

Trabajo Fin de Grado
Doble Grado en Ingeniería Eléctrica e Ingeniería
Electrónica Industrial

Diseño Eléctrico de un Transformador de Potencia mediante Livescript

Autor: Enrique Martínez Martínez

Tutor: César Álvarez Arroyo

Dpto. de Ingeniería Eléctrica
Escuela Politécnica Superior
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024



Trabajo Fin de Grado
Doble Grado en Ingeniería Eléctrica e Ingeniería Electrónica Industrial

Diseño Eléctrico de un Transformador de Potencia mediante Livescript

Autor:

Enrique Martínez Martínez

Tutor:

César Álvarez Arroyo

Dpto. de Ingeniería Eléctrica

Escuela Politécnica Superior

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024

A mi abuelo, mi amigo

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a mi tutor, César, por alimentar mis ganas de dedicarme al desarrollo del sector de la energía eléctrica, a mis padres, Pilar y Enrique, por el apoyo incondicional que me brindaron todos estos años, a mi hermana, Lourdes, por ser una fuente de inspiración llegando a ver como se convertía en Doctora por la Universidad de Sevilla, a mis abuelos, Juanma y Prudencia, por la confianza depositada en mí incluso antes de empezar este camino, y a mi pareja, Andrea, por acompañarme y soportarme como un pilar fundamental de mi vida hasta este momento. Todos y cada uno de vosotros habéis dejado una huella imborrable en mí, parte del mérito de este proyecto es vuestro.

Enrique Martínez Martínez

Sevilla, 2024

RESUMEN

El presente proyecto pretende servir de introducción al diseño eléctrico de un transformador de potencia trifásico sumergido en aceite, como primera toma de contacto con este proceso y las dificultades que implica, así como su automatización.

En primer lugar, se detallarán los principales aspectos del diseño eléctrico de un transformador tipo columnas, entendiendo la teoría y el procedimiento de diseño, así como las desviaciones que pueden ocurrir durante el proyecto.

Posteriormente, se aplicará lo aprendido a una especificación para un transformador trifásico de 90MVA 132/34.5kV ONAF y se hará uso de la herramienta Livescript de Matlab para implementar un programa con el que alcanzar una solución final que cumpla con la especificación requerida.

ABSTRACT

This project is intended as an introduction to the electrical design of a three-phase oil-immersed power transformer, as a first contact with this process and the difficulties involved, as well as its automation.

First, the main aspects of the electrical design of a column type transformer will be detailed, understanding the theory and the design procedure, as well as the deviations that can occur during the project.

Subsequently, what has been learned will be applied to a specification for a 90MVA 132/34.5kV ONAF three-phase transformer and the Matlab Livescript tool will be used to implement a program that will lead to a final solution that meets the required specification.

ÍNDICE

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	x
Índice	xi
Índice de Figuras.....	xv
Índice de Tablas.....	xvii
Índice de Ecuaciones.....	xviii
1. Introducción	1
1.1 Definición de transformador	1
1.2 Objetivos del diseño	2
1.3 Teoría básica de los transformadores	2
1.3.1 Conceptos y términos electromagnéticos	2
1.3.2 Campo electromagnético	4
1.3.3 Funcionamiento ideal de un transformador	5
2. Procedimiento de diseño	8
2.1 Inputs en el proceso de diseño	8
2.2 Diagrama de flujo del diseño.....	10
3. Diseño del núcleo	11
3.1 Cálculo del diámetro y el área del núcleo	11
3.1.1 Introducción al núcleo	11
3.1.2 Selección del círculo central	12
3.1.3 Selección del ancho de los escalones que conforman el núcleo	13
3.1.4 Cálculo del área bruta y neta del núcleo	16
3.1.5 Tipos de apilado del núcleo	18
4. Diseño de los arrollamientos	21
4.1 Cálculo de los voltajes por vuelta.....	21
4.2 Cálculo de las tensiones y corrientes de fase	23
4.3 Cálculo del número de vueltas o espiras	25
4.4 Cálculo del área de la sección transversal del conductor	32
4.4.1 Área efectiva de un conductor rectangular	32
4.4.2 Área efectiva de un conductor redondo.....	32
4.4.3 Área efectiva de un conductor en forma de lámina	33
4.4.4 densidad de corriente.....	33
4.5 Selección de la densidad de corriente	33
4.5.1 Densidad de corriente limitada por penalizaciones	34

4.6	Selección del tamaño de los conductores	35
4.6.1	Conductor descubierto	35
4.6.2	Dimensión del conductor recubierto	37
4.7	Selección del tipo de bobinados	39
4.7.1	Bobinado en espiral o cilíndrico	39
4.7.2	Bobinado en hélice o helicoidal	40
4.7.3	Bobinado en capa	40
4.7.4	Bobinado en disco.....	40
4.7.5	Otros tipos de bobinado	41
4.7.6	Consideraciones durante la selección del tipo de bobinado	41
4.8	Cambiador de tomas de regulación y sus conexiones	42
4.8.1	Cambiador de tomas fuera del circuito	42
4.8.2	Cambiador de tomas sin carga	43
4.8.3	Cambiador de tomas en carga.....	43
4.8.4	Selección del cambiador de tomas	44
4.9	Cálculo de la altura axial de los bobinados.....	44
4.9.1	Bobinado en espiral o en capa	44
4.9.2	Bobinado de hélice.....	45
4.9.3	Bobinado de discos.....	46
4.10	Separaciones eléctricas de transformadores trifásicos llenos de aceite.....	47
4.11	Cálculo del diámetro de los arrollamientos y el espesor radial	47
4.11.1	Bobinados en espiral	47
4.11.2	Bobinados helicoidales	48
4.11.3	Bobinados en lámina	50
4.11.4	Bobinados de espiras entrelazadas.....	50
4.11.5	Bobinados en disco.....	50
4.12	Aislamiento entre capas	51
4.12.1	Cálculo del aislamiento entre capas para la tensión a los ensayos de sobretensión	52
4.12.2	Aislamiento entre las dos primeras capas cercanas al final de la línea para resistencia a ensayos de impulsos.....	53
4.13	Cálculo del diámetro y la profundidad radial de las bobinas	53
4.13.1	Cálculo del diámetro interior	54
4.13.2	Cálculo del diámetro exterior	54
4.13.3	Cálculo de la profundidad radial	55
4.13.4	Cálculo de la longitud media por vuelta.....	56
4.14	Peso del conductor descubierto, el recubrimiento y la resistencia de los devanados .	56
4.14.1	Peso total del conductor descubierto.....	56
4.14.2	Peso total del aislamiento.....	57
4.14.3	Cálculo de la resistencia total en los devanados.....	58
4.14.4	Desviaciones del cálculo analítico para la resistencia y el peso.....	59
5.	Cálculo de las pérdidas en carga	60
5.1	Cálculo de las pérdidas por efecto Joule	60
5.2	Cálculo de las pérdidas por corrientes parásitas y por dispersión	62
5.2.1	Pérdidas por corrientes de parásitas en los devanados.....	62
5.2.2	Pérdidas por dispersión en las tapas de las bornes.....	62
5.2.3	Pérdidas por dispersión en las vigas de aprieto.....	63
5.2.4	Pérdidas por corriente circulante en bobinados de disco continuo.....	65
5.2.5	Pérdidas en el tanque	66
5.2.6	Pérdidas en el tanque debido a buses de alta intensidad.....	67
5.2.7	Pérdidas totales por dispersión del flujo	67
6.	Cálculo de la reactancia	68
6.1	Cálculo de la reactancia de un transformador con dos devanados	68
6.1.1	Correcciones en la fórmula de Rogowski	70
6.2	Cálculo de la reactancia con diferentes distribuciones de amperios vuelta	70
6.3	Arrollamiento BT-AT-BT	71
6.4	Arrollamientos realizados en dos devanados diferentes con separación entre ellos ..	73

6.5	Reactancia de devanados en diferentes arrollamientos con una disminución de la altura de estos hacia las capas exteriores	74
7.	Cálculo de las dimensiones de la ventana del núcleo, las pérdidas en el núcleo, eficiencia y regulación.....	76
7.1	Cálculo de las dimensiones de la ventana del núcleo y el peso del núcleo.....	76
7.1.1	Núcleo de tres fases y tres columnas	77
7.1.2	Núcleo de tres fases y cinco columnas	78
7.2	Cálculo de las pérdidas en el núcleo	79
7.2.1	Cálculo de las pérdidas mediante un factor de fabricación medio.....	79
7.2.2	Cálculo de las pérdidas mediante la suma de las pérdidas en láminas de chapa con orientación en la dirección del grano y perpendicular a esta.....	80
7.3	Cálculo de la corriente de vacío (o de excitación).....	81
7.3.1	Desviaciones	81
8.	Diseño Eléctrico mediante Matlab.....	84
8.1	Especificaciones.....	84
8.2	Diseño del núcleo.....	86
8.2.1	Diámetro del núcleo	86
8.2.2	Cálculo del área bruta y neta del núcleo	88
8.3	Diseño de los bobinados.....	91
8.3.1	Cálculo de los voltajes por vuelta	91
8.3.2	Cálculo de las tensiones y corrientes de fase	91
8.4	Cálculo del número de vueltas.....	93
8.4.1	Cálculo del número de vueltas Devanado LV.....	93
8.4.2	Cálculo del valor real de tensión por vuelta y densidad de flujo máxima real	93
8.4.3	Cálculo del número de vueltas Devanado HV.....	94
8.4.4	Cálculo del número de vueltas en las tomas de regulación	94
8.4.5	Categorías de variación de tensión	95
8.5	Selección de la densidad de corriente	97
8.6	Selección del tipo y el tamaño de los conductores.....	98
8.6.1	Cálculo del área transversal del conductor.....	100
8.6.2	Selección del tipo de bobinado y su configuración.....	101
8.7	Cálculo altura axial de los bobinados	109
8.7.1	Distancias eléctricas en transformadores trifásicos de potencia llenos de aceite aislante.....	115
8.8	Aislamiento entre capas	116
8.9	Cálculo del diámetro y la profundidad radial de los arrollamientos	117
8.10	Cálculo del estrés eléctrico del aislamiento entre arrollamientos.....	119
8.11	Cálculo del peso total del conductor descubierto, recubierto y resistencia del arrollamiento	121
8.12	Cálculo del tamaño de la ventana y las pérdidas en el núcleo.....	125
8.12.1	Tamaño de la ventana y cálculo del peso del núcleo.....	125
8.12.2	Cálculo de las pérdidas en el núcleo	126
8.12.3	Cálculo de la corriente de excitación (corriente en vacío).....	127
8.12.4	Resumen.....	127
8.13	Cálculo de las pérdidas en carga.....	127
8.13.1	Cálculo de las pérdidas por ohm en los devanados.....	127
8.13.2	Cálculo de las pérdidas por corrientes de Eddy.....	129
8.13.3	Cálculo de las pérdidas por dispersión.....	129
8.13.4	Cálculo de las pérdidas en carga	133
8.14	Cálculo de la reactancia.....	134
8.14.1	Cálculo de la reactancia mediante el método de devanados separados con capas reducidas el final.....	134
9.	Output de diseño	137
9.1.1	Tensiones y corrientes del transformador	137
9.1.2	Número de vueltas y tomas de regulación	137
9.1.3	Diseño del núcleo y los arrollamientos	138
9.1.4	Peso del núcleo y pérdidas en vacío	141

9.1.5	Pérdidas en carga	141
9.1.6	Dimensiones de los arrollamientos	142
9.1.7	Impedancia	142
10.	Conclusiones	144
11.	Posibles proyectos futuros	146
12.	Bibliografía	147

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Primer transformador de potencia comercial desarrollado por G. Westinghouse (1886).....	1
Figura 1.2. Transformador Ideal.....	5
Figura 2.1. Diagrama de flujo para el diseño de un transformador.....	10
Figura 3.1. Bobina de Chapa magnética previa al corte.....	11
Figura 3.2. CUARTA PARTE DEL CÍRCULO DEL NÚCLEO.....	14
Figura 3.3. Círculo del núcleo con un número finito de pasos.....	16
Figura 3.4. Tipos de apilado de chapa (a) normal, (b) butt (c) step-lap.....	18
Figura 3.5. (a) Núcleo de un transformador de 3 columnas. (b) Apilado step-lap de una esquina del núcleo. (c) Apilado step lap de la junta de la columna central.....	18
Figura 3.6. Esquema de apilado step-lap.....	19
Figura 3.7. Simulación FEA, (a) no-load Bm, (b) full-load Bm.....	20
Figura 3.8. Caminos magnéticos en las juntas (a) apilado normal y (b) apilado step-lap.....	20
Figura 4.1. Intercambiadores de tomas, (a) intercambiador DETC, (b) intercambiador OLTC.....	27
Figura 4.2. Intercambiadores de tomas, (a) tipo resistivo, (b) tipo reactivo, (c) tipo electrónico.....	27
Figura 4.3. Intercambiadores de toma, (a) tipo in tank, (b) tipo off tank.....	28
Figura 4.4. Intercambiadores de toma, (a) tipo de aislamiento en aceite, (b) tipo de aislamiento en vacío.....	28
Figura 4.5 Conexiones básicas de los devanados de regulación (a) lineal, (b) conmutador inversor simple, (c) conmutador inversor múltiple, (d) conmutador de cambio grueso simple, (e) conmutador de cambio grueso múltiple.....	29
Figura 4.6. Configuración típica de devanados de regulación conectados en estrella.....	29
Figura 4.7. Configuraciones típicas de devanados de regulación conectados en triángulo.....	29
Figura 4.8. Bobinas de conductor, (a) PICC y (b) CTC.....	36
Figura 4.9. Conductores de cobre, (a) tipo PICC y (b) tipo CTC.....	36
Figura 4.10. tipos de agrupaciones "Bunched" de PICC.....	37
Figura 4.11. Detalle de un conductor CTC del fabricante APAR.....	39

Figura 4.12. Tipos de devanados, (a) devanado en espiral monocapa, (b) devanado en espiral bicapa, (c) devanado en capas.	39
Figura 4.13. Devanado monocapa helicoidal con 2 mazos y detalle de separadores.....	40
Figura 4.14.(a) Detalle constructivo de un devanado de discos continuos y esquema, (b) esquema de un devanado en discos entrelazados.	41
Figura 4.15. Devanado de regulación con conductores numerados.	42
Figura 4.16. Conmutador lineal de tomas de regulación.	42
Figura 4.17. Conmutador (a) puente simple y (b) puente doble.	43
Figura 4.18. (a) Esquema de conexionado para un OLTC lineal, (b) tipo coarse-fine y (c) reversing switch.	43
Figura 4.19. Evolución típica de la tensión para un tiempo t en un ensayo de sobretensión.....	51
Figura 4.20. Curva típica tensión-tiempo del ensayo de impulso para una separación en aceite.	51
Figura 4.21. Curva típica tensión-tiempo del ensayo de impulso para una separación con aislante pressboard.	52
Figura 4.22. Diferentes tipos de aislamiento intercapa.	53
Figura 5.1. Detalle del núcleo y sujeción de la parte activa mediante varas de fijación.....	63
Figura 5.2. Detalle del núcleo y sujeción de la parte activa mediante placas de amarre.	64
Figura 5.3. Detalle de la densidad de distribución de pérdidas superficiales debido a las placas de amarre.....	65
Figura 6.1. Diagrama de amperios vuelta generalizado.	71
Figura 6.2. Amperios vuelta para un arrollamiento tipo BT-AT-BT.	71
Figura 6.3. Diagrama amperios-vuelta para un arrollamiento BT-AT-Taps.....	73
Figura 7.1. Núcleos con igual distancia entre sus columnas.	76
Figura 7.2. transformadores trifásicos de 3 columnas (a) durante el calado de las bobinas en el núcleo y (b) con el calado completo.	77
Figura 7.3. transformadores trifásicos de 3 columnas (a) durante el calado de las bobinas en el núcleo y (b) con el calado completo.	77
Figura 7.4. Dimensiones relativas típicas del ancho de las columnas para un núcleo de 3 fases y 5 columnas.....	79
Figura 7.5. Tabla con diferentes factores de construcción para diferentes diámetros y grados del núcleo.....	80
Figura 7.6. Tabla de cálculo de pérdidas específicas según el material que constituye el núcleo.	82
Figura 7.7. Detalles de las pérdidas en el núcleo para diferentes tipos de chapa comunes, a 1.5 T para CRGO Steel convencional y 1.7T para el CRGO Hi-B-Steel.	83
Figura 7.8. Propiedades magnéticas de los materiales Hi-B CRGO.	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Diámetros del círculo del núcleo para una potencia dada	13
Tabla 3.2 Factores de paso y llenado del área bruta.	16
Tabla 4.1. Parámetros PICC.....	38
Tabla 4.2. Parámetros PICC esmaltado.....	38
Tabla 4.3. Tipos de esmalte para conductores PICC.....	38
Tabla 4.4. Parámetros CTC.....	38
Tabla 4.5. Tipos de esmalte para conductores CTC.	38
Tabla 4.6. Tipos de arrollamientos típicos según rangos de potencia.	41
Tabla 10.1. Valores de la especificación vs diseño.	145

