecho. Las corrientes de Foucault, por su parte, se reducen construyendo el núcleo con láminas muy finas apiladas y aisladas entre sí.

2.5. CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR DE TRES ARROLLAMIENTOS

En el circuito equivalente de un transformador trifásico de tres arrollamientos (figura 2.3 [Bur15]), destaca la presencia de dos flujos distintos. Un flujo que concatena todos los arrollamientos y otro que concatena a un arrollamiento. La suma aritmética de los amperios-vuelta de las tres fases se conoce como flujo común. El flujo disperso es creado por los amperios vuelta de la fase concatenada. La resta entre la tensión que se aplica al arrollamiento primario y la caída de tensión en el mismo se conoce como fuerza electromotriz.

$$\overline{E_1} = \overline{U_1} - R_1 * \overline{I_1} - jX_{1d}\overline{I_1} \quad (2.5)$$

$$\overline{U_2} = \overline{E_2} - R_2 * \overline{I_2} - jX_{2d}\overline{I_2} \quad (2.6)$$

$$\overline{U_2} = \overline{E_3} - R_3 * \overline{I_3} - jX_{3d}\overline{I_3} \quad (2.7)$$

En este circuito equivalente se trabaja, a través de la relación de transformación (r_t), con todos los datos referidos a un solo arrollamiento (arrollamiento primario).

$$\overline{Z'} = \overline{Z} * r_t^2 \quad (2.8)$$

Debido a que la caída de tensión es prácticamente despreciable, se puede tomar como idénticas la tensión en vacío y la tensión en carga, por tanto el flujo es creado por el mismo valor de amperios vuelta.

$$N_1\overline{I_1} + N_2\overline{I_2} + N_3\overline{I_3} = N_0\overline{I_0} \quad (2.9)$$

La suma de la corriente que crea el flujo más la corriente que permite vencer los amperios vuelta de la carga, constituyen la corriente primaria de la red.

El valor de la impedancia se expresa en porcentaje:

$$Z_{100} = 100 * \frac{Z_i I_{iN}}{U_{iN(FaseNeutro)}} \quad (2.10)$$

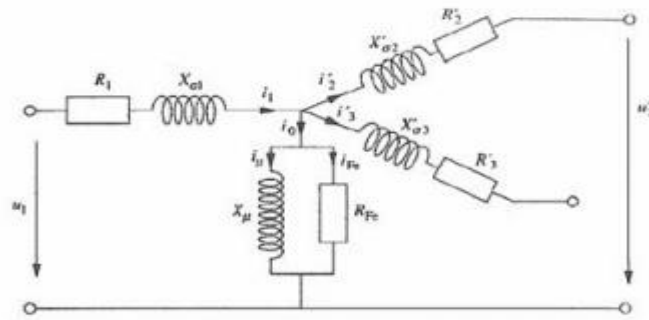


Figura 2.3: circuito equivalente de un transformador de tres arrollamientos.

2.6. ESTUDIO DE LOS CORTOCIRCUITOS ASIMÉTRICOS

Un transformador debe ser construido para que soporte los esfuerzos térmicos, dieléctricos y mecánicos que se producen en él durante su funcionamiento.

Los esfuerzos mecánicos son debidos principalmente a las fuerzas de repulsión entre arrollamientos. Es sabido que cuando se tienen dos hilos conductores que llevan corrientes i_1 e i_2 , entre ambos aparece una fuerza

$$\vec{F} = i_1 \cdot (\vec{l} \times \vec{B}_d) \quad (2.11)$$

Donde B_d es la inducción de dispersión creada por el otro arrollamiento, que es proporcional a la corriente de dicho arrollamiento

$$B_d = k i_2 \quad (2.12)$$

Las fuerzas entre arrollamientos dependen pues del producto de las corrientes primaria y secundaria y son mayores cuando estas corrientes alcancen su mayor valor, esto es en cortocircuito.

Para cuantificar las fuerzas entre arrollamientos se debe obtener el mayor valor de la corriente durante el cortocircuito. En algunos casos la peor corriente de cortocircuito se da durante los cortocircuitos trifásicos, pero en otros muchos la peor corriente de cortocircuito se da durante los cortocircuitos monofásicos.

Para estudiar un cortocircuito monofásico se utiliza la llamada teoría de las componentes simétricas, en la cual un sistema de corrientes desequilibrado se expresa como suma de tres sistemas equilibrados: uno de secuencia directa, otro de secuencia inversa y un tercero de secuencia homopolar. Además se precisa un circuito que represente la relación entre tensiones y corrientes en cada una de las secuencias. La topología de los circuitos equivalentes de secuencia directa, inversa y homopolar es la mostrada en la figura 2.3, si bien el valor numérico de la impedancia es diferente para la secuencia directa y para la secuencia homopolar (la impedancia de secuencia inversa es idéntica a la de secuencia directa). En apartados posteriores se indica la forma de calcular estas impedancias a partir de las dimensiones geométricas del transformador.

2.7. CÁLCULO DE LA IMPEANCIA DE SECUENCIA DIRECTA

Normalmente, cuando se habla de la impedancia de un transformador de potencia, se da por sentado de que se trata de la impedancia de cortocircuito de secuencia directa.

El valor de la impedancia de secuencia directa frecuentemente es utilizado en la construcción de un circuito equivalente de tipo T (figura 2.4 [Rey12]), el cual es de gran utilidad para los cálculos correspondientes al análisis de sistemas eléctricos de potencia.

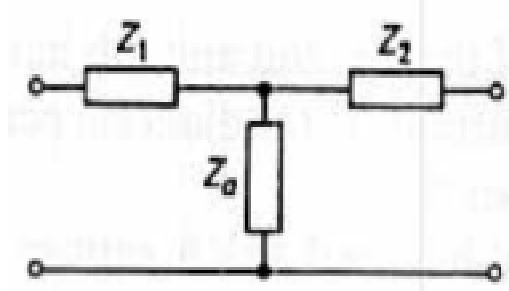


Figura 2.4: circuito equivalente T de un transformador de potencia.

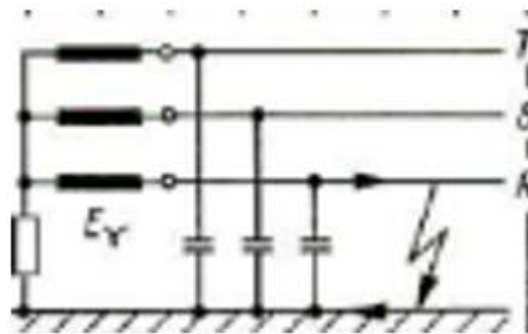


Figura 2.5: Cortocircuito monofásico a tierra.

Frecuentemente la rama magnetizante se desprecia por la elevada impedancia de la misma y queda el circuito de la figura 2.5. La impedancia resultante Z_{cc} tiene un carácter casi totalmente inductivo y se suele denominar impedancia de cortocircuito. La parte imaginaria de esta impedancia se llama inductancia de cortocircuito.

Para calcular la inductancia de cortocircuito primeramente se calcula la energía magnética almacenada por el flujo disperso que corresponde a una determinada intensidad I . La inductancia de cortocircuito tiene un valor tal que la energía almacenada en dicha bobina coincide con la energía magnética calculada.

$$\frac{1}{2} * L_{cc} * I^2 = \int \frac{1}{2} * B * H * dVol \quad (2.13)$$

Donde $dVol$ es la diferencial de volumen en el transformador y B es la inducción magnética, que se relaciona con el campo magnético H según la siguiente expresión.

$$B = \mu_0 * H \quad (2.14)$$

Introduciendo la ecuación (2.14) en la ecuación (2.13) y despejando la inductancia de dispersión queda:

$$L_{cc} = \frac{\int \mu_0 H^2 dV_{ol}}{I^2} \quad (2.15)$$

Para poder evaluar la expresión (2.15) es necesario el conocer el campo magnético en los puntos por los que discurre el flujo de dispersión.

En la figura 2.6 [Bur15] se muestra una línea de flujo disperso. Para la obtención del campo magnético se aplica la ley de Ampere a las diferentes líneas de campo magnético.

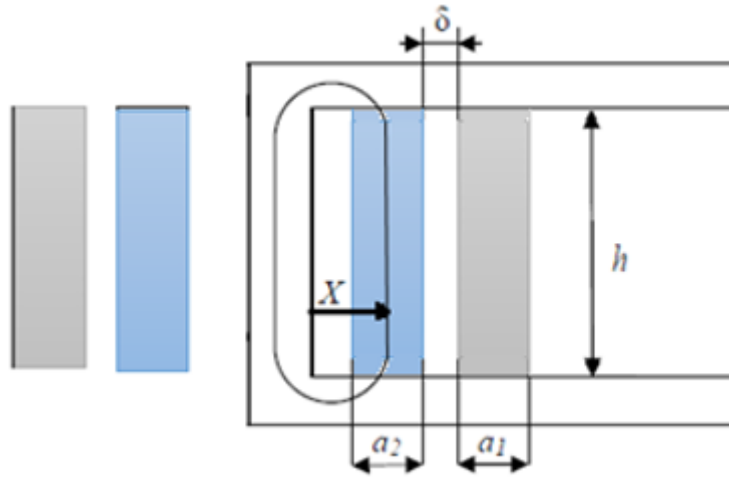


Figura 2.6: Recorrido de una línea de campo magnético.

$$\oint \vec{H} * d\vec{l} = N_x * I \quad (2.16)$$

El flujo de dispersión discurre por el aire y por el hierro, dado que la permeabilidad del aire es muy inferior a la del hierro, el campo magnético H que se precisa para establecer la inducción en el aire es muy elevado en comparación con el que precisa el núcleo, de ello se deriva que la integral se reduzca únicamente a la ventana del transformador al ser despreciable su valor en el núcleo magnético por lo que el problema se reduce al cálculo del campo magnético para diferentes valores de x . Además se va a suponer que el campo es puramente axial. Con ello la fuerza magnetomotriz F_x vale

$$F_x = H_x * h \quad (2.17)$$

Donde h es la altura del arrollamiento.

En la ecuación 2.16, N_x es el número de espiras concatenado por la línea de campo

$$N_x = N_{BT} \frac{x - r_{BT}}{a_2} \quad \text{si } r_{BT} < x < r_{BT} + a_2 \quad (2.18)$$

$$N_x = N_{BT} \quad \text{si } r_{BT} < x < r_{AT} \quad (2.19)$$

$$N_x = N_{BT} - N_{AT} \frac{x - r_{AT}}{a_1} \quad \text{si } r_{AT} < x < r_{AT} + a_1 \quad (2.20)$$

Donde r_{BT} y r_{AT} son los diámetros internos de los arrollamientos de BT y AT respectivamente y el significado de a_1 y a_2 se ha visto en figuras precedentes.

De las ecuaciones anteriores se obtiene la evolución de H_x en cualquier punto de la ventana del transformador.

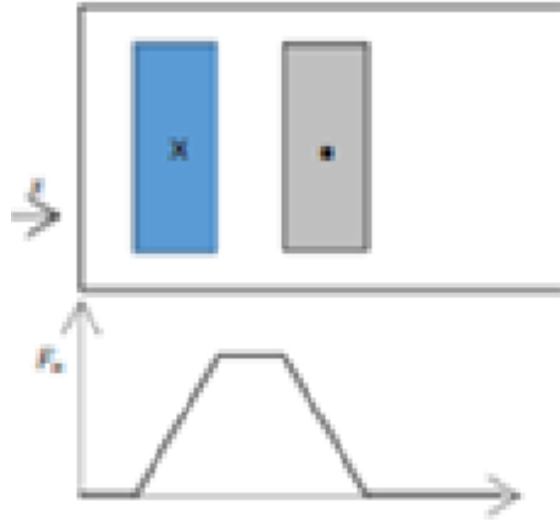


Figura 2.7: Curva de evolución de H_x en cualquier punto de la ventana del transformador.

Una vez que se tiene el valor de H en cada punto de la ventana ya podemos aplicar la expresión 2.15 y se llega a

$$L_{cc} = \frac{\mu_0 N^2}{h} * \left(l_\delta * \delta + \frac{a_1 l_1 + a_2 l_2}{3} \right) \quad (2.21)$$

Donde h es la altura equivalente; l_δ , l_1 y l_2 son las longitudes medias del entrehierro y de cada uno de los arrollamientos.

Si se desea la obtención de la reactancia de cortocircuito a partir de la impedancia de cortocircuito, hay que emplear la siguiente expresión. Siendo ω la frecuencia angular, la cual depende de la frecuencia del sistema f .

$$X_{cc} = L_{cc} * \omega = L_{cc} * 2 * \pi * f \quad (2.22)$$

Frecuentemente X_{cc} se expresa en porcentaje respecto de la impedancia base

$$\epsilon_s = 2 * \pi * \mu_0 * \frac{S_N}{3 * U_w^2 * h} * \left(l_\delta * \delta + \frac{a_1 l_1 + a_2 l_2}{3} \right) \quad (2.23)$$

Donde S_N es la potencia nominal y U_w la tensión por fase

Muchos transformadores tienen la facultad de variar su relación de transformación a través de los cambiadores de tomas en carga. La impedancia de secuencia directa varía de manera no-lineal con la posición del cambiador de tomas sin una norma fija, ya que estos cambios dependen de como este diseñado el transformador. Por este motivo, se

mide habitualmente, la impedancia de secuencia directa en más de una posición del cambiador de tomas en carga.

Debido a que en el presente Trabajo únicamente se hace mención de la impedancia de secuencia directa (es el objeto principal de estudio), se realiza el análisis de esta en su toma o posición central.

2.8. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE EL CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR

2.8.1. FUNDAMENTOS BÁSICOS SOBRE LAS IMPEDANCIAS HOMOPOLARES SOBRE TRANSFORMADORES YN_ynd

El arrollamiento primario del transformador de potencia toma una corriente que es suma entre la corriente necesaria para crear flujo y la corriente que se opone a los amperios vuelta del secundario más la corriente que neutraliza los amperios vueltas correspondientes al arrollamiento terciario:

$$i_1 = i_m + \frac{N_2}{N_1} i_2 + \frac{N_3}{N_1} i_3 \quad (2.24)$$

Debido a que como se puede observar en la ecuación anterior, la corriente que circula por el transformador es bastante elevada, se deduce que la impedancia homopolar en este caso (YN_ynd), es bastante reducido si se compara con transformadores con configuraciones distintas en las que la corriente es bastante más baja.

En general, la cuba influye en el valor de la impedancia homopolar. Hay autores que describen a la cuba como un arrollamiento más que estuviera conectado en triángulo. Otros autores como Kulkarni tienen en cuenta el efecto de la cuba en el procedimiento de cálculo de la impedancia homopolar por medio de las dimensiones geométricas del transformador. Para ello utiliza dos métodos, uno aproximado y otro exacto:

- En el método aproximado (figura 2.8 [Rey12]), se halla la impedancia homopolar mediante simulaciones de cortocircuitos. Se desprecia la rama magnetizante pues la corriente que necesaria para crear el flujo homopolar es insignificante. La influencia de la cuba se nota gracias al flujo que circula por ella.

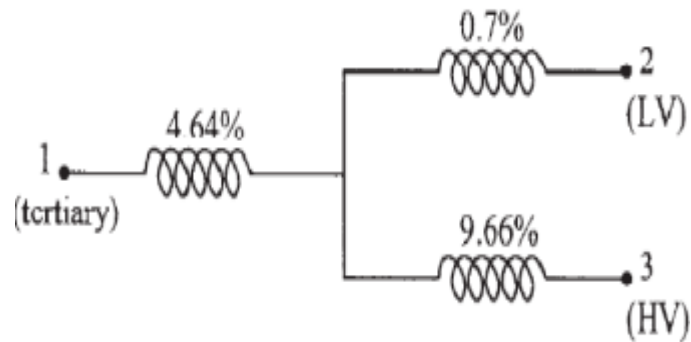


Figura 2.8: circuito equivalente del método aproximado.

- El método más exacto, por su parte considera a la cuba como un arrollamiento adicional en triángulo. Pero también desprecia la rama magnetizante. La finalidad de este método es hallar la impedancia homopolar en el caso de que el terciario esté cerrado mientras se cortocircuita el arrollamiento secundario. Primero se calculan las reactancias de cortocircuito entre arrollamientos, teniendo en cuenta la cuba como arrollamiento. En segundo lugar se halla la potencia reactiva a través de la energía magnética almacenada. Finalmente se procede a calcular la impedancia homopolar.

2.8.2. CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA MAGNETIZANTE

HOMOPOLAR

Kulkarni y Khaparde [Kulk04], sugieren un planteamiento simplificado para hallar la impedancia homopolar. Este procedimiento se basa en utilizar las fórmulas utilizadas para el cálculo de la impedancia de dispersión entre dos arrollamientos, considerando que la cuba es uno de los arrollamientos del transformador y el arrollamiento considerado (AT o BT según el caso) el otro arrollamiento.

Sin embargo los resultados obtenidos mediante estos procedimientos no dan resultados idénticos (son semejantes, pero con un cierto error) a los valores obtenidos mediante medición. Por este motivo estos autores aconsejan otros métodos (método de los elementos finitos), para realizar cálculos cuyos resultados sean más precisos.

La impedancia homopolar (Z_0) consta de una componente resistiva (R_0) y de otra inductiva (X_0). Aunque la parte resistiva de las impedancias homopolares es muy superior a las correspondientes a la secuencia directa, la parte resistiva es mucho menor que la inductiva, por tanto la parte resistiva puede ser despreciada. Con lo cual se refiere a la impedancia de secuencia homopolar en términos de reactancia de secuencia homopolar.

La impedancia homopolar se obtiene haciendo circular una sola corriente en el arrollamiento conectado a la fuente. Una determinada corriente (I) produce energía

magnética (E_{mag}) en cada uno de los arrollamientos a través de la cuál obtenemos la inductancia que circula por cada uno de los arrollamientos:

$$L_{ind} = 2E_{mag}/I^2 \quad (2.25)$$

El valor de la reactancia magnetizante homopolar se obtiene a partir de la suma de todas las inductancias halladas:

$$X_{homopolar} = 2\pi * 50 * L_{ind} \quad (2.26)$$

El orden de magnitud de la impedancia magnetizante dependerá del tipo del núcleo magnético del transformador. Así en bancos trifásicos compuestos por unidades monofásicas la impedancia magnetizante es muy elevada, por lo que su influencia es despreciable (la impedancia magnetizante está en paralelo con la impedancia de dispersión), en transformadores de tres columnas la impedancia magnetizante es más reducida y en transformadores de cinco columnas toma un valor intermedio que depende de la tensión aplicada.

Por su parte, la impedancia magnetizante homopolar porcentual es la inversa de la corriente de vacío expresada porcentualmente:

$$Z_{0pu} = \frac{Z_0}{Z_{base}} * 100 = \frac{U_N/I_0}{U_N/I_N} * 100 = \frac{I_N}{I_0} * 100 \quad (2.27)$$

2.8.3. CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR ENTRE ARROLLAMIENTOS

En este contexto el arrollamiento en triangulo se encuentra abierto y los cálculos necesarios para obtener la impedancia homopolar se realizan en el arrollamiento conectado en serie. Por ese motivo sólo se realizan dos ensayos: A1A (alimentación en alta tensión mientras el lado de baja tensión este abierto) y B1A (alimentación al arrollamiento de baja tensión mientras el arrollamiento de alta tensión se encuentra abierto). De aquí en adelante se denominará con el subíndice A para referirse al ensayo A1A y el subíndice B para el ensayo B1A. En ambos ensayos solo circula corriente por el arrollamiento conectado a la fuente. Debido a que sólo se mide el valor de la impedancia del arrollamiento en estrella, se puede despreciar el arrollamiento terciario, pues este no influye en el valor de la impedancia homopolar debido a que nunca circula corriente por él.

Es importante mencionar que la medida de las impedancias homopolares correspondientes a tanto al arrollamiento de alta tensión (Z_A) como al de baja tensión (Z_B), se realiza con la tensión correspondiente, garantizando así la no linealidad de la impedancia homopolar (Z_0). Durante el cálculo de la impedancia homopolar se mantienen las mismas propiedades en el interior del transformador (permeabilidad y conductividad), por lo que la precisión que se obtiene con los resultados es razonable. Sin embargo el campo magnético que aparece es distinto para cada ensayo [Sor14].

2.8.4. CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR CUANDO MÁS DE UN ARROLLAMIENTO LLEVA CORRIENTE

[Sor14]El cálculo de la impedancia homopolar cuando más de un arrollamiento lleva corriente supone el análisis de un transformador trifásico en cortocircuito. Durante este cálculo, se mantienen constantes las propiedades internas del transformador. Tanto las paredes de la cuba como el núcleo magnético deben tener una permeabilidad lo suficientemente elevada (300 y 5000 respectivamente), además, entre la pared interna y externa de la cuba la conductividad es bastante elevada (7×10^6), mientras que en el núcleo la conductividad es nula debido a que está constituido por unas láminas de acero y el efecto de las corrientes de Foucault en ellas es despreciable.

La corriente conectada a la fuente de alimentación durante el ensayo, es un dato de entrada, por lo tanto el problema se reduce a hallar la corriente inducida tanto en la cuba como en los arrollamientos restantes. Esta corriente es la misma y se halla a través de un proceso iterativo. Se busca obtener un flujo nulo en los arrollamientos en cortocircuito. La tensión inducida U_{ensayo_i} (2.32) de la espira i es directamente proporcional al flujo ϕ_i (2.28). La caída de tensión es insignificante en los transformadores de potencia trifásicos.

El flujo ϕ_i se define como el producto escalar entre la magnitud vectorial de la densidad de flujo (B_z) por el vector correspondiente a la superficie i . Por tanto se trabaja con la integral de la componente axial de la densidad (B_z). El valor de la integral, proporcionado por el software Comsol with Matlab, se puede hallar numéricamente a lo largo del eje radial, gracias a su simetría axial como se muestra en la figura 4.18 del capítulo 4. La siguiente ecuación ilustra la formula necesaria para obtener ϕ_i :

$$\phi_i = \int B_z 2\pi r dr \quad (2.28)$$

Los valores que se obtiene de B_z , ϕ_i , V_i son complejos (tienen una parte real y otra imaginaria).

A cada variación de la corriente durante el proceso iterativo, varían los enlaces de flujo del arrollamiento en cortocircuito hasta llegar al resultado deseado. La corriente que circula por el arrollamiento de alta tensión tiene que ser la misma que la que circula por el arrollamiento de regulación gruesa, por ello aunque los bucles correspondientes a los cálculos de los enlaces de flujo sean independientes entre sí, el mecanismo utilizado para la solución de las ecuaciones debe buscar simultáneamente la corriente en ambos arrollamientos (alta tensión y regulación gruesa) para conseguir un enlace de flujo nulo en cada uno de ellos cuando se hallan en cortocircuito.

Finalmente, después de conseguir la corriente que anula el flujo en el arrollamiento cortocircuitado tanto para el ensayo A1A (baja tensión en cortocircuito) como B1A (alta

tensión y regulación gruesa en cortocircuito), se procede a calcular las pertinentes impedancias de cortocircuito tanto en ohmios como en porcentajes:

$$Z_{100} = 100 * \frac{Z_{homios}}{Z_{base}} \quad (2.29)$$

$$Z_{homios} = \frac{U_n^2}{S_n} \quad (2.30)$$

$$Z_{homios} = \frac{U_{ensayo}}{I_{n_fuente}} \quad (2.31)$$

$$U_{ensayo} = \omega \sum Enlaces\ de\ flujo_i \quad (2.32)$$

S_n , U_n y I_{n_fuente} : valores nominales de la potencia, la tensión y la corriente del arrollamiento conectado a la fuente.

La cuantía de la impedancia de cortocircuito depende del tipo de ensayo, como más adelante se verá. Según la norma **IEC 60076-8** [IEC97], el valor de la impedancia homopolar medida con arrollamiento cortocircuitado y otro en estrella, es alrededor del 80% y el 100% de la impedancia medida con la misma configuración en secuencia directa. El valor de la impedancia homopolar en cortocircuito es superior cuanto más cerca este el arrollamiento alimentado al núcleo.

CAPÍTULO 3:

MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

3.1. INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

El método de los elementos finitos (MEF) es un método numérico que permite el estudio de diversos problemas de ingeniería y física. Facilita la resolución de cuestiones cuyo análisis hasta hace unos pocos años era prácticamente irrealizable mediante los procedimientos matemáticos habituales.

Este método suponía, definir los prototipos de ensayo y perfeccionarlos a través de múltiples iteraciones, lo cual suponía un elevado coste económico, además de una excesiva inversión de tiempo. Sin embargo el MEF ofrece la posibilidad de realizar estos cálculos por medio de un software, lo que supone un importante ahorro de tiempo y de coste económico. Las soluciones numéricas obtenidas mediante este procedimiento no son exactos, pero si aproximados.