ÍNDICE DE ECUACIONES

(1.1).....	2
(1.2).....	3
(1.3).....	3
(1.4).....	3
(1.5).....	3
(1.6).....	3
(1.7).....	4
(1.8).....	4
(1.9).....	4
(1.10).....	5
(1.11).....	6
(1.12).....	6
(1.13).....	6
(1.14).....	6
(1.15).....	7
(1.16).....	7
(3.1).....	12
(3.2).....	14
(3.3).....	14
(3.4).....	14
(3.5).....	15
(3.6).....	15
(3.7).....	15
(3.8).....	15
(3.9).....	16
(3.10).....	17
(3.11).....	17
(3.12).....	17
(3.13).....	17

(3.14).....	17
(4.1).....	21
(4.2).....	21
(4.3).....	21
(4.4).....	22
(4.5).....	22
(4.6).....	23
(4.7).....	24
(4.8).....	24
(4.9).....	24
(4.10).....	24
(4.11).....	24
(4.12).....	25
(4.13).....	26
(4.14).....	30
(4.15).....	31
(4.16).....	32
(4.17).....	32
(4.18).....	33
(4.19).....	33
(4.20).....	33
(4.21).....	34
(4.22).....	34
(4.23).....	35
(4.24).....	35
(4.25).....	44
(4.26).....	45
(4.27).....	45
(4.28).....	45
(4.29).....	46
(4.30).....	46
(4.31).....	47
(4.32).....	47
(4.33).....	48
(4.34).....	48
(4.35).....	48
(4.36).....	49
(4.37).....	49
(4.38).....	49
(4.39).....	49
(4.40).....	50
(4.41).....	50
(4.42).....	50
(4.43).....	50
(4.44).....	52
(4.45).....	53
(4.46).....	54
(4.47).....	54

(4.48).....	54
(4.49).....	54
(4.50).....	55
(4.51).....	55
(4.52).....	55
(4.53).....	56
(4.54).....	56
(4.55).....	56
(4.56).....	57
(4.57).....	57
(4.58).....	57
(4.59).....	57
(4.60).....	57
(4.61).....	57
(4.62).....	58
(4.63).....	58
(4.64).....	58
(4.65).....	59
(5.1).....	60
(5.2).....	60
(5.3).....	61
(5.4).....	61
(5.5).....	61
(5.6).....	62
(5.7).....	63
(5.8).....	63
(5.9).....	64
(5.10).....	64
(5.11).....	64
(5.12).....	65
(5.13).....	65
(5.14).....	66
(5.15).....	66
(5.16).....	67
(6.1).....	68
(6.2).....	68
(6.3).....	69
(6.4).....	69
(6.5).....	69
(6.6).....	69
(6.7).....	70
(6.8).....	72
(6.9).....	72
(6.10).....	72
(6.11).....	72
(6.12).....	74
(6.13).....	74
(6.14).....	74

(6.15).....	75
(6.16).....	75
(6.17).....	75
(7.1).....	77
(7.2).....	77
(7.3).....	78
(7.4).....	78
(7.5).....	78
(7.6).....	78
(7.7).....	79
(7.8).....	80
(7.9).....	80
(7.10).....	81
(7.11).....	81

1. Introducción

Los equipos que emplean energía eléctrica se han venido utilizando y se utilizarán cada vez más para mejorar la comodidad, el confort y la productividad del ser humano, así como la industria avanza. El transformador constituye un eslabón vital del sistema eléctrico que lleva la energía eléctrica desde las centrales de generación hasta el usuario para su consumo. Existen millones de transformadores funcionando en todo el mundo para el suministro de energía en una multitud de aplicaciones. La capacidad de potencia de estas máquinas va desde los transformadores de gran potencia y elevada tensión que pesan varios cientos de toneladas, hasta los minúsculos micro transformadores disponibles en algunos circuitos electrónicos como pueden ser los cargadores de pared para dispositivos móviles.

La demanda de transformadores aumenta continuamente como consecuencia de la urbanización, el crecimiento demográfico, la industrialización de las economías emergentes, la sustitución de las unidades envejecidas del sistema existente, e incluso la reparación de aquellas unidades fallidas. Aunque el transformador es un producto que lleva existiendo desde hace más de 130 años, cuando G. Westinghouse encomendó la fabricación del primer aparato comercial en 1885, finalizando éste en 1886, su estructura básica y su principio han permanecido inalterados.



FIGURA 1.1. PRIMER TRANSFORMADOR DE POTENCIA COMERCIAL DESARROLLADO POR G. WESTINGHOUSE (1886).

Gracias a la utilización de materiales y tecnologías perfeccionadas para el diseño, la fabricación, la producción, el funcionamiento y el mantenimiento, la eficacia y la sofisticación del producto son cada vez mayores.

1.1 Definición de transformador

El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) define el transformador como:

Dispositivo eléctrico estático formado por dos o más bobinados con o sin núcleo magnético para producir el acoplamiento mutuo entre circuitos eléctricos.

La Comisión Electrotécnica Internacional (CEI) define el transformador como:

Aparato estático con dos o más bobinados que, por inducción electromagnética, transforma un sistema de tensión y corriente alternas en otro sistema de tensión y corriente, generalmente de valores diferentes y a la misma frecuencia, con el fin de transmitir energía eléctrica.

El transformador consta esencialmente de un circuito eléctrico compuesto por los conductores que transportan la corriente, un circuito magnético compuesto por un núcleo de un material ferromagnético con una alta conductancia magnética. Para aumentar el flujo que concatenan los arrollamientos. Además, deberá existir un sistema aislante para aislar las espiras y los devanados entre sí y con otros. Tanto el circuito eléctrico como el circuito magnético producen calor cuando tiene lugar el proceso de transferencia de potencia, haciendo necesario transferir eficazmente el calor generado para que los sistemas, materiales y componentes, especialmente el aislamiento, funcionen sin pérdida de propiedades durante toda la vida útil del equipo.

1.2 Objetivos del diseño

Se espera que el diseño del transformador satisfaga las demandas en constante evolución de las distintas partes interesadas, incluidos los clientes, las autoridades reguladoras, la sociedad y la industria. El diseñador del producto debe estar preparado para seleccionar la solución óptima entre diferentes alternativas, a veces contradictorias. Estos objetivos incluyen, entre otros, los siguientes:

- Diseñar el transformador seleccionando los materiales más adecuados para reducir el coste del producto.
- Optimizar el coste de propiedad del producto durante su vida útil
- Producto seguro y respetuoso con el medio ambiente
- Desarrollar el producto adecuado para satisfacer los requisitos cambiantes de la red y del cliente
- Adaptar las nuevas tecnologías y ofrecer mejoras continuas

Los ingenieros que trabajan en la industria de los transformadores deben conocer los principios de diseño y los conceptos fundamentales para poder fabricar transformadores eficientes y fiables y esforzarse por desarrollar nuevos productos y absorber nuevas tecnologías.

1.3 Teoría básica de los transformadores

En esta sección se mostrarán algunas de las teorías básicas que ayudarán a entender el funcionamiento de cualquier máquina eléctrica, con énfasis en las máquinas eléctricas estáticas. La teoría básica del funcionamiento de los transformadores está disponible en numerosos libros de texto, además, el interés principal es entender el diseño eléctrico y el porqué de las consideraciones que conducen al diseñador durante el proceso, por tanto, no se detallará en esta sección ningún cálculo más allá de los conocimientos básicos.

1.3.1 Conceptos y términos electromagnéticos

Se denomina flujo magnético a la presión que ejerce un campo magnético en un área de espacio vacío, al escribir en forma de ecuación

$$\phi = \mu_0 \cdot H \cdot A \quad (1.1)$$

Donde:

ϕ = flujo magnético (Wb).

$A = \text{Área (m}^2\text{)}.$

$H = \text{Campo magnético (A/m)}$

$\mu_0 = \text{Permeabilidad en el vacío.}$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad (1.2)$$

Donde:

$\mu_0 = \text{Permeabilidad en el vacío.}$

A la densidad de flujo magnético se le define como el flujo que circula a través de una superficie:

$$B = \frac{\phi}{A} \quad (1.3)$$

Donde:

$B = \text{Densidad de flujo magnético (T)}.$

$\phi = \text{flujo magnético (Wb)}.$

$A = \text{Área (m}^2\text{)}.$

La relación entre la densidad de flujo y el propio flujo permite combinar ambas ecuaciones para obtener la siguiente:

$$B = \mu_0 \cdot H \quad (1.4)$$

Donde:

$B = \text{Densidad de flujo magnético (T)}.$

$H = \text{Campo magnético (A/m)}.$

$\mu_0 = \text{Permeabilidad en el vacío.}$

La realidad no permite representar cómo se comportan los materiales mediante la ecuación (1.4), para ello se debe definir un nuevo término conocido como Permeabilidad relativa, que permite distinguir las propiedades magnéticas del material estudiado:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1.5)$$

Donde:

$\mu_0 = \text{Permeabilidad en el vacío.}$

$\mu_r = \text{Permeabilidad relativa.}$

$\mu = \text{Permeabilidad del material.}$

De tal forma que se reescribe la ecuación (1.4) como:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (1.6)$$

Donde:

μ = Permeabilidad del material.

B = Densidad de flujo magnético (T).

H = Campo magnético (A/m).

A la resistencia que presenta un material ante el paso de un flujo de campo magnético se le conoce como reluctancia y es un término análogo al de la resistencia en un circuito eléctrico ante el paso de un flujo de corriente.

$$\mathcal{R} = \frac{f.m.m.}{\phi} = \frac{N \cdot I}{\phi} \quad (1.7)$$

Donde:

\mathcal{R} = Reluctancia magnética (H).

f.m.m. = Fuerza magneto motriz (Av).

ϕ = flujo magnético (T).

N = Número de vueltas.

I = Intensidad que circula a través del material (A).

A la combinación de la intensidad y el número de vueltas o espiras se le denomina amperios-vuelta (Av).

Estudiando la reluctancia en un circuito magnético uniforme y cerrado, esta se podrá calcular como:

$$\mathcal{R} = \frac{l_m}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot A} \quad (1.8)$$

Donde:

\mathcal{R} = Reluctancia magnética (H).

l_m = Longitud media del camino magnético (m).

μ_0 = Permeabilidad en el vacío.

μ_r = Permeabilidad relativa.

A = Área de la sección transversal al circuito magnético (m²).

1.3.2 Campo electromagnético

Tras el descubrimiento de que una corriente eléctrica produce un campo magnético al circular a través de un conductor, Ampere realizó la hipótesis de que la corriente eléctrica era la fuente de todos los campos magnéticos, dando forma así a la Ley de Ampere de la siguiente forma:

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = N \cdot I \quad (1.9)$$

Donde:

Φ_c = Flujo de campo magnético en un circuito magnético cerrado (Wb).

H = Campo magnético (A/m).

dl = Diferencial de longitud (m).

NI = Amperios-vuelta (Av).

La teoría afirmaba que la fuerza del campo magnético en un circuito magnético cerrado era generada por un número de conductores N , acarreado una corriente I .

Más tarde, en 1831 Faraday descubrió otra ley fundamental del magnetismo, la cual afirmaba que, si el flujo magnético vinculado a un circuito eléctrico variaba, este inducía una fuerza electromotriz (f.e.m.) proporcional al cambio en el flujo.

$$V = -\frac{d\phi}{dt} \quad (1.10)$$

Donde:

V = Tensión o fuerza electromotriz (V).

ϕ = Flujo magnético (Wb).

t = Tiempo (s).

El símbolo negativo proviene de la Ley de Lenz, la cual afirma que la tensión inducida se opone siempre al cambio en el flujo.

1.3.3 Funcionamiento ideal de un transformador

Un transformador ideal parte de las siguientes premisas:

- La resistencia que ofrecen los devanados es nula.
- La reluctancia que ofrecen los devanados y el circuito magnético es Nula.

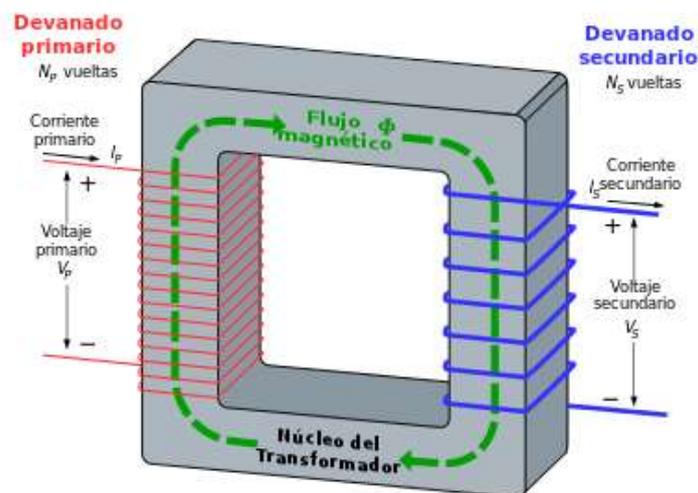


FIGURA 1.2. TRANSFORMADOR IDEAL.

De tal forma que las relaciones entre el circuito primario y secundario tal y como muestra la Figura 1.2 serán según la Ley de Faraday para un número N de espiras en los conductores primario:

$$v_p = N_p \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (1.11)$$

Donde:

v_p = Fuerza electromotriz en el devanado primario del transformador (V).

N_p = Número de espiras o vueltas en el devanado primario del transformador.

$\frac{d\phi}{dt}$ = Variación del flujo en el núcleo del transformador (Wb/s).

Y para el secundario:

$$v_s = N_s \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (1.12)$$

Donde:

v_s = Fuerza electromotriz en el devanado secundario del transformador (V).

N_s = Número de espiras o vueltas en el devanado secundario del transformador.

$\frac{d\phi}{dt}$ = Variación del flujo en el núcleo del transformador (Wb/s).

Al reescribir estos términos como un valor eficaz mediante la ecuación de la f.e.m. para una onda senoidal:

$$V = 4 \cdot K_f \cdot N \cdot f \cdot \phi_0 \quad (1.13)$$

Donde:

V = Tensión (V).

K_f = Factor de forma para una onda senoidal.

N = Número de espiras en el devanado donde se realice el cálculo.

f = Frecuencia a la que se alimenta desde la red la máquina (Hz).

ϕ_0 = Flujo magnético en vacío (Wb).

Obteniendo de al reorganizar los términos la relación de transformación del transformador:

$$m = \frac{V_p}{V_s} = \frac{4.44 \cdot N_p \cdot f \cdot \phi_0}{4.44 \cdot N_s \cdot f \cdot \phi_0} = \frac{N_p}{N_s} \quad (1.14)$$

Donde:

m = Relación de transformación.

V_p = Tensión en el devanado primario (V).

V_s = Tensión en el devanado secundario (V).

N_p = Número de espiras en el devanado primario.

N_s = Número de espiras en el devanado secundario.

f = Frecuencia a la que se alimenta desde la red la máquina (Hz).

ϕ_0 = Flujo magnético en vacío (Wb).

La ley de Hopkinson afirma que los amperios-vuelta han de ser iguales a la entrada y a la salida del transformador, por tanto:

$$I_p \cdot N_p = I_s \cdot N_s \quad (1.15)$$

Donde:

I_p = Corriente que circula por el devanado primario (A).

I_s = Corriente que circula por el devanado secundario (A).

N_p = Número de espiras en el devanado primario.

N_s = Número de espiras en el devanado secundario.

Finalizando así la última relación como:

$$m = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p} \quad (1.16)$$

Donde:

m = Relación de transformación.

I_p = Corriente que circula por el devanado primario (A).

I_s = Corriente que circula por el devanado secundario (A).

N_p = Número de espiras en el devanado primario.

N_s = Número de espiras en el devanado secundario.

2. Procedimiento de diseño

2.1 Inputs en el proceso de diseño

La recopilación de los requerimientos y diferentes documentos necesarios por parte del cliente para el inicio del diseño de un transformador de potencia, la realizará el departamento de ofertas y ventas de cada fabricante, estos serán los encargados de reconocer una oportunidad y explorarla, así como de obtener todos los inputs por parte del cliente, necesarios para el diseño del transformador, en definitiva, se encargarán de la comunicación y coordinación con el cliente hasta que se presente la oferta comercial del proyecto. Los requerimientos del cliente podrán variar de uno a otro considerablemente, pero existirá un número mínimo de documentos:

- Hoja de datos técnica.
- Oferta comercial.
- Planos de transporte.
- Planos de ensamblaje.

Así como sucede a los requerimientos, las especificaciones también podrán variar según los inputs que un cliente facilite a la empresa encargada de la construcción de la máquina, se requerirá de múltiples interacciones entre ambas partes hasta obtener las especificaciones mínimas para el diseño, el cliente podrá dejar a libertad del diseñador algunas de estas, primando siempre el diseño de menor coste, de ahí surgirá la importancia de la optimización de los diseños. Las especificaciones necesarias serán:

- Potencia máxima del transformador en kVA o MVA o diferentes potencias en caso de sistemas de refrigeración en diferentes etapas para el transformador.
- Número de fases.
- Frecuencia.
- Tipo de refrigeración.
- Aplicación del transformador una vez puesto en servicio
 - Condiciones de servicio:
 - Temperatura máxima del aire ambiente.
 - Temperatura ambiente media diaria,
 - Temperatura ambiente media ponderada anualmente.
 - Temperatura ambiente mínima.
 - Altitud, especialmente si se pondrá en servicio el transformador por encima de los 1000m desde el nivel medio del mar.
 - Nivel sísmico.
 - Servicio inusual:
 - Variación de la frecuencia superior a la permitida por la norma
 - Variación de la tensión superior a la permitida en el requisito de sobretensión, sobre todo el de corta duración.
 - Requisito de sobre-flujo o sub-flujo en su caso.
 - Condiciones especiales de sobrecarga.

- Tensión nominal de AT en vacío
- Conexión del arrollamiento de AT
- Tensión nominal de BT en vacío
- Conexión del arrollamiento de BT
- Grupo vectorial u horaria.
- Tomas de regulación si las hay y variación de la tensión.
- Si estas tomas se realizarán con una variación de la tensión con flujo constante, flujo variable o mixto.
- Si las tomas de regulación se dispondrán en el lado de AT, BT, terciario, o una combinación de estos.
- Rango de las tomas de regulación.
- Paso mínimo de las tomas de regulación.
- Tipo de tomas de regulación: Si se trata de tomas de regulación en carga, sin carga o fuera del transformador.
- Aumento garantizado de la temperatura del bobinado en: °C.
- Aumento garantizado de la temperatura del aceite en: °C.
- Impedancia en tanto por ciento y tolerancia admisible.
- Si se penalizan o no las pérdidas en vacío, en carga o ambas y el valor de la penalización.
- Si se especifican valores de pérdidas máxima garantizadas.
- Densidad de flujo admisible.
- Densidad de corriente admisible.
- Nivel de ruido admisible.
- Limitación del tamaño y las dimensiones totales, así como el peso total del transformador.
- Radiadores/aletas de refrigeración.
- Color de la pintura y esquema de esta.
- Accesorios necesarios.
- Disposición externa de los terminales.
- Datos para el funcionamiento en paralelo si se especifica.
- Exigencia de pruebas especiales fuera de las rutinarias.
 - Ensayos de sobrecalentamiento:
 - Incluyendo pérdidas en diferentes tomas de regulación, sobrecarga, etc.
 - Prueba de impulso:
 - Configurando diferentes tipos de impulsos según la norma.
 - Pruebas especiales:
 - Cortocircuito mecánico, no suele hacerse en las instalaciones donde se fabrica el transformador, debido a la destructibilidad de estos y el impacto que pueda tener en los alrededores.
 - Nivel de ruido.
 - Impedancia de secuencia cero.
 - Medición de la capacitancia.
 - Análisis de armónicos.
 - Estanqueidad del conservador y el transformador.
 - Vacío del conservador y el transformador.
 - Equilibrio magnético.
 - Análisis de gases disueltos.
 - Respuesta en frecuencia.

2.2 Diagrama de flujo del diseño

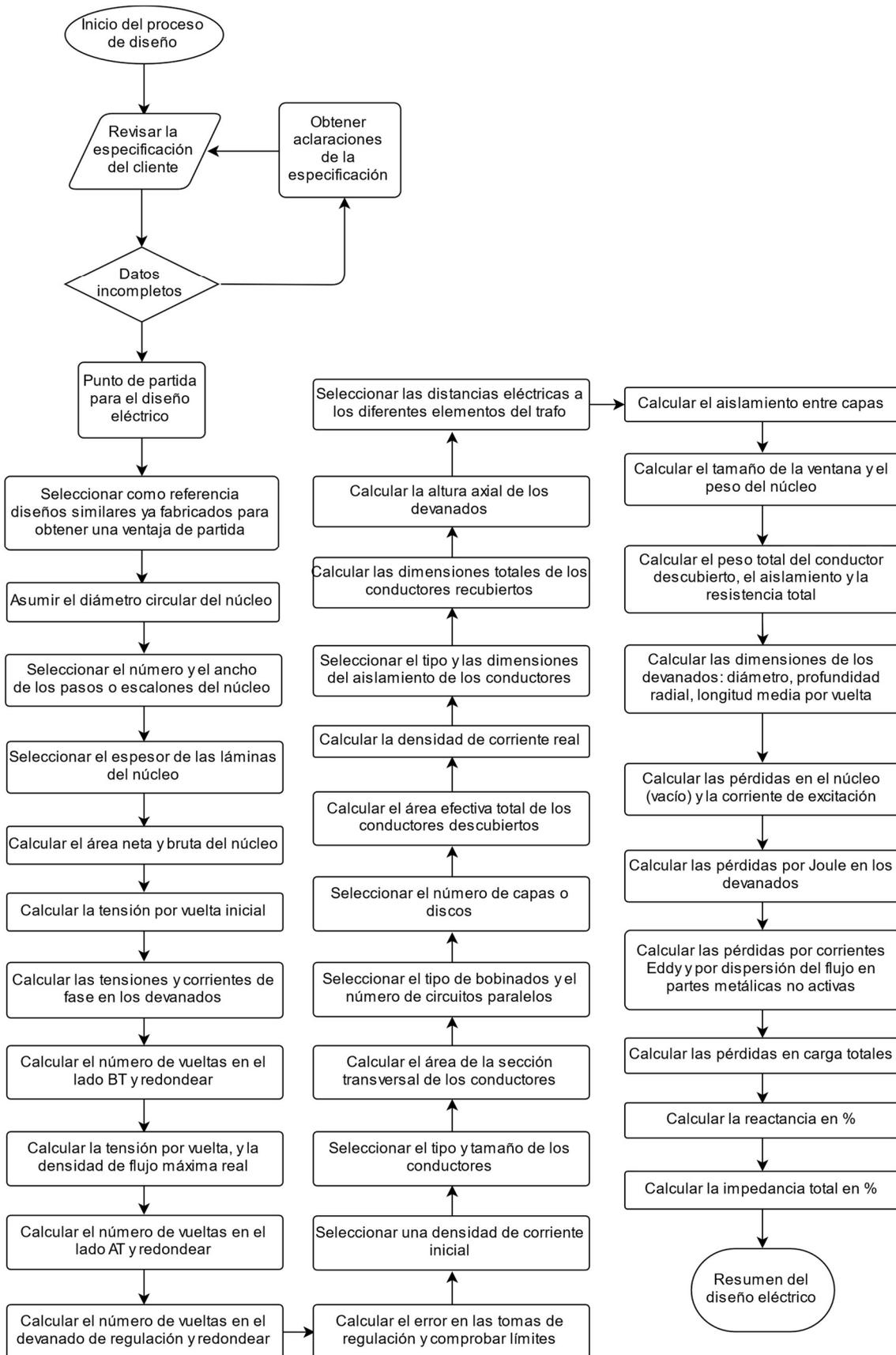


FIGURA 2.1. DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL DISEÑO DE UN TRANSFORMADOR.

3. Diseño del núcleo

3.1 Cálculo del diámetro y el área del núcleo

3.1.1 Introducción al núcleo

El núcleo del transformador constituirá el circuito magnético de éste y se encargará de guiar al flujo magnético a través de los diferentes devanados eléctricamente aislados. Estará formado por láminas de un material ferromagnético, coloquialmente denominado chapa, generalmente hierro o acero al silicio. Las láminas de material ferromagnético estarán aisladas entre sí de forma que se reduzcan las pérdidas por corrientes parásitas.

El material con el que se construyen actualmente los transformadores de gran potencia se denomina “CRGO Steel” o *Cold Rolled Grain Oriented Steel*, también conocido como acero eléctrico o acero al silicio, su nombre deriva del resultado, así como del método de fabricación. Se laminará el material mediante un proceso en frío por el cual sus granos acabarán orientados en una misma dirección.



FIGURA 3.1. BOBINA DE CHAPA MAGNÉTICA PREVIA AL CORTE.

El núcleo del transformador podrá conformar incluso más del 20% del coste total de este, además de estar directamente relacionado con las pérdidas durante el ciclo de vida del producto, (Chakraborty, 2018) estudió el impacto de este coste para diferentes tipos de materiales y espesores de chapa que pueden conformar el núcleo. La conclusión obtenida fue que el uso de un material de chapa de mayor calidad impactará en gran medida en el coste total del transformador, siendo este un requisito a aclarar durante la fase comercial previa a la licitación del proyecto, el cliente será el que decidirá el material a usar, tanto por aceptación del material propuesto por el diseñador como por especificación propia. A pesar de que un material de mayor calidad disminuirá las pérdidas que sufra el transformador a lo largo de su vida, pudiendo incluso suponer una ventaja a pesar del incremento en el coste inicial, el uso de un acero de mayor calidad aumentará la dificultad del proceso de apilamiento, incrementando el número de horas de trabajo requeridas para el apilado, dado que las láminas deberán manipularse con un mayor cuidado.

La tendencia actual del mercado de materiales para la producción de transformadores se denomina mercado centrado en el vendedor o “*Seller Market*”. El precio para los acopios de los principales materiales del transformador ha aumentado notoriamente respecto a años anteriores, independiente de los índices de las materias primas con los que se fabrican, algunos de estos índices los recoge [T&D Europe - The voice of Europe's grid technology providers \(tdeurope.eu\)](http://T&D Europe - The voice of Europe's grid technology providers (tdeurope.eu)).

3.1.2 Selección del círculo central

El diseño eléctrico de un transformador de potencia podrá iniciarse de diferentes formas, en la literatura de (Dasgupta, 2002) este menciona que el diseño, siempre y cuando no se tengan valores de referencia de un diseño previo parecido al objetivo, partirá de la siguiente fórmula:

$$\frac{V}{T} \propto K \sqrt{kVA} \quad (3.1)$$

Donde:

V = Voltios o tensión del devanado correspondiente (V).

T = Número de vueltas o espiras, del inglés “Turns”.

K = Factor con un valor entre 0.35 a 0.45 dependiendo del material que constituya los arrollamientos.

kVA = Potencia nominal del transformador en kVA .

Esta fórmula también es mencionada en literatura de (Nair, 2021), sin embargo, se propone únicamente como alternativa, pues tal y como se puede comprobar comenzando algunos diseños diferentes con ella, a medida que aumentamos la potencia del transformador, nos da un punto de partida más lejano al óptimo. Esto se entenderá, debido a que el desarrollo durante los diferentes años en los que fueron publicados ambos libros, se dio una gran importancia al término denominado como “*TOC*”, del inglés “*Total Ownership Cost*” del transformador, referente al coste total del transformador durante la vida útil de la máquina, desde los costes de materiales hasta las pérdidas a lo largo de todo su ciclo de vida. Será un factor de vital importancia a la hora del diseño de los transformadores, ya que los clientes buscarán el precio más económico no únicamente durante la construcción, si no el uso de la máquina también.

El proyecto se centrará en el diseño de un *LPT*, del inglés “*Large Power Transformer*”, o transformador de gran potencia, denominación que recibirán aquellos transformadores a partir de una potencia elevada. Se utilizará tal y como plantean ambos libros (Dasgupta, 2002) y (Nair, 2021), un método de aproximación, donde se tomará como punto de partida un diseño similar al objetivo.

El diseño siempre se comenzará asumiendo la hipótesis de que el núcleo es completamente circular, que, aun siendo irreal, producirá resultados reales. En caso de no tener ninguna referencia previa para unas características del transformador semejantes, se podrá utilizar la Tabla 3.1, que aparece en el libro (Nair, 2021), donde se recogen los diámetros típicos para los círculos que inscriben al núcleo magnético.

TABLA 3.1 DIÁMETROS DEL CÍRCULO DEL NÚCLEO PARA UNA POTENCIA DADA

KVA (trifásicos)	Diámetro del círculo del núcleo (mm)
25	80-92
63	95-105
100	112-122
125	125-130
160	130-135
200	138-145
250	148-157
315	155-165
400	167-174
500	178-182
630	185-192
1000	212-222
1600	230-243
3150	278-290
5000	347-358
8000	360-375
10,000	375-400
16,000	420-465
20,000	500-560
31,500	580-680
50,000	620-680
63,000	700-760
100,000	780-840

Los rangos de la Tabla 3.1 podrán variar considerablemente cuando las especificaciones del transformador, las penalidades o el coste de los principales materiales del núcleo y los arrollamientos (chapa y cobre) cambien. Siendo el objetivo final, fabricar el transformador más económico posible que cumpla con garantía la especificación del cliente y la calidad exigida.

Lo ideal, siempre que se tenga la oportunidad, será usar como referencia diseños previos de transformadores similares.

3.1.3 Selección del ancho de los escalones que conforman el núcleo

Para cualquier núcleo, independientemente del diámetro de este, el primer paso que deberá decidir el diseñador será determinar la anchura máxima permitida de las láminas de chapa a usar para la construcción de este, de tal forma que se llene la máxima cantidad de área posible del círculo que inscribe al núcleo. Para construir la sección transversal circular del núcleo en N pasos o escalones diferentes, habrá que seleccionar el mismo número N de anchos de láminas.

3.1.3.1 Ancho óptimo de los escalones del núcleo

Existe un método de cálculo que trata de maximizar el área que se rellena del círculo que inscribe al núcleo, para un número determinado de escalones, seleccionando el ancho óptimo de los escalones, (si existiese la posibilidad de un número infinito de escalones, la sección transversal del núcleo sería un círculo perfecto). Este método, descrito en el libro de (Nair, 2021), únicamente será aplicable a la construcción de transformadores de potencia de tipo columna.

Empezará representando únicamente una cuarta parte del círculo que inscribe al núcleo sobre dos ejes perpendiculares, un eje x y un eje y, siendo el radio del círculo del núcleo R, el eje x representará el espesor del apilado para las láminas de un mismo ancho hasta la mitad del núcleo mientras que el eje y representará la mitad del ancho de los escalones.

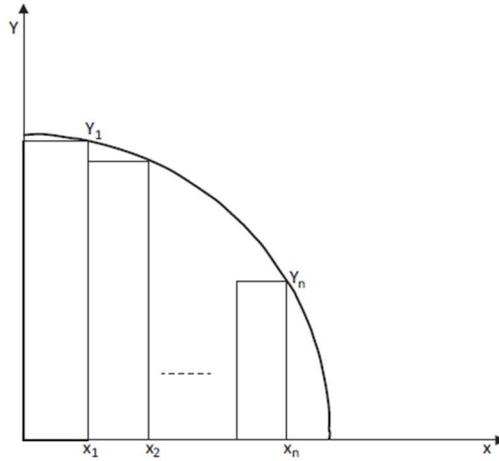


FIGURA 3.2. CUARTA PARTE DEL CÍRCULO DEL NÚCLEO.

Al representar matemáticamente la Figura 3.2, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$A_{n(Tot)} = 4[x_1y_1 + (x_2 - x_1)y_2 + \dots + (x_n - x_{n-1})y_n] \quad (3.2)$$

Donde:

$A_{n(Tot)}$ = Área total del núcleo (mm^2).

x_1, x_2, \dots, x_n = Espesor del apilado de láminas con un mismo ancho (mm).

y_1, y_2, \dots, y_n = Mitad del ancho de las láminas del núcleo (mm).

El radio será igual a aquellas sumas cuadráticas de los diferentes anchos y espesores límites de los apilados:

$$R^2 = x_i^2 + y_i^2 \quad (3.3)$$

Donde:

R = Radio del círculo que inscribe al núcleo (mm).

x_1, x_2, \dots, x_n = Espesor del apilado de láminas con un mismo ancho (mm).

y_1, y_2, \dots, y_n = Mitad del ancho de las láminas del núcleo (mm).

El área del enésimo escalón será:

$$A_i = 4[Y_i(x_i - x_{i-1})] \quad (3.4)$$

Donde:

A_i = Área del enésimo paso (mm^2).

Y_i = Mitad del ancho del enésimo paso (mm).

x_i = Espesor del apilado de las láminas que conforman el enésimo paso (mm).

x_{i-1} = Espesor del apilado previo al enésimo paso (mm).

Al despejar la ecuación (3.3) en función del ancho de los escalones:

$$Y_i = \sqrt{R^2 - x_i^2} \quad (3.5)$$

Donde:

Y_i = Mitad del ancho del enésimo paso (mm).

R = Radio del círculo que inscribe al núcleo (mm).

x_i = Espesor del apilado de las láminas que conforman el enésimo paso (mm).

El área total del núcleo será el sumatorio de todas las áreas individuales para “n” escalones:

$$A_n = 4 \sum_{i=1}^n (x_i - x_{i-1}) \sqrt{R^2 - x_i^2} \quad (3.6)$$

Donde:

A_n = Área del total del núcleo (mm²).

x_i = Espesor del apilado de las láminas que conforman el enésimo paso (mm).

x_{i-1} = Espesor del apilado previo al enésimo paso (mm).

R = Radio del círculo que inscribe al núcleo (mm).