El cálculo mediante el método de los elementos finitos (MEF), exige definir nodos (mallas). Se trata de mallas formadas por un conjunto de puntos y hacen posible la discretización de los elementos finitos (figura 3.1). Cada grupo de mallas tiene la forma de un triángulo equilátero y se realiza a través de programas informáticos (generadores de mallas) justo antes del pre-proceso.

La importante evolución que está sufriendo la informática, ha colocado a este método como el más utilizado. Es utilizado tanto por su sencillez en la resolución de problemas complejos de física y ciencia, como por la facilidad con la que permite analizar cuestiones complejas relacionadas con campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos ya sean estáticos como cuasi-estáticos.

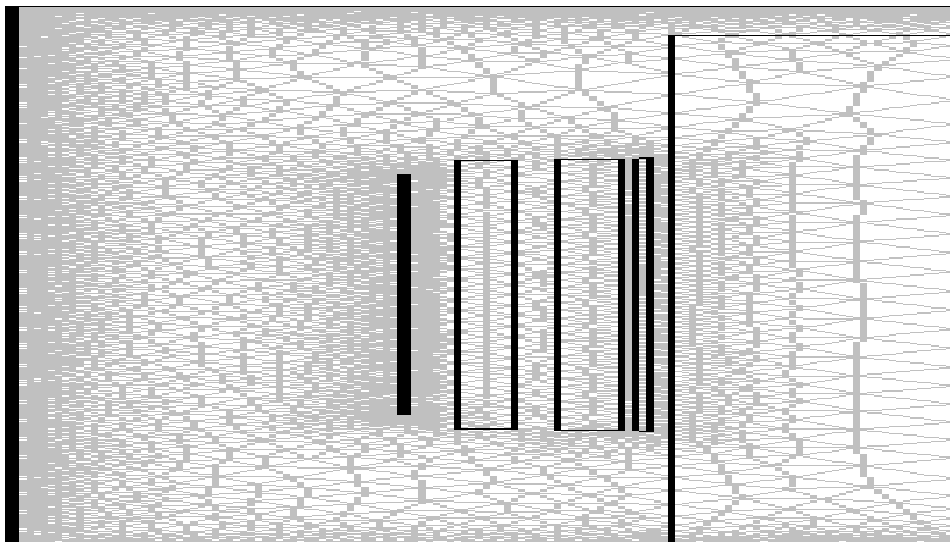


Figura 3.1: Discretización de una malla (modelo de un transformador).

3.2. HISTORIA DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

El concepto de elementos finitos no es un término nuevo, pues hace un par de siglos que se introdujo.

[Muñ14] En la antigüedad se utilizaban tácticas de discretización tanto espacial como temporal en el análisis y resolución de cuestiones relacionadas con la física y la ingeniería, además de la arquitectura, tal es el caso de las construcciones de las pirámides egipcias.

Grandes personajes históricos, relacionados con las matemáticas como es Arquímedes (287-212) emplearon este procedimiento en la determinación tanto de volúmenes como de áreas de objetos sólidos.

En la historia moderna de la ciencia, destaca como propulsor Richard Courant, quien en 1943 se basó en el sistema de análisis y reducción de variables propuesto por Rayleigh Ritz para progresar en el método de los elementos finitos.

En 1956, aprovechando la fabricación de los primeros ordenadores, Los físicos-matemáticos (L. J. Topp, M. J. Turner, H. C. Martin y R. W. Clough) redactaron un documento en el que analizaban de manera más amplia y profunda el método de los elementos finitos. Estos propusieron que a través de una estructura con unos nodos definidos y equilibrados y con elementos lineales discretizados, se podía plantear un sistema de ecuaciones en los que se obtuviera el desplazamiento de los nodos a través de las fuerzas y la rigidez de las barras de los mismos.

Años más tarde, Taylor y Zienkiewicz argumentaron la posibilidad de hallar ecuaciones de elementos finitos aproximando pesos residuales o definiendo unos mínimos cuadrados. Este hecho aumentó el interés de otros destacados matemáticos por la materia.

A principios de la década de los 70 fue cuando se comenzó a definir algoritmos más precisos, gracias al creciente uso y desarrollo de los ordenadores. Tuvo mucha importancia el interés por disminuir el tiempo de trabajo. El desarrollo eficiente de este método comenzó a influir en la realización de actividades como la construcción de edificios en los que requerían de habilidades relacionadas con el estudio y análisis de problemas de mecánica estática (equilibrio de barras, vigas y cables).

En los 80 se inicia la comercialización de softwares. Estos programas incluyen en su mayoría una nueva herramienta, útil en el análisis y resolución de complejos problemas. Se trata del pre-procesado y del post-procesado de los modelos graficados y mallados.

Actualmente existe una gran cantidad de softwares que permiten modelar y ejecutar problemas complejos que solo pueden ser resueltos, eficazmente y en un corto periodo de tiempo, mediante el método de los elementos finitos. Aunque esto requiere leer y entender este método, lo cual no resulta tarea fácil para todo el mundo, pues no son todos los que entienden de física y ciencia. En el presente trabajo, se va a realizar el

estudio del transformador por medio de Comsol multiphysics, software que permite modelar, analizar, mallar y procesar distintos modelos geométricos.

3.3. DEFINICIÓN DE LOS ELEMENTOS FINITOS

El método de los elementos finitos se basa en aproximaciones numéricas de elementos continuos, de manera que [Zie94]:

1. Se divide un sistema continuo basado en infinitos grados de libertad en un número finito de partes o elementos. El comportamiento de estos elementos lo define un número finito de grados de libertad asociados a puntos característicos. Estos puntos se conocen con el nombre de nodos y se encargan de unir los diferentes elementos finitos.
2. La solución de estos problemas se obtiene aplicando un sistema de ecuaciones discretos. Estas ecuaciones se hallan ensamblando los diferentes elementos finitos.
3. Se pasa de un sistema de ecuaciones cuya solución se obtiene realizando operaciones matemáticas a un sistema en el que los nodos definen las distintas incógnitas, es decir, los nodos son el objeto de estudio.
4. Se definen unas funciones de forma o funciones de interpolación. Estas funciones determinan el comportamiento en el interior de cada elemento a partir de nodos.

El método de los elementos finitos consiste, por consiguiente, en pasar de un elemento o cuerpo de naturaleza continua a un modelo discreto aproximado. Esta transformación se consigue gracias al método de discretización de elementos.

El estudio del interior de cada elemento se realiza por interpolación de nodos. Por tanto el método de los elementos finitos realiza un estudio basado en aproximaciones de nodos.

3.4. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Este método se puede comprender de manera bastante clara y precisa mediante su aplicación a un determinado objeto sólido.

Un ejemplo de aplicación del MEF, sería el estudio de una determinada placa sometida a tensión. Estructuralmente sería una forma de generalizar el cálculo de matrices de estructuras al análisis de sistemas continuos. De hecho como se menciona en la introducción de este capítulo este método tiene sus orígenes en aplicaciones arquitectónicas.

Tanto los nodos (i, j, m) como el contorno que forman las partes que los unen, definen un elemento finito e, como se puede observar en la siguiente figura [Fri04].

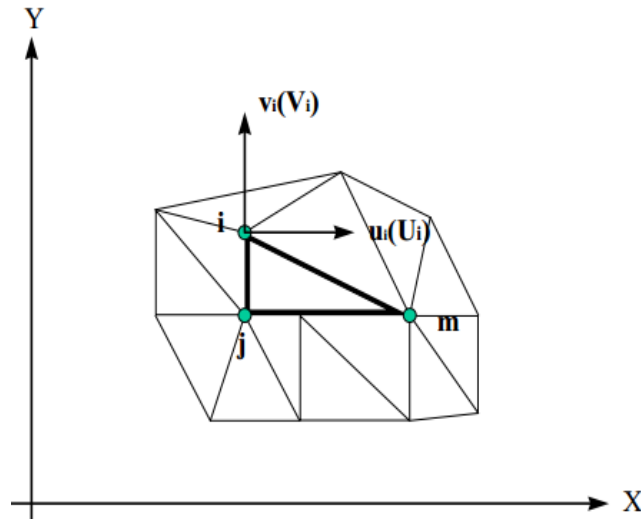


Figura 3.2. Coordenadas del nodo definido por los vectores (i, j, m).

El desplazamiento u realizado por cualquier nodo viene dado por el vector $\vec{u}$, definido en la ecuación 3.1:

$$\vec{u} = \sum N_i a_i^e = [N_i \ N_j \ \dots] \begin{pmatrix} \vec{a}_i \\ \vec{a}_j \\ \dots \end{pmatrix}^e = N a^e \quad (3.1)$$

Donde N representa las funciones de posición o funciones de forma y es un dato. El término a^e es el vector que determina el desplazamiento realizado por los nodos cuando son sometidos a tensión. Estos desplazamientos dependen de las funciones de forma seleccionadas.

$$u = \begin{Bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{Bmatrix} \quad (3.2)$$

$$a_i^e = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix} \quad (3.3)$$

Los distintos movimientos verticales y horizontales que realiza un nodo vienen especificados por el vector matricial u .

Una vez definido los desplazamientos nodales, se procede al cálculo de las deformaciones provocadas por las tensiones a las que se encuentra sometida la placa sólida.

Las deformaciones se representan mediante la letra ϵ y se halla mediante la siguiente ecuación:

$$\epsilon = S u \quad (3.4)$$

Donde S es su correspondiente operador lineal.

Sustituyendo la ecuación (3.1) en la ecuación (3.4) se llega a la siguiente expresión (ecuación 3.5):

$$\varepsilon = SNa = Ba \quad (3.5)$$

Si tenemos en cuenta que la placa esta sometida a tensiones internas y a deformaciones iniciales, la siguiente expresión (ecuación 3.6) es la adecuada par relacionar las principales deformaciones y tensiones a los que esta somedito el cuerpo.

$$\sigma = D(\varepsilon - \varepsilon_o) + \sigma_o \quad (3.6)$$

En esta última ecuación, D representa la matriz de esticidad. Esta matriz recoge las distintas propideades que definen los materiales que caractrizan la placa:

$$q^e = \begin{Bmatrix} q_i^e \\ q_j^e \\ \dots \end{Bmatrix} \quad (3.7)$$

Las fuerzas distribuidas, las fuerzas nodales y las tensiones de contorno son identicas en cuanto a condiciones de estática se refiere. Es muy importante elegir correctamente las dirrecciones de las fuerzas y que estas sean las mismas. El numero de componentes de las fuerzas debe ser equivalente al numero de desplazamiento de los nodos.

$$q_i^e = \begin{Bmatrix} U_i \\ V_i \end{Bmatrix} \quad (3.8)$$

El principio de los trabajos virtuales determina la relaciona las fuerzas distribuidas, las fuerzas nodales y las tensiones de contorno [Fri04]:

$$q^e = \int_{V^e} B^T \sigma dv - \int_{V^e} N^T b dv \quad (3.9)$$

- b: fuerzas distribuidas.
- V^e : volumen de la placa {e}

Teniendo el carácter lineal de las tensiones:

$$q^e = \int_{V^e} B^T DB dV - \int_{V^e} N^T b dV - \int_{V^e} B^T D \varepsilon_o dV + \int_{V^e} B^T \sigma_o dV = K^e a^e + f^e + P. \quad (3.10)$$

- Si las fuerzas distribuidas por unidad de superficie {t}s no son despreciables:

$$P = - \int_{A^e} N^T t dA$$

- A^e : superficie de contorno.
- El término de la superficie {t} debe tener el mismo número de componentes que vector matricial {u}.

La ecuación que relaciona las tensiones con las deformaciones termina siendo definida por la siguiente expresión:

$$\sigma = DBa^e - D\varepsilon_o + \sigma_o \quad (3.11)$$

3.5. FUNCIONES DE FORMA DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Las funciones de forma permiten simplificar la resolución de problema mediante el método de elementos finitos.

3.5.1. PROPIEDADES DE FORMA

Las propiedades de forma son las siguientes [Fri04]:

1. Propiedad de derivada.
La derivada del operador {S} debe ser del mismo orden que la función de forma.
2. Propiedad de integral.
Se debe realizar la derivada de manera que la función sea integrable. Es importante respetar la coherencia de la ecuación 3.6.
3. Propiedad de semejanza.
Las funciones de forma se rigen por las leyes de distribución. Las leyes de distribución de corrimientos son continuas por tanto también lo son las funciones de forma.
4. Condición de polinomio completo.
La función de forma normalmente es una función polinómica. El resultado de esta función debe ser próxima a la solución real. Para que eso sea posible es imprescindible que la función de forma sea un polinomio completo.

3.5.2. CRITERIO DE PARCELA

Resulta útil que las funciones de forma sean capaces de valer la unidad de los nodos a los que están ligados y que el valor del resto sea nulo. Estos elementos son conocidos con el nombre de elementos conformes. También permiten garantizar la continuidad de la ley de distribución de corrimientos entre los elementos.

Un elemento incapaz de garantizar el cumplimiento de la ley de corrimientos es un elemento no conforme. Estos elementos son la causa de que se den infinitas deformaciones en el contorno de la placa. Pero su existencia es de interés siempre que no produzca disipación de trabajo entre contornos.

Los elementos no conformes son los responsables de que se emplee el criterio de la parcela. Este criterio tiene como objetivo principal, verificar que exista una excelente convergencia entre elementos no conformes.

Aplicar el criterio de la parcela, consiste en aislar un grupo de elementos finitos disconformes del conjunto de elementos y aplicar un estado de corrimientos que provoque una deformación constante sin disipar trabajo alguno.

3.5.3. TIPOS DE FUNCIONES DE FORMA

En cada elemento del que se divide la placa se pueden distinguir tres tipos de puntos o nodos:

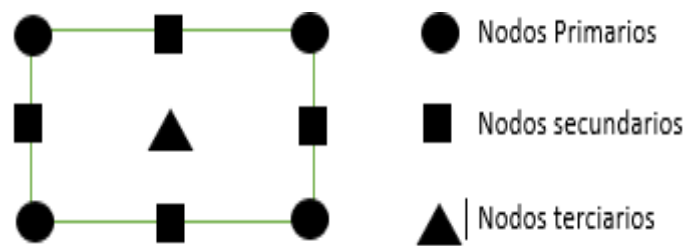


Figura 3.3: Tipos de nodos.

Las funciones de forma se pueden agrupar en dos grupos o familias:

- Serendipidas: este grupo lo forman está constituido por los nodos primarios y los nodos secundarios.
- Lagrangianas: este grupo lo forman los tres tipos de nodos (primarios, secundarios y terciarios).

Se pueden realizar interpolaciones de geometría. Estas interpolaciones permiten ajustar los elementos de manera más precisa. Este procedimiento consiste en transformar un elemento de referencia en un elemento con lados curvos (figura3.4):

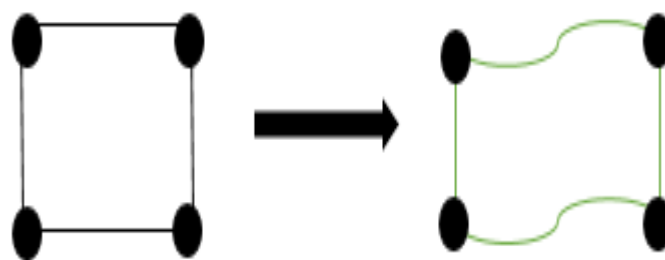
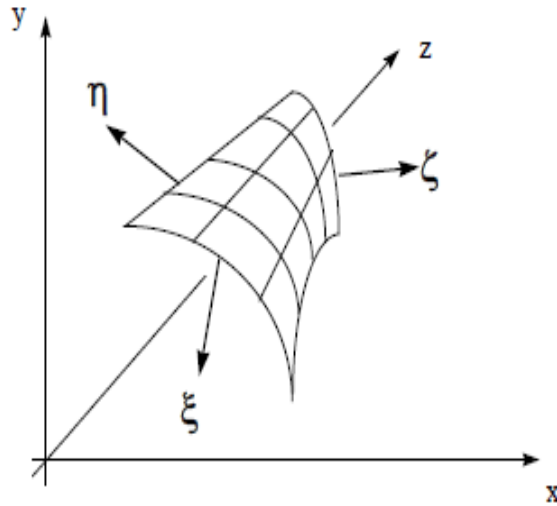


Figura 3.4: Transformación geométrica a través de funciones de interpolación.

3.5.4. INTEGRACIÓN NUMÉRICA

Las transformaciones curvilineas modifican las coordenadas x, y, z , que definen el plano. A través de estas alteraciones se obtienen las coordenadas locales η, ζ, ξ (figura3.5 [Fri04]).

Figura 3.5: Sistema de coordenadas locales η , ζ , ξ .

Estas transformaciones únicamente se hacen efectivas si están acompañadas de un cambio de variables en las ecuaciones integrales. Se ha de transformar en variables locales $\{\zeta, \xi, \eta\}$, las variables $\{x, y, z\}$ de las expresiones que definen las ecuaciones de forma.

$$\frac{\partial N_j}{\partial x_i} = [J]^{-1} \frac{\partial N_j}{\partial \xi_i} \quad (3.12)$$

Donde J es la matriz jacobiana de la transformación:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial \zeta} & \frac{\partial Y}{\partial \zeta} & \frac{\partial Z}{\partial \zeta} \\ \frac{\partial X}{\partial \eta} & \frac{\partial Y}{\partial \eta} & \frac{\partial Z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial X}{\partial \xi} & \frac{\partial Y}{\partial \xi} & \frac{\partial Z}{\partial \xi} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

En la ecuación 3.13, las diferenciales de volumen en cada sistema de coordenadas están conectados de la siguiente forma:

$$dx dy dz = \text{determinante}[J] d\zeta d\eta d\xi$$

Tras efectuar la transformación, la resolución de la integral resulta mucho más simple en el sistema de coordenadas local (ζ, η, ξ) , que en el sistema cartesiano (x, y, z) en el cual los dominios se hallan distorsionados. Sin embargo, en el proceso de obtención del resultado final, pueden surgir ciertas dificultades debido a los siguientes factores [Fri04]:

1. El resultado del determinante de $[J]$ puede ser cero debido a una mala discretización de los elementos, y tiene como resultado la imposibilidad de hallar la solución deseada.
2. El procedimiento por el cual se elabora la matriz jacobiana resulta laborioso y consume tiempo.
3. La matriz jacobiana puede estar condicionada de manera incorrecta (determinante $[J]$ próximo a cero).

La tercera dificultad resulta la más temible de las dificultades. Pues esta, en ocasiones tiene como consecuencias la introducción de ciertos errores numéricos en la matriz jacobiana. La detección de estos errores resulta arduo.

Resolver numéricamente la integral, consiste en reemplazar la función de forma que se va a integrar por otra función de forma (polinomio de interpolación) que pase por un número determinado de puntos. Estos puntos se conocen como puntos de Gauss.

La solución de la integral del polinomio se obtiene ponderando la suma de valores del polinomio de interpolación.

En la siguiente figura 3.6 [Fri04] se muestran los límites de integración del polinomio de interpolación f .

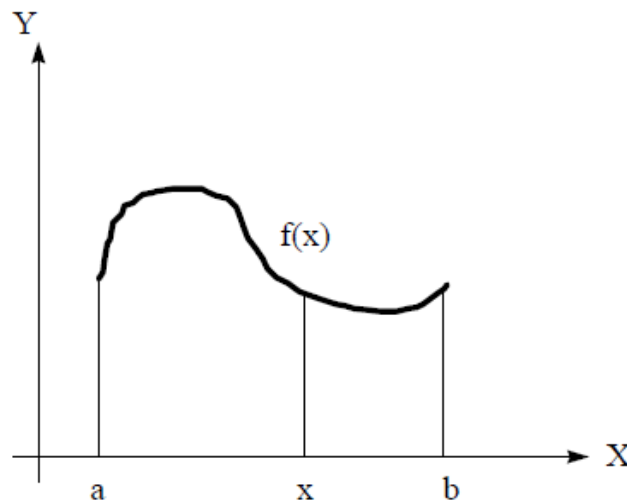


Figura 3.6: Límites de integración de la función f .

$$\int_a^b f(x)dx \approx \int_a^b P(x)dx \quad (3.14)$$

$$\int_a^b P(x)dx = \sum H_i f(x_i) \quad (3.15)$$

H_i : factor de peso.

El procedimiento más utilizado en el proceso de sustitución de la función de forma por un polinomio es la cuadratura de Gauss-legendre. Este método faculta realizar integrales de cualquier función que se encuentre en el intervalo $(-1,+1)$ mediante la sustitución de la función que se pretende integrar ($f(x)$) por un polinomio de Legendre de grado $2n-1$.

Si se toma como base n puntos de Gauss es posible hallar el valor deseado más próximo a la integral (figura 3.7 [Fri04]):

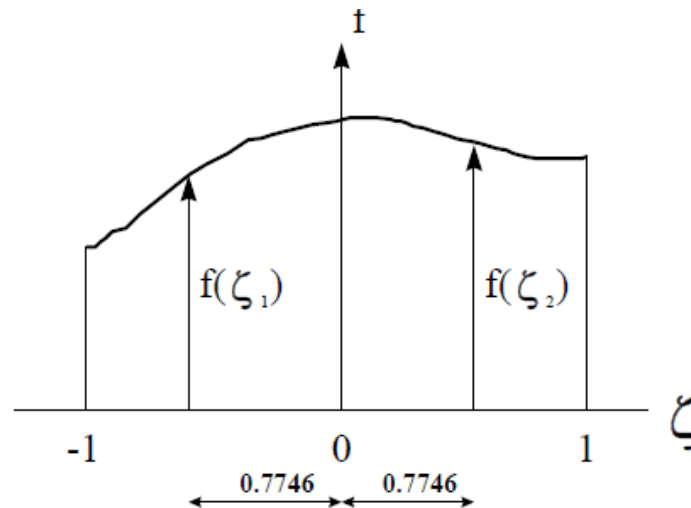


Figura 3.7: Integración Gauss-Legendre de la función f .

Finalmente se llega a la conclusión de que los puntos de Gauss son los puntos que más se adecuan a la evaluación de tensiones y deformaciones [Fri04]. Estas aproximaciones se quedan cortas y los errores resultan cuantiosos si se realiza el estudio en puntos distintos a los puntos de Gauss. Debido a este hecho es aconsejable evitar evaluar los nodos en todos los puntos, pero si en los puntos de Gauss.

3.5.5 ESTIMACIÓN DEL ERROR Y MALLADO ADAPTATIVO

En el análisis de problemas empleando el método de los elementos finitos, los errores efectuados tienen múltiples orígenes [Kul04]:

- Errores de modelización:
 - En la modelización de cargas exteriores
 - Modelización de condiciones de contorno
 - Propiedades de los materiales
- Errores en la discretización:
 - Errores en la aproximación de la geometría. Por déficit de capacidad de las funciones de forma geométricas en la representación con exactitud de la geometría real. Este problema se resuelve aumentando el mallado o refinándolo en las zonas conflictivas.
 - Errores en la discretización. Relacionados con el tamaño del elemento y la función de forma de los corrimientos de los nodos. Como norma general se emplean elementos pequeños en las zonas de variación rápida de la solución, y elementos grandes en las zonas de variación lenta.
- Errores de computación:
 - Error en la integración sobre elementos. Dado que hay que tomar un grado de polinomio de Legendre, hay que aceptar un cierto grado error (asociado al grado del polinomio).

- Error en la resolución del sistema de ecuaciones. Por errores de truncamiento en la representación interna del ordenador de los números reales, y por errores de redondeo.

3.5.5.1 ESTIMACIÓN DEL ERROR

El método exacto utilizado para determinar los errores asociados a la solución del problema, consiste en conocer de manera exacta la solución y compararlo con el valor obtenido en el estudio [Gal13]:

$$e_{\text{corrimientos}} = u_{\text{real}} - u_{\text{calculada}} \quad (3.16)$$

$$e_{\text{deformaciones}} = \varepsilon_{\text{real}} - \varepsilon_{\text{calculada}} \quad (3.17)$$

$$e_{\text{tensiones}} = \sigma_{\text{real}} - \sigma_{\text{calculada}} \quad (3.18)$$

El método empleado para estimar el error se basa en normas que representan alguna cantidad escalar integral, para medir el error o la función de error.