De esta forma, el resultado del cálculo del área del núcleo dependerá únicamente de una variable independiente, en este caso x_i . Para maximizar la función se deberán aplicar las siguientes condiciones al conjunto de ecuaciones resultantes de desarrollar la ecuación (3.6) según el número de pasos:

$$\text{Condiciones para maximizar la función} \rightarrow \begin{cases} \frac{\delta A_n}{\delta x_i} = 0 \\ \frac{\delta^2 A_n}{\delta x_i^2} < 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

Esto conducirá a un sistema de ecuaciones no lineales que requerirán de métodos iterativos para hallar su solución. La ecuación por resolver será la siguiente:

$$(R^2 - x_i^2)[x_{i+1}^2 - x_i(3x_i - 2x_{i-1})] + x_i^2(x_i - x_{i-1})^2 = 0 \quad (3.8)$$

Donde:

x_i = Espesor del apilado de las láminas que conforman el enésimo paso (mm).

x_{i-1} = Espesor del apilado previo al enésimo paso (mm).

R = Radio del círculo que inscribe al núcleo (mm).

Aplicar la ecuación (3.8) resultará en un sistema de n ecuaciones desde $i = 1$, hasta $i = n$. Será una buena práctica normalizar la ecuación dividiendo entre R^4 , de tal forma que la solución obtenida aparezca en función a la relación de x/R .

En la Tabla 3.2, obtenida del libro de (Nair, 2021) se podrán observar los factores resultantes de la ecuación (3.8), para un número mínimo de 3 escalones, hasta un máximo de 11.

TABLA 3.2 FACTORES DE PASO Y LLENADO DEL ÁREA BRUTA.

N.º de Pasos	Área Bruta (%)	Factor de los pasos										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	85.1	0.906	0.707	0.424	-	-	-	-	-	-	-	-
5	90.8	0.949	0.846	0.707	0.534	0.314	-	-	-	-	-	-
7	93.4	0.967	0.901	0.814	0.707	0.581	0.434	0.254	-	-	-	-
9	94.8	0.976	0.929	0.868	0.762	0.707	0.605	0.497	0.370	0.216	-	-
11	95.8	0.982	0.943	0.893	0.832	0.762	0.707	0.648	0.555	0.450	0.333	0.190

Las anchuras de los escalones calculadas anteriormente darán diferentes anchuras para diferentes diámetros de núcleo. El número de datos a manejar será muy elevado. Por lo tanto, las anchuras de los escalones se estandarizarán a múltiplos de 5 o 10mm.

La combinación óptima de anchuras para los escalones del núcleo podrá obtenerse al calcular las anchuras utilizando los factores de la Tabla 3.2 y redondeando a 5 o 10 mm más próximos, según el plan de optimización deseado.

3.1.4 Cálculo del área bruta y neta del núcleo

Ahora al representar el círculo completo que inscribe al núcleo, para un determinado número de pasos:

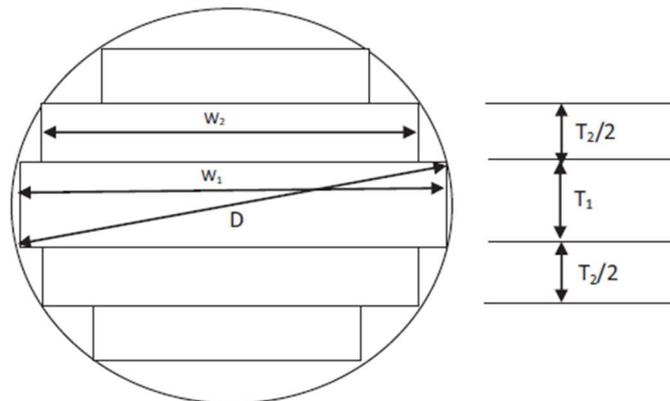


FIGURA 3.3. CÍRCULO DEL NÚCLEO CON UN NÚMERO FINITO DE PASOS.

Donde:

D = Diámetro del círculo que inscribe al núcleo (mm).

W_1, W_2, \dots, W_n = Ancho del escalón del núcleo, del inglés "width" (mm).

T_1, T_2, \dots, T_n = Espesor del apilado que conforma el escalón, del inglés "thickness" (mm).

El área bruta que conforma el núcleo se obtendrá de la fórmula (3.9):

$$A_{n(bruta)} = W_1 T_1 + W_2 T_2 + \dots + W_n T_n \quad (3.9)$$

Donde:

$A_{n(bruta)}$ = Área total bruta del núcleo (mm²).

W_1, W_2, \dots, W_n = Ancho del escalón del núcleo, del inglés "width" (mm).

T_1, T_2, \dots, T_n = Espesor del apilado que conforma el escalón, del inglés “thickness” (mm).

Se podrá calcular uno a uno el espesor del apilado de los diferentes pasos siguiendo:

$$T_1 = \sqrt{D^2 - W_1^2} \quad (3.10)$$

$$T_2 = \sqrt{D^2 - W_2^2} - T_1 \quad (3.11)$$

$$T_3 = \sqrt{D^2 - W_3^2} - (T_1 + T_2) \quad (3.12)$$

El espesor para el paso enésimo será:

$$T_n = \sqrt{D^2 - W_n^2} - \sum_{i=1}^{n-1} T_i \quad (3.13)$$

Donde:

D = Diámetro del círculo que inscribe al núcleo (mm).

W_1, W_2, \dots, W_n = Ancho del escalón del núcleo, del inglés “width” (mm).

T_1, T_2, \dots, T_n = Espesor del apilado que conforma el escalón, del inglés “thickness” (mm).

El área neta total del núcleo se obtendrá del área bruta total del núcleo multiplicada por un factor de apilamiento, para el “CRGO Steel” se usará un factor de 0.97.

$$A_{n(neta)} = A_{n(bruta)} \times K \quad (3.14)$$

Donde:

$A_{n(neta)}$ = Área total neta del núcleo (mm²).

$A_{n(bruta)}$ = Área total bruta del núcleo (mm²).

K = Factor de apilamiento de valor 0.97 para el CRGO Steel.

3.1.4.1 Cálculo del espesor de la pila de escalones

El grosor del apilado de cada escalón se calculará teniendo en cuenta los siguientes factores:

1. Espesor del laminado.
2. Tipo de diseño del núcleo: escalonado “Step-lap” o normal.

Los espesores estándar por utilizar normalmente serán 0,30, 0,27 o 0,23mm, esto dependerá según el proveedor del material y la especificación del cliente, existen espesores comerciales de hasta 20mm.

Los espesores de la pila T_1, T_2, \dots, T_n deberán redondearse a múltiplos enteros del espesor estándar seleccionado. El número de laminaciones se redondeará al número entero inferior, de manera que el área del núcleo no sobrepase el límite del círculo que lo inscribe núcleo.

3.1.5 Tipos de apilado del núcleo

3.1.5.1 Apilado normal

En el apilado normal, Figura 3.4(a), las láminas de chapa se apilarán de manera uniforme una encima de otra, de forma que las juntas en las esquinas estarán alineadas unas con otras. Es un método simple de apilar lo que lo hace fácil de implementar tanto a la fabricación en taller como al cálculo analítico para el diseño eléctrico del transformador.

3.1.5.2 Apilado *Step-lap*

En este método de apilado, Figura 3.4(c), más avanzado que el normal, las láminas de chapa se apilarán de forma escalonada en grupos de varias láminas normalmente entre 5 y 8, esto hará que las juntas entre las láminas no se alineen directamente una encima de otra, si no que sigan el patrón solapado. Este será método más costoso de fabricar y aumentará considerablemente la dificultad de la implementación para un diseño eléctrico.

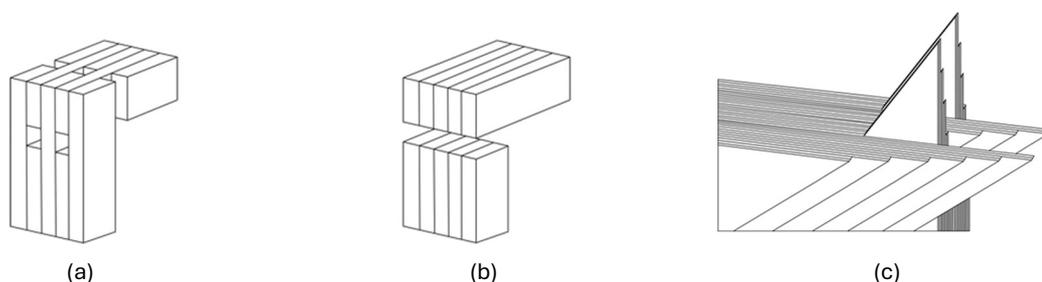


FIGURA 3.4. TIPOS DE APILADO DE CHAPA (A) NORMAL, (B) BUTT (C) STEP-LAP.

Existen diferentes formas de modelar los núcleos apilados en esta forma, algunas de ellas son el método Gaussiano obtenido por (Hernández, de León, Cañedo, & Olivares-Galván, 2010) y el FEM, en el estudio antes mencionado se compararon numerosas simulaciones por elementos finitos y un modelo Gaussiano, llegando a la conclusión de que ambos métodos llegaban a resultados similares, con unas diferencias del 6% entre uno y otro, sin embargo el modelo Gaussiano desarrollado reducía la carga de simulación en la CPU en gran medida. Por tanto, hallaron un método simple y eficiente que podría ser aplicado al diseño eléctrico de los transformadores.

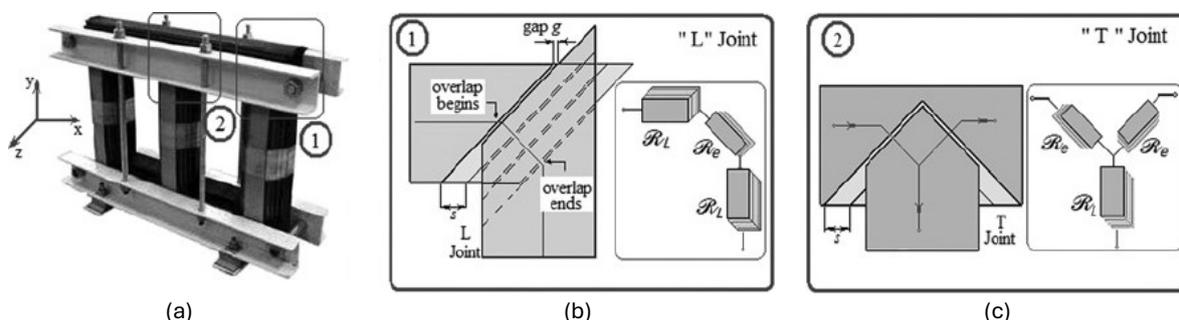


FIGURA 3.5. (A) NÚCLEO DE UN TRANSFORMADOR DE 3 COLUMNAS. (B) APILADO STEP-LAP DE UNA ESQUINA DEL NÚCLEO. (C) APILADO STEP LAP DE LA JUNTA DE LA COLUMNA CENTRAL.

Otro estudio de (Kefalas, Loizos, & Kladas, 2011) mostró un método implementado un código FE que integraba el modelo vectorial de histéresis para el cálculo de las juntas en el apilado en *step-lap*, en este se puede observar la Figura 3.6, donde se observa un ejemplo claro de este apilado.

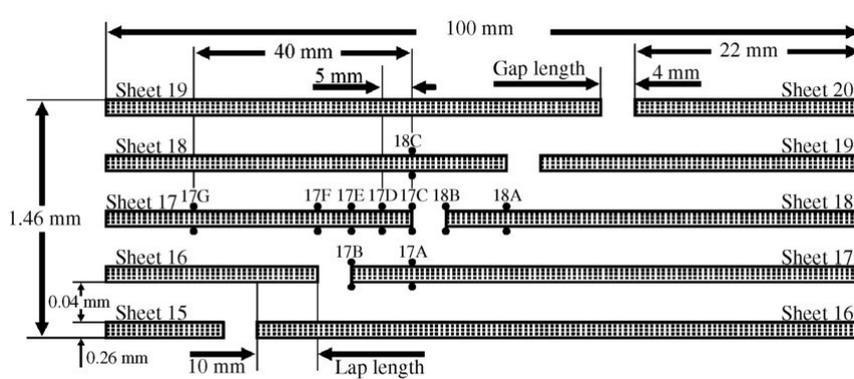


FIGURA 3.6. ESQUEMA DE APILADO STEP-LAP.

3.1.5.3 Diferencias entre apilados

El corte durante la fabricación de las láminas del núcleo no será perfecto, en las juntas de unión entre una y otra habrá imperfecciones que dejarán algunos espacios entre ellas, dificultando el paso del flujo magnético y aumentando en tanto la reluctancia.

Cuando el flujo magnético en el núcleo se aproxime a los espacios de aire en las esquinas y las juntas del yugo, el flujo tendrá dos opciones, pasar a través del espacio con aire de la junta, donde la permeabilidad magnética relativa del aire es muy reducida (en torno a 1) o atravesar el aislamiento entre laminas y pasar a través de la lámina más cercana en perpendicular a la dirección de la orientación de los granos del laminado, donde la permeabilidad magnética relativa es del orden de 10^4 y la reluctancia magnética considerablemente menor.

El flujo siempre seleccionará el camino de menor reluctancia, sin embargo, el acero CRGO se saturará a una densidad de flujo magnético de aproximadamente 2T.

Situando un caso donde la densidad de flujo de trabajo sea 1.7T, si ahora el flujo de una lámina en un apilado normal ha de circular por cualquiera de sus láminas adyacentes, el flujo por la lámina que comprenda la unión del flujo propio y el añadido será del doble el flujo de trabajo de una sola lámina, 3.4T, lo que sobrepasará en gran medida el punto de saturación del acero al silicio.

El flujo excesivo que deberá atravesar el espacio con aire contribuirá a la pérdida de f.e.m. y requerirá de una corriente de excitación mayor para cubrir las pérdidas que ocurran al intentar alcanzar la densidad de flujo magnético de diseño en el núcleo. Además, la saturación excesiva de la chapa magnética en las juntas y esquinas generará una mayor magnetostricción, denominada así la propiedad que tienen los materiales ferromagnéticos para cambiar su forma al encontrarse en presencia de un campo magnético. Las vibraciones en forma de sonido serán causadas por la frecuencia de las fluctuaciones del campo magnético, por tanto, la saturación del núcleo será la principal fuente de ruido en el transformador tal y como recogen (Hsu, Huang, Hsieh, Adireddy, & Chrisey, 2017), donde mostraron que el nivel de ruido emitido por los transformadores estará generado por una combinación de la deformación por magneto constricción en el núcleo y de fuerzas electromagnéticas en los devanados y partes metálicas como el tanque y las tapas de los diferentes elementos.

Los niveles de ruido en los transformadores se determinarán mediante aplicación de la norma (UNE-IEC 60076-10-1, 2007).

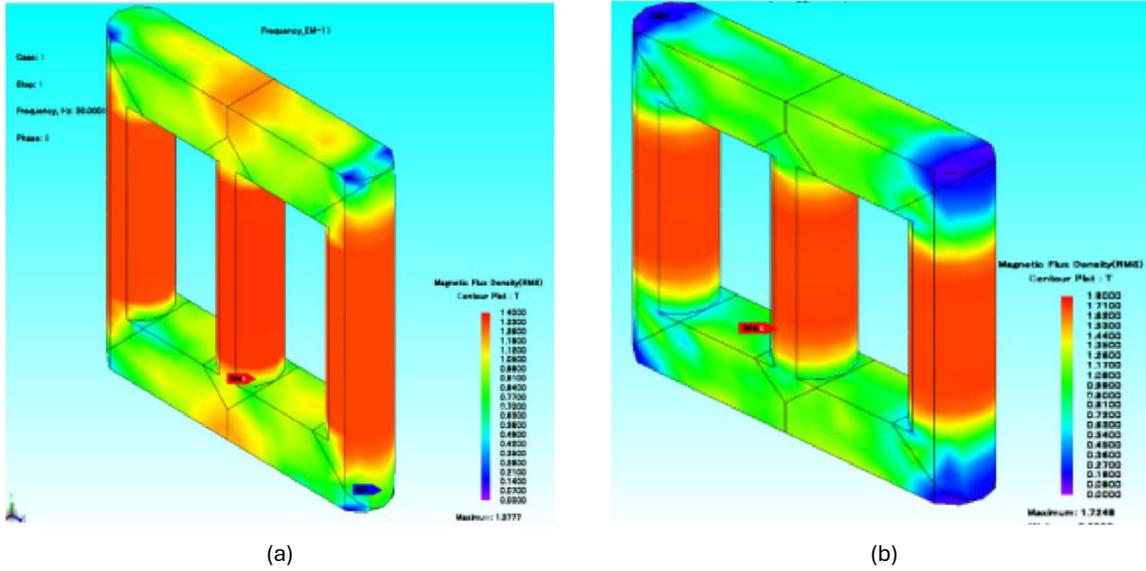


FIGURA 3.7. SIMULACIÓN FEA, (A) NO-LOAD BM, (B) FULL-LOAD BM.

En el caso del apilado en *step-lap* el flujo que se aproxima a las juntas y los espacios con aire tiene muchas más posibilidades (caminos magnéticos) para pasar de una lámina a la siguiente tal y como se muestra en la Figura 3.8, donde se pueden observar hasta 6 posibilidades de cruces magnéticos frente a 2 en el apilado convencional. Se consigue así una distribución del flujo más homogénea en las juntas y las esquinas del núcleo, la mayor parte del flujo evitará las separaciones con aire. Como resultado de este apilado la contribución a las pérdidas del núcleo será menor y la densidad de flujo se mantendrá debajo de los límites de saturación, además la corriente de excitación y el ruido también disminuirán.