La norma que normalmente se utiliza es la norma de energía que viene dada por:

$$\|e\| = \left[\int_{\Omega} (\varepsilon_{\text{real}} - \varepsilon_{\text{calculada}})(\sigma_{\text{real}} - \sigma_{\text{calculada}}) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.19)$$

Esta expresión está relacionada con la energía con la que se deforma el sistema [105]

$$dU = \int_{\Omega} d\varepsilon^T \sigma d\Omega \quad (3.20)$$

El principal inconveniente de este método radica en que los valores reales siempre son desconocidos. Por este motivo la única forma factible de evaluar las diferencias entre las soluciones es mediante de errores. Estas estimaciones comparan la solución calculada respecto a una solución obtenida interpolando con funciones del mismo tipo que las empleadas para presentar el campo de corrimientos. El resultado obtenido es $\hat{\sigma}$, se trata de un campo de tensiones “aplaneado”. El error estimado es:

$$e_{\sigma} = \hat{\sigma} - \sigma_{\text{calculada}} \quad (3.21)$$

Este valor e_{σ} se puede introducir en la ecuación (3.21) para calcular el error de esta forma o cualquier otra (corrientes, deformaciones, etc.).

3.5.5.2 MALLADO ADAPTATIVO

Es importante disponer de un medio mediante el cual se evalúe el error cometido durante el análisis de un problema a través del método de los elementos finitos. La evaluación del error cometido en los cálculos radica en facilitar el refinamiento del elemento de análisis. Este refinamiento tiene como objetivo principal permitir llegar a resultados por debajo de un cierto error marcado.

Existen tres métodos de refinamiento de los elementos:

1. Método H

Consiste en reducir el error centrándose en el tamaño. Se actúa directamente sobre el tamaño del elemento pero se mantiene constante la función de forma. Este método presenta dos inconvenientes:

- Es el método más lento desde el punto de vista de velocidad de convergencia.
- Se pierde el control sobre el mallado, pudiendo generar mallas distorsionadas.

2. Método P

Este método se basa en el aumento continuo del grado de los polinomios de interpolación (funciones de forma). Este aumento progresivo se debe realizar manteniendo fijo el tamaño de los elementos. Se trata de un método con mayor velocidad de convergencia que el método H. el principal problema que presenta este método radica en que:

- Solicita acortar el grado máximo de polinomio. Un grado muy alto es capaz de provocar rizado en las soluciones.

3. Método HP

Estriba en el empleo de manera secuencial los métodos H y P. primero se optimiza el mallado a la geometría. Posteriormente se transforma el grado del polinomio hasta conseguir el valor deseado.

CAPÍTULO 4:

CARACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR EN ESTUDIO

El transformador a modelar presenta la siguiente conexión: **YNyn0+d**, inspirado en un modelo de transformador que está actualmente en funcionamiento, motivo por el cual se van a omitir ciertos datos característicos respetando así la confidencialidad del mismo. Se trata de un transformador trifásico de tres columnas como podemos apreciar en la figura 4.1 [GRE13]. El lado de AT del transformador dispone de un arrollamiento de regulación fina y de un arrollamiento de regulación gruesa; estos arrollamientos están en serie entre sí y con el arrollamiento principal de AT (figura 4.2 [Bur15]).

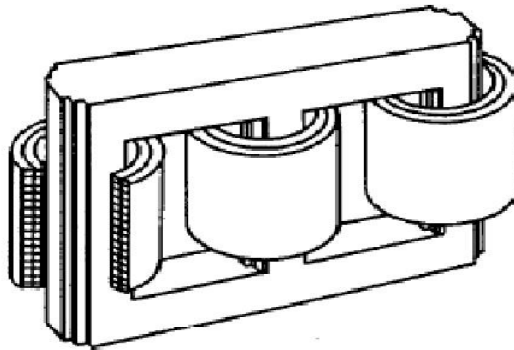


Figura 4.1 Transformador trifásico de tres columnas.

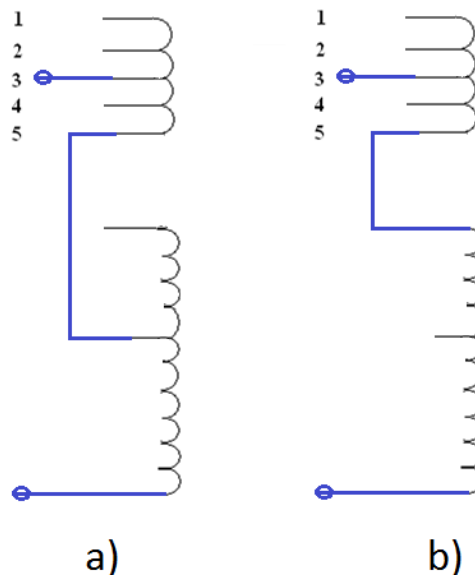


Figura 4.2: En la parte a) se muestra la conexión del transformador en las posiciones de regulación de tensión inferior a la asignada, en las que el arrollamiento de regulación gruesa está fuera de servicio.. En la parte b) se muestra la conexión del transformador en las posiciones de tensión superior a la asignada, con el arrollamiento de regulación gruesa en servicio.

En la tabla 4.1 se muestran las características principales del transformador a modelar.

Potencia Nominal HV (MVA)	60
Potencia Nominal LV (MVA)	60
Potencia Nominal TER (MVA)	1/3 de HV/LV =20
Tension Nominal HV (toma maxima) (KV)	147.84
Tension Nominal HV (toma central) (KV)	132
Tension Nominal HV (toma minima) (KV)	116.16
Tension Nominal LV (KV)	45
Tension Nominal TER (KV)	aproximadamente 10
Corriente Nominal HV (toma maxima) (A)	234
Corriente Nominal HV (toma central) (A)	262.4
Corriente Nominal HV (toma minima) (A)	298.2
Corriente Nominal LV (A)	770
Corriente Nominal TER (Afase)	668.2
Ditancia vertical ventana-cuba	YH
Ditancia horizontal ventana-cuba	LH
Altura ventana	WH
Distancia centro-centro	CC
Conexion del transformador	Ynyn0+d

Tabla 4.1: Características principales de transformador.

Podemos apreciar la disposición de los arrollamientos en la figura 4.3. El arrollamiento más cercano al núcleo magnético (**Core en la figura 4.3**) es el terciario (**TER en la figura 4.3**) seguidamente se encuentra el arrollamiento de baja tensión (**LV en la figura 4.3**) cuyo diámetro es superior al terciario pero inferior al de alta tensión (**HV en la figura 4.3**). A continuación se encuentra el arrollamiento de regulación gruesa (**HV-Coarse**) finalmente, en la parte más alejada al núcleo se encuentra el de regulación fina (**HV-Fine**). En la figura W representa el espesor de cada uno de los arrollamientos y H la altura de los mismos.

El número de espiras del arrollamiento de regulación fina es idéntico al número de espiras del arrollamiento de regulación gruesa.

Pending winding position drawing and detailed conductors drawing

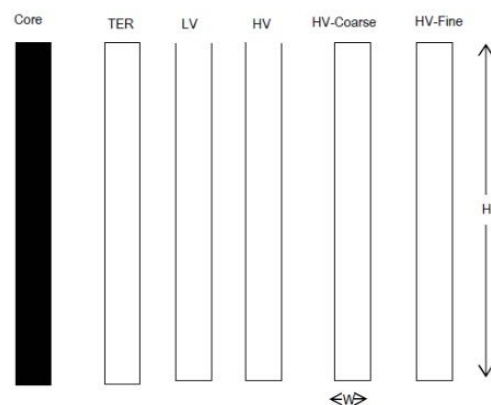


Figura 4.3: Posicionamiento de los arrollamientos del transformador

Esta configuración es idéntica para cada una de las tres columnas del transformador. En la figura 4.4 se muestra una sección longitudinal del núcleo magnético.

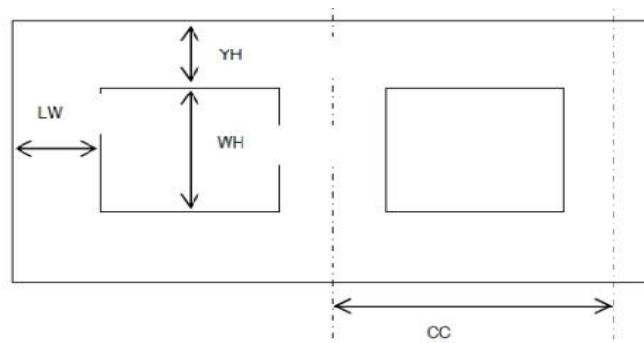


Figura 4.4: Sección longitudinal del núcleo magnético.

La cuba del transformador se considera un paralelepípedo, tal como se muestra en la figura 4.5 [Bur15]:

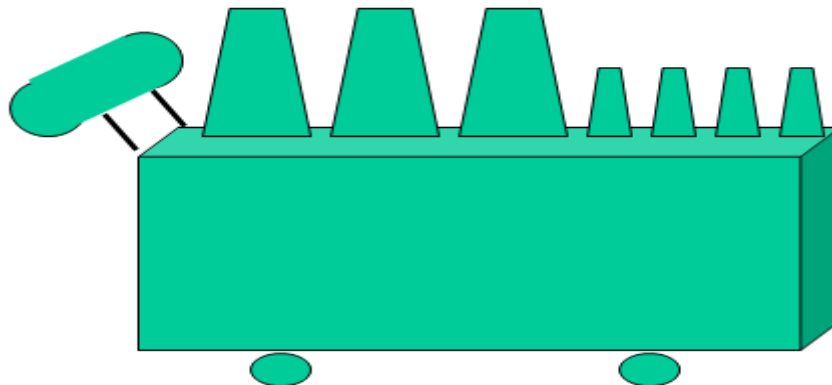


Figura 4.5: Cuba del transformador.

El transformador en estudio presenta 21 posiciones de regulación, pero el estudio que se realiza en este Trabajo Fin de Grado se centra en la toma central, de forma que el arrollamiento de regulación fina no está recorrido por corriente alguna y no es preciso modelarlo.

Por razones de confidencialidad las dimensiones del transformador no se mostrarán aquí, sino que se referirá a ellas mediante símbolos. Los símbolos utilizados se muestran en la tabla 4.2:

Dimensiones	TER	LV	HV	HV-Coarse	HV-Fine
Número de espiras	Nter	Nlv	Nhv	Nhvc	Nhvf
Diámetro interno	Dter	Dlv	Dlv	Dhvc	Dhvf
Espesor arrollamiento	Wter	Wlv	Whv	Whvc	Whvf
Culata superior	Yter	Ylv	Yhv	Yhvc	Hhvf
Culata inferior	Bter	Blv	Bhv	Bhvc	Bhvf
Altura arrollamiento	Hter	Hlv	Hhv	Hhvc	Hhvf

Tabla 4.2: Dimensiones del transformador.

4.1. MODELADO EN ELEMENTOS FINITOS

El modelado del transformador se ha realizado con Comsol Multiphysics 3.5a, se trata de un software que nos permite resolver problemas complejos físicos y de ingeniería basados en ecuaciones diferenciales mediante el método de elementos finitos. Esta herramienta informática es capaz de interactuar con Matlab (Comsol with Matlab 3.5a). Matlab es útil para resolver integraciones debido a la complejidad que presenta la resolución de integrales en Comsol. Es posible crear una geometría a través de otro software compatible (Solidedge o Catia) e importarla directamente a Comsol.

La figura 4.6 nos muestra algunos de los módulos con los que nos permite trabajar Comsol Multiphysics 3.5a.

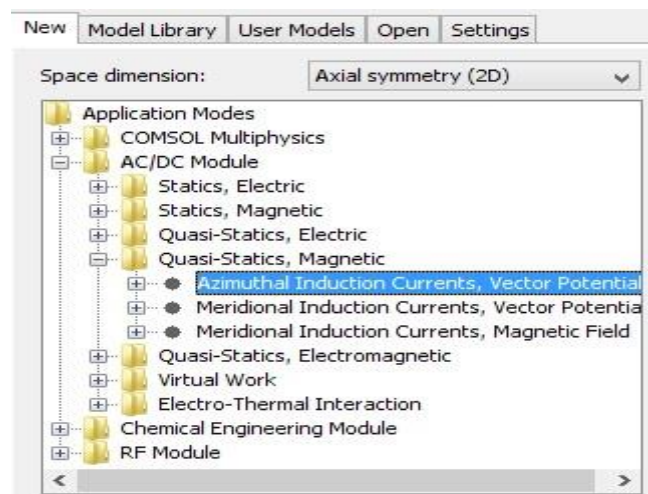


Figura 4.6: Módulos de Comsol multiphysics 3.5a.

Se ha modelado el transformador como un sólido con simetría axial, con lo que se eligió un modelado 2D axial asimétrica, este modelo, pese a que no refleja fielmente la realidad, permite obtener excelentes resultados en el estudio del transformador. Aunque la resolución en 3D sería más óptima debido a que permite llegar a soluciones más próximas a la realidad, no se ha considerado como una opción debido al tiempo y recursos limitados disponibles.

El modulo utilizado ha sido el AC/DC ya que permite simular dispositivos y elementos tanto eléctricos, magnéticos como electromagnéticos. Dentro de este módulo se ha elegido el submódulo Quasi-Statics, Magnetic, por la necesidad de calcular campos magnéticos creados por corrientes de baja frecuencia teniendo en cuenta las corrientes de Foucault engendradas en la cuba.

Teniendo en cuenta las características del problema (simetrías, intensidad en los arrollamientos con sólo una componente perpendicular al plano del dibujo) y la importancia de las corrientes inducidas en la cuba el método de resolución más adecuado en este caso es el cuasi-estático magnético con corrientes azimutales. La siguiente figura 4.7 muestra el grafico en el que se basa este estudio.

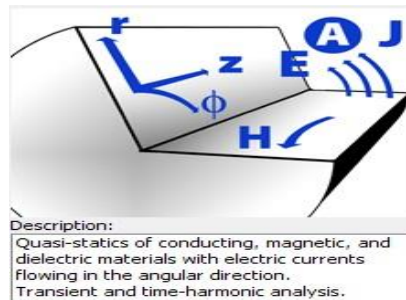


Figura 4.7: Grafico en el que se basan los cálculos de Comsol.

Las ecuaciones que utiliza este método son

$$(j\omega\sigma - \omega^2\epsilon_0 \cdot \epsilon_r) \cdot A_\phi + \nabla \times (\mu_0^{-1}\mu_r^{-1}\nabla \times A_\phi) - \sigma v \times (\nabla \times A_\phi) = \left(\frac{\sigma \Delta V}{2\pi r} + J_\phi^e \right) \quad (4.1)$$

Donde J_ϕ es la componente azimutal de la densidad de corriente eléctrica, A_ϕ es la componente azimutal del potencial vector magnético, ΔV la tensión externa aplicada, v la velocidad de la parte móvil, μ , ϵ y σ la permeabilidad, permitividad y conductividad respectivamente y ω la frecuencia angular.

- **Propiedades de los materiales**

En el análisis del transformador se deben tener en cuenta las propiedades de los distintos materiales que lo forman, pues estos influyen en el resultado de los diversos estudios realizados y realizables. En el presente estudio se ha tomado una permeabilidad relativa (μ) de la pared de la cuba igual a 300 y una conductividad eléctrica del acero de la cuba (σ) de $7 \cdot 10^6$ (s/m). En realidad el valor de la densidad de flujo es distinto en todos los puntos de la pared de la cuba, por consiguiente lo idóneo hubiese sido trabajar con distintas μ , pero por simplicidad se ha supuesto lineal el problema y por consiguiente μ constante.

El modelado de las corrientes de Foucault en el núcleo magnético y en los arrollamientos complica mucho el problema, requiere conocer muchos más detalles del transformador (forma de construcción de los arrollamientos, dimensiones de los conductores, espesor de las chapas magnéticas, etc.) y sin embargo no aumenta prácticamente la precisión de los resultados obtenidos. Con el objetivo de prevenir la aparición de corrientes de Foucault, en todas las simulaciones realizadas se ha supuesto conductividad nula en todos los arrollamientos y en el núcleo del transformador. La permeabilidad del núcleo magnético se ha tomado constante e igual a $\mu=5000$. En los transformadores reales la permeabilidad del núcleo es un poco mayor, pero si se aumenta en exceso la permeabilidad del núcleo sin hacer un mallado suficientemente fino aparecen problemas de inestabilidad numérica.

En la tabla 4.3 se resumen los valores de permeabilidad y conductividad con las que se han obtenido el valor de la impedancia de secuencia directa y se ha realizado el estudio la impedancia de secuencia homopolar.

Elemento del transformador	Conductividad	Permeabilidad
Espesor pared cuba	7,00E+06	300
Arrollamiento terciario	0	1
Arrollamiento de alta tensión	0	1
Arrollamiento de baja tensión	0	1
Arrollamiento regulación gruesa	0	1
arrollamiento de regulación fina	0	1
Superficie cuba	0	1
núcleo magnético	0	5000

Tabla 4.3: conductividad y permeabilidad de los elementos del transformador.

- **Geometría del transformador**

El transformador de estudio en este trabajo, presenta tres columnas con cinco arrollamientos en cada una de las columnas. La figura 4.8 muestra el dibujo en planta del objeto de análisis.

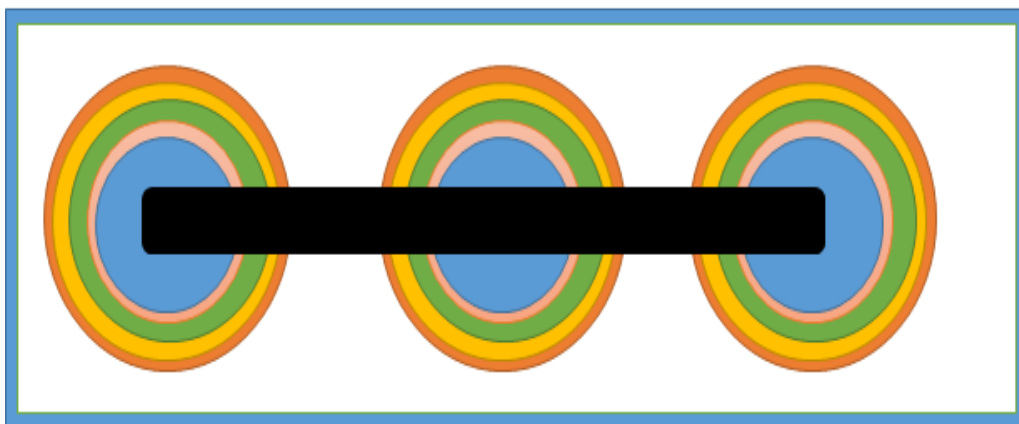


Figura 4.8: Planta del transformador.

En color azul y en la parte más exterior del transformador se halla la cuba, en negro se representa el núcleo magnético del transformador. En colores vivos y del exterior al interior de la cuba se representan los arrollamientos de regulación fina (naranja) y regulación gruesa (amarillo), además de los de alta (verde) y baja tensión (rosa). En esta figura se ha omitido el arrollamiento terciario.

En la figura 4.9 se muestra un corte en alzado donde, ahora sí, se muestra en color gris el arrollamiento terciario.

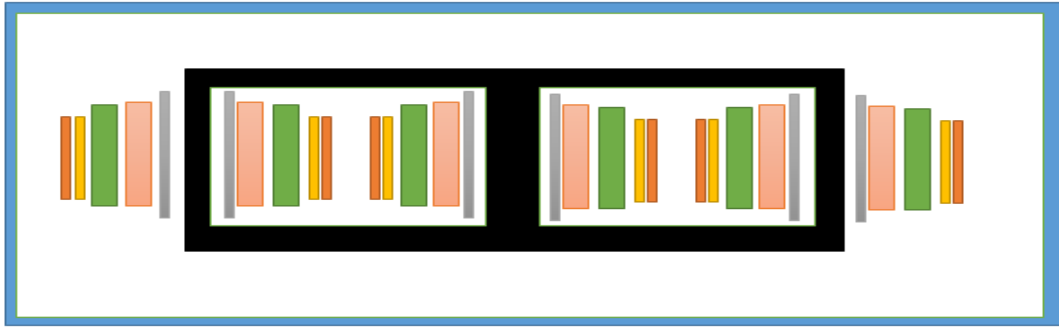


Figura 4.9: Corte en el alzado.

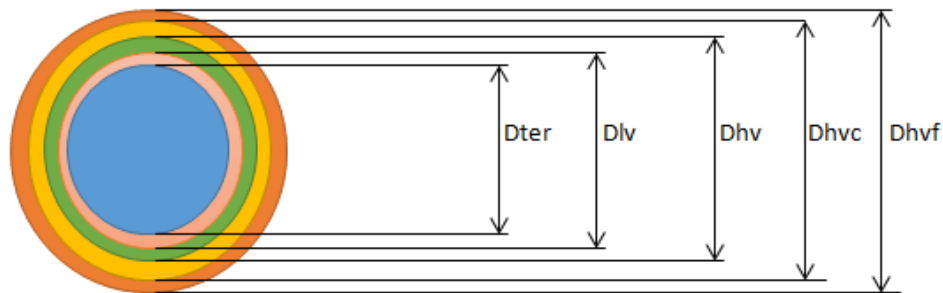


Figura 4.10: Representación de las dimensiones del diámetro de los arrollamientos.

4.2. CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA DE SECUENCIA DIRECTA

Como se vio en el capítulo 2, el cálculo de la impedancia de secuencia directa a partir de la geometría de la ventana del transformador es muy sencillo. Por este motivo y con el fin de adquirir experiencia en el manejo de Comsol se ha calculado mediante Elementos Finitos la impedancia de secuencia directa y se ha comparado con los valores reales proporcionados por la placa de características del transformador.

Tal y como se ha dicho, se admite que una fase cualquiera del transformador tiene simetría axial, y por ello se utiliza un estudio 2D axisimétrico. Para analizar una sola fase se modela la mitad de la ventana, pues la mayor parte del flujo magnético se halla en el núcleo del mismo y en el espacio entre arrollamientos, figura 4.11:



Figura 4.11: Geometría del transformador utilizada para el cálculo de la impedancia de secuencia directa.

La reluctancia ofrecida al paso del flujo común es despreciable por tanto se utiliza un circuito magnético cerrado.

Para determinar la impedancia de secuencia directa se realizan ensayos de cortocircuito en el transformador tomando los arrollamientos por parejas. En estos ensayos se inyecta corriente en uno de los arrollamientos y se cortocircuita el otro arrollamiento, dejando los demás a circuito abierto. Los casos analizados son los siguientes: AT-BT (se excita el arrollamiento de AT y se cortocircuita el de BT), AT-TER (se alimenta el lado de AT y se cortocircuita el terciario) y por ultimo BT-TER (BT conectado a la fuente y terciario cortocircuitado). En el software se introducen los valores de excitación como densidad de corriente.

$$J(A * vueltas/m^2) = I_n * N/S \quad (4.2)$$

Donde J representa la densidad de corriente aparente, S y N la superficie y el número de espiras del arrollamiento excitado e I_n la corriente proporcionada en la placa de características del transformador.

La composición del arrollamiento consta de: unos separadores entre espiras, un hilo de cobre y de aislamientos de papel (en ocasiones con resina). Pero solo puede circular corriente a través de los hilos de cobre.

La forma de los arrollamientos puede ser de capa o de disco, pero como carecemos de información precisa sobre los arrollamientos (dimensiones de los conductores y de los aislamientos), consideramos que la corriente circula por todo el arrollamiento, por lo tanto este va a ser un modelo simple pero no detallado.

Entre las opciones disponibles en el menú *Postprocesado* Comsol ofrece directamente la energía almacenada y la inductancia la calculamos de la siguiente forma:

$$L(H) = E * 2/I_n^2 \quad (4.3)$$

Siendo L la inductancia y E la suma de la energía magnética almacenada en todos el espacio en estudio. Es importante que al obtener la energía magnética en el menú *Postprocesado* se indique que realice una integral volumétrica, pues en sistemas con 2D con simetría axisimétrica se da la posibilidad de hacer la integral en un área o en un volumen.

La reactancia de cortocircuito porcentual se calcula a partir de la reactancia obtenida por medio de la inductancia y la reactancia base:

$$X(\Omega) = 2\pi fL \quad (4.4)$$

$$X_b(\Omega) = U_n^2/S_n \quad (4.5)$$

$$X(\%) = X/X_b \quad (4.6)$$

- **Comparación de los resultados de la impedancia de secuencia directa**

Tras la realización del análisis de la impedancia de secuencia directa por medio del modelo 2D axial simétrico, procedemos a comparar los resultados obtenidos con los valores reales proporcionados por la placa característica (tabla 4.4).

Ensayo	2D axil simétrico	Real
AT-BT	10,62	11
AT-TER	5,7	5,9
BT-TER	1,504	1,58

Tabla 4.4: comparación entre resultados de ensayo y valores reales.

Es apreciable que los resultados de ensayo son prácticamente idénticos a los reales (máximo error cometido 4.8%), por tanto se asumen correctos el diseño y los cálculos realizados y se prosigue con el estudio en cuestión.