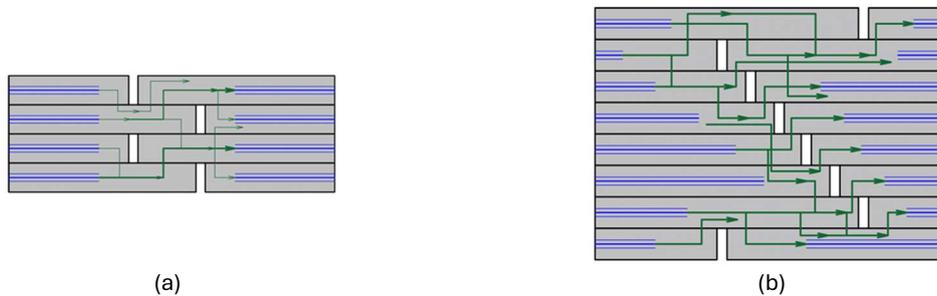


FIGURA 3.8. CAMINOS MAGNÉTICOS EN LAS JUNTAS (A) APILADO NORMAL Y (B) APILADO STEP-LAP.

4. Diseño de los arrollamientos

4.1 Cálculo de los voltajes por vuelta

Uno de los términos fundamentales, en el diseño de los arrollamientos de un transformador de potencia, es la relación que existe entre la tensión en un arrollamiento y el número de vueltas que da un mismo conductor para conformarlo, esto es, equivalente a expresar la relación entre la tensión de fase entre el número de espiras del devanado.

Los voltios por vuelta o tensión por espira pueden ser calculados mediante la ecuación de la f.e.m.:

$$V \equiv f.e.m. = 4 K_f f T \Phi_{m\acute{a}x} \quad (4.1)$$

Donde:

V = Tensión de fase (V).

$f.e.m.$ = Fuerza electromotriz (V).

K_f = Factor de forma para la tensión.

T = Número de vueltas o espiras en un devanado.

f = Frecuencia de la red que alimenta la máquina (Hz).

$\Phi_{m\acute{a}x}$ = Máximo flujo magnético (Tm^2).

Además, con ayuda de la ecuación de densidad de flujo:

$$B_{m\acute{a}x} = \frac{\Phi_{m\acute{a}x}}{A} \quad (4.2)$$

Donde:

$B_{m\acute{a}x}$ = Máxima densidad de flujo magnético (T).

$\Phi_{m\acute{a}x}$ = Máximo flujo magnético (Tm^2).

A = Área de la sección transversal (m^2).

Se puede modificar la ecuación (4.1) de manera que relacione directamente el área de la sección transversal del círculo que inscribe al núcleo ferromagnético, con la frecuencia y la densidad de flujo máxima, expresando dicha ecuación:

$$\frac{V}{T} = 4 K_f f B_{m\acute{a}x} A \quad (4.3)$$

Donde:

V/T = Voltios por vuelta.

K_f = Factor de forma para la tensión.

f = Frecuencia de la red que alimenta la máquina (Hz).

$B_{m\acute{a}x}$ = Máxima densidad de flujo magnético (T).

A = rea de la sección transversal (m^2).

Siempre y cuando la tensión que alimente la máquina sea alterno senoidal el factor de forma tendrá un valor de 1.11. Se puede, por tanto, reescribir la ecuación (4.3) de forma que dependa de un número mínimo de términos.

$$\frac{V}{T} = 4.44 f B_{m\acute{a}x} A \quad (4.4)$$

Donde:

V/T = Voltios por vuelta.

f = Frecuencia de la red que alimenta la máquina (Hz).

$B_{m\acute{a}x}$ = Máxima densidad de flujo magnético (T).

A = rea de la sección transversal (m^2).

Antes de iniciar el cálculo, se debe revisar que se cumplan las siguientes condiciones para el valor de la densidad de flujo máxima ($B_{m\acute{a}x}$):

1. En caso de que el cliente especifique máxima densidad de flujo máxima admisible, utilizaremos el valor especificado por este para los cálculos.
2. En caso de que cliente especifique el límite saturación para la densidad de flujo y el límite de sobre flujo, se utilizará la ecuación (4.5) para calcular la densidad de flujo máxima admisible:

$$B_{m\acute{a}x} = \frac{B_{sat}}{\text{Límite de sobre flujo unitario}} \quad (4.5)$$

Donde:

$B_{m\acute{a}x}$ = Máxima densidad de flujo magnético (T).

B_{sat} = Densidad de flujo de saturación (T).

3. Cuando el cliente no especifique la densidad de flujo de saturación, se utilizará el valor de 1.9 Tesla como la máxima densidad de flujo de saturación.
4. Cuando se especifique la capacidad de soportar sobretensiones de corta duración, se deberá comprobar además el requisito de sobre flujo antes de fijar la densidad de flujo en servicio. Si la sobretensión de corta duración limita al 40% por encima de la tensión nominal durante 5 segundos y al 25% por encima de la tensión nominal durante 1 minuto, la densidad de flujo en servicio puede decidirse según lo indicado anteriormente.
5. La densidad de flujo en servicio obtenida anteriormente mediante cálculo analítico puede requerir una reducción. Si el valor de capitalización por penalidades en vacío es considerablemente alto o si el nivel de límite de ruido que debe garantizarse es bajo.

La densidad de flujo deberá limitarse en zonas cercanas al círculo polar rtico, en aquellas localizaciones donde se observe un flujo magnético causado por los vientos solares que

alcanzan la superficie de la tierra con regularidad, tal y como observaron (Shiota, y otros, 2012), la densidad de flujo máxima se limitará a un valor inferior al usual como medida de protección. Los vientos solares no son más que ondas electromagnéticas provenientes del astro, que, al llegar a la tierra inducirán en componentes metálicos un flujo magnético continuo, añadiendo una componente de corriente continua al transformador en servicio.

4.2 Cálculo de las tensiones y corrientes de fase

Es mandatorio que, el cliente, siempre determine en la especificación facilitada al fabricante las tensiones de línea, la interconexión de los arrollamientos y su horaria, a estos dos últimos términos agrupados se les conoce como grupo vectorial. Así se podrán obtener los valores de tensiones e intensidades de fase correspondientes a los devanados del transformador y necesarios su diseño.

Los devanados con conexiones en zig-zag estarán exentos de su cálculo a lo largo de este proyecto. Esto debido principalmente a:

1. A pesar de que la obtención mediante cálculo analítico de los valores de tensión e intensidad en los devanados en zig-zag es simple y ha sido cursada por los estudiantes, la complejidad que le añade al proceso de diseño eléctrico del transformador una vez se avanza en este es muy elevada. Dado que añade un número de opciones y consecuentemente variables diferentes elevado, se ha tenido que acotar el grueso del proyecto fuera de este alcance o de lo contrario, hubiese sido poco probable completar el diseño eléctrico de la máquina estática en la duración trabajo de fin de grado.
2. Si bien en los transformadores MPT, del inglés, “*Medium Power Transformers*” o Transformadores de distribución, son comúnmente usados los devanados en zig-zag, en los LPT no es usual verlos. Por tanto, se han tenido en consideración las dificultades técnicas más comunes y recurrentes a esta clase de transformadores.

El enfoque de este proyecto es concretamente el diseño eléctrico de los LPT, se evitará en la medida de lo posible adentrarse en el estudio o diseño de casos excepcionales. Se limitará, por tanto, a calcular las configuraciones en delta o triángulo y estrella, para un transformador trifásico.

Cabe destacar antes de comenzar, que el cálculo de todas las tensiones es en vacío. El diseñador deberá tener especial cuidado cuando la tensión dada en la especificación por parte del cliente sea a plena carga, con un factor de potencia determinado, en cuyo caso la tensión en vacío del devanado secundario, se calculará teniendo en cuenta la regulación, utilizando esa tensión en vacío para calcular el número de espiras del devanado secundario. Esta situación sólo se dará en casos especiales, el valor de tensión garantizado seguirá siendo la tensión en vacío.

4.2.1.1 Devanado conectado en triángulo o delta (d)

$$V_f = U_L \quad (4.6)$$

Donde:

V_f = Tensión de fase (V).

U_L = Tensión de línea (V).

$$I_L = \frac{S_{m\acute{a}x}}{\sqrt{3} U_L} \quad (4.7)$$

Donde:

I_L = Corriente de línea (A).

$S_{m\acute{a}x}$ = Potencia máxima aparente (VA).

U_L = Tensión de línea (V).

Al usar como dato inicial el de la especificación, este suele venir en kVA o MVA, se deberá multiplicar por 10^3 o por 10^6 en los diferentes casos.

$$I_f = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \quad (4.8)$$

Donde:

I_L = Corriente de línea (A).

I_f = Corriente de fase (A).

4.2.1.2 Devanado conectado en estrella (w,y,e)

$$V_f = \frac{U_L}{\sqrt{3}} \quad (4.9)$$

Donde:

V_f = Tensión de fase (V).

U_L = Tensión de línea (V).

$$I_L = \frac{S_{m\acute{a}x}}{\sqrt{3} U_L} \quad (4.10)$$

Donde:

I_L = Corriente de línea (A).

$S_{m\acute{a}x}$ = Potencia máxima aparente (VA).

U_L = Tensión de línea (V).

$$I_f = I_L \quad (4.11)$$

Donde:

I_L = Corriente de línea (A).

I_f = Corriente de fase (A).

4.2.1.3 Tomas de regulación

Cuando se disponga de tomas de regulación, se deberá calcular las corrientes de línea y de fase correspondientes a las posiciones de las tomas más alta, nominal y más baja, siendo magnitudes importantes de cara a los cálculos posteriores. Adicionalmente, es usual calcular las mismas magnitudes para todas las posiciones de las tomas.

4.3 Cálculo del número de vueltas o espiras

Para cualquier diseño, lo más común será comenzar calculando el número de vueltas de los conductores en el lado de baja tensión y, a partir de este valor, calcular número de vueltas en el devanado de alta tensión. Existen desviaciones cuando el transformador posee características únicas, como puede ser un devanado de regulación, en ese caso es posible calcular primero el número de vueltas de dicho devanado, para cada una de las diferentes tomas de regulación, ajustando la densidad de flujo magnético máxima hasta que el error cometido en el número de vueltas y por tanto, en el porcentaje de la tensión regulada sea el mínimo. En el caso de este proyecto procederemos siempre de la primera forma.

4.3.1.1 Vueltas en el devanado BT

Siempre que el devanado esté conectado en estrella o triángulo el número de vueltas se calculará de la siguiente forma:

$$N_{BT} = \frac{V_{f-BT(en\ vacío)}}{\overline{T}} \quad (4.12)$$

Donde:

N_{BT} = Número de espiras en el lado de BT.

$V_{f-BT(en\ vacío)}$ = Tensión de fase en el lado BT en vacío (V).

\overline{T} = Voltios por vuelta calculados de la ecuación de la f.e.m.

Al calcular el número de vueltas mediante la ecuación (4.12), el valor normalmente no será un número entero. Se deberá redondear el número de vueltas al número entero más próximo, siempre cumpliendo los siguientes parámetros:

- Cuando la densidad de flujo real se calcule sobre el número de vueltas redondeado, la densidad de flujo no deberá superar los valores obtenidos según del cálculo de voltios por vuelta previo. Para ello debemos seleccionar siempre el número de vueltas entero inmediatamente superior al obtenido mediante la ecuación (4.12).
- Será preferible seleccionar un número de vueltas par para el bobinado de BT, siempre y cuando el número de capas del bobinado de BT sea par. Cuando se utilice un bobinado de capas con un número impar de capas, un bobinado helicoidal de una sola capa o bobinado de discos, el número de vueltas puede ser par o impar indistintamente.

4.3.1.2 Vueltas en el devanado AT

Siempre que el devanado de AT sea en triángulo o estrella, habiendo calculado previamente el número de vueltas en el devanado de BT, se podrá calcular el número de vueltas del devanado AT con ayuda de la ecuación (4.13):

$$N_{AT} = N_{BT} \left(\frac{V_{f-AT}(\text{en vacío} - \text{toma de regulación seleccionada})}{V_{f-BT}(\text{en vacío})} \right) \quad (4.13)$$

Donde:

N_{AT} = Número de espiras en el lado de AT.

N_{BT} = Número de espiras en el lado de BT.

$V_{f-AT}(\text{en vacío} - \text{toma de regulación seleccionada})$ = Tensión de fase en el lado AT en vacío, para una posición de las tomas de regulación determinada (V).

$V_{f-BT}(\text{en vacío})$ = Tensión de fase en el lado BT en vacío (V).

Se deberá redondear el valor obtenido al número entero más cercano, independientemente de si este es el superior o el inferior, además, se deberá tener en cuenta preferentemente la misma consideración respecto al tipo de arrollamiento y el número de capas que se tuvo a la hora de calcular el número de vueltas en el devanado BT.

4.3.1.3 Vueltas en las tomas de regulación

Los transformadores suelen disponer de tomas de regulación para modificar la relación de transformación entre las tensiones primaria y secundaria, para la selección de las diferentes tomas se hace uso de un cambiador de tomas “*Tap-changer*” en inglés. Estos pueden clasificarse tanto en lineales como rotativos, en carga o en vacío, fuera o dentro de la cuba del transformador, etc. En el caso de un LPT lo más común es encontrar el cambiador de tomas dentro de la propia cuba del transformador y, además, posicionados en el lado de AT, esto es debido a que la intensidad que han que soportar los contactos es mucho menor que la que circularía a través de los estos si estuviese situado en el lado de BT.

En la realidad, al depender totalmente de una especificación por parte del cliente, este puede requerir las tomas de regulación en cualquier devanado, AT, BT o incluso en un devanado terciario, auxiliar o de compensación si lo hubiese, pudiendo configurarse un LPT incluso con varias tomas de regulación y de diferente tipo cada una de estas, un ejemplo sería un transformador con cambiador de tomas OLTC en el lado de AT y DETC en el lado de BT, otro ejemplo de caso único es encontrar un solo OLTC en el devanado terciario.

Los cambiadores de tomas se pueden clasificar según el tipo de cambio que realicen:

- *On-load Tap Changer* (OLTC): El cambio en la toma se realiza bajo condiciones de carga.
- *De-energized Tap Changer* (DETC): El cambio en la toma se realiza en vacío o tras de-energizar el transformador. También puede denominarse *Off-Circuit Tap Changer* (OCTC), aunque ciertos fabricantes prefieren separar como categorías diferentes.

La ventaja del OLTC es la habilidad de dotar al transformador de una herramienta para controlar la tensión, la regulación, el flujo de corriente y finalmente, el flujo de potencia.

DEETAP® DU

Rotating de-energized tap-changer for maximum power



DEETAP® DU is a rotating de-energized tap-changer for adjusting the voltage of oil-insulated transformers up to maximum power ranges. Unlike on-load tap-changers, with de-energized tap-changers, the desired winding tap is adjusted with the transformer turned off.

(a)

VACUTAP® VR®

The specialist for maximum power



Universal on-load tap-changer in vacuum technology for transformers with special power requirements. VACUTAP® VR® is the most powerful on-load tap-changer in vacuum technology. It is at home wherever performance and safety are needed in grid or industrial operations.

(b)

FIGURA 4.1. INTERCAMBIADORES DE TOMAS, (A) INTERCAMBIADOR DETC, (B) INTERCAMBIADOR OLTC.

Según el principio de funcionamiento los cambiadores OLTC pueden clasificarse como:

- Resistivos: Los más comunes actualmente, pueden fabricarse tanto como conmutador de desvío o como conmutador selector.
- Reactivos: Usados comúnmente en países con estándar ANSI, normalmente para regular el lado de baja del transformador.
- Electrónicos: Tecnología emergente.



VACUTAP® VR®

Universal on-load tap-changer in vacuum technology for transformers with special power requirements. VACUTAP® VR® is the most powerful on-load...

(a)



VACUTAP® RMV-II

Our first reactor-type on-load tap-changer with vacuum interrupters, developed in the 1980s specially for use in North America. VACUTAP® RMV impresses...

(b)



VACUTAP® VBO®

VACUTAP® VBO® is the first resistor-type, bolt-on on-load tap-changer (OLTC) in vacuum technology offering all advantages of this established...

(c)

FIGURA 4.2. INTERCAMBIADORES DE TOMAS, (A) TIPO RESISTIVO, (B) TIPO REACTIVO, (C) TIPO ELECTRÓNICO.

Según la localización:

- Dentro del tanque.
- Fuera del tanque.



VACUTAP® VR®

Universal on-load tap-changer in vacuum technology for transformers with special power requirements. VACUTAP® VR® is the most powerful on-load...

(a)



VACUTAP® RMV-II

Our first reactor-type on-load tap-changer with vacuum interrupters, developed in the 1980s specially for use in North America. VACUTAP® RMV impresses...

(b)

FIGURA 4.3. INTERCAMBIADORES DE TOMA, (A) TIPO IN TANK, (B) TIPO OFF TANK.

Según el tipo de aislamiento:

- Aislamiento de aceite.
- Aislamiento de vacío.



OILTAP® G

Universal on-load tap-changer in oil technology for high-power transformers. OILTAP® G is the most powerful on-load tap-changer in oil technology. It...

(a)



VACUTAP® VR®

Universal on-load tap-changer in vacuum technology for transformers with special power requirements. VACUTAP® VR® is the most powerful on-load...

(b)

FIGURA 4.4. INTERCAMBIADORES DE TOMA, (A) TIPO DE AISLAMIENTO EN ACEITE, (B) TIPO DE AISLAMIENTO EN VACÍO.

Además, los tipos de conmutación de las tomas de regulación se dividen en:

- Conmutación Lineal: No muy común en los LPT, con la menor cantidad de regulación posible, hace que el diseño tanto del transformador como del cambiador de tomas sea simple.
- Conmutación Más/Menos (*Plus/Minus*): El más común, combina una regulación aditiva con una sustractiva, necesita de un selector entre estas dos regulaciones “*Change Over Selector*” (COS).
- Conmutación Gruesa/Fina (*Coarse/Fine*): La menos común de todas, posee una inserción de un devanado grueso en conjunto a un COS.

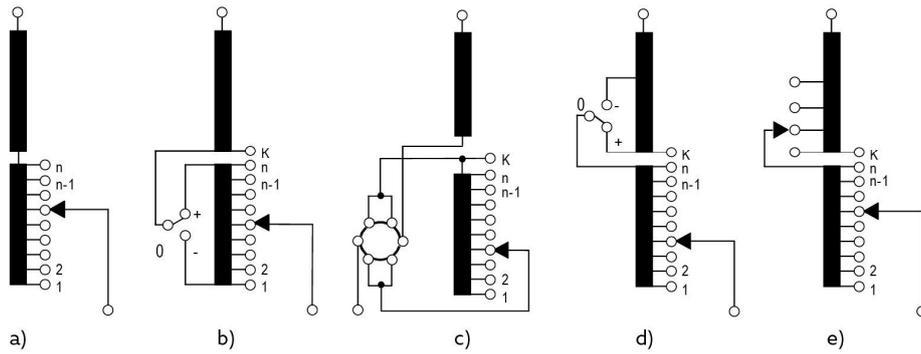


FIGURA 4.5 CONEXIONES BÁSICAS DE LOS DEVANADOS DE REGULACIÓN (A) LINEAL, (B) CONMUTADOR INVERSOR SIMPLE, (C) CONMUTADOR INVERSOR MÚLTIPLE, (D) CONMUTADOR DE CAMBIO GRUESO SIMPLE, (E) CONMUTADOR DE CAMBIO GRUESO MÚLTIPLE.

Además, dispondremos de uno o varios cambiadores de tomas dependiendo de la interconexión de los devanados:

- Devanado conectado en estrella (Y): Para devanados de dos devanados, la regulación más común es en el final neutro del devanado. Esta solución facilita la regulación de tensión más económica, generalmente se realiza con aislamiento gradual combinado con cambiador compacto en el punto neutro trifásico.

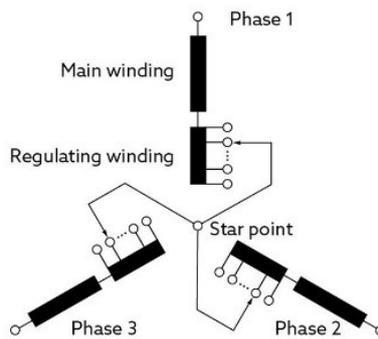


FIGURA 4.6. CONFIGURACIÓN TÍPICA DE DEVANADOS DE REGULACIÓN CONECTADOS EN ESTRELLA.

- Devanado conectado en triángulo (Delta): Podrán existir de 2 a 3 cambiadores de tomas según la localización del devanado de regulación y la configuración de sus polos.

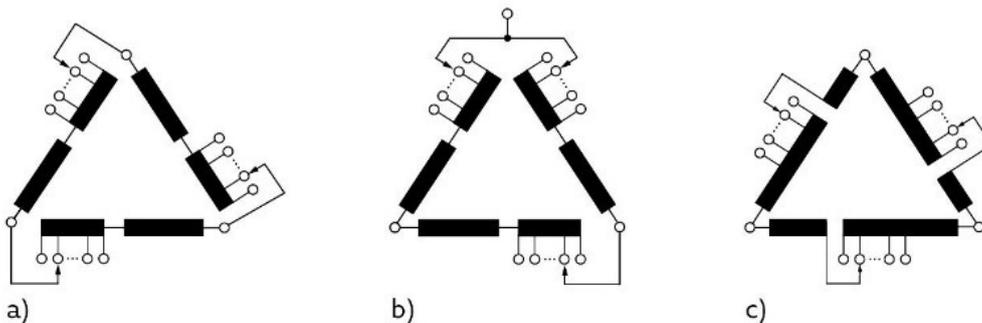


FIGURA 4.7. CONFIGURACIONES TÍPICAS DE DEVANADOS DE REGULACIÓN CONECTADOS EN TRIÁNGULO.

El diseño de este proyecto estará limitado únicamente a encontrar cambiador o no, para la posición de las tomas de regulación en el lado de AT, disminuyendo así la cantidad de variables a modificar.

Antes de iniciar el diseño, se debe comprobar que en la especificación nos aporta la siguiente información relativa a la regulación del transformador:

1. El tipo de cambiador de tomas para las tomas de regulación: OLTC, DETC.
2. Rango de las tomas de regulación: En porcentaje, el valor máximo de la regulación en ambas direcciones.
3. Paso de las tomas de regulación: En tanto por ciento, es el incremento de una toma a la siguiente.
4. Número total de tomas de regulación.
5. El tipo de flujo en las tomas de regulación: CFVV, VFVV, CbVV.

Los principales fabricantes de cambiadores de tomas son las empresas Hitachi Energy, antigua ABB PowerGrids y Reinhausen cuyos portafolios de “*Tap-changers*” se muestran en los siguientes enlaces:

- [Transformer Tap-changers | Hitachi Energy](#)
- [On-Load Tap-Changers: Reinhausen](#)

Destaca esta última empresa como la propietaria de la tecnología VACUTAP®, cuyo uso está ampliamente extendiendo al punto de que una gran proporción de los clientes exigen en su especificación su utilización o la de un cambiador de tomas similar en especificaciones.

4.3.1.4 Categorías de variación de la tensión en las tomas de regulación

La variación de la tensión en las tomas de regulación puede clasificarse en 3 tipos distintos según la forma en la que se realice:

4.3.1.4.1 VARIACIÓN DE TENSIÓN CON FLUJO CONSTANTE (CFVV)

Se denomina “*Constant Flux Voltage Variation*” o CFVV a la variación de tensión que se produce cuando la tensión es igual a la tensión nominal para cualquier devanado donde no se sitúen las tomas de regulación y a la tensión nominal multiplicada por el factor de regulación para el devanado regulado, es decir, cuando se proporcionen tomas de regulación en el devanado donde se produce la variación de tensión, los voltios por vuelta permanecen constantes, independientemente de las posiciones en las que se sitúen las tomas de regulación, de ahí el término de flujo constante.

Para el cálculo de vueltas del devanado regulado según la toma seleccionada, en el caso de un “CFVV” las tomas de regulación se instalarán en el devanado donde se requiera dicha variación de tensión, se calculará el número de vueltas en dicho devanado de regulación para una toma de regulación determinada de la siguiente forma:

$$V_{tap} = \frac{V_{f-Devanado\ regulación}}{\bar{T}} \quad (4.14)$$

Donde:

V_{tap} = Vueltas requeridas en la toma seleccionada.

$V_{f-Devanado\ regulaci3n}$ = Tensi3n de fase del devanado correspondiente a la toma seleccionada (V).

V/T = Voltios por vuelta calculados de la ecuaci3n de la f.e.m. (V/n3mero de vueltas).

Deber3 redondearse el n3mero de vueltas al n3mero entero m3s pr3ximo.

4.3.1.4.2 VARIACI3N DE TENSI3N CON FLUJO VARIABLE

Se denomina “*Variable Flux Voltage Variation*” o (VFVV) a la variaci3n de tensi3n que sucede cuando la tensi3n en las tomas de regulaci3n es constante, para el devanado donde se sit3en las tomas regulaci3n, e igual a la tensi3n de ese lado de la red. 3nicamente se puede variar la relaci3n de transformaci3n, existe, por tanto, una variaci3n de la tensi3n para un devanado donde no est3en situadas las tomas de regulaci3n.

Manteniendo la tensi3n constante en el devanado con tomas de regulaci3n y variando la relaci3n de transformaci3n, var3a el n3mero de vueltas del devanado de regulaci3n para los cuales circula un flujo a una tensi3n constante, de esta forma se var3an los voltios por vuelta, de ah3 que se denomine variaci3n de tensi3n con flujo variable. Adem3s, al variar los voltios por vuelta, la densidad de flujo en el n3cleo variar3 en la misma medida con cada posici3n de las tomas de regulaci3n.

Para calcular el n3mero de vueltas para “VFVV” se debe entender que, con un n3mero de vueltas mayor en el devanado de las tomas de regulaci3n, la tensi3n de salida ser3 m3s baja, y viceversa, con un n3mero menor de vueltas en el devanado de las tomas, la tensi3n de salida ser3 m3s alta.

4.3.1.4.3 VARIACI3N DE TENSI3N COMBINADA

Esta clase de variaci3n “*Combined Voltage Variation*” o (CbVV), combina las otras dos previamente mencionadas, de la siguiente forma:

- Por debajo de un determinado factor de regulaci3n, la tensi3n de la toma del devanado sin tomas de regulaci3n es constante y por encima de este factor, las tensiones de las tomas de regulaci3n de los devanados con toma son constantes.
- La diferencia en el n3mero de espiras de tomas adyacentes se denomina espiras por paso de toma. En el caso de transformadores con tomas previstas en el bobinado de disco, es conveniente que las vueltas por paso de toma sean exactamente un n3mero entero. Esto puede conseguirse seleccionando los voltios por espira, tales que:

$$\frac{V}{T} = \frac{V_{paso}}{\text{vueltas por paso de tomas de regulaci3n}} \quad (4.15)$$

Donde:

V/T = Voltios por vuelta.

V_{paso} = Tensi3n de paso (V).

Ser3 importante calcular el error cometido en todas las posiciones de las tomas de regulaci3n entre el valor ideal de n3mero de vueltas por toma y el entero real, si el error de dicha relaci3n excede los l3mites en cualquier posici3n de las tomas, ser3 necesario reajustar el n3mero de vueltas.

4.4 Cálculo del área de la sección transversal del conductor

En transformadores de gran potencia es común que únicamente se utilicen conductores rectangulares, siendo la principal razón de esto el hecho de que, al apilar una vuelta sobre otra tanto en la dirección radial como la axial, las agrupaciones de conductores rectangulares ocupan un menor volumen que sus homólogos redondos. Aun así, en esta sección veremos el cálculo para todos los tipos de conductores disponibles.

El área efectiva de los conductores rectangulares siempre será menor que el producto de su ancho y su espesor, esto se debe al redondeo necesario en los cantos de las esquinas que conforman el conductor rectangular. Las esquinas se redondearán de manera que se eviten, en la medida de lo posible, bordes afilados que puedan cortar el aislamiento y donde se produzcan concentraciones de campo eléctrico formando puntos calientes o incluso la posibilidad de un salto eléctrico.

A la hora de calcular el área efectiva de un conductor rectangular, se deberá tener en cuenta en qué medida afecta el redondeo de las esquinas, a mayor espesor del conductor menor será este redondeo.

4.4.1 Área efectiva de un conductor rectangular

Se puede observar en la literatura de (Dasgupta, 2002), el cálculo del área de la sección transversal de conductores rectangulares basada en una estimación bajo unos límites, donde primero se calculará el área para un conductor redondo y luego mediante tablas se seleccionará un conductor rectangular equivalente.

Al estudiar la forma que presenta el libro de (Nair, 2021), este presenta una forma más fácil de llevar a una programación. A la hora de calcular el área efectiva de un conductor rectangular, sigue el siguiente esquema:

$$A_{\text{rectangular}} = \begin{cases} b \cdot t \cdot 0.85; t \geq 3.5\text{mm} \\ b \cdot t \cdot 0.55; 3.4\text{mm} \leq t \leq 2.25\text{mm} \\ b \cdot t \cdot 0.35; 1.6.4\text{mm} \leq t \leq 2.25\text{mm} \\ b \cdot t \cdot 0.55; 1.6\text{mm} > t \end{cases} \quad (4.16)$$

Donde:

$A_{\text{rectangular}}$ = Área efectiva del conductor rectangular (mm^2).

b = Ancho del conductor (mm).

t = Espesor del conductor (mm).

4.4.2 Área efectiva de un conductor redondo

El cálculo de esta clase de área efectiva será directo, pues corresponde a la relación que existe entre el radio y el área de una sección circular:

$$A_{\text{redondo}} = \pi R^2 \quad (4.17)$$

Donde:

A_{redondo} = Área efectiva del conductor redondo (mm^2).

R = Radio del conductor redondo (mm).

Al reescribirse la ecuación (4.17) de forma que se relacione con el diámetro del núcleo:

$$A_{\text{redondo}} = \frac{\pi}{4} d^2 \quad (4.18)$$

Donde:

A_{redondo} = Área efectiva del conductor redondo (mm²).

d = Diámetro del conductor redondo (mm).

4.4.3 Área efectiva de un conductor en forma de lámina

El uso en la actualidad de este tipo de conductores se limita a transformadores de no muy alta potencia. El valor de esta área efectiva es calculable mediante análisis geométrico:

$$A_{\text{lámina}} = bt \quad (4.19)$$

Donde:

$A_{\text{lámina}}$ = Área efectiva del conductor en forma de lámina (mm²).

b = Ancho del conductor (mm).

t = Espesor del conductor (mm).

4.4.4 densidad de corriente

La densidad de corriente efectiva se obtendrá dividiendo la corriente que circula por un devanado, entre el área efectiva total del conductor que conforma dicho devanado.

$$\delta_{\text{efectiva}} = \frac{I_f}{A_{\text{efectiva tot}}} \quad (4.20)$$

Donde:

δ_{efectiva} = Densidad de corriente efectiva (A/mm²).

I_f = Corriente de fase (A).

$A_{\text{efectiva tot}}$ = Área total efectiva del conductor (mm²).

4.5 Selección de la densidad de corriente

La selección de la densidad de corriente dependerá de los siguientes de factores:

1. Valor de capitalización de las pérdidas en carga o el valor garantizado de las pérdidas en carga y el coste del material conductor.
2. Gradiente de tensión entre los bobinados.
3. Requisitos de resistencia frente a cortocircuito.

Generalmente, la densidad de corriente de los distintos devanados se seleccionará de forma que los gradientes de los devanados sean iguales, sin embargo, siempre y conforme el valor de

la capitalización de las pérdidas en carga sea mayor, la densidad de corriente elegida deberá ser menor.

Cuando la impedancia del transformador deba ser baja, la densidad de corriente podrá estar limitada por la resistencia de cortocircuito.

Los valores típicos que arroja el libro de (Nair, 2021) son similares al que mencionan otras literaturas como (Dasgupta, 2002). La densidad de la corriente según el material del que estén hechos los devanados será de:

- Aluminio: $\delta = 1.5 - 2.0 \text{ A/mm}^2$.
- Cobre: $\delta = 2.0 - 3.6 \text{ A/mm}^2$.

Se pueden utilizar densidades de corriente más elevadas si las pérdidas, el gradiente entre los bobinados y las tensiones de cortocircuito permanecen dentro de límites aceptables.

4.5.1 Densidad de corriente limitada por penalizaciones

Cuando se utilice la capitalización de las pérdidas en carga, el límite inferior de la densidad de corriente podrá calcularse igualando el coste de la pérdida de carga (capitalización de la pérdida de carga) producida al utilizar la cantidad unitaria de material conductor, con el coste de la cantidad unitaria de conductor más el valor prorrateado del coste de fabricación. Cuando se especifique la cifra de capitalización de la pérdida de carga, se podrá utilizar el siguiente procedimiento para determinar la densidad de corriente inicial con la que comenzar el diseño eléctrico.

Para el caso del cobre, la densidad de corriente se calculará según la ecuación (4.21):

$$\delta = \sqrt{\frac{K \cdot C}{2.4 \cdot A}} \quad (4.21)$$

Donde:

A = Capitalización de las pérdidas en carga (EUR/kW).

C = Coste del conductor de cobre (EUR/kg).

K = Factor de valor añadido.

δ = Densidad de corriente (A/mm²).

El valor de *K* variará según el fabricante. Las penalizaciones por pérdidas en carga podrán ser requeridas en cualquier divisa especificada por el cliente, por tanto, para proyectos fuera del país de fabricación será posible la necesidad de un tipo de cambio. Además, el cliente podrá también de especificarlo como un porcentaje total al valor del proyecto.

Para el caso de conductores fabricados de aluminio, la densidad se calculará según la ecuación (4.22):

$$\delta = \sqrt{\frac{K \cdot C}{13 \cdot A}} \quad (4.22)$$

Donde:

A = Capitalización de las pérdidas en carga (EUR/kW).
 C = Coste del conductor de aluminio (EUR/kg).
 K = Factor de valor añadido.
 δ = Densidad de corriente (A/mm²).