4.3. OBTENCIÓN DE LA IMPEDANCIA DE SECUENCIA

HOMOPOLAR DEL TRANSFORMADOR

Debido al número de créditos limitado del Trabajo de Fin de Grado, de las dos posibilidades que existen a la hora de trabajar con un transformador Yyd (trabajar con el terciario cerrado o trabajar con el terciario abierto) se elegirá sólo la que corresponde al funcionamiento con el terciario abierto.

Dado que dos de las impedancias del circuito equivalente ante secuencia homopolar se pueden obtener mediante las fórmulas de Karsai (A0A y B0A) [Kar87], para obtener el circuito equivalente ante secuencia homopolar del transformador resta sólo obtener dos impedancias homopolares: las que corresponden a alimentar el arrollamiento de AT con el arrollamiento de BT en cortocircuito y el terciario abierto (que se denominará en adelante ensayo A1A) y el que corresponde a alimentar el arrollamiento de BT con el arrollamiento de AT en cortocircuito y el arrollamiento terciario abierto (que se denominará en adelante B1A).

Por tanto en cada uno de estos ensayos sólo circula corriente por dos arrollamientos: el arrollamiento conectado a la fuente y el arrollamiento cortocircuitado. Por el arrollamiento terciario no circulan corrientes al estar en circuito abierto.

La forma de obtener la cada una de las impedancias homopolares indicadas es la siguiente:

- En primer lugar se inyectarán en los arrollamientos las corrientes del ensayo de cortocircuito ante secuencia homopolar y se obtendrán los enlaces de flujo que concatenan a cada uno de los arrollamientos.

- En segundo lugar se calculará el valor eficaz de la tensión en régimen permanente sinusoidal del arrollamiento conectado a la fuente como

$$U_0 = \omega \Psi \quad (4.7)$$

Donde Ψ son los enlaces de flujo que concatenan al arrollamiento.

- En tercer lugar se calculará la impedancia homopolar como

$$Z_0 = \frac{U_0}{I_0} \quad (4.8)$$

Donde I_0 es la corriente que circula por una de las fases del arrollamiento conectado a la fuente de alimentación durante el ensayo.

- En cuarto lugar se expresará la impedancia calculada en Ohmios a porcentaje dividiendo por la impedancia base.

$$Z_B = \frac{U_N^2}{S_N} \quad (4.9)$$

$$Z_0(\%) = \frac{Z_0(\Omega)}{Z_B} \quad (4.10)$$

El modelo que se desarrollará es un modelo lineal (se admite que tanto la permeabilidad del hierro como la permeabilidad de la cuba son constantes), por eso, el valor de la intensidad inyectado por la fuente al arrollamiento conectado a ella no influye en el valor de Z_0 , ya que existe proporcionalidad entre la corriente y el flujo. Por eso la obtención de la corriente en el arrollamiento conectado a la fuente no presenta ningún problema, pues se puede tomar el valor que queramos (por ejemplo la corriente nominal).

Mayor problema plantea el cálculo de la corriente en el arrollamiento cortocircuitado. Cuando se realiza un ensayo de cortocircuito ante secuencia directa de un transformador los amperios vuelta del arrollamiento conectado a la fuente y los del arrollamiento cerrado en cortocircuito son iguales, pues el flujo magnético discurre en su mayoría por el núcleo magnético que tiene una reluctancia reducida, con lo que los amperios-vuelta precisos para crear el flujo son reducidos. Sin embargo cuando se realiza un ensayo de cortocircuito ante secuencia homopolar los amperios-vuelta de los arrollamientos conectado a la fuente y cortocircuitado no son iguales. Ello se debe a que en este caso el flujo magnético cierra parte de su camino por la cuba, con lo que induce en ella corrientes que influyen en el balance de amperios-vuelta. La corriente de la cuba es imposible de medir y la corriente de los arrollamientos cortocircuitados no es habitual medirla en los ensayos realizados en fábrica, y por eso en este Trabajo Fin de Grado ha habido que obtenerla de forma teórica. Para ello se utiliza la idea básica de que cuando se cortocircuita un arrollamiento de reducida resistencia el flujo concatenado por dicho arrollamiento debe ser cero.

En los aparados que siguen se expondrá la geometría utilizada para el cálculo de la impedancia homopolar, la forma de calcular los enlaces de flujo concatenados por cada arrollamiento y la forma de obtener la intensidad en el arrollamiento no conectado a la fuente.

4.3.1. GEOMETRÍA DEL TRANSFORMADOR EN EL CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA DE SECUENCIA HOMOPOLAR

Cuando se aplica a un transformador un sistema de tensiones de secuencia directa en las columnas de las tres fases se establecen tres flujo idénticos y decalados 120° , cuya suma en el punto central del circuito magnético es cero (figura 4.12 [Bur15]). Sin embargo, cuando se aplica a un transformador un sistema de tensiones de secuencia homopolar, se tiene en las tres fases tres flujos idénticos y en fase, que no suman cero en el punto central del circuito magnético. Ello obliga a que las líneas de inducción se deban cerrar por el medio externo al circuito magnético (Figura 4.13 [Bur15]). Las líneas de inducción buscan los medios de menor reluctancia para cerrar su camino, por eso el flujo homopolar cierra su camino a través de la cuba.

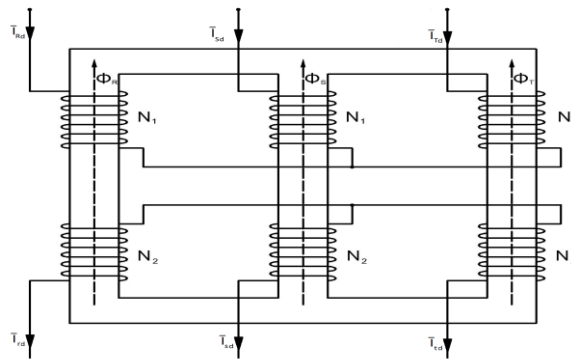


Figura 4.12: Trayectoria de los flujos de secuencia directa.

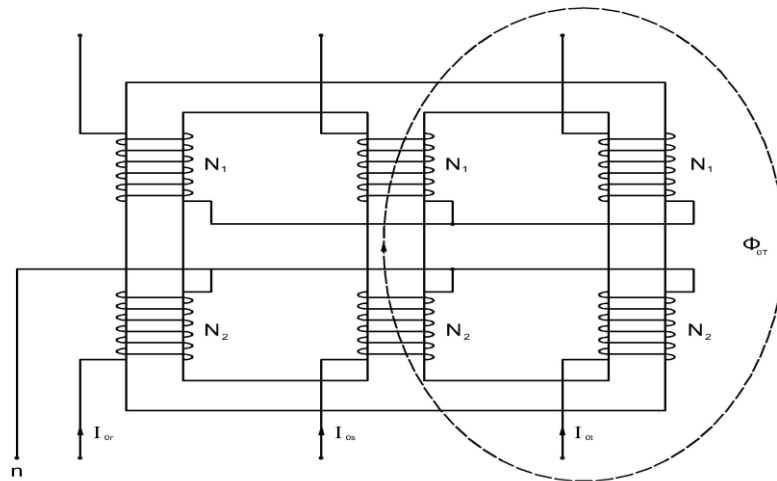


Figura 4.13: Trayectoria de los flujos de secuencia homopolar.

En el estudio del presente transformador (YNynd+0), teniendo en cuenta que los arrollamientos de alta y baja tensión presentan una configuración en estrella y que el triángulo del terciario está abierto, no circula corriente por los arrollamientos y por tanto no es necesario tener en cuenta este último para el cálculo del flujo, motivo por

el cual se ha supuesto durante el análisis del transformador, una configuración de tipo YNyn.

En la figura se puede observar la trayectoria que sigue el campo magnético en el interior de la cuba cuando se inyectan corrientes en los arrollamientos de alta tensión y baja tensión del transformador. Los amperios vuelta contrapuestos de AT y BT hacen que el camino de ida del flujo sea el espacio comprendido entre este arrollamiento y el de baja tensión el flujo retorna por el resto del espacio circundante aunque con una mayor concentración en la cuba. Las corrientes que se inducen en la cuba, se oponen al paso del flujo magnético y apantallan la cuba, debido a ello la circulación de flujo en la cuba se limita a los primeros milímetros de la misma (efecto pelicular)

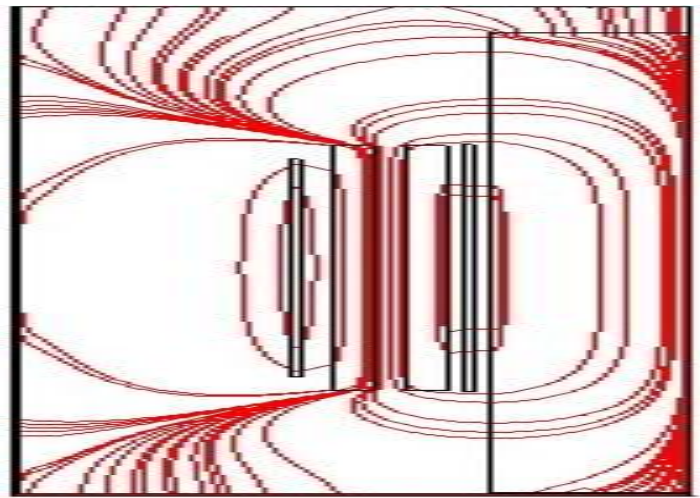


Figura 4.14: Trayectoria del campo magnético en la cuba.

El modelo empleado para el cálculo de la impedancia de secuencia directa no representa fielmente la realidad del transformador, es más bien una aproximación de este. El diseño en 3D proporciona una aproximación más a la realidad y presenta resultados más precisos, sin embargo, los recursos computacionales y el tiempo que implica la realización en esta dimensión obligan a trabajar en 2D axis-simétrico, cuyos resultados se han demostrado razonablemente precisos. Para el cálculo de la impedancia de secuencia homopolar es imprescindible tener en cuenta el cierre del flujo a través de la cuba. Por ello este estudio exige un corte perpendicular en la mitad del plano del núcleo magnético (plano XX' de la figura 4.8), tal como se muestra en la figura 4.15:

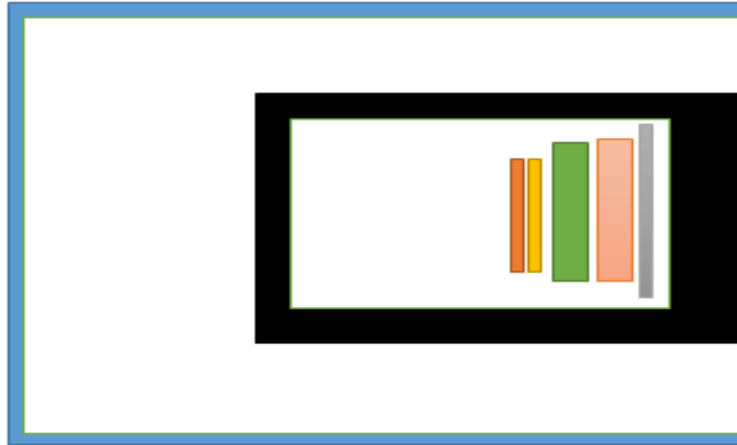


Figura 4.15: Geometría del transformador (impedancia de secuencia homopolar).

- **Condiciones de contorno**

Es muy importante definir las condiciones de frontera antes de realizar la simulación de los ensayos. La resolución por el método de los elementos finitos nos permite dos posibles grupos de contorno del transformador. El primer grupo es el formado por la pared exterior de la cuba, el cual hemos definido con unas condiciones de aislamiento magnético debido a las características magnéticas que presenta y de la función de protección y aislamiento que desempeña. El segundo grupo lo forman la superficie de la pared interna de la cuba y los demás elementos que componen el transformador. La frontera de este grupo, por su parte, se ha definido con una condición de continuidad.

4.3.2. CÁLCULO DE LOS ENLACES DE FLUJO DE LOS ARROLLAMIENTOS

En este apartado la herramienta informática Matlab juega un papel muy importante, pues si bien el cálculo de campos magnéticos se realiza a través del software de Elementos Finitos, el cálculo de los enlaces de flujo que concatenan uno cualquiera de los arrollamientos se realiza mediante un proceso iterativo programado en Matlab.

Para calcular el flujo magnético concatenado por un arrollamiento primeramente Matlab llamará al programa de elementos finitos Comsol con una densidad de corriente conocida circulando por los arrollamientos. Comsol obtendrá el valor de la inducción en cada punto del espacio (figura 4.16).

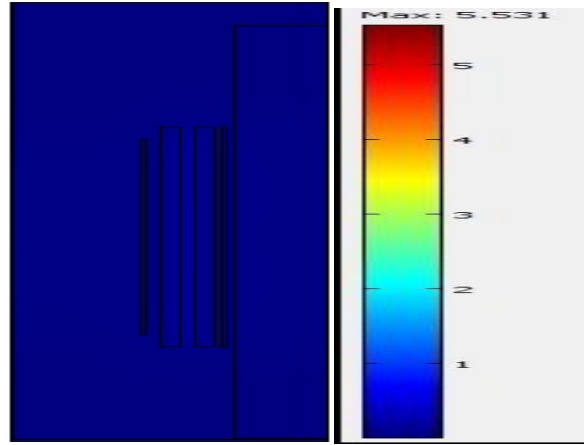


Figura 4.16: Densidad de flujo mediante elementos finitos.

El valor de los enlaces de flujo concatenados por los arrollamientos, se obtiene dividiendo la superficie del arrollamiento en un cierto número de partes iguales que en adelante llamaremos elementos de arrollamiento (figura 4.16). Así, se han dividido el espesor del arrollamiento de alta y baja tensión en 5 columnas, sin embargo el arrollamiento de regulación gruesa se ha dividido sólo en 2 columnas debido a su espesor reducido. La altura de cada uno de los tres arrollamientos en estudio (alta tensión, baja tensión y regulación gruesa) se ha dividido en 20 partes. De esta forma los arrollamientos de AT y BT se han dividido en 100 elementos y el de regulación gruesa en 40 elementos.

El valor de los enlaces de flujo totales se halla como la suma del número de espiras de cada una de los elementos del arrollamiento por el flujo que concatena el elemento.

$$\Psi = \sum_{i=1}^{100} \frac{N}{100} \cdot \Phi_i \quad (4.11)$$

A su vez, el flujo que concatena uno de los elementos en los que se ha dividido el arrollamiento se obtiene como

$$\Phi_i = \iint B_z * ds \quad (4.12)$$

Dado que el flujo se obtiene como producto escalar de la tensión por el diferencial de superficie se ha tomado solamente el valor de la inducción normal a la superficie (B_z).

La componente axial de la inducción es diferente en cada uno de los puntos de la superficie encerrada por el elemento de arrollamiento considerado, más concretamente depende de la distancia entre el punto de la superficie y el eje de simetría. Teniendo en cuenta la simetría admitida en el problema, para realizar la integral (4.12) se ha dividido la superficie interior al elemento de arrollamiento en un conjunto de anillos de circunferencia concéntricos.

$$dS = 2\pi r_i \cdot dr \quad (4.13)$$

Siendo r_i la distancia comprendida entre el eje de simetría y el centro de la división del diferencial de superficie del elemento.

De esta manera la integral 4.12 se realiza de forma discreta como un sumatorio

$$\iint B_z \cdot ds \cong \sum_1^{100} B_{zi} \cdot ds \quad (4.14)$$

Donde B_{zi} representa el valor de la inducción en 100*5*20 puntos de tanto el arrollamiento de AT como el de BT y, 100*2*20 puntos de la superficie de regulación gruesa.

El procedimiento se ilustra en la figura 4.17:

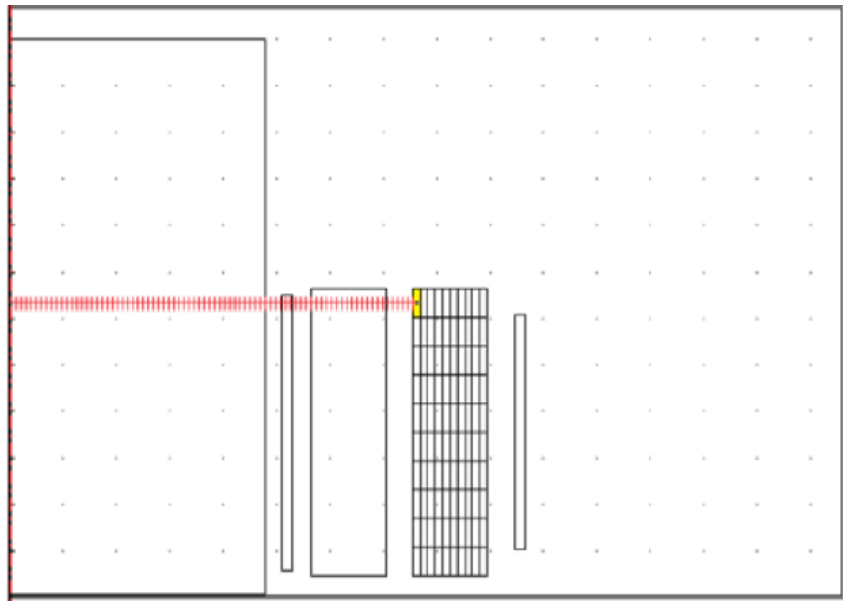


Figura 4.17: división i del flujo i.

La obtención de la inducción en los diferentes puntos de la ecuación (4.13) se realiza por medio de la función Postinterp que permite obtener el valor de la inducción en cualquier punto. Se trata de un comando aplicable gracias a la interfaz entre Comsol y Matlab. La componente normal de la inducción se representa como B_{z_emqa} como se observa en el siguiente código desarrollado para el cálculo del flujo (figura 4.18).

```

BzAT=zeros(100,5,20); % Valor de la induccion en 100x5x20 puntos del arrollamiento AT
BzrAT=zeros(100,5,20); % Producto de la induccion axial por el radio de cada punto
FlujoEspAT=zeros(5,20);

hAT=1.647; % Altura del arrollamiento de AT
for colAT=1:5 % Recorremos cada una de las 5 capas desde la cuba hacia el núcleo
    XcolAT(colAT)=0.529-(0.0625)/10-(0.0625)*(colAT-1)/5; % Coordenada del centro de cada una de las 100 espiras en las que se divide el arrollam
    dif_r=XcolAT(colAT)/99;
    for filaAT=1:20 % Recorremos cada una de las 20 filas de abajo a arriba
        YfilaAT=0.706+hAT/40+hAT*(filaAT-1)/20;
        for coordenadaAT=1:100 % coordenada de cada una de las 100 circunferencias concéntricas usadas para el cálculo del flujo
            radioAT=(coordenadaAT-1)*XcolAT(colAT)/99;
            BzAT(coordenadaAT,colAT,filaAT)=postinterp(fem,'Bz_emga',[radioAT;YfilaAT]);
            BzrAT(coordenadaAT,colAT,filaAT)=BzAT(coordenadaAT,colAT,filaAT)*radioAT;
        end
        FlujoEspAT(colAT,filaAT)=sum(BzrAT(:,colAT,filaAT))*dif_r*2*pi;
    end
end
end

```

Figura 4.18: Código Matlab para el cálculo del flujo concatenado por cada arrollamiento.

4.3.3. CÁLCULO DE LA CORRIENTE DEL ARROLLAMIENTO EN CORTOCIRCUITO

La corriente en el arrollamiento conectado a la fuente es conocida pero la corriente en el arrollamiento cortocircuitado no. La intensidad en el arrollamiento cortocircuitado será aquella que haga que el valor de los enlaces de flujo en el arrollamiento cortocircuitado sea nulo.

Para obtener el valor de la corriente utilizaremos el método de Newton Raphson (figura 4.19 [Goo15]).

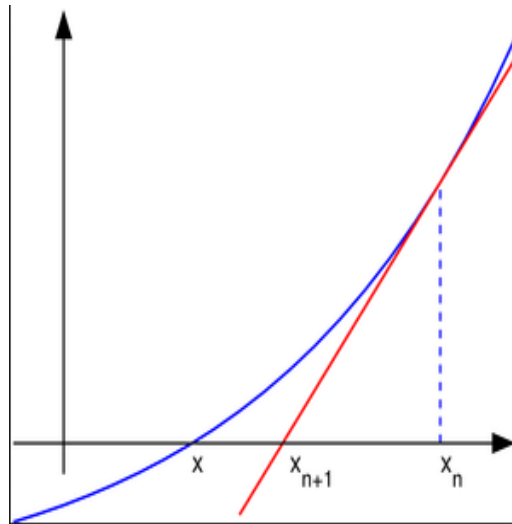


Figura 4.19: Método de Newton Raphson.

En la figura 4.19 el eje vertical representa los valores de los enlaces de flujo y el horizontal los valores de corriente en el arrollamiento cortocircuitado. Se trata de encontrar aquel valor de la corriente que hace cero los enlaces de flujo. Una aproximación a la raíz de la curva de flujo se obtiene sustituyendo la curva de flujo (azul) por su tangente (en rojo). La intersección de la tangente con el eje de abscisas es la siguiente:

$$X_{n+1} = X_n - \frac{X_n - X_{n-1}}{Y_n - Y_{n-1}} * Y_n \quad (4.15)$$

Como se aprecia en la figura 4.19, X_{n+1} no es la raíz de la función flujo, por lo que se debe repetir el procedimiento de forma iterativa. Este proceso iterativo proporciona el valor de la corriente en el arrollamiento cortocircuitado que anula los enlaces de flujo en dicho arrollamiento (figura 4.20):

```

if contador==1 %%%%contador si
    ibt_n_1=ibt_n*0.9;%%%%%%%%%valor de la corriente de baja tension IE
    ibt=ibt_n_1;%%%%%%%%%valor de la corriente de baja tension para el c
        %%%%%%%%%(solo en el caso de contador igual a 1)
    flujo_n=EnlacesFlujoBT;%%%%%%%%%valor inicial del flujo(flujo n)
    tolerancia=abs(EnlacesFlujoBT);%%%%%%%%%tolerancia del fujo n
else if contador>1 %%%%contador no, contador distinto de 1
    tolerancia=abs(EnlacesFlujoBT);%%%%%%%%%valor actual de l
    if tolerancia>0.1 %%%%tolerancia distinta de cero, cont
        flujo_n_1=EnlacesFlujoBT;%%%%%%%%% valor del flujo cor
        ibt=ibt_n_1-(ibt_n_1-ibt_n)*(flujo_n_1)/(flujo_n_1-flu
            %%%%%%%%% si el proximo valor de
        flujo_n=flujo_n_1;%%%%%%%%%valor del flujo n para el calcu
            %%%%%%%%% si el proximo valor de
        ibt_n_1=ibt;%%%%%%%%%valor de la corriente IBT_n+1 para el
            %%%%%%%%%si el proximo valor del flujo es dist
    else %%%%tolerancia igual a cero, finalizar iteracion
    end %end if
end %end else if

end %end if

% Cálculo del flujo concatenado por el arrollamiento de AT
% Cálculo del flujo concatenado por el arrollamiento de AT
end %end While (tolerancia igual a cero ==>> salir del bucle)

```

Figura 4.20: Código Matlab del Método de Newton Raphson.

4.3.4. CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR

Con la resultante de la suma de todos los enlaces de flujos, se halla la tensión en el arrollamiento conectado a la fuente externa. Conocido el valor de la corriente con el que se ha alimentado dicho arrollamiento (la corriente nominal) se puede obtener la impedancia según (4.8).

A continuación se muestra (figura 4.21) la parte final del código desarrollado para la obtención de la impedancia porcentual homopolar del ensayo en cuestión.

```

% Calcular la tensión

Eflujototal=EnlacesFlujoRG+EnlacesFlujoAT;
omega=2*pi*50;
Uensayo=omega*Eflujototal;
iat=(770*255)/(658+90);
% Se calcula la impedancia en ohmios
Zhomios=Uensayo/iat;
Unominal=132e3;
Snominal=60e6;
Zbase=Unominal^2/Snominal;
Zpu=100*Zhomios/Zbase;

```

Figura 4.21: Código Matlab para la obtención de la impedancia porcentual.

- **Comparación de resultados de la impedancia de secuencia homopolar.**

Del éxito conseguido en la obtención de la impedancia homopolar del transformador en estudio, depende la viabilidad del estudio a realizar de este trabajo.

Debido a que conocemos los valores de la impedancia homopolar de este transformador obtenida en la plataforma de ensayos del fabricante, podemos comprobar si los resultados obtenidos mediante Comsol y Matlab son los esperados.

En la tabla 4.5 se puede observar la diferencia entre los valores obtenidos en el cálculo de la impedancia homopolar (A1A y B1A) y los valores reales (valores de la impedancia homopolar obtenidos en los ensayos de fábrica).

impedancia homopolar	valores de fabrica	valores de ensayo	error
A1A(%)	10,73	10,14	5,50%
B1A(%)	11,13	11,05	0,72%

Tabla 4.5: Impedancia homopolar del ensayo vs Impedancia homopolar de fábrica.

Los resultados de esta comparación son satisfactorios, pues el error que resulta de calcular la impedancia homopolar A1A y la impedancia homopolar B1A del transformador por medio del software interactivo Comsol Matlab 3.5a es muy pequeño: la diferencia entre el valor de ensayo y el valor de fábrica para la impedancia homopolar A1A es de un 5,5%, mientras que la diferencia entre el valor de la impedancia homopolar B1A obtenida mediante ensayo y la facilitada por la fábrica es de un 0,72%.

Esta diferencia es debida probablemente a que los datos de las coordenadas de los arrollamientos, el núcleo y la cuba, han sido tomadas manualmente (a partir de los datos obtenidos se han tenido que realizar cálculos matemáticos para obtener algunas dimensiones necesarias para el diseño geométrico del prototipo del transformador en estudio) con lo cual se han podido cometer errores en algunos decimales.

Este éxito en los resultados, significa que se ha realizado satisfactoriamente el modelado del transformador para hallar el valor de su impedancia homopolar y nos permite seguir adelante con el objetivo planteado para este trabajo de fin de grado: análisis de los factores que influyen en la impedancia homopolar de un transformador, que se abordará en el próximo capítulo.

CAPITULO 5:

RESULTADOS

Como se indicó en el capítulo 2 existen fórmulas que permiten obtener la impedancia de secuencia directa de un transformador. Estas fórmulas permiten evaluar la influencia de diferentes dimensiones geométricas en la impedancia y con ello cumplir con los requisitos exigidos por el comprador del transformador (ya que una de las magnitudes que se especifican al comprar un transformador es la impedancia de secuencia directa) de la forma más económica posible.

Sin embargo, a diferencia de lo anterior no existen fórmulas para el cálculo de la impedancia homopolar de un transformador ni se ha encontrado en la literatura técnica consultada ningún estudio que permita cuantificar la influencia de las diferentes dimensiones geométricas en la impedancia homopolar.

Por eso, en este capítulo se realizarán diferentes simulaciones para conocer cuál es la influencia de determinadas dimensiones geométricas en la impedancia homopolar. Las dimensiones geométricas que se considerarán son:

- Altura de los arrollamientos
- Distancia entre los arrollamientos AT y BT
- Distancia AT-cuba
- Distancia de los arrollamientos al núcleo
- Espesor de los arrollamientos (por ejemplo del arrollamiento de AT)

El estudio de los factores que influyen en el valor de la impedancia homopolar se realiza con el transformador trabajando en su toma central. El estudio trabajando en la toma mínima y máxima sería semejante.

En el capítulo anterior hemos descrito con detalle la geometría del transformador, los materiales utilizados, el tipo de mallado y las condiciones de contorno necesarias para el estudio de la impedancia homopolar mediante Comsol multiphysics.

En el capítulo 4 se mostró el procedimiento adecuado para la obtención de la impedancia homopolar del transformador mediante un código Matlab, a partir de este código vamos a realizar todos los ensayos, cambiando únicamente lo que demande el ensayo en cuestión. Los cambios habituales son los que afectan a las dimensiones y coordenadas de los arrollamientos y las dimensiones y coordenadas de la cuba.

Como se ha comentado anteriormente, la tabla 4.5 del apartado anterior proporciona los valores de partida de la impedancia homopolar del transformador. A partir de estos valores se procederá a la realización de los diferentes ensayos.

5.1 INFLUENCIA DE LA ALTURA ENTRE ARROLLAMIENTOS

La inductancia de un arrollamiento se puede obtener dividiendo el número de espiras al cuadrado entre la reluctancia del camino por el que transcurren las líneas de flujo

$$L = \frac{N^2}{R_{tot}} \quad (5.1)$$

La reluctancia total se puede obtener como suma de las reluctancias que se encuentran en serie (por ejemplo, la reluctancia del camino de ida de las líneas de campo, que se establece por el conducto entre arrollamientos, más la reluctancia del camino de retorno que se establece por el exterior de los arrollamientos y por el interior del arrollamiento más interno)

$$R_{tot} = R_{s_ida} + R_{s_vuelta} \quad (5.2)$$

El retorno de las líneas de flujo se puede hacer por diferentes caminos alternativos (núcleo magnético, espacio entre el núcleo y el arrollamiento más interno, cuba, espacio entre la cuba y el arrollamiento más externo) como se puede observar en la figura 5.1 [Bur15]. Al ser caminos alternativos las reluctancias están en paralelo, con lo que

$$\frac{1}{R_{s_vuelta}} = \frac{1}{R_{p_1}} + \frac{1}{R_{p_2}} + \frac{1}{R_{p_3}} + \frac{1}{R_{p_4}} \quad (5.3)$$

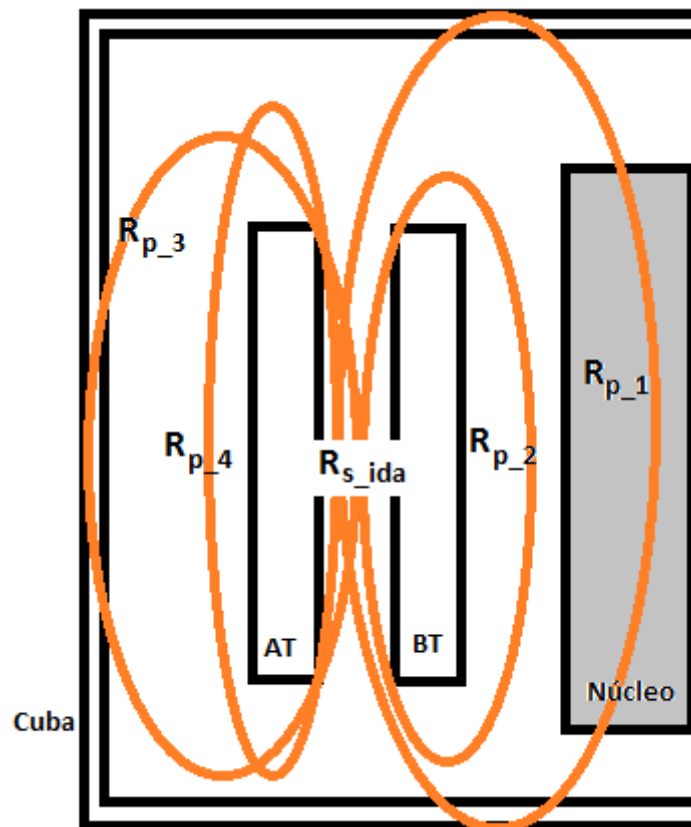


Figura 5.1: Diferentes caminos de la línea de flujo homopolar.

Cada una de las reluctancias depende de la longitud del trayecto que recorre el flujo (l) y de la sección de aso correspondiente (s):

$$R = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{s} \quad (5.4)$$

La altura de los arrollamientos influye en R_{s_ida} , con lo que es de esperar que al aumentar la altura aumente la reluctancia R_{tot} y con ello disminuya la impedancia homopolar.

Para realizar este estudio partimos de un caso base que es semejante, aunque no idéntico, al del transformador en estudio en la toma central del transformador de potencia. La diferencia entre el caso base y el transformador en estudio es que en este caso base, por simplicidad se ha igualado la altura de los arrollamientos principales, AT y BT, que en el transformador original no coinciden, aunque se ha mantenido la proporcionalidad inicial entre alturas correspondientes a los arrollamientos de AT y el de regulación gruesa.

Para analizar la influencia de la altura no se ha alterado ninguna de las demás dimensiones de los arrollamientos, tampoco se han alterado las dimensiones de la cuba ni del núcleo, pues sólo nos interesa estudiar el efecto de la altura de los arrollamientos en la impedancia homopolar A1A y B1A del transformador.

Se ha realizado el ensayo con cuatro valores distintos para la altura, con unos incrementos de +2.5%, +5%, 0% y -2.5% sobre el valor inicial.

La sección de los arrollamientos depende la altura por tanto al variar esta última también varía la sección y por consiguiente el valor de la densidad de corriente (ecuación 4.2). Al mantener constante la corriente de los arrollamientos y el número de arrollamientos la densidad de corriente disminuye a medida que aumentamos la altura de los arrollamientos. Los enlaces de flujo dependen de la densidad de corriente. La tensión de ensayo depende de los enlaces de flujo y la impedancia homopolar en ohmios depende de la tensión de ensayo, por tanto la impedancia homopolar porcentual depende de la tensión de ensayo (ecuación 4.7 y ecuación 4.8).

En las siguientes tablas se muestran todos los datos utilizados para realizar el ensayo, así como los distintos resultados obtenidos:

Caso	Altura BT	Altura AT	Altura RG	Impedancia homopolar ZA1A
-2,5%	1574	1574	1393	10,58
0,0%	1657	1657	1475,9	10,09
2,5%	1698	1698	1503,3	9,87
5,0%	1740	1740	1540,5	9,66

Tabla 5.1: Influencia de la altura A1A.

Caso	Altura BT	Altura AT	Altura RG	Impedancia homopolar ZB1A
-2,5%	1574	1574	1393	11,58
0,0%	1657	1657	1475,9	11,04
2,5%	1698	1698	1503,3	10,788
5,0%	1740	1740	1540,5	10,55

Tabla 5.2: Influencia de la altura B1A.

En la figura 5.2 se muestra gráficamente la información contenida en las tablas 5.1 y 5.2.

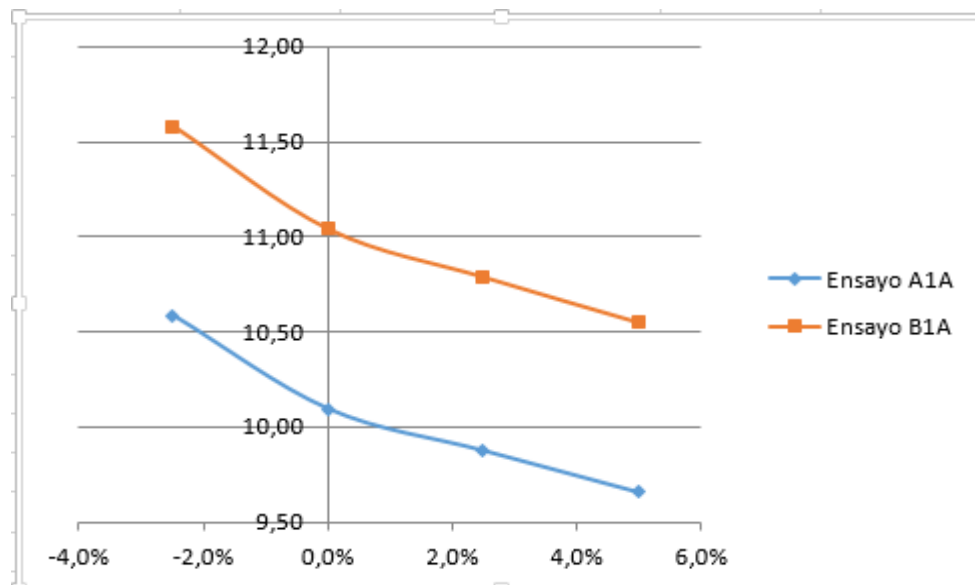


Figura 5.2: Evolución de la impedancia homopolar según su altura.

Podemos observar en ambas tablas que, como era de esperar, a medida que aumenta la altura de los arrollamientos se produce una disminución progresiva de la impedancia homopolar. Este aumento no es totalmente lineal, pues si partimos del caso base (variación 0%) y disminuimos la altura un 2.5% se produce una variación superior al que se produce si partimos del caso base y aumentamos la distancia un 2.5%. Esta variación se hace más pequeña a medida que aumenta la altura de los arrollamientos, es decir, el efecto resultante de aumentar la distancia un 2.5% inicialmente es inferior al efecto de volver a aumentar otros 2.5% la altura, la influencia del aumento de la altura disminuye progresivamente.

Como podemos observar en la tabla 5.3 la impedancia homopolar A1A presenta una sensibilidad ligeramente inferior ante la influencia de la variación de la altura de los arrollamientos que la que presenta la impedancia homopolar B1A (12.4% para el caso A1A frente a 13,7% en el caso B1A). Esta sensibilidad es de sentido negativo como consecuencia de la disminución de la impedancia con la altura, sin embargo, pese a la diferencia entre ambas sensibilidades (1.3% de diferencia), tanto la impedancia A1A como la impedancia B1A tienen la misma tendencia frente a la variación de la altura.

A1A	Sensibilidad (%)	-12,4
B1A	Sensibilidad (%)	-13,7

Tabla 5.3: sensibilidad de la influencia de la altura.

5.2 INFLUENCIA DE LA DISTANCIA ENTRE EL ARROLLAMIENTO

AT Y LA CUBA

Interesa analizar cómo influye la distancia entre el arrollamiento AT y la cuba. Para conseguir esto es necesario realizar algunos cambios en las coordenadas de los diferentes elementos del transformador.

En el estudio se mantendrán constantes las dimensiones de todos los arrollamientos y las distancias entre ellos. También se han mantenido las dimensiones y las coordenadas del núcleo. Debido a la configuración del transformador (figura 4.14) el arrollamiento de baja tensión está más próximo al núcleo que el arrollamiento de alta tensión, por tanto, debido a su posición sus coordenadas no se variarán en el estudio. Como el arrollamiento de regulación gruesa es parte del arrollamiento de alta tensión, se mantiene en todo momento la distancia entre ambos arrollamientos. Por tanto en este estudio se han mantenido constantes las coordenadas de los arrollamientos de AT y de regulación gruesa y tan sólo se han variado progresivamente las dimensiones interna y externa de la cuba como causa de la variación de la distancia AT-cuba.

En las tablas 5.4 y 5.5 se pueden observar las variaciones realizadas y los distintos resultados obtenidos. Estos resultados se pueden ver de forma más gráfica en la figura 5.3.

Caso	Variación distancia (%)	Distancia núcleo-BT (m)	Espesor BT (m)	Distancia BT_AT (m)	Espesor AT (m)	Distancia RG cuba (m)
Distancia a la cuba	5,82%	0,0575	0,0615	0,0470	0,1265	0,4153
	2,91%	0,0575	0,0615	0,0470	0,1265	0,4039
	0,00%	0,0575	0,0615	0,0470	0,1265	0,3925
	-2,91%	0,0575	0,0615	0,0470	0,1265	0,3811

Tabla 5.4: Distancias relevantes en el estudio de la influencia del grosor del canal entre el arrollamiento externo y la cuba

Caso	Variación distancia (%)	impedancia homopolar A1A (%)	impedancia homopolar B1A (%)
Distancia a la cuba	5,82%	10,17	11,05
	2,91%	10,16	11,05
	0,00%	10,14	11,05
	-2,91%	10,12	11,05

Tabla 5.5: Influencia de la distancia entre el arrollamiento AT y la cuba en la impedancia homopolar A1A y B1A.

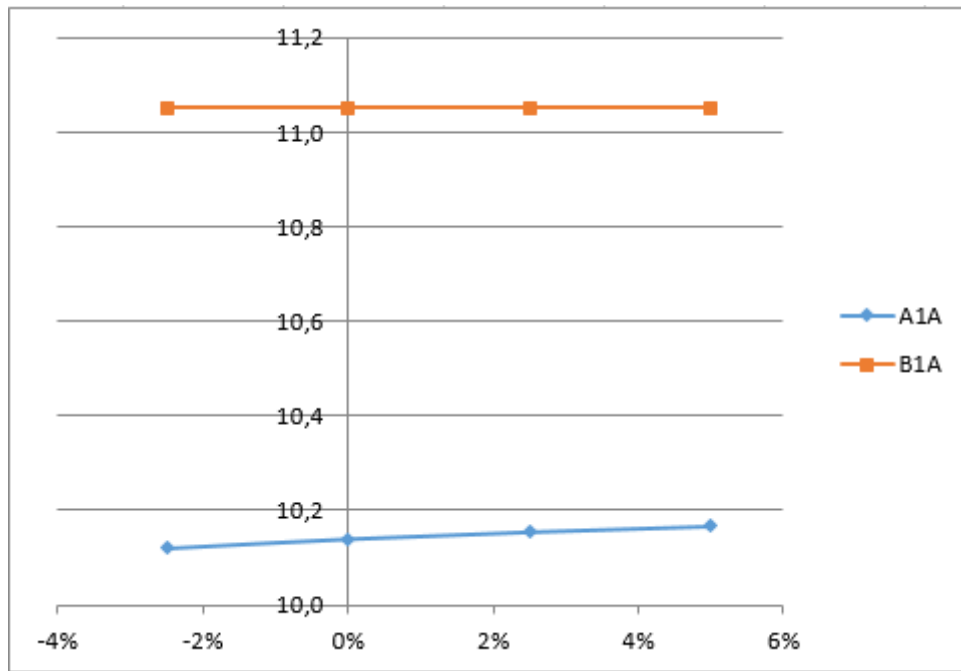


Figura 5.3: Curva de evolución de las impedancias A1A y B1A frente a la variación de la distancia del arrollamiento AT y cuba.

En la tabla 5.5 se muestra la variación de la impedancia expresada en porcentaje respecto de la que corresponde a la posición base.

Impedancia homopolar A1A	Impedancia homopolar B1A	Variación respecto al caso base A1A	Variación respecto al caso base B1A
10,17	11,05	0,3%	0,0%
10,16	11,05	0,2%	0,0%
10,14	11,05	0,0%	0,0%
10,12	11,05	-0,2%	0,0%

Tabla 5.5: Porcentaje de variación de las impedancias A1A y B1A respecto al valor de la impedancia del caso base cuando se produce una variación de la distancia entre el arrollamiento AT y la cuba.

Como se puede observar en la tabla 5.5, la influencia de la distancia entre el arrollamiento de AT y la cuba en la impedancia homopolar B1A es nula. Esto es lógico si se tiene en cuenta cuál es la trayectoria del flujo en este ensayo (figura 5.4). En este ensayo el arrollamiento de AT se encuentra cortocircuitado, y en él se inducen unas corrientes que hacen que el flujo en su exterior sea nulo y con ello apantallan la cuba, por tanto, el espesor del canal entre AT y la cuba resulta irrelevante.

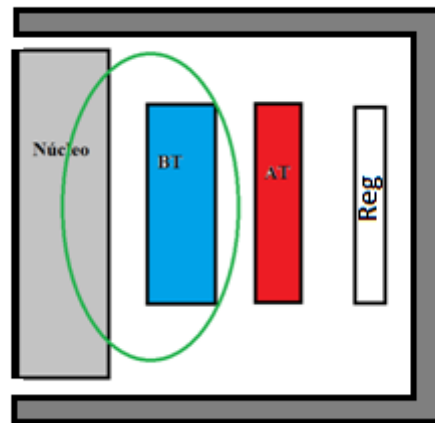


Figura 5.4: Trayectorias del flujo homopolar en el caso B1A.

Como se puede observar en la tabla 5.5, la influencia de la distancia entre el arrollamiento de AT y la cuba en la impedancia homopolar A1A es prácticamente nula si mantenemos la distancia entre los arrollamientos AT y RG, con una sensibilidad que está por debajo del 0,3%. Esto es debido a que la mayor parte del flujo creado por el arrollamiento de AT retorna por la cuba y tan sólo regresa por el canal existente entre AT y la cuba una muy pequeña parte del flujo homopolar. La figura 5.5 muestra las trayectorias de flujo en este caso.

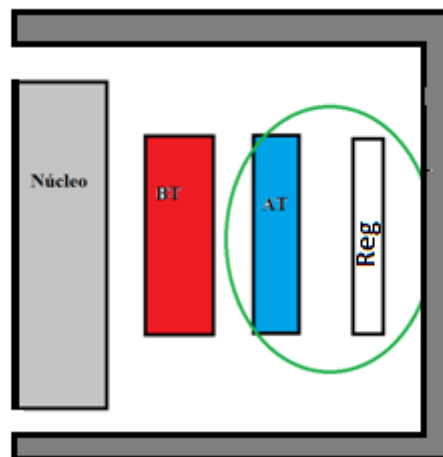


Figura 5.5: Trayectorias del flujo homopolar en el caso A1A.

El resultado de este estudio resulta bastante sorprendente: La distancia entre el arrollamiento de AT y la cuba casi no afecta al valor de las impedancias homopolares calculadas, en otras palabras, se podría conseguir casi el mismo valor de las impedancias homopolares con una cuba de dimensiones superiores o inferiores a las del caso base.

no

5.3. INFLUENCIA DE LA DISTANCIA ENTRE ARROLLAMIENTOS AT y BT

En este estudio se han considerado cuatro valores distintos de la distancia entre los arrollamientos AT y BT.

Durante el estudio se han mantenido constantes las dimensiones de los arrollamientos, pues solo interesa observar cómo afecta la distancia entre el arrollamiento AT-BT a la impedancia homopolar del transformador.

En primer lugar se ha analizado cómo afecta el distanciamiento progresivo entre los arrollamientos AT-BT a la impedancia homopolar A1A del transformador de potencia. En segundo lugar, se ha realizado el mismo análisis, pero esta vez observando cómo influye la distancia entre arrollamientos en la impedancia homopolar B1A. En ambos casos se han mantenido las distancias entre los demás arrollamientos así como las distancias entre estos y la pared interior de la cuba: arrollamiento BT- núcleo, arrollamiento AT- arrollamiento RG y arrollamiento RG-pared interior de la cuba. Dado que la distancia entre AT-BT se ha cambiado, para mantener el espesor del arrollamiento de AT y la distancia entre éste y la cuba ha habido que variar las coordenadas de los arrollamientos AT y RG, pero no así en la posición del núcleo ni en la posición del arrollamiento de BT que mantienen constantes sus dimensiones y coordenadas en todos los estudios. También se han variado las coordenadas de la cuba (interna y externa).

En las siguientes tablas 5.6 a 5.8 se puede observar las dimensiones de los diferentes elementos del transformador y la influencia de la distancia entre el arrollamiento AT-BT en la impedancia homopolar del transformador.

Caso	Variación distancia (%)	Distancia núcleo-BT (m)	Espesor BT (m)	Distancia BT_AT (m)	Espesor AT (m)	Distancia RG cuba (m)
Distancia entre arrollamientos de AT y BT	11,6%	0,0575	0,0615	0,0524	0,1265	0,3925
	5,8%	0,0575	0,0615	0,0497	0,1265	0,3925
	0,00%	0,0575	0,0615	0,0470	0,1265	0,3925
	-5,8%	0,0575	0,0615	0,0442	0,1265	0,3925

Tabla 5.6. Distancias relevantes en el estudio de la influencia del grosor del canal entre el arrollamiento externo y la cuba.

Caso	Variación distancia (%)	Impedancia homopolar A1A (%)	Impedancia homopolar B1A (%)
Distancia entre arrollamientos de AT y BT	11,6%	10,74	11,7
	5,8%	10,43	11,26
	0,00%	10,14	11,05
	-5,8%	9,84	10,66

Tabla 5.7: influencia de la distancia entre los arrollamientos AT-BT en las impedancias homopolar A1A y B1A del transformador.

impedancia homopolar A1A	impedancia homopolar B1A	Variación respecto al caso base A1A	Variación respecto al caso base B1A
10,74	11,70	5,9%	5,8%
10,43	11,26	2,9%	1,9%
10,14	11,05	0,0%	0,0%
9,84	10,66	-3,0%	-3,5%

Tabla 5.8: Sensibilidad de las impedancias A1A y B1A frente a la influencia de la distancia del arrollamiento AT y BT.

En la figura 5.6 se muestran de forma gráfica los resultados:

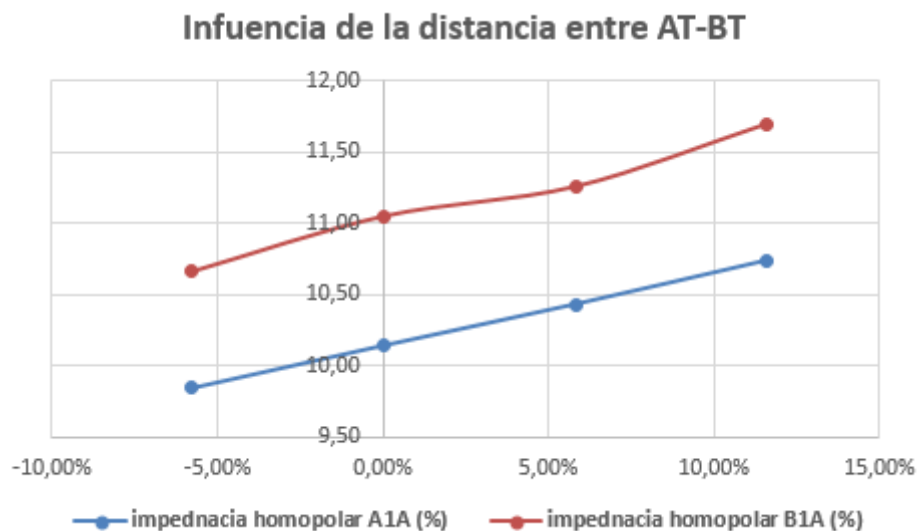


Figura 5.6: Evolución de las impedancias homopolar A1A y B1A cuando se produce una variación en la distancia entre los arrollamientos AT-BT.