4.6 Selección del tamaño de los conductores

4.6.1 Conductor descubierto

La sección transversal de cualquier conductor se obtendrá dividiendo la corriente de fase en un devanado entre la densidad de corriente en este.

$$A_{\text{conductor descubierto}} = \frac{I_f}{\delta} \quad (4.23)$$

Donde:

$A_{\text{conductor descubierto}}$ = Área de la sección transversal del conductor descubierto (mm²).

I_f = Corriente de fase (A)

δ = Densidad de corriente (A/mm²).

A partir del área obtenida mediante la fórmula (4.23), se podrá determinar el tamaño del conductor estándar más próximo, al calcular el área efectiva de dicho conductor y, a continuación, calcular la densidad de corriente real que circulará por ese devanado. Para seleccionar conductores rectangulares, se elegirán los tamaños de las pletinas de conductor en base a los siguientes límites:

1. La relación entre el ancho y el espesor de la pletina deberá situarse entre:

$$6 \leq \frac{w_d}{t_d} \leq 2 \quad (4.24)$$

Donde:

w_d = Ancho del conductor descubierto (mm).

t_d = Espesor del conductor descubierto (mm).

2. Se evitarán preferiblemente los anchos más pequeños de 5mm y espesores menores que 1.2mm.
3. De la misma forma se evitarán preferentemente también los anchos mayores a 16mm y espesores más grandes de 4.5mm.
4. Con el objetivo de la estandarización en las dimensiones de los conductores, se usarán incrementos en el espesor del conductor de 0.05mm e incrementos en el ancho de este de 0.1mm.

El motivo de los límites en las dimensiones de los conductores rectangulares, es debido a que las pérdidas por corrientes de Eddy en los devanados se incrementan con el cuadrado del espesor del conductor y, por tanto, se prefieren conductores finos. Aun así, pueden existir casos en los que se hagan excepciones, se deberá tener siempre en cuenta que la desviación de estos límites dificultará el proceso de fabricación y, por tanto, incrementará el número de horas de fabricación de la máquina.



FIGURA 4.8. BOBINAS DE CONDUCTOR, (A) PICC Y (B) CTC.

Sucede que, al aumentar la potencia de los transformadores, en la misma medida que la potencia se eleve, se incrementarán el resto de las magnitudes eléctricas, esto hace que podamos alcanzar un límite de diseño en el que no existiese un conductor lo suficientemente grande como para que soportase la densidad de corriente que ha de pasar a través de él y cuya área efectiva sea inferior al área calculada durante el proceso de diseño. Se recurrirá entonces al uso de alternativas constructivas con el objetivo de aumentar el área efectiva total del conductor.

Los principales tipos de conductores disponibles y certificados para su uso en la fabricación de transformadores de potencia son:

- *Paper Insulation Covered Conductor (PICC)*: Conductor rectangular calculado hasta ahora, recubierto con un aislamiento de papel Kraft u otro de similares prestaciones.
- *Continued Transposed Conductor (CTC)*: Conductor formado por transposiciones continuas de pletinas de pequeño tamaño, formado siempre por un número impar de estos conductores, de forma que permita la transposición en el conductor más exterior al agrupamiento.



FIGURA 4.9. CONDUCTORES DE COBRE, (A) TIPO PICC Y (B) TIPO CTC.

Los conductores CTC proporcionan unas claras ventajas en el diseño y la fabricación de grandes transformadores comparándolos con conductores PICC:

1. Reducción de las pérdidas por Joule.
2. Distribución más uniforme de la temperatura proporcionando un menor gradiente en los devanados.
3. Aumento del factor espacial.
4. Reducción del tiempo de bobinado.
5. Reducción del tamaño del transformador.
6. Reducción del coste total del transformador.

Sin embargo, el uso de PICC se preferirá para aquellos casos donde nos interese que la resistencia ante estreses mecánicos del devanado sea superior.

El cobre o aleaciones de cobre utilizadas para la construcción de transformadores de potencia se definen como CU-ETC, CU-Ag0.1 y OFC de acuerdo con la norma estándar para Conductores de cobre para fines eléctricos (ASTM B49-17).

Los conductores podrán agruparse de manera que se aumente el área efectiva total del conductor equivalente, existen dos tipos de agrupaciones principales:

- *Bunched*: Cuyo término significa “juntos”, esta agrupación se formará a base de un número no muy grande de conductores PICC distribuidos tanto axial como radialmente, pudiendo variar el aislamiento de estos y un aislamiento a la agrupación total.
- Mazos: Se podrá aumentar el número de circuitos en paralelo, para ello, se dispondrá de un número mayor de conductores, con su correspondiente aislamiento. Estos podrán distribuirse tanto axial como radialmente, conformando lo que se conocerá como un “Mazo” de conductores, en inglés referido como “*bundle*”.

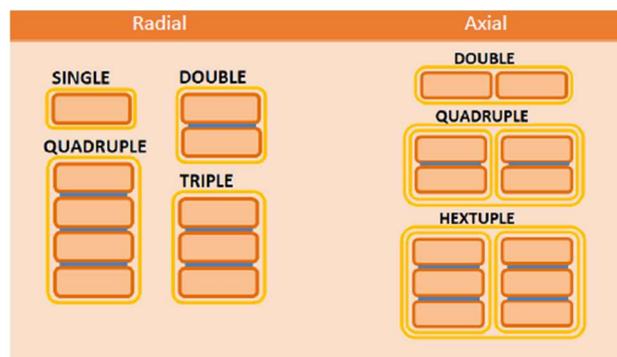


FIGURA 4.10. TIPOS DE AGRUPACIONES "BUNCHED" DE PICC.

4.6.2 Dimensión del conductor recubierto

Los conductores se podrán recubrir con dos tipos de aislantes diferentes, papel aislante, y esmalte, este último ofrece unas mejores propiedades mecánicas al conductor que recubre, posteriormente del secado de dicho esmalte. La selección del aislante deberá hacerse siguiendo los factores resumidos a continuación:

1. En caso de que se especificase por parte del cliente, se usará el recubrimiento determinado este. El diseñador siempre podrá ofrecer valoración técnica de la selección del aislante con el cliente, si este lo solicitase.
2. El Principal objetivo será siempre ser económicamente competitivos. Si el cliente no especificara el tipo de recubrimiento, la selección se realizará determinando únicamente el impacto económico de este. El tamaño total de los conductores recubiertos con esmalte será menor que el de aquellos recubiertos de papel, de tal forma, que el esmaltado podrá ser usado como alternativa evaluando el costo total al que llevaría su elección.

Las configuraciones comerciales más comunes para la fabricación de los arrollamientos de los transformadores, según el tipo y número de conductores, la agrupación y aislamiento de estos serán:

1. PICC único.
2. PICC doble: Doble conductor PICC.
3. *Multistrand*: Multi trama, así es como se denominan a las agrupaciones de conductores PICC mayores a 2 conductores.
4. TEE: “*Twin Enameled Epoxy*” doble conductor con esmalte y epoxi.
5. TPU: “*Twin PICC*” doble conductor axial.
6. CTC: Cables continuamente transpuestos.
7. CTCE: Cables transpuestos continuamente con esmalte de epoxi.

Observando el catálogo comercial del fabricante [Conductors – Apar](#). Se pueden encontrar más en detalle las múltiples configuraciones existentes para los conductores que conformarán los arrollamientos, recogidas en las siguientes tablas para conductores PICC y CTC:

TABLA 4.1. PARÁMETROS PICC.

Parámetros conductores de cobre recubiertos con papel	
Parámetro	Rango
Ancho (Una sola pletina)	3.00 mm hasta 16.00 mm
Grosor (Una sola pletina)	1.00 mm hasta 5.00 mm
Número de capas	16 máximo

TABLA 4.2. PARÁMETROS PICC ESMALTADO.

Parámetros conductores de cobre recubiertos con papel esmaltado	
Parámetro	Rango
Ancho (Una sola pletina)	3.00 mm hasta 12.50 mm
Grosor (Una sola pletina)	0.90 mm hasta 3.25 mm
Número de capas	16 máximo

TABLA 4.3. TIPOS DE ESMALTE PARA CONDUCTORES PICC.

Tipo de esmalte para conductores PICC		
Código	Tipo de esmaltado	Clase (°C)
PVA	Acetato de polivinilo	120
PEI	Polieterimida	180
PEI+PAI	Polieterimida + Poliamida-imidas	200

TABLA 4.4. PARÁMETROS CTC.

Parámetros conductores de cobre CTC	
Parámetro	Rango
Número de pletinas	Desde 5 hasta 83
Ancho (Una sola pletina)	3.15 mm hasta 11.50 mm
Grosor (Una sola pletina)	0.90 mm hasta 3.00 mm
Número de capas	24 máximo
Factor de transposición	Desde 6 hasta 12

TABLA 4.5. TIPOS DE ESMALTE PARA CONDUCTORES CTC.

Tipo de esmalte para conductores CTC		
Código	Tipo de esmaltado	Clase (°C)
PVA	Acetato de polivinilo	120
PEI	Polieterimida	180
PEI+PAI	Polieterimida + Poliamida-imidas	200
Epoxi	Epoxi estándar B	120
Epoxi (HS)	Epoxi especial B	120

Además, en este catálogo aparece una sección donde el propio fabricante nos facilita las fórmulas para el cálculo de las transposiciones y dimensiones del conductor CTC. Para este proyecto, sin embargo, se utilizará la aproximación utilizada en el libro de texto de (Nair, 2021).

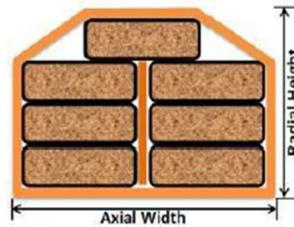


FIGURA 4.11. DETALLE DE UN CONDUCTOR CTC DEL FABRICANTE APAR.

4.7 Selección del tipo de bobinados

Los diferentes tipos de arrollamientos que se usarán para la construcción de transformadores de potencia de cualquier clase de se recogen en los siguientes apartados:

4.7.1 Bobinado en espiral o cilíndrico

Normalmente con una o dos capas, su uso se centra a transformadores de baja o media potencia o devanados terciarios y de regulación en transformadores de gran potencia. Su mazo podrá conformarse con 2 o más conductores tanto axial como radialmente, siendo necesarias transposiciones entre los conductores radiales con tal de mantener la longitud equivalente entre estos. Se formará mediante vueltas concéntricas alrededor del núcleo, una seguida de otra en la dirección axial, en el caso de que fuese bicapa, una vez se recorriese la totalidad de la longitud axial de la bobina, se recorrería de nuevo esta totalidad, pero en sentido contrario, siendo necesarias las transposiciones de los conductores radiales al paso entre capas. La característica principal de este tipo de devanado es que no posee separadores entre las diferentes espiras, si existiendo aislamiento entre capas. Poseen buena resistencia mecánica, pero, al carecer de separadores entre las espiras, la refrigeración que presentan es un factor limitante. Según el número de capas se clasifican como:

1. Monocapa: Se utilizarán en arrollamientos de baja tensión y devanados terciarios o auxiliares con intensidades medias y bajas, así como para algunos tipos de regulación.
2. Bicapa: Su uso vendrá impuesto a aquellos transformadores con arrollamientos de baja tensión y alta intensidad, al pasar de una capa a otra es necesario la transposición de los conductores.

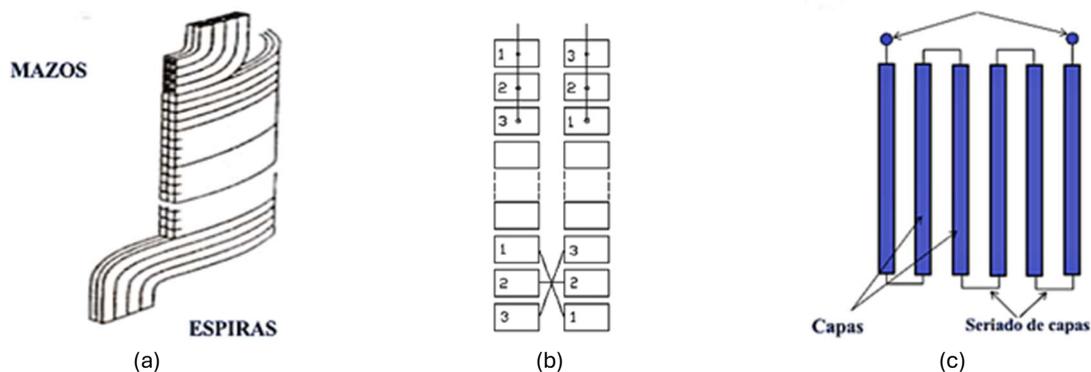


FIGURA 4.12. TIPOS DE DEVANADOS, (A) DEVANADO EN ESPIRAL MONOCAPA, (B) DEVANADO EN ESPIRAL BICAPA, (C) DEVANADO EN CAPAS.

4.7.2 Bobinado en hélice o helicoidal

Su uso viene dispuesto para los arrollamientos de baja tensión y muy alta intensidad, también puede disponer de una o dos capas al igual que su homólogo en espiral. Su mazo será equivalente al del devanado en espiral y podrá disponer de hasta dos mazos de conductores. Su fabricación sigue la misma forma que el mencionado en los devanados en espiral, la principal diferencia es que este tipo de arrollamiento cuenta con separadores entre las espiras, así como entre los mazos y un asilamiento entre capas en caso de ser bicapa, serán necesarias las transposiciones entre conductores de un mismo mazo para mantener su longitud equivalente además de las transposiciones consideradas en la configuración en bicapa del devanado en espiral. Al poseer separadores la refrigeración de este tipo de arrollamiento será muy superior al devanado en espiral, sin disminuir apenas su resistencia mecánica.

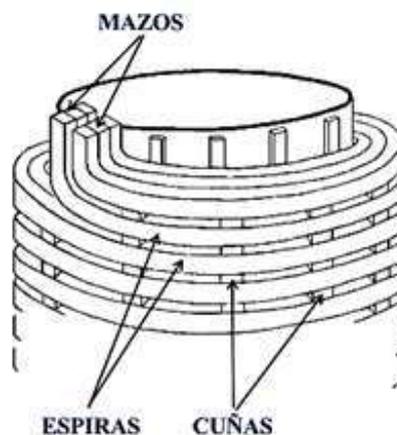


FIGURA 4.13. DEVANADO MONOCAPA HELICOIDAL CON 2 MAZOS Y DETALLE DE SEPARADORES.

4.7.3 Bobinado en capa

Su uso se centrará en aplicaciones de alta tensión hasta un cierto rango, su fabricación es igual al devanado en espiral, de hecho, muchas veces referirse al devanado en capa es indistinto de referirse al devanado en espiral. Pues lo único que cambia es el número de capas, considerando como un equivalente en espiral con un número de capas mayor a 2. El aislamiento entre capas aumenta de manera que mejora también la refrigeración en el devanado. El resto de las características son exactamente iguales a las mencionadas para el devanado en espiral.

4.7.4 Bobinado en disco

Ampliamente usado en transformadores de gran potencia, su fabricación consiste en vueltas concéntricas una sobre otra en dirección radial, conformando lo que se conoce como disco. Una vez acabado el disco el conductor pasará al siguiente disco en dirección axial, estos cambios se intercalarán entre el interior y el exterior del arrollamiento conforme se sucedan los discos a lo largo de la dirección axial. Poseen una muy buena refrigeración debido a los espacios entre discos, así como una muy buena resistencia mecánica. Existen dos tipos distintos de arrollamientos en disco según las interconexiones de estos:

3. Discos continuos: Utilizados en media y alta tensión su característica principal es que están formados por conductores continuos sin soldaduras.

4. Discos entrelazados: A su vez se subdivide en total o parcial entrelazamiento, su uso abarca la alta y muy alta tensión ya que poseen una mejor capacitancia serie, lo que mejor el gradiente de tensión ante impulsos. Los conductores se cortan para permitir la intercalación de espiras mediante soldadura.

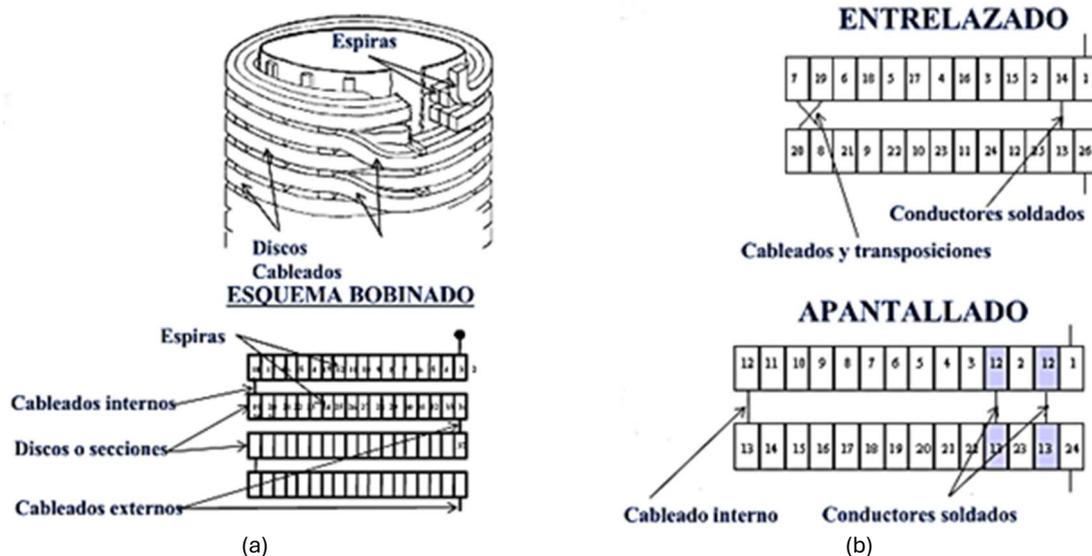


FIGURA 4.14. (A) DETALLE CONSTRUCTIVO DE UN DEVANADO DE DISCOS CONTINUOS Y ESQUEMA, (B) ESQUEMA DE UN DEVANADO EN DISCOS ENTRELAZADOS.