Como se puede observar en las tablas 5.7 y 5.8 al producirse un aumento en la distancia entre los arrollamientos AT-BT, se produce un incremento en la impedancia homopolar del transformador. Esto era de esperar a la luz de las ecuaciones (5.1) a (5.3).

Al aumentar la distancia de los arrollamientos AT-BT un 5,8% respecto al original se produce un incremento de un 2,9% de la impedancia homopolar A1A del transformador y así ocurre cada vez que se produce un aumento de la distancia del mismo porcentaje respecto al anterior; también se puede observar que se produce una disminución del 3%, si reducimos la distancia inicial entre arrollamientos un 5,8%. Por este motivo se puede afirmar que la distancia entre los arrollamientos AT-BT influye de forma aproximadamente lineal en la impedancia homopolar del transformador como se muestra en la figura 5.6. Esto es lo mismo que ocurre con la impedancia de secuencia directa (ecuación (2.23)).

Sin embargo cuando se incrementa la distancia entre los arrollamientos AT-BT no se produce un incremento lineal en la impedancia homopolar B1A. Se puede observar en

la tabla 5.5, que cuando se aumenta un 5,8% la distancia entre los arrollamientos principales tan sólo se registra un aumento del 1,9% en la impedancia homopolar B1A, mientras que cuando se disminuye un 5,8%, se observa una reducción del 3,5%. Al incrementar la variación a un 11,6% la impedancia B1A se incrementa un 5,9%, es decir, la variación en la impedancia homopolar B1A presenta una variación lineal ni simétrica con la distancia entre los arrollamientos AT-BT (figura 5.6).

La impedancia A1A tiene una sensibilidad inferior (5.28%) a la variación de esta distancia, mientras que la impedancia homopolar B1A presenta una sensibilidad superior (6.5%) a la variación de la distancia entre los arrollamientos principales. Como conclusión, afirmamos que, la influencia de la distancia entre arrollamientos A1A-B1A no es la misma para la impedancia homopolar A1A que para la impedancia homopolar B1A. No es sencillo encontrar una razón para ello, si bien se puede aventurar la siguiente: la reluctancia del núcleo magnético es prácticamente despreciable debido a su alta reluctancia, con lo que la reluctancia que se ofrece a las líneas de la figura 5.4 (impedancia B1A) es casi exclusivamente la del canal entre arrollamientos (y por tanto es muy sensible a la distancia entre arrollamientos), mientras que las líneas de la figura 5.6 se cierran por la cuba, que ofrece una mayor reluctancia, con lo que la distancia entre arrollamientos juega un papel menos relevante.

5.4 INFLUENCIA DE LA DISTANCIA ENTRE LOS ARROLLAMIENTOS Y EL NÚCLEO

El estudio de la influencia de la distancia entre el núcleo magnético y el arrollamiento es de gran importancia. El camino por el que circula el flujo magnético depende de cómo estén situados los arrollamientos con respecto al núcleo.

Se comienza este ensayo determinando el número de casos (tres casos con un incremento de 2.5% respecto al caso base) a tener en cuenta para determinar la influencia de la distancia entre arrollamientos y el núcleo con respecto a la impedancia homopolar del transformador (impedancia homopolar A1A y B1A).

Se produce el incremento de la distancia variando las coordenadas de los dos principales arrollamientos (arrollamiento de baja tensión y arrollamiento de alta tensión), pero se mantiene en todos los casos la distancia entre los arrollamientos de alta tensión y baja tensión además de la distancia entre el arrollamiento de alta tensión y el de regulación gruesa, por tanto, también se produce una variación de la coordenada del arrollamiento de regulación gruesa. En ningún de los casos de este estudio se produce una variación en las dimensiones de los arrollamientos.

Por error no se incrementaron las coordenadas de la pared interior y exterior de la cuba, con lo que la distancia entre AT y cuba es diferente en cada uno de los casos en estudio. Esto reduce la claridad del estudio, si bien, como se mostró en el apartado 5.2, la

distancia AT-cuba no influye en la impedancia homopolar B1A e influye muy poco (sensibilidad inferior al 0,3%) en la impedancia homopolar A1A).

En las tablas 5.9 y 5.10 se pueden observar tanto las variaciones realizadas en las coordenadas de los arrollamientos como los resultados obtenidos para los dos ensayos realizados (ensayo de la influencia de la distancia del núcleo al arrollamiento de BT sobre la impedancia homopolar A1A y ensayo de la influencia de la distancia del núcleo al arrollamiento de BT sobre la impedancia homopolar B1A):

Caso	Variación distancia (%)	Distancia núcleo-BT (m)	Espesor BT (m)	Distancia BT_AT (m)	Espesor AT (m)	Distancia RG cuba (m)
Distancia entre el núcleo y el arrollamiento de BT	5,00%	0,0604	0,0615	0,0470	0,1265	0,3896
	2,50%	0,0589	0,0615	0,0470	0,1265	0,3911
	0,00%	0,0575	0,0615	0,0470	0,1265	0,3925
	-2,50%	0,0561	0,0615	0,0470	0,1265	0,3939

Tabla 5.9: Distancias relevantes en el estudio de la influencia del grosor del canal entre el núcleo y el arrollamiento de BT.

Caso	Variación distancia (%)	impedancia homopolar A1A (%)	impedancia homopolar B1A (%)
Distancia entre el núcleo y el arrollamiento de BT	5,00%	10,20	11,11
	2,50%	10,17	11,04
	0,00%	10,14	11,05
	-2,50%	10,11	10,95

Tabla 5.10: influencia de la distancia entre el arrollamiento de BT y el núcleo en las impedancias homopolares A1A y B1A.

impedancia homopolar A1A	impedancia homopolar B1A	Variación respecto al caso base A1A	Variación respecto al caso base B1A
10,20	11,11	0,6%	0,5%
10,17	11,04	0,3%	-0,1%
10,14	11,05	0,0%	0,0%
10,11	10,95	-0,3%	-0,9%

Tabla 5.11: Variación en porcentaje de la impedancia homopolar A1A y la impedancia homopolar B1A con respecto a sus respectivos caso base.

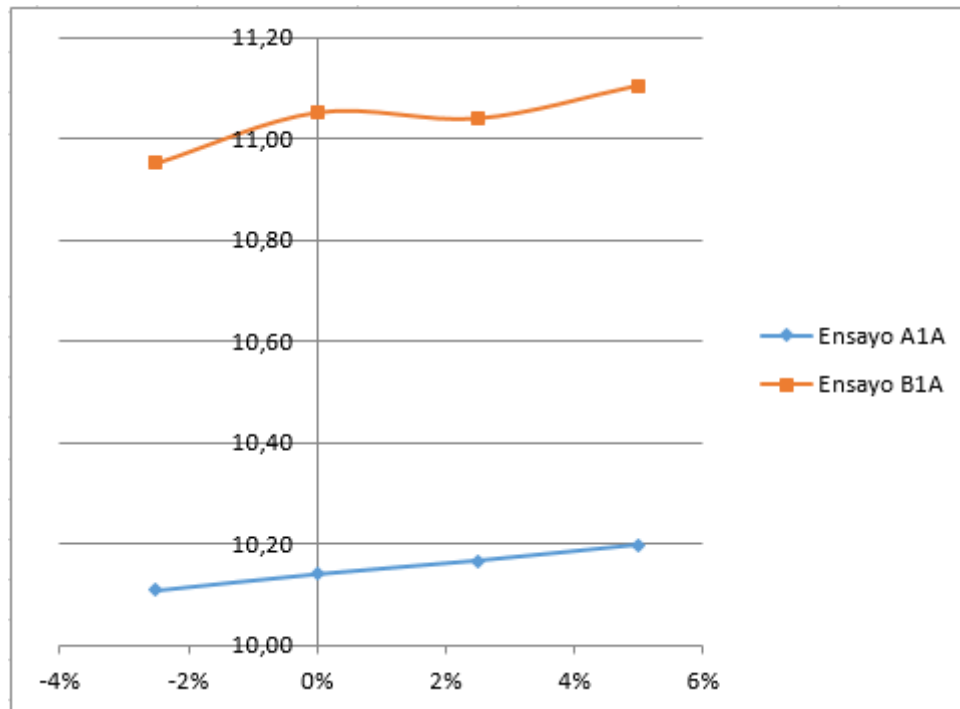


Figura 5.7: Curva de evolución de las impedancias homopolares A1A y B1A cuando se produce un incremento en la distancia entre el arrollamiento de BT y el núcleo.

Impedancia homopolar	A1A	B1A
Sensibilidad (%)	1,20	2,05

Tabla 5.12: Porcentaje de sensibilidad de la influencia de la distancia entre el arrollamiento de BT y el núcleo en la impedancia homopolar A1A y la impedancia homopolar B1A del transformador de potencia.

La tabla 5.10 muestra cómo influye el efecto de aumentar o disminuir la distancia de los arrollamientos en la impedancia homopolar A1A del transformador en estudio. Se puede observar que a medida que aumenta la distancia entre el núcleo y el arrollamiento de BT se produce un incremento en la impedancia homopolar A1A, este incremento es de un 0,3% por cada 2,5% en la variación de la distancia en estudio: si disminuimos un 2,5% la distancia respecto al caso inicial, el valor porcentual de la impedancia homopolar A1A se reduce un 0,3% respecto al caso base; sin embargo aumentamos la distancia un 2,5% respecto al caso inicial, se produce un incremento 0,3% en el valor porcentual de la impedancia homopolar A1A con respecto al caso base; y se produce el mismo incremento (0,3%) en la impedancia homopolar A1A si aumentamos otro 2,5% (esto es, un 5% respecto al caso inicial) la distancia entre el núcleo y el arrollamiento de BT respecto del caso anterior como se puede observar en la tabla 5.10. Por lo tanto se puede afirmar que la distancia entre arrollamientos y el núcleo influye de forma lineal ascendente (figura 5.8), pero con un porcentaje de sensibilidad bastante bajo (1,2%) con respecto al caso base de la impedancia homopolar A1A del transformador de potencia en estudio, como se puede observar en la tabla 5.12.

La distancia entre los arrollamientos y el núcleo tiene un comportamiento menos lineal en la impedancia B1A (tabla 10): al disminuir un 2,5% la distancia entre los arrollamientos y el núcleo, el valor de la impedancia homopolar B1A disminuye un 0.9% respecto al caso base; al aumentar un 2,5% la distancia entre los arrollamientos y el núcleo, el valor porcentual de la impedancia homopolar B1A también disminuye, pero esta vez en un porcentaje inferior (un -0,1% respecto al caso base); y si aumentamos un 5% la distancia entre los arrollamientos y el núcleo, se produce un aumento 0,5% en el valor inicial de la impedancia homopolar B1A del transformador. Por tanto se llega a la conclusión de que la impedancia homopolar B1A tiene una tendencia no-lineal y no monótona con respecto a la distancia entre los arrollamientos y el núcleo (figura 5.3), y su sensibilidad (2.05%) es superior a la de la impedancia A1A (tabla 5.12).

Podemos sacar como conclusión de que las dos impedancias homopolares en ensayo (impedancia homopolar A1A e impedancia homopolar B1A) tienen un comportamiento distinto frente a una variación de la distancia entre los arrollamientos y el núcleo. La razón que cabe argumentar para justificar tal comportamiento es la misma que se esgrimió en el apartado 5.2 (la diferente reluctancia del camino de cierre del flujo en las figuras 5.4 y 5.5 y por consiguiente la menor importancia relativa del camino común a las figuras 5.4 y 5.5 en el caso A1A).

5.5 INFLUENCIA DEL ESPESOR DEL ARROLLAMIENTO DE ALTA TENSIÓN

Los arrollamientos habitualmente se construyen a base de pletinas de cobre. Dado que la sección del hilo de cobre depende de la intensidad que circula por los arrollamientos, el espesor del arrollamiento guarda relación con el número de espiras del mismo, si bien el fabricante puede hacer un arrollamiento más alto y con menor espesor o más bajo y con mayor espesor. La selección de esos factores (espesor del arrollamiento y altura del mismo) tiene influencia en la capacidad para resistir esfuerzos de cortocircuito del transformador y en el valor de la impedancia de cortocircuito ante secuencia directa.

Variar el espesor del arrollamiento de alta tensión no exige variar las coordenadas de la esquina inferior izquierda del mismo como tampoco exige variar las coordenadas del arrollamiento de baja tensión. Pero si es necesario variar las coordenadas del arrollamiento de regulación gruesa con el objetivo de mantener la distancia entre los arrollamientos alta tensión y regulación gruesa.

Se han mantenido constantes las coordenadas y las dimensiones de la cuba y del núcleo del transformador en todos los casos de estudio.

En la tabla 5.13 se muestran las dimensiones de los principales elementos del transformador, y en la tabla 5.14 los resultados obtenidos para los dos ensayos en estudio (influencia del espesor del arrollamiento de alta tensión en la impedancia

homopolar A1A e influencia del espesor del arrollamiento de alta tensión en la impedancia homopolar B1A):

Caso	Variación distancia (%)	Distancia núcleo-BT (m)	Espesor BT (m)	Distancia BT_AT (m)	Espesor AT (m)	Distancia RG cuba (m)
Espesor de AT	5,00%	0,058	0,062	0,047	0,066	0,389
	2,50%	0,058	0,062	0,047	0,064	0,391
	0,00%	0,058	0,062	0,047	0,063	0,393
	-2,50%	0,058	0,062	0,047	0,061	0,394

Tabla 5.13: Principales distancias en el estudio de la influencia del espesor del arrollamiento de alta tensión en el valor de las impedancias homopolares.

Caso	Variación distancia (%)	impednacia homopolar A1A (%)	impednacia homopolar B1A (%)
Espesor de AT	5,00%	10,25	11,12
	2,50%	10,20	11,09
	0,00%	10,14	11,05
	-2,50%	10,08	10,99

Tabla 5.14: Influencia del espesor del arrollamiento de alta tensión en el valor porcentual de la impedancia homopolar A1A.

impednacia homopolar A1A	impedancia homopolar B1A	Variación respecto al caso base A1A	Variación respecto al caso base B1A
10,25	11,12	1,1%	0,6%
10,20	11,09	0,6%	0,3%
10,14	11,05	0,0%	0,0%
10,08	10,99	-0,6%	-0,6%

Tabla 5.15: Porcentaje de variación del valor porcentual de las impedancias homopolares A1A y B1A con respecto al valor del caso base.

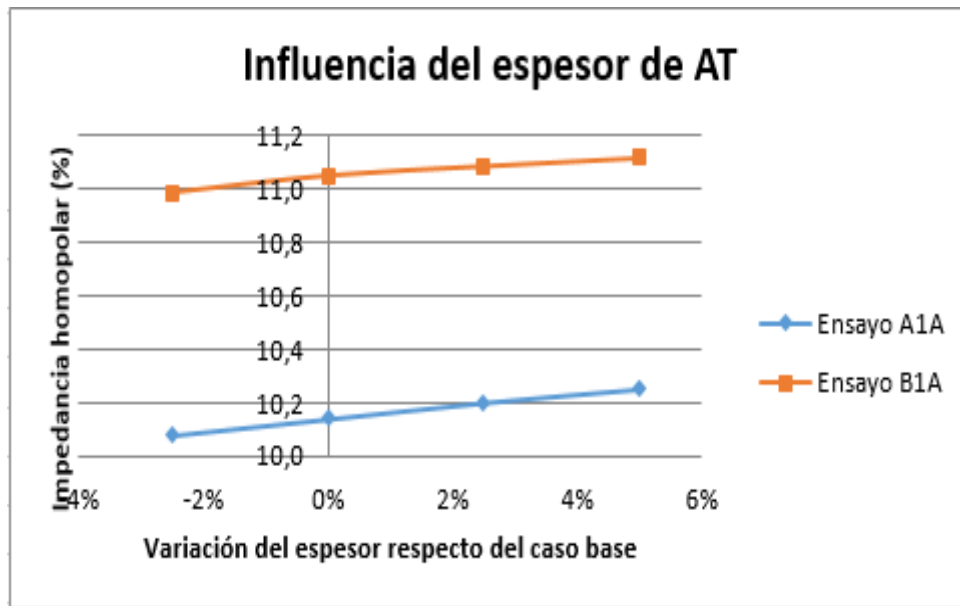


Figura 5.8: Curva de evolución de las impedancia homopolar A1A y de la impedancia homopolar B1A cuando se produce un incremento del espesor del arrollamiento de AT.

Impedancia homopolar	A1A	B1A
Sensibilidad	2,27	1,76

Tabla 5.16: Porcentaje de sensibilidad de la influencia del espesor del arrollamiento de alta tensión en la impedancia homopolar A1A y en la impedancia homopolar B1A.

La impedancia homopolar porcentual A1A aumenta a medida que se incrementa el espesor del arrollamiento de alta tensión (incremento de la distancia entre el diámetro interior y el diámetro exterior del arrollamiento de alta tensión) como se ilustra en la tabla 5.15: al producirse una disminución del 2.5% del espesor del arrollamiento de alta tensión sobre el espesor inicial, se produce una reducción del 0.6% en el valor de la impedancia homopolar A1A con respecto a la impedancia base; por el contrario, si aumentamos un 2.5% el valor del espesor inicial del arrollamiento de alta tensión, se registra un aumento en el valor porcentual de la impedancia homopolar A1A de un 0.6%; y si aumentamos otros 2.5% el valor del espesor anterior (aumento del 5% del espesor inicial), se produce un incremento de la impedancia porcentual homopolar A1A de un 0.5% adicional (aumento de un 1.1% respecto de la impedancia homopolar A1A base). Por tanto la dependencia de la impedancia homopolar con respecto al espesor del arrollamiento de AT es prácticamente lineal (figura 5.8). La sensibilidad de la impedancia homopolar A1A con respecto a la influencia de la altura es bastante baja (2.27%) como se puede observar en la tabla 5.16.

Por lo que se refiere a la impedancia homopolar porcentual B1A (tabla 5.15 y figura 5.9) las conclusiones son semejantes: la relación entre la impedancia homopolar B1A y el espesor del arrollamiento de AT es lineal. Sin embargo la influencia del espesor de AT sobre la impedancia homopolar A1A es el doble de que tiene sobre la impedancia homopolar B1A (tabla 5.15), dicho en otras palabras, la impedancia homopolar B1A

tiene una sensibilidad inferior (1.76%) que la que se registra en la impedancia homopolar A1A (tabla 5.16) respecto al espesor del arrollamiento de AT.

5.6 INFLUENCIA DEL ESPESOR DEL ARROLLAMIENTO DE BAJA TENSIÓN

Para llevar a cabo este estudio se han realizado tres casos adicionales al caso base. Una variación en el espesor del arrollamiento de baja tensión, supone una variación en las coordenadas del arrollamiento de alta tensión con el objetivo de mantener la distancia entre arrollamientos en todo momento. Al variar las coordenadas del arrollamiento de alta tensión deben variar las coordenadas de arrollamiento de regulación gruesa, pues la distancia entre estos arrollamientos se debe mantener siempre pues ambas representan a un solo arrollamiento. Tanto las coordenadas de la cuba y el núcleo como las dimensiones de las mismas se han mantenido constantes en todos los casos de este apartado.

En las tablas 5.17 a se pueden observar las distancias principales utilizadas en los casos estudiados y los resultados obtenidos en el estudio.

Caso	Variación distancia (%)	Distancia núcleo-BT (m)	Espesor BT (m)	Distancia BT_AT (m)	Espesor AT (m)	Distancia RG cuba (m)
Espesor de BT	5,00%	0,058	0,065	0,047	0,127	0,389
	2,50%	0,058	0,063	0,047	0,127	0,391
	0,00%	0,058	0,062	0,047	0,127	0,393
	-2,50%	0,058	0,06	0,047	0,127	0,394

Tabla 5.17: Dimensiones utilizadas en el estudio de la influencia del espesor del arrollamiento de BT en el valor de la impedancias homopolar.

Caso	Variación distancia (%)	impedancia homopolar A1A (%)	impedancia homopolar B1A (%)
Espesor de BT	5,00%	10,29	11,17
	2,50%	10,21	11,11
	0,00%	10,14	11,05
	-2,50%	10,06	10,88

Tabla 5.18: Influencia del espesor del arrollamiento de BT en el valor de las impedancias homopolar.

impedancia homopolar A1A	impedancia homopolar B1A	Variación respecto al caso base A1A	Variación respecto al caso base B1A
10,29	11,17	1,48%	1,09%
10,21	11,11	0,69%	0,54%
10,14	11,05	0,00%	0,00%
10,06	10,88	-0,79%	-1,54%

Tabla 5.19: Porcentaje de variación del valor porcentual de las impedancias homopolares con respecto al valor del caso base.

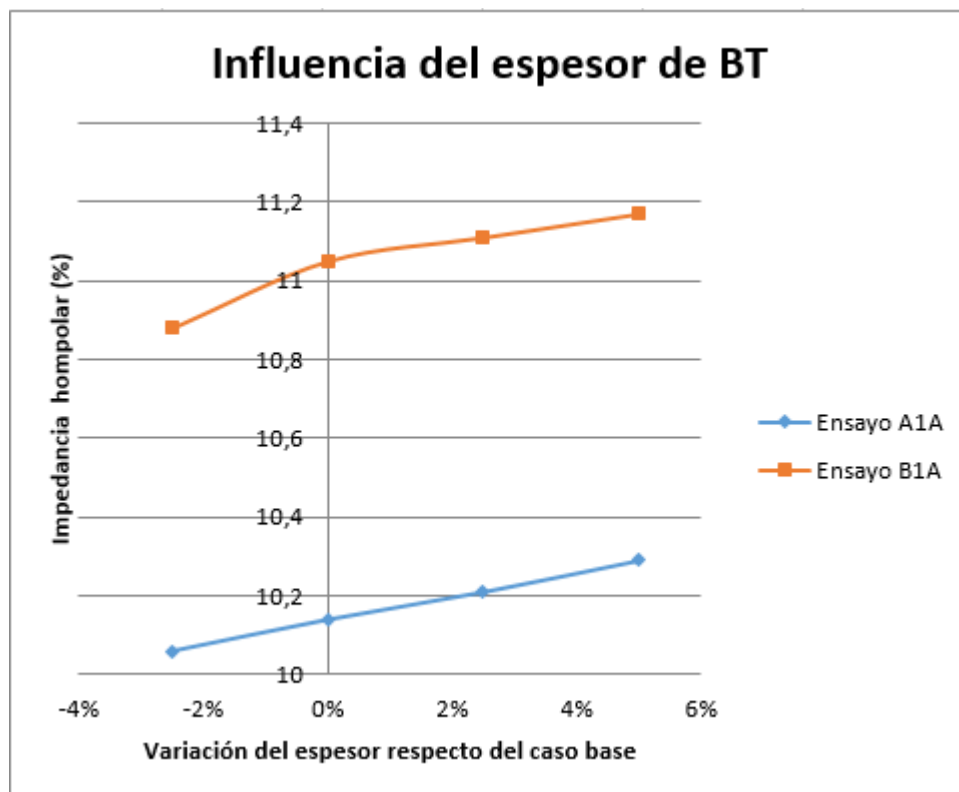


Figura 5.9: Curva de evolución de las impedancia homopolar A1A y de la impedancia homopolar B1A cuando se produce un incremento del espesor del arrollamiento de baja tensión.

Impedancia homopolar	A1A	B1A
Sensibilidad	3,07	3,87

Tabla 5.20: Porcentaje de sensibilidad de la influencia del espesor del arrollamiento de baja tensión en la impedancia homopolar A1A y en la impedancia homopolar B1A.

En la tabla 5.18 y la figura 5.9 se puede observar que la impedancia homopolar A1A varía de forma aproximadamente lineal con el espesor del arrollamiento de BT. La sensibilidad de la impedancia homopolar A1A con respecto al espesor del arrollamiento de BT es de un 3.07%.

Por lo que se refiere a la influencia del espesor del arrollamiento de BT sobre la impedancia homopolar B1A, ésta es claramente no lineal: al producirse una variación en el espesor del -2.5% en el arrollamiento de baja tensión se observa una reducción en el valor de la impedancia base de un -1.54%; sin embargo, cuando se incrementa el valor del espesor en un 2.5% el valor de la impedancia homopolar solo varía un 0.54%. Más lineal parece el segundo tramo de la curva, ya que al producirse un incremento en el valor del espesor del arrollamiento de baja tensión en un 5% (incremento de un 2.5% respecto al caso anterior) se observa una variación en la impedancia B1A de 1.09% (incremento de un 0.55% respecto al caso anterior) como se puede observar en la tabla 5.18. La sensibilidad que presenta esta impedancia homopolar a la influencia del espesor del arrollamiento de baja tensión es de un 3.87 % respecto a la impedancia base (tabla 5.20).

5.7 INFLUENCIA DEL ESPESOR DEL CANAL DE IDA DEL FLUJO MAGNÉTICO

En apartados anteriores hemos analizado la influencia de diferentes distancias en el valor de las impedancias homopolares A1A y B1A y a menudo las figuras que hemos mostrado representan el valor de la impedancia homopolar frente al porcentaje de variación de la distancia en cuestión. Sin embargo, las distancias consideradas en el estudio (por ejemplo la distancia entre el arrollamiento de AT y la cuba, o la distancia entre arrollamientos, o el espesor de uno cualquiera de los arrollamientos) son muy diferentes, con lo que un 2,5% de variación de la distancia representa 11 mm si estamos hablando de la distancia entre AT y la cuba y tan sólo representa 2mm si estamos hablando del espesor de At, por poner dos casos extremos.

La expresión (2.23) que proporciona la impedancia de cortocircuito porcentual en secuencia directa relaciona dicha impedancia con una distancia que es una suma ponderada de la distancia entre arrollamientos, el espesor del arrollamiento de AT y el espesor del arrollamiento de BT (estas dos últimas con un coeficiente de ponderación 1/3). Como se indicó no existe una expresión análoga a la (2.23) que proporcione el valor de la impedancia homopolar del transformador, pero cabe preguntarse si la distancia ponderada mencionada es más importante que el valor de cada uno de los sumandos. Por eso en las figuras 5.10 y 5.11 se representan las impedancias homopolares A1A y B1A en función de la distancia ponderada anteriormente citada. En dichas figuras la distancia ponderada es

$$\text{Distancia ponderada} = \delta + \frac{a_1 + a_2}{3} \quad (5.5)$$

Donde δ es la distancia entre arrollamientos y a_1 y a_2 los espesores de los arrollamientos de AT y BT respectivamente.

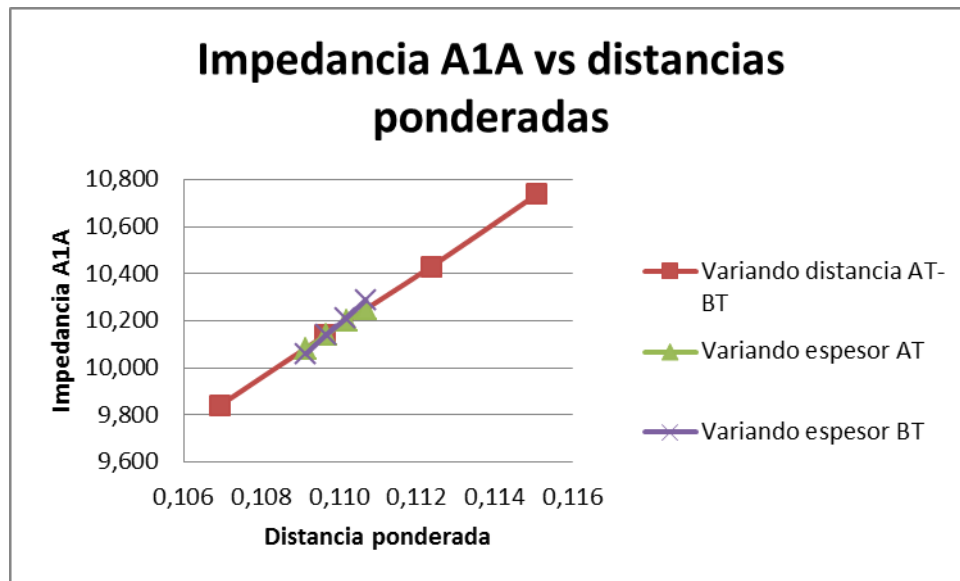


Figura 5.10: Evolución de las impedancia homopolar A1A en función de la distancia ponderada.

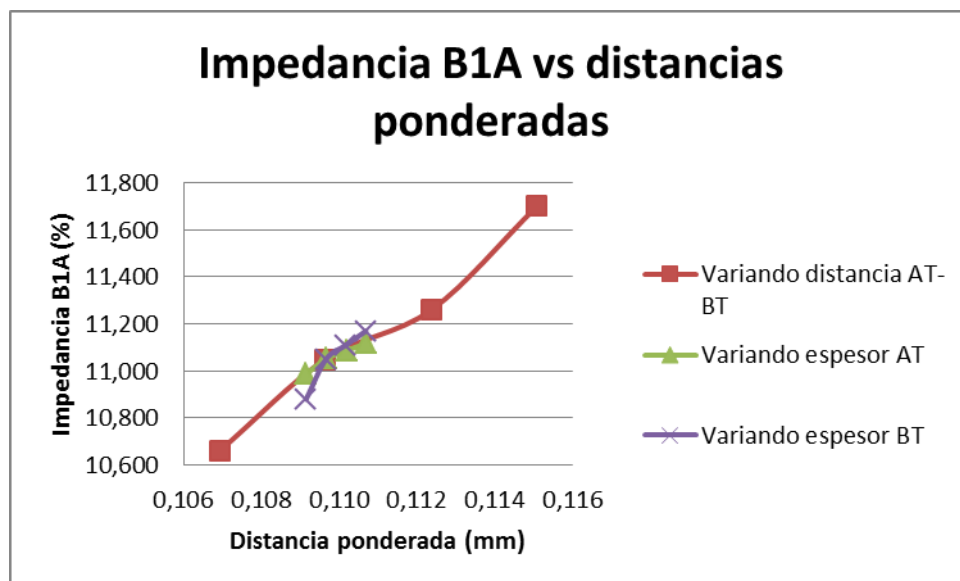


Figura 5.11: Evolución de las impedancia homopolar B1A en función de la distancia ponderada.

Como se desprende de la figura 5.10 la impedancia homopolar A1A presenta una relación lineal con la distancia ponderada, y la relación lineal es prácticamente idéntica sea cual sea la distancia individual que varíe.

Por el contrario la figura 5.11 muestra que la evolución de la impedancia B1A con la distancia ponderada no es lineal y no lo es independientemente de cuál de las distancias individuales varíe. La relación no lineal pareciera ser la misma tanto si varía la distancia AT-BT como si varía el espesor de AT, mientras que la relación no lineal pareciera ser diferente en el caso de que la distancia individual que varíe fuera el espesor del

arrollamiento de BT. Obtener conclusiones más precisas requeriría un mayor número de simulaciones, que no se han podido realizar por cuestiones de tiempo.

Se ha intentado encontrar una causa que justifique la linealidad de la curva 5.10 y la no linealidad de la curva 5.11, pero no se ha encontrado ninguna suficientemente satisfactoria. En este sentido debe tenerse en cuenta la complejidad del problema en estudio.

5.8 ENERGIA ALMACENADA EN LA CUBA

La impedancia homopolar de un transformador se puede obtener por cálculo de varias maneras diferentes. En este Trabajo Fin de Grado se ha obtenido a partir de la tensión aplicada al arrollamiento energizado para conseguir que circule la intensidad deseada, sin embargo cabe obtenerlo a partir de la energía magnética almacenada como se ha hecho en el caso de la impedancia de secuencia directa.

Sorprende la poca influencia que algunas de las dimensiones del transformador (distancia entre el núcleo y el arrollamiento de BT o la distancia entre el arrollamiento de AT y la cuba). Para comprender el porqué de esta reducida influencia se va a analizar la distribución de la energía magnética almacenada.

En este apartado se analiza no solo la energía magnética almacenada en general en la cuba, sino, la energía magnética almacenada en cada una de los recintos en los que se divide la cuba cuando se realiza el estudio de la impedancia homopolar del transformador.

Para poder realizar este ensayo se parte de una serie de recintos iniciales (recintos que representan a cada uno de los elementos de que consta la cuba del transformador de potencia), estos recintos son conocidos como rectángulos, por eso se va a utilizar la simbología R_n (donde R se refiere a rectángulo y n al número de rectángulo que se trate) para distinguir los distintos recintos o rectángulos.

En la siguiente tabla se puede observar cada uno de los recintos que dividen a la cuba justo antes de realizar el ensayo:

Rectángulos iniciales					
Rectángulo	Significado	rbase	zbase	espesor	altura
R1	BT	0,353	0,710	0,062	1,657
R2	AT	0,461	0,715	0,063	1,647
R3	Regulación gruesa	0,576	0,805	0,012	1,467
R4	Cuba exterior	0,000	0,000	0,990	3,300
R5	Cuba interior	0,000	0,015	0,980	3,280
R6	Núcleo	0,000	0,025	0,295	3,097
R7	Terciario	0,317	0,706	0,016	1,665

Tabla 5.21: Dimensiones de los recintos iniciales de la cuba antes de realizar el ensayo.

La tabla 5.21 se representa en la siguiente figura:

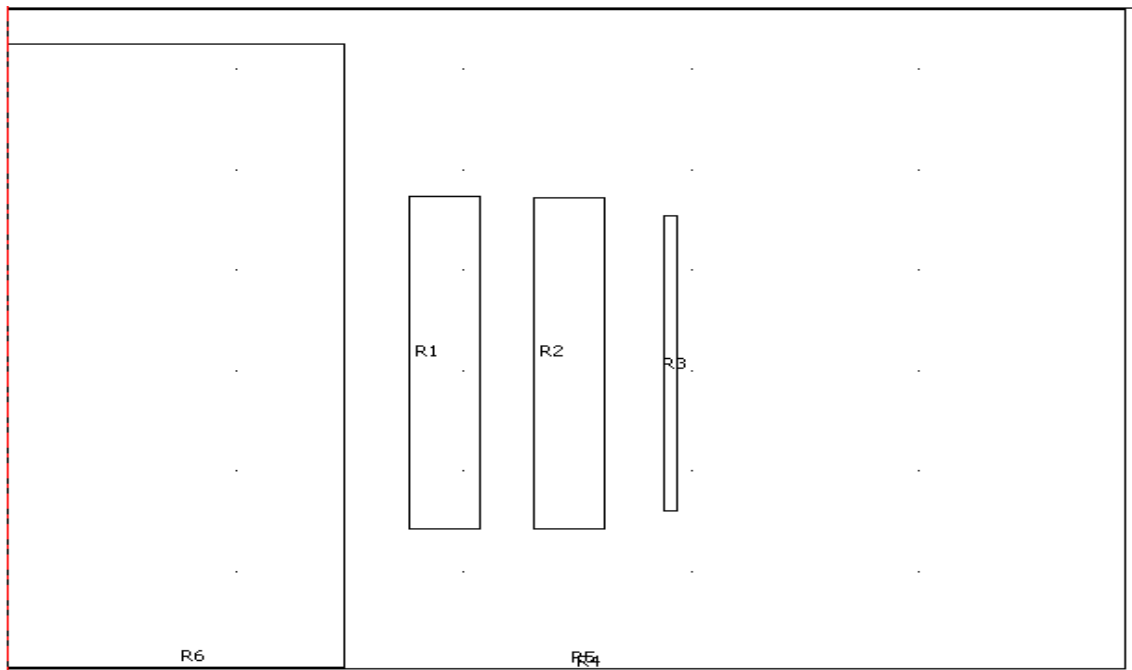


Figura 5.12: Imagen de los recintos de la cuba antes de realizar el ensayo.

Antes de analizar la influencia que tiene cada uno de los recintos de la cuba, es decir comparar analizar en qué lugar concreto de la cuba se registran los mayores y los menores valores de la energía, hemos de asegurarnos de que se mantiene constante el valor de la energía y por consiguiente el valor del flujo magnético total de la cuba, y para eso tenemos que estudiar el valor de la energía y de la cuba antes de determinar el valor de la energía en cada uno de los recintos de la cuba. La siguiente imagen ilustra cómo se reparte el flujo magnético en cada una de las partes iniciales de la cuba:

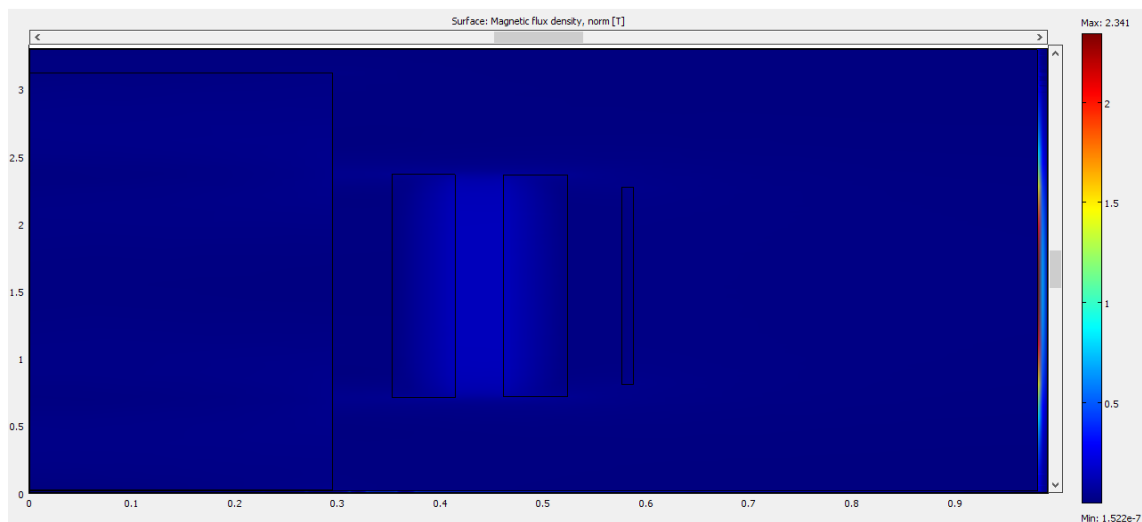


Figura 5.13: Imagen del reparto del flujo magnético en cada una de las partes de la cuba antes de analizar la influencia de los recintos según la energía que almacenan cada uno de ellos en el ensayo A1A.

Tras analizar el valor del flujo inicial en la cuba antes de realizar el estudio, se procede a dividir la cuba en tantos recintos como sea posible, partiendo de la idea de que todo lo que rodea o no forme parte de los rectángulos iniciales se considera recinto.

En la siguiente tabla, se muestra cada uno de los nuevos recintos obtenidos:

Nuevos rectángulos					
Rectángulo	Significado	rbase	zbase	espesor	altura
R8	Espacio BT-Núcleo	0,295	0,015	0,058	3,280
R9	Espacio AT-BT	0,414	0,015	0,047	3,280
R10	Espacio RG-Cuba	0,588	0,015	0,393	3,280
R11	Espacio AT-RG	0,524	0,015	0,052	3,280

Tabla 5.22: Dimensiones de los nuevos rectángulos obtenidos tras la división de la forma inicial de la cuba.

La tabla 5.22 muestra un total de tres rectángulos adicionales, por lo tanto, el estudio de la aportación de la energía en cada una de las partes de la cuba se realizará en un total de 11 recintos. Pero estos recintos se subdividirán a su vez en subdominios como veremos más adelante.

La siguiente imagen muestra la forma final de la cuba del transformador tras la división realizada:

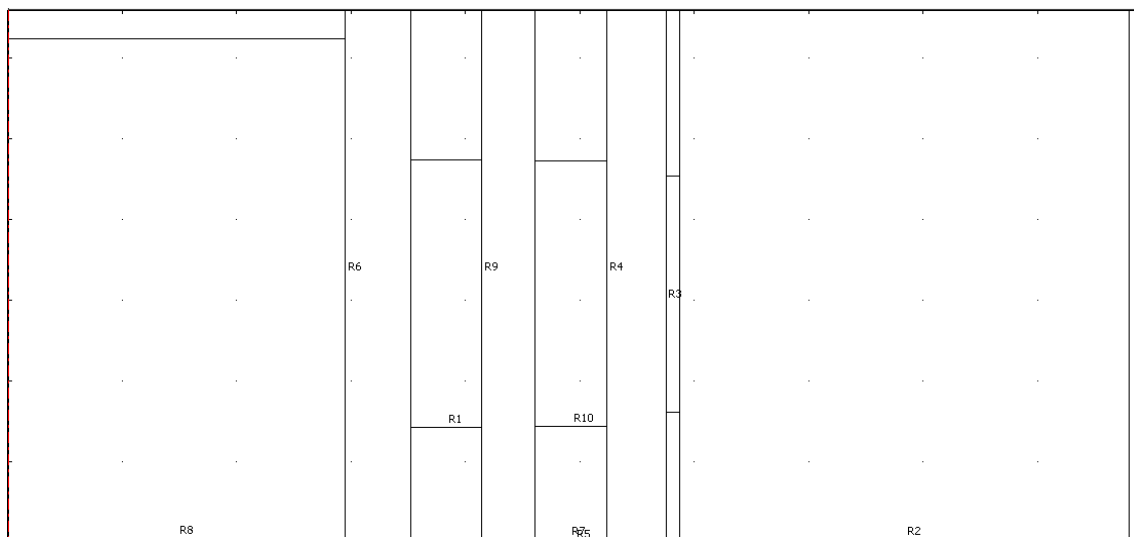


Figura 5.14: Forma de la cuba tras realizar las divisiones necesarias para realizar estudio de la energía en cada uno de los ensayos correspondientes (Impedancia homopolar A1A e Impedancia homopolar B1A).

Una vez obtenido la figura 5.14, se procede con el estudio correspondiente, pero primero ha de asegurarse que la formación de nuevos recintos no afecta al valor del flujo magnético total de la cuba y por consiguiente tampoco afecta al valor de la energía total de la cuba del transformador de potencia. La siguiente figura muestra cómo se reparte el flujo magnético en la cuba del transformador:

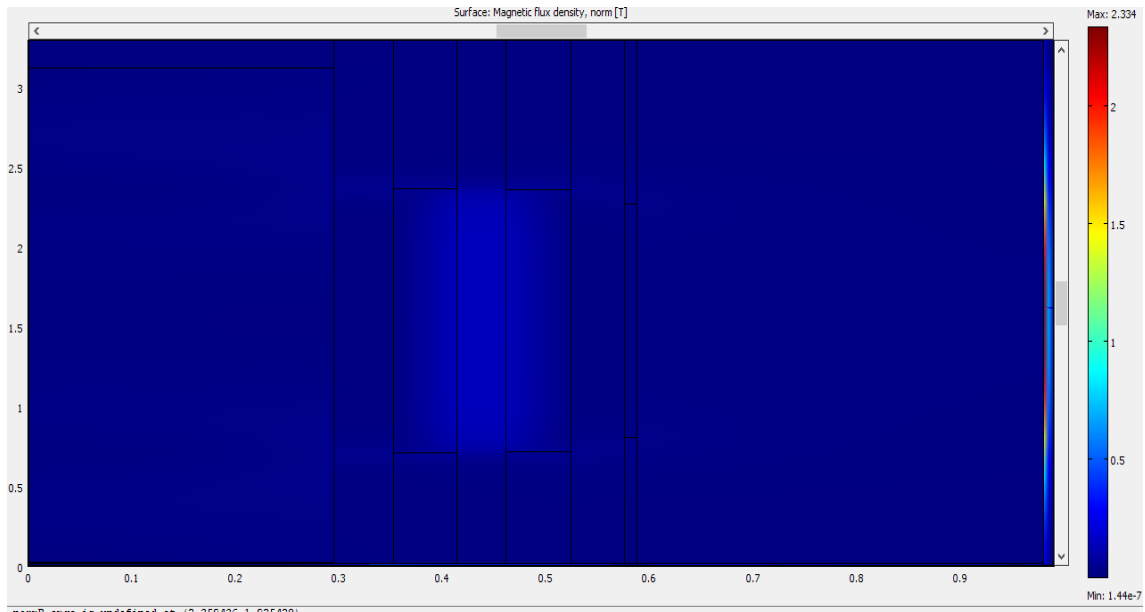


Figura 5.15: Distribución del flujo magnético en la cuba tras la formación de nuevos recintos.

Al comparar la figura 5.13 con la figura 5.15 se observa que en ambos casos el valor máximo y mínimo de flujo magnético que alcanza la cuba es el mismo. Sin embargo este dato no resulta suficiente para poder afirmar que se cumple lo esperado (la adición de nuevos recintos a la cuba no afecta al valor de su flujo total así como al valor de su energía, pues se trata de un problema físico, por tanto mientras se mantengan las mismas propiedades y se realicen los mismos cálculos se obtendrán los mismos resultados). Por este motivo se va a comparar el valor de la energía en toda la cuba. En ambos casos, el valor de la energía es el mismo (para el ensayo de la impedancia homopolar A1A se ha obtenido un valor total de la energía de $1.6\text{E}3\text{ J}$, mientras que, para el ensayo de la impedancia homopolar B1A se ha obtenido un valor de la energía de $1.74\text{E}3\text{ J}$).

En vista de que se cumple la condición impuesta para realizar con éxito el estudio, se procede con el mismo. Se ha obtenido el valor total de la energía en ambos casos, pero este estudio se basa en un solo caso, por eso vamos a estudiar solamente el valor de la energía en cada uno de los recintos y su influencia en los demás en el valor de la impedancia homopolar para poder demostrar o en su defecto hacer constar de que los resultados de los distintos ensayos hechos durante la realización del presente trabajo de fin de grado, tienen su base en un hecho sólido y o lógico.

Como hemos contado anteriormente, los recintos o rectángulos en los que se divide la cuba, se subdividen a su vez en subdominios. Estos subdominios representan cada una de las partes en la que se almacena la energía en el transformador (incluye no únicamente los recintos de los que consta la cuba, sino que también el espacio que separa los recintos de los que consta la cuba, con lo cual permite obtener resultados más precisos).

La siguiente tabla muestra la cantidad de dominios de que consta la cuba del transformador y sus correspondientes dimensiones:

Subdominio	Significado
1	cuba exterior
2	nucleo-cuba Inferior
3	nucleo
4	nucleo-cuba Inferior
5	BT-nucleo
6	BT-cuba Inferior
7	BT
8	BT-cuba Superior
9	AT-BT
10	AT-cuba Inferior
11	AT
12	AT-cuba Superior
13	RG-AT
14	RG-cuba Inferior
15	RG
16	RG-cuba Superior
17	RG-cuba Interior

Tabla 5.23: Número y significado de cada uno de los subdominios de que consta la cuba del transformador de potencia.

La energía almacenada en la cuba del transformador de potencia del presente trabajo de fin de grado se halla repartida en un total de 17 subdominios, sin embargo este reparto no es proporcional, pues la energía magnética se encuentra en una mayor proporción en unos determinados subdominios y en otros subdominios la energía magnética resulta prácticamente despreciable.

En las tablas que se ilustra a continuación, se puede observar cómo se reparte la energía en los distintitos subdominios de la cuba bien para el ensayo de la impedancia homopolar A1A como para el ensayo de la impedancia homopolar B1A.

Subdominio	Significado	Energía B1A (J)	Energía B1A (%)
1	cuba exterior	1,96E+00	0,1%
2	nucleo-cuba Inferior	7,91E-02	0,0%
3	nucleo	4,09E-01	0,0%
4	nucleo-cuba Inferior	1,98E-01	0,0%
5	BT-nucleo	2,53E+01	1,5%
6	BT-cuba Inferior	8,55E+00	0,5%
7	BT	3,39E+02	19,5%
8	BT-cuba Superior	8,57E+00	0,5%
9	AT-BT	8,58E+02	49,3%
10	AT-cuba Inferior	5,72E+00	0,3%
11	AT	4,53E+02	26,0%
12	AT-cuba Superior	5,75E+00	0,3%
13	RG-AT	1,89E+01	1,1%
14	RG-cuba Inferior	4,59E-01	0,0%
15	RG	1,11E+00	0,1%
16	RG-cuba Superior	4,65E-01	0,0%
17	RG-cuba Interior	1,26E+01	0,7%
	Total	1,74E+03	100,0%

Tabla 5.24: Energía magnética almacenada en los distintos subdominios del transformador según el ensayo de la impedancia homopolar B1A.

Según la tabla 5.24 el subdominio formado por el espacio entre el recinto del núcleo y la cuba inferior es el que menos energía almacena con un total de 7.91E-02 con un porcentaje de prácticamente un 0.0% sobre el total de la energía almacenada en la cuba. Tanto el recinto formado por el arrollamiento de AT como el arrollamiento de BT almacenan una energía magnética considerable (el arrollamiento de AT almacena 3.39E+02 J de energía magnética, lo que representa el 19.5% del total de la energía almacenada en la cuba; por su parte, el arrollamiento AT almacena 4.53E+02 J de energía magnética, lo que representa un 26% del total de la energía magnética almacenada en la cuba), de hecho son los recintos que más energía magnética almacenan, sin embargo no representan el subdominio con más energía magnética. El subdominio que forman el espacio entre el recinto formador por el arrollamiento de AT y el arrollamiento de BT es el lugar de la cuba donde más energía magnética se almacena, pues en él se registra un total de 8.58E+02 J de energía magnética, lo que supone un total del 49.3% de la energía total de la cuba del transformador de potencia.

Subdominio	Significado	Energía A1A (J)	Energía A1A (%)
1	cuba exterior	4,23E+01	2,6%
2	nucleo-cuba Inferior	6,02E-02	0,0%
3	nucleo	9,22E-03	0,0%
4	nucleo-cuba Inferior	1,78E-01	0,0%
5	BT-nucleo	6,99E+00	0,4%
6	BT-cuba Inferior	3,65E+00	0,2%
7	BT	2,90E+02	18,1%
8	BT-cuba Superior	3,75E+00	0,2%
9	AT-BT	7,42E+02	46,4%
10	AT-cuba Inferior	5,90E+00	0,4%
11	AT	3,73E+02	23,3%
12	AT-cuba Superior	5,87E+00	0,4%
13	RG-AT	1,54E+01	1,0%
14	RG-cuba Inferior	9,27E-01	0,1%
15	RG	1,56E+00	0,1%
16	RG-cuba Superior	9,13E-01	0,1%
17	RG-cuba Interior	1,07E+02	6,7%
	Total	1,60E+03	100,0%

Tabla 5.26: Energía magnética almacenada en los distintos subdominios del transformador según el ensayo de la impedancia homopolar A1A.

A diferencia del ensayo con impedancia homopolar B1A, como se ilustra la tabla 5.27, el estudio de la energía magnética almacenada en los distintos subdominios de la cuba, muestra que el núcleo de la cuba es el recinto donde menos se almacena energía magnética, sin embargo, los dos recintos donde más se almacena energía son los mismos que en el ensayo A1A (el recinto formado por el arrollamiento de AT con un 23.3% del total de la energía y el recinto formado por el arrollamiento de BT con un 18.1% del total de la energía magnética almacenada). El subdominio que más almacena energía es el de formado por el espacio entre el arrollamiento AT y el arrollamiento BT con un total 46.4% de la energía.

En ambos ensayos la energía magnética se halla concentrada en solo tres recintos (el arrollamiento AT, el arrollamiento BT y el espacio formado por ambos arrollamientos), por tanto los cambios en cualquiera de estos recintos tienen una influencia superior en la impedancia homopolar del transformador tanto para el ensayo con la impedancia homopolar A1A, como el ensayo con la impedancia homopolar B1A.

La impedancia homopolar depende de la tensión que se alcanza durante el ensayo y esa a su vez depende del flujo magnético del arrollamiento y como ya se comentó en el capítulo 4 (figura 4.21), el flujo magnético depende de la energía magnética, de tal forma que a mayor energía magnética mayor flujo magnético, a mayor flujo magnético mayor tensión de ensayo, a mayor tensión de ensayo mayor impedancia homopolar. Por este motivo cualquier variación que se realiza en una zona con un porcentaje despreciable de energía magnética sobre el total de la energía, tiene un efecto sobre la impedancia

homopolar despreciable o en su defecto nulo, tal es el caso del apartado 5.3, donde se estudia la influencia que tiene sobre la impedancia homopolar una variación de la distancia entre el arrollamiento de AT y la cuba: la ejecución de este ensayo, como ya se ha contado, se realiza aumentando el tamaño de la cuba, pero en las paredes de la cuba la energía magnética almacenada es despreciable, por lo tanto no produce efecto alguno en el valor de la energía del transformador y por consiguiente, tampoco produce efecto en el valor del flujo magnético de la cuba, lo que se traduce en una impedancia homopolar constante frente al cambio de la distancia entre el arrollamiento de alta tensión y la cuba. Sin embargo, al realizar una variación en la distancia del recinto o subdominio donde más energía magnética se almacena, se obtiene el mayor porcentaje de variación de la impedancia homopolar, tal es el caso del apartado 5.2, donde se estudia la influencia que tiene la variación de la distancia entre los dos arrollamientos principales (arrollamiento de AT y arrollamiento de BT) sobre el valor de la impedancia homopolar: al alejar el arrollamiento AT del arrollamiento de BT, se amplía el valor de la energía magnética concentrada en el recinto que separa ambos arrollamientos, por consiguiente aumenta el porcentaje de energía magnética concentrada sobre el total de la energía magnética, lo que se traduce en un incremento del valor porcentual de la impedancia homopolar del transformador, pero este porcentaje de incremento es inferior al producido al disminuir la superficie del recinto que separa ambos arrollamientos (tabla 5.9), pues el valor de la energía magnética es superior cuanto más nos acerquemos al centro del recinto formado por la distancia entre el arrollamiento de AT y el arrollamiento de BT (figura 5.13 y figura 5.15). Las tablas 5.26 y 5.27 muestran que tanto el arrollamiento de alta tensión como el arrollamiento de baja tensión concentran entre las 2 más del 42% del total de la energía magnética, lo que significa que después del recinto formado por la distancia que separa ambos arrollamientos, el recinto formado por el espesor de los mismos tiene la segunda y la tercera mayor influencia en la impedancia homopolar, esto se demuestra en los apartados 5.5 y 5.6, pues si comparamos el efecto de la influencia de los espesores de los arrollamientos de AT y BT con la influencia que tiene el resto de recintos en la impedancia homopolar, vemos que solo es superado por el efecto causado en la variación de la distancia de ambos arrollamientos (almacena casi la mitad de la energía magnética de la cuba).

CAPÍTULO 6:

RESUMEN, CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1 RESUMEN DEL TRABAJO REALIZADO

En el presente trabajo de fin de grado, se ha estudiado cómo influyen en el valor de las impedancias homopolares las principales dimensiones del transformador:

- La altura de los arrollamientos
- La distancia entre los arrollamientos principales
- La distancia entre el arrollamiento de alta tensión y la cuba
- El espesor de los arrollamientos de alta y baja tensión.
- La distancia entre el arrollamiento de BT y la cuba

Antes de comenzar este estudio, y como parte de la formación previa a afrontar el problema a estudiar, se ha obtenido el valor de la impedancia de secuencia directa mediante simulación por Elementos Finitos de los ensayos de cortocircuito en el transformador. Se han tomado los arrollamientos en parejas de dos (arrollamiento de alta tensión-arrollamiento de baja tensión, arrollamiento alta tensión-arrollamiento terciario y arrollamiento de baja tensión-arrollamiento terciario) energizando el primer arrollamiento y cortocircuitando el segundo, pero en ambos casos, manteniendo el tercer arrollamiento en circuito abierto. En este estudio se han obtenido resultados bastante satisfactorios, pues el máximo error cometido ha sido de un 4.8% correspondiente al ensayo de cortocircuito BT-TER (arrollamiento de baja tensión energizado, arrollamiento terciario cortocircuitado y arrollamiento de alta tensión en circuito abierto).

Tras haber obtenido resultados satisfactorios en el cálculo de la impedancia de secuencia directa, se ha continuado el estudio realizando el cálculo de la impedancia homopolar a través de Comsol y Matlab (software utilizado en este trabajo). El diseño del transformador se ha llevado a cabo mediante Comsol Multiphysics, pero para la obtención del código necesario para el cálculo del valor de la impedancia homopolar se ha utilizado Matlab.

El programa desarrollado en Matlab para el cálculo de impedancias homopolares utiliza el código proporcionado por Comsol junto con el algoritmo de Newton Raphson para obtener el valor de la corriente en el arrollamiento no unido a la fuente (el arrollamiento cortocircuitado). Para obtener el valor de la impedancia homopolar es necesario conocer el valor de la tensión que se debe aplicar al arrollamiento energizado para hacer circular la intensidad deseada. El cálculo de dicha tensión se realiza a partir de los enlaces totales de flujo que concatenan el arrollamiento energizado. El flujo en cada

espira se obtiene integrando la inducción proporcionada por Comsol. Esta integración se realiza mediante Matlab.

El valor de la impedancia homopolar obtenida se ha comparado con los valores obtenidos mediante ensayos de fábrica y una vez más el resultado ha sido satisfactorio, con un error máximo del 5.5% correspondiente al cálculo de la impedancia homopolar A_{1A} , error suficientemente reducido como para proseguir con la fase final del presente trabajo de fin de grado: el análisis de los factores que influyen en la impedancia homopolar del transformador.

En la fase final de este trabajo, se ha tomado como base de comparación los resultados obtenidos en la fase anterior (las impedancias homopolares del transformador). Esta es la fase principal de este trabajo y consiste en analizar cómo varía la impedancia homopolar del transformador cuando se varía alguna de las dimensiones del transformador de potencia. En todos estos estudios, mediante razonamientos físicos se puede tener una idea previa de cómo debe variar la influencia homopolar.

Desde los primeros estudios se vio que la variación de algunas de las dimensiones apenas tenía relevancia en el valor de la impedancia homopolar y se descartaron algunos de los estudios previstos, como es el caso del análisis de la influencia de la distancia entre arrollamientos y culatas en el valor de la impedancia homopolar del transformador. Este análisis ha sido descartado tras analizar influencia de la distancia del arrollamiento de alta tensión y la cuba y observar que ésta apenas influye en el valor de la impedancia homopolar.

En primer lugar, se ha comenzado analizando la influencia que tiene sobre la impedancia homopolar del transformador de potencia el aumentar o disminuir la altura de los arrollamientos principales. Dado que la reluctancia que se presenta al paso del flujo homopolar aumenta al aumentar la altura se espera que el valor de la impedancia homopolar disminuya al producirse un aumento en el valor de la altura de los arrollamientos.

Seguidamente se ha analizado cómo influye sobre el valor de la impedancia homopolar el variar la distancia que separa el arrollamiento de alta tensión con el arrollamiento de baja tensión. Como se sabe las líneas de flujo son cerradas, con lo que presentan un camino de ida y un camino de retorno. La distancia entre arrollamientos determina la sección de paso del camino de ida de las líneas de flujo homopolar. Como la reluctancia que se presenta al paso del flujo es inversamente proporcional a la superficie de paso, a mayor superficie de paso menor es la reluctancia y a menor reluctancia, mayor es la impedancia homopolar del transformador.

Una vez acabado el análisis de la influencia de la distancia entre el arrollamiento de alta tensión y el arrollamiento de baja tensión en la impedancia homopolar del transformador de potencia, se procedió a analizar cómo influye en dicha impedancia el aumentar o disminuir la distancia de los arrollamientos a la cuba. Los caminos de retorno del flujo homopolar se cierran por la cuba y por el espacio de aire existente entre arrollamientos y cuba. La distancia entre los arrollamientos y cuba influye en la sección

de las segundas líneas de flujo mencionadas. No obstante, son mayoría las líneas que se cierran por el hierro de la cuba, por lo que se espera que la distancia entre arrollamientos y cuba no tenga demasiada influencia.

El cuarto análisis realizado ha sido el correspondiente al estudio de la influencia de la distancia entre el núcleo y el arrollamiento de AT sobre el valor de la impedancia homopolar del transformador de potencia. Respecto a los resultados esperados de este estudio se puede decir algo muy parecido a lo dicho para la distancia entre arrollamientos y cuba: el camino de retorno de las líneas de flujo se realiza en parte por el núcleo magnético y en parte por el espacio existente entre el núcleo y el arrollamiento de BT. Evidentemente a mayor sección de paso menor reluctancia y mayor reactancia homopolar, pero dado que la reluctancia del núcleo tiene un valor muy reducido, se espera que la mayoría de las líneas retornen por el núcleo y por tanto la influencia de esta distancia es reducida.

En último lugar se ha analizado la influencia que tienen sobre la impedancia homopolar tanto el espesor del arrollamiento de AT como el espesor del arrollamiento de BT. Cuanto mayor es el espesor de los arrollamientos, mayor es la superficie de paso del camino de ida de las líneas de flujo. Como la inductancia de los arrollamientos depende inversamente de la reluctancia que se ofrece al paso de las líneas de flujo y el valor de la reluctancia es inversamente proporcional a la superficie de paso, se espera que la impedancia homopolar del transformador aumente al aumentar el espesor de los arrollamientos.

Se comprobó también que la impedancia homopolar presenta una dependencia con el espesor ponderado entre arrollamientos ($a_1/3 + \delta + a_2/3$), donde δ es la distancia entre arrollamientos y a_1 y a_2 el espesor de los mismos.

Sorprendidos por la poca influencia que tienen algunas de las distancias analizadas en el valor de la impedancia homopolar, se obtuvo el valor de la energía magnética almacenada en los diferentes recintos que componen el transformador, ya que existe un método alternativo al empleado en este Trabajo Fin de Grado que consiste en hallar la impedancia homopolar a partir de la energía magnética almacenada (semejante al que se empleó en las tareas preparatorias del trabajo para hallar la impedancia de secuencia directa del transformador).

6.2 CONCLUSIONES

En lo básico los resultados obtenidos concuerdan con el análisis previo que cabe realizar razonando sobre el proceso físico que determinan el valor del flujo homopolar, esto es

- La impedancia homopolar disminuye al aumentar la altura de los arrollamientos
- La impedancia homopolar aumenta al aumentar la separación entre los arrollamientos y la cuba

- La impedancia homopolar aumenta al aumentar la distancia entre los arrollamientos y el núcleo magnético
- La impedancia homopolar aumenta al aumentar la separación entre arrollamientos
- La impedancia homopolar aumenta al aumentar el espesor de cualquiera de los arrollamientos

Una de las distancias (la distancia entre arrollamientos y núcleo) tiene una influencia casi despreciable en la impedancia homopolar, dos de ellas (el espesor de los dos arrollamientos) tiene una influencia pequeña (sensibilidades inferiores al 5%), una de ellas (distancia entre arrollamientos) tiene una influencia media (ligeramente superior al 5%) y la última (la altura de los arrollamientos) tiene una influencia bastante elevada (ligeramente superior al 10%)

	A1A	B1B
Altura arrollamientos	-12,40%	-13,70%
Distancia a la CUBA	0,30%	0%
Distancia a NÚCLEO	1,20%	2,05%
Distancia entre arrollamientos	5,28%	6,50%
Espesor AT	2,27%	1,76%
Espesor BT	3,07%	3,87%

Tabla 6.1: Sensibilidad de las impedancias homopolares a las variaciones de las dimensiones.

La distribución de la energía magnética tiene mucho que ver en los resultados obtenidos. En el ensayo B1A 95% de la energía almacenada en la cuba se halla en los recintos formados por el arrollamiento de AT, el arrollamiento de BT y la superficie que separa estos arrollamientos, mientras que en ensayo A1A esta energía representa el 87,7% del total, por tanto las variaciones de las dimensiones de los recintos en los que queda almacenada tan sólo un 5% de la energía magnética apenas influyen el valor de la impedancia homopolar.

Por esa razón se observa una influencia superior en la impedancia homopolar (impedancia homopolar A1A e impedancia homopolar B1A) de la distancia que separa el arrollamiento de baja tensión y el arrollamiento de alta tensión y de la altura de los arrollamientos.

En general la impedancia A1A es menos sensible a variaciones de las distancias estudiadas que la impedancia B1A (con la excepción de la sensibilidad frente al espesor del propio arrollamiento, que es mayor). Aunque hemos reflexionado sobre las causas de que esto sea así, en la actualidad no disponemos de una explicación plausible a esto. La clave de esta reflexión es la reluctancia que presenta el camino de vuelta de las trayectorias del flujo homopolar (figuras 5.5 y 5.6).

El comportamiento de las dos impedancias homopolares analizadas (impedancia homopolar A1A e impedancia homopolar B1A) frente a variaciones de las dimensiones principales del transformador es relativamente semejante aunque presenta algunas diferencias importantes.

La impedancia homopolar A1A presenta una variación prácticamente lineal frente a cambios en cualquiera de las dimensiones mencionadas si bien en algunos casos la pendiente de la línea es mayor que en otra (mayor sensibilidad). Por ejemplo, la sensibilidad de la impedancia homopolar frente a variaciones de la distancia a la cuba es prácticamente nula.

La impedancia homopolar B1A, por su parte, tiene un comportamiento bastante menos lineal con la variación de las diferentes distancias analizadas. No es sencillo justificar la causa de esta no linealidad.

Lo que sí resulta más lógico es que la distancia entre la cuba y los arrollamientos principales no ejerza ninguna influencia en la impedancia B1A, pues en este caso el arrollamiento de AT apantalla la cuba, por lo que su influencia es nula. Este hecho queda corroborado cuando se observa que la energía magnética almacenada en los recintos exteriores al arrollamiento supone menor del 1% de la energía magnética total almacenada en el interior del transformador.

Otra conclusión importante es la correlación clara que existe entre la distancia $(a_1/3 + \delta + a_2/3)$ y la impedancia homopolar.

6.3 TRABAJOS FUTUROS.

En el presente Trabajo de Fin de Grado se han analizado de forma detallada, los factores que influyen en la impedancia homopolar del transformador, para ello, se han realizado dos tipos de ensayos: impedancia homopolar A1A e impedancia homopolar B1A. Sin embargo existen 8 posibles ensayos a realizar para obtener el circuito equivalente ante secuencia homopolar. Por tanto, uno de los posibles trabajos futuros sería el análisis de los factores que influyen en la impedancia homopolar en cada uno de los demás ensayos restantes (6 en total). Entre ellos, los casos más difíciles corresponden al de los ensayos de impedancia homopolar cuando tres arrollamientos llevan corriente (ensayos A1C y B1C, esto es, con el terciario cerrado).

También sería interesante incluir en el estudio el análisis de la influencia del espesor de la cuba y del diámetro del núcleo magnético.

En este trabajo fin de grado, para la obtención de la impedancia homopolar se ha utilizado un modelo axisimétrico basado en un corte del transformador por un plano normal al plano del núcleo. Sin embargo, en realidad un transformador no es un sólido con simetría axial, y de hecho la geometría de la columna central difiere mucho de la utilizada. Ocurre que la componente axial de la inducción es bastante constante a lo largo de la altura de los arrollamientos. Por eso, se podría pensar en hacer un modelo

de elementos finitos basado en un dibujo en planta del transformador y que no tuviera simetría axial sino una profundidad igual a la altura de los arrollamientos.

Un tercer trabajo de interés para el futuro es comparar las corrientes calculadas mediante el método de Newton-Raphson con las que circulan por los arrollamientos en los diferentes ensayos.

CAPÍTULO 7:

PRESUPUESTO.

Este capítulo es de utilidad, porque este Trabajo de Fin de Grado, puede ser considerado como un proyecto empresarial y como todo proyecto empresarial, consta de un análisis del presupuesto invertido.

Actualmente, en la Universidad Carlos III de Madrid, todo Trabajo de Fin de Grado tiene un valor total de 12 créditos sobre un total de 240 créditos por grado. Se pretende que un alumno invierta 25 horas semanales por cuatrimestre para cada crédito de estudio, por tanto un alumno debe invertir 300 horas como mínimo en un trabajo de fin de grado. Sin embargo en este trabajo de fin de grado se han invertido 660 horas en total, debido a los diversos problemas que se ha tenido con el software utilizado y con la realización del proyecto en general.

Si se considera que en España el salario mínimo para alumnos en periodo de prácticas profesionales en empresas es de 6.5€/hora y se consideran las 660 horas invertidas en el presente trabajo de fin de grado, llevar a cabo este Trabajo ha costado un total de 4290€ en horas de trabajo.

Pero en el presupuesto también hay que tener en cuenta la amortización correspondiente a los softwares utilizados: Comsol Multiphysics 3.5a y Matlab R2007b. El primero tiene un coste de 180€ y el segundo un coste total de 150€.

Otro dato a tener en cuenta es la amortización del hardware. En este caso, se trata de ordenador portátil de un valor de 600€ con 5 años de vida útil. Pero se ha utilizado desde febrero hasta septiembre, un total de 1 año. Por tanto la inversión total referida al hardware es de 120€.

Si se suman la inversión en el hardware más la inversión en el software con la inversión en horas de trabajo, el presupuesto invertido es de un total de € como se ilustra en la siguiente tabla:

Presupuesto Proyecto Fin de Grado			
	Concepto	Coste	Inversion
Mano de Obra	660 horas de trabajo	6,5€/horas	4.290 €
Total			4.290 €
Hardware	Ordenador (año)	600 €	120 €
Total			120 €
Software	Comsol Multiphysics	180 €	180 €
	Matlab R2007b	150 €	150 €
Total			330 €
Total			4.740 €

Tabla 8.1: Presupuesto de Trabajo.

CAPÍTULO 8:

BIBLIOGRAFIA.

[MIT11] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (2011). Planificación de los sectores de electricidad y Gas 2012-2020. Desarrollo de las redes de transporte. Primer borrador.

[GRE15] Gestión de Redes Eléctricas (2015). Introducción a las redes eléctricas. Estructura y actividades del sector eléctrico español. Módulo A, tema A-2.

[BOE09] Boletín Oficial del Estado (2009). Disposiciones Generales, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

[IEC93] International Standard IEC 60076-1 (1993). Power Transformers Part 1: General. Edition 2.1 2000-2004.

[GRE15] Gestión de Redes Eléctricas (Curso 2015). Módulo B: Gestión de Equipos e Instalaciones Eléctricas. Tema B-3.

[Yeb09] Yébenes Cabrejas, Francisco José (2009). Universidad Carlos III de Madrid. Proyecto de Fin de Carrera: *Gestión de la cargabilidad de transformadores de potencia*.

[SEI13] Sector Electricidad (13). Comunidad de profesionales de la Ingeniería Eléctrica. España.

[Mor03] Fraile Mora, Jesús. Maquinas Eléctricas (2003). 5ª edición. Mc Graw Hill, S.A.U.

[IEE10] ANSI IEEE C57.12.90 (2010). *Standard Test Code for Liquid Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers*.

[DeL09] De León, Francisco, Senior Member, IEEE, and, Martinez, Juan A., Member, IEEE (2009), *Dual Three Winding Transformers Equivalent Circuit Matching Leakage Measurement*.

[Muñ14] J.J. Benito Muñoz, R. Álvarez Cabal, F. Ureña Prieto, E. Salete Casino, E. Aranda Ortega (2014): *Introducción al Método de los Elementos Finitos*. UNED. Madrid. 2014.

[Zie94] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor (1994): *El Método de los Elementos Finitos, Vol. 1 y 2*. CIMNE-Mc Graw Hill, 1994.

[UM15] Universidad Mendoza (2015), Maquinas Eléctricas: *Principio de Funcionamiento del Transformador de Potencia*.

[Gal13] Galán Pardo, Noelia (2013). Universidad Carlos III de Madrid. Trabajo de Fin de Grado: *Cálculo de la impedancia homopolar de un transformador mediante el método de los elementos finitos*.

[Sor14] Sorrentino Ramírez, Elmer (2014). Universidad Carlos III de Madrid. Tesis Doctoral: *Determinación de las impedancias homopolares de transformadores trifásicos de tres columnas con conexión YNyd a partir de sus dimensiones geométricas*.

[Kul04] Kulkarni, S.V. and, Khaparde, S.A. (2014): *Transformers Engineering. Design and Practice*. Marcel Dekker, Inc.

[IEC97] Norma IEC 60076-8 (1997). Guía de aplicación de transformadores de potencia.

[Rey12] Reyes Ramos, Estefanía (2012). Universidad Carlos III de Madrid. Proyecto de Fin de Carrera: *Determinación de la Impedancia Homopolar del Transformador de Potencia*.

[Kar87] Karsai, K.; Kerényi, D.; Kiss, L. (1987): *Large Power of Transformers*. Elsevier Science Pub. Co.

[Fri04] Frías Valero, Eduardo (2004). UPC. Tesis Doctoral: *Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos*.

[Bur15] Burgos Díaz, Juan Carlos (2015). *Circuitos magnéticos y transformadores: constitución física de transformadores*. Tema 2.

[Bur15] Burgos Díaz, Juan Carlos (2015). *Circuitos magnéticos y transformadores: Transformadores trifásicos*. Tema 4.

[Goo15]Google2015:

<https://www.google.com/search?q=metodo+de+newton+raphson&espv=2&biw=1366&bih=667&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0CAcQAUoAmoVChMIkIKWq8b0xwIVCZuICh3lbQ22#tbm=isch&q=metodo+de+secante&imgsrc=RkxR-qKYsxAHPM%3A>.