4.7.5 Otros tipos de bobinado

- Bobinado en lámina o tipo “foil”: Conformado por una única lámina conductora con tiras recubriendo sus extremos y revolucionada sobre sí misma. Se usará principalmente en aplicaciones de alta intensidad y baja tensión, para transformadores de potencia baja y media.
- Bobinado tipo “Crossover coils”: Este método de bobinado se verá utilizado para devanados de alta tensión en transformadores de distribución.

4.7.6 Consideraciones durante la selección del tipo de bobinado

La selección del tipo de arrollamiento para una clase de tensión en particular dependerá de la densidad de corriente seleccionada y consecuentemente del área de la sección transversal, del número de vueltas que deban distribuirse a lo largo de núcleo y de las tensiones de ensayo especificadas. De entre todos los tipos de arrollamientos que pueden fabricarse, para los transformadores de gran potencia, únicamente se usarán para este proyecto los devanados en disco.

En la Tabla 4.6 se recoge un breve resumen de algunas configuraciones típicas diferentes de arrollamientos para una determinada potencia:

TABLA 4.6. TIPOS DE ARROLLAMIENTOS TÍPICOS SEGÚN RANGOS DE POTENCIA.

kVA (trifásicos)	Tipo de bobinado de AT	Tipo de bobinado de BT
16-200	Bobina/Espiras entrelazadas	Espiral
315	Bobina/ Espiras entrelazadas	Espiral/lamina
500-1600	Capa	Espiral/lamina
3150-5000	Capa/disco	Espiral/hélice/lamina si BT es inferior a 2,4 kV
6300-10000	Capa/disco	Espiral/hélice/disco

Además de los devanados primario y secundario pueden existir devanados de regulación, estos suelen ser en espiral, aunque también se les denomina “loop” para este caso concreto. Todos sus escalones dispuestos unos sobre otros se han de bobinar conjuntamente en paralelo, es decir, el número de mazos será equivalente al de escalones, no habrá separadores entre las espiras y tanto los escalones superiores como los inferiores se unirán bajo una misma numeración de donde se sacarán los conductores que irán directamente al cambiador de tomas de regulación.



FIGURA 4.15. DEVANADO DE REGULACIÓN CON CONDUCTORES NUMERADOS.

Desde el punto de vista del cálculo para este diseño se obviar esta clase de devanados, así como se obviarán también los devanados en lámina o “foil” y de espiras entrelazadas o “crossover coil”, pues, estos dos últimos están muy limitados a un uso en baja y media tensión.

4.8 Cambiador de tomas de regulación y sus conexiones

El cambiador de tomas se utilizará para añadir o restar vueltas al devanado del transformador al que esté conectado, este podrá ser el devanado primario, secundario o incluso el terciario o auxiliar, los diferentes tipos de cambiadores de tomas que se utilizarán ya fueron mencionados en un apartado anterior, definiéndolos con más detalle:

4.8.1 Cambiador de tomas fuera del circuito

El OCTC u “Off-Circuit Tap Changer” será operado cuando el transformador esté desconectado de la red y por tanto completamente de energizado (seccionadores abiertos y cualquier tensión remanente puesta a tierra).

Las disposiciones básicas del circuito de los arrollamientos del transformador donde se sitúa el cambiador de tomas son lineales, de puente simple o doble.

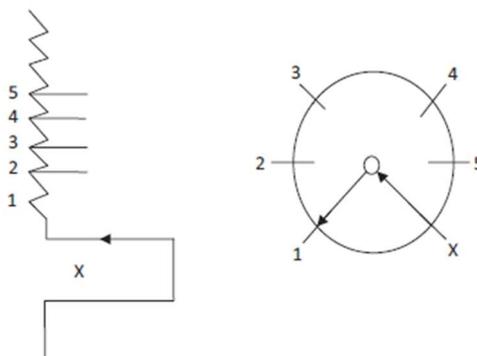


FIGURA 4.16. CONMUTADOR LINEAL DE TOMAS DE REGULACIÓN.

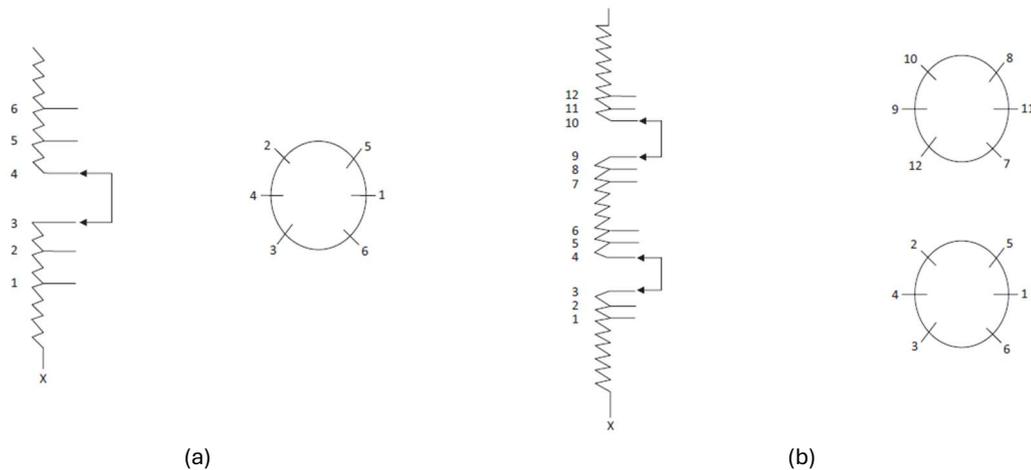


FIGURA 4.17. CONMUTADOR (A) PUENTE SIMPLE Y (B) PUENTE DOBLE.

4.8.2 Cambiador de tomas sin carga

El cambiador de tomas sin carga “DETC” se diferencia del cambiador de tomas fuera de circuito en que el cambiador de tomas debe funcionar cuando no hay carga conectada, pero el transformador aún sigue energizado.

En muchas especificaciones, los términos cambiadores de tomas fuera de circuito y sin carga se utilizan indistintamente, con el mismo significado. Por tanto, debemos como diseñadores, obtener las aclaraciones pertinentes respecto al requisito del cliente.

Aquí se pueden utilizar las mismas disposiciones que en el apartado anterior.

4.8.3 Cambiador de tomas en carga

Los cambiadores de tomas en carga “OLTC” Se utilizan para cambiar la relación de espiras en el devanado del transformador al que se conectan y regular la tensión cuando el trafo está suministrando a una carga aislada. Cuando está conectado a una red virtual de potencia infinita se utiliza para controlar el flujo de potencia reactiva entre los nodos de la red. Los más utilizados actualmente son los de transición de resistencias.

Las disposiciones básicas del circuito de los arrollamientos del transformador donde se sitúa el cambiador de tomas para este caso serán lineales, grueso/fino y conmutador invertido.

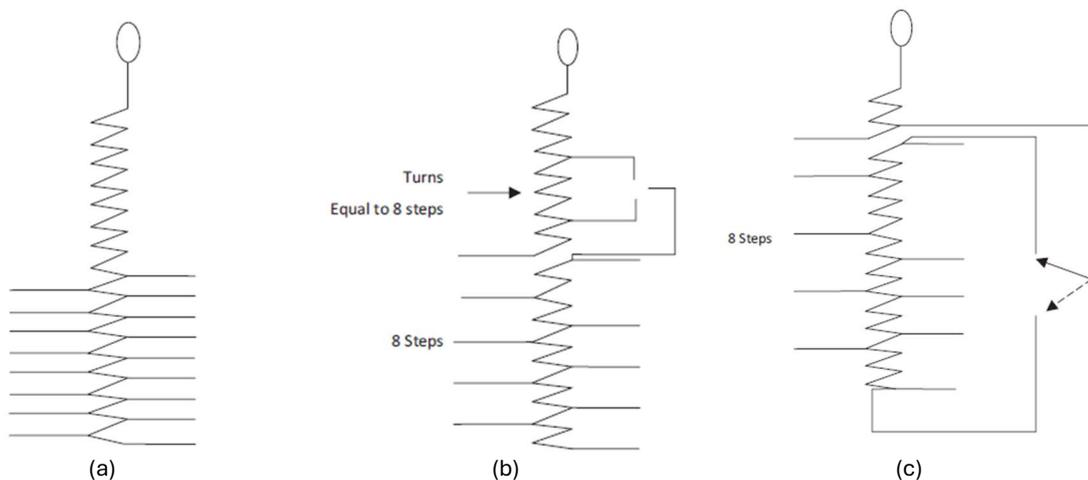


FIGURA 4.18. (A) ESQUEMA DE CONEXIONADO PARA UN OLTC LINEAL, (B) TIPO COARSE-FINE Y (C) REVERSING SWITCH.

4.8.4 Selección del cambiador de tomas

A la hora de seleccionar un cambiador de tomas u otro se debe comprobar los siguientes criterios:

1. Tensión nominal del devanado
2. Clase del aislamiento del devanado, incluidas las tensiones de ensayo (sobretensión, impulso, etc.).
3. Rango total de la variación de la tensión requerido en la especificación.
4. Tensión de paso.
5. Intensidad nominal e intensidad máxima en el devanado
6. Nivel de aislamiento a tierra en el punto de conexión al cambiador de tomas.
7. Nivel de falla del sistema
8. Requerimientos de cortocircuito.
9. Distribución de las tomas (lineal, inversa...)
10. Protección de las tomas de regulación necesaria.
11. Si se requiere funcionamiento en paralelo y, en caso afirmativo, detalles del transformador existente y esquema de control del cambiador de tomas.

4.9 Cálculo de la altura axial de los bobinados

Las alturas axiales totales de los diferentes bobinados que conformen el transformador se calcularán según el tipo de estos. Todas estas alturas por calcular serán las alturas axiales finales de los devanados, tras el secado en una autoclave y posterior prensado.

Durante el proceso de diseño es usual la colocación de bloques extra de madera tanto al principio y al final como intercalados en los devanados, esta medida se realiza por dos motivos. El primero es colocar en los extremos de las bobinas parte de material que, en caso de que el arrollamiento estuviese fuera de las dimensiones establecidas durante el diseño, pudiese eliminarse parte de este hasta cumplir con ellas, funcionando como un margen físico. El segundo motivo suele darse en casos donde se dispone de un devanado separado axialmente en dos o cuando se necesite ajustar más finamente la reactancia de la bobina, ya que al intercalar en mitad del arrollamiento algunos de estos bloques varía la altura y con ello la reactancia final.

4.9.1 Bobinado en espiral o en capa

Para calcular la altura axial total de este devanado se debe distinguir entre dos términos diferentes. El primero será la altura física total del bobinado cuyo valor se usará durante el posterior cálculo de la altura de la ventana del núcleo. Y, por otro lado, la altura eléctrica del devanado, que servirá para posteriormente calcular de la inductancia, en los casos que se verán más adelante, si no apareciese especificado un término diferenciado del otro, ambos tomarán el mismo valor.

La altura axial física de los arrollamientos en espiral se regirá por la siguiente ecuación:

$$A_{axial(física)} = (N + 1)W N_F + 1.15 W N_T \quad (4.25)$$

Donde:

$A_{axial(física)}$ = Altura axial física (mm).

N = Número de vueltas por capa.

W = Ancho del conductor recubierto con el aislante (mm).

N_T = Número de transposiciones por capa.

N_F = Número de conductores paralelos dispuestos en una dirección plana radial.

La altura axial que se deberá utilizar para calcular la reactancia será la altura eléctrica, que se obtendrá de la ecuación (4.25), a la que habrá que restarle una vuelta, así quedará la siguiente ecuación:

$$A_{axial(eléctrica)} = N W N_F + 1.15 W N_T \quad (4.26)$$

Donde:

$A_{axial(eléctrica)}$ = Altura axial eléctrica (mm).

N = Número de vueltas por capa.

W = Ancho del conductor recubierto con el aislante (mm).

N_T = Número de transposiciones por capa.

N_F = Número de conductores paralelos dispuestos en una dirección plana radial.

4.9.2 Bobinado de hélice

Para calcular la altura axial total del devanado en hélice se procederá al cálculo igual que en el devanado en espiral, teniendo en consideración, además, el espesor de los espaciadores entre los conductores y mazos.

De esta forma la altura axial física para el devanado en hélice será:

$$A_{axial(física)} = (N + 1)(W_c + W_e)N_F + 1.15 (W_c + W_e) N_T \quad (4.27)$$

Donde:

$A_{axial(física)}$ = Altura axial física (mm).

N = Número de vueltas por capa.

W_c = Ancho del conductor recubierto con el aislante (mm).

W_e = Ancho del espaciador entre conductores (mm).

N_T = Número de transposiciones por capa.

N_F = Número de conductores paralelos dispuestos en una dirección plana radial.

De la misma forma para la altura axial eléctrica:

$$A_{axial(eléctrica)} = N (W_c + W_e)N_F + 1.15 (W_c + W_e) N_T \quad (4.28)$$

Donde:

$A_{axial(eléctrica)}$ = Altura axial eléctrica (mm).

N = Número de vueltas por capa.

W_c = Ancho del conductor recubierto con el aislante (mm).

W_e = Ancho del espaciador entre conductores (mm).

N_T = Número de transposiciones por capa.

N_F = Número de conductores paralelos dispuestos en una dirección plana radial.

4.9.3 Bobinado de discos

La altura axial, tanto física como eléctrica, coincidirá en este caso y será la suma de los diferentes anchos de los conductores que forman los discos más los anchos de los espaciadores situados entre los discos.

La altura axial podrá calcularse después de haber preparado un diagrama del bobinado donde se indicarán el tipo y el tamaño de discos y espaciadores.

La altura axial así calculada será la dimensión final después de el secado y prensado de los arrollamientos. Por tanto, los espaciadores de *pressboard* deberán tener en cuenta el factor de compresibilidad para el cartón prensado, utilizado en el diseño. En caso de que fuese de grado K se utilizaría un factor de compresibilidad del 3% mientras que si fuese de grado 3 se usará un factor de un 5%. Se calculará entonces la altura axial en los devanados en disco según la siguiente ecuación:

$$A_{axial} = \sum_{i=1}^n W_d + \sum_{i=1}^n W_e \quad (4.29)$$

Donde:

A_{axial} = Altura axial tanto física como eléctrica (mm).

W_d = Ancho del disco formado por los conductores más el aislante (mm).

W_e = Ancho de los espaciadores (mm).

En el caso de que todos los discos mostraran las mismas dimensiones, así como los espaciadores, la ecuación (4.29) se simplificaría de la siguiente forma:

$$A_{axial} = N_d W_d + N_e W_e \quad (4.30)$$

Donde:

A_{axial} = Altura axial tanto física como eléctrica (mm).

N_d = Número de discos en la dirección axial.

W_d = Ancho del disco formado por los conductores más el aislante (mm).

N_e = Número de espaciadores en la dirección axial.

W_e = Ancho de los espaciadores (mm).

4.10 Separaciones eléctricas de transformadores trifásicos llenos de aceite

El libro de texto de (Nair, 2021) recoge las separaciones típicas para transformadores trifásicos llenos de aceite, sin embargo, estas únicamente alcanzan una tensión media baja y una potencia ligeramente superior a la que podemos encontrar en transformadores de distribución.

Si el cliente requiere de separaciones mayores, se utilizarán siempre las que éste especifique.

Es una buena práctica calcular las separaciones entre los arrollamientos de BT y AT en base a que el estrés inducido en AC para el ensayo de sobretensión sea de 5.5kV/mm o menos.

Para arrollamientos concéntricos el estrés máximo en el aceite mineral puede calcularse siguiendo el siguiente procedimiento, siempre y cuando la separación del aislamiento entre los arrollamientos de BT y AT esté llena de aceite mineral o de *pressboard*:

$$e_i = \frac{V}{r_i \left[\frac{1}{E_1} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) + \frac{1}{E_2} \ln \left(\frac{r_3}{r_2} \right) + \dots + \frac{1}{E_{n-1}} \ln \left(\frac{r_n}{r_{n-1}} \right) \right]} \quad (4.31)$$

Donde:

e_i = Estrés en el dieléctrico en consideración (kV/mm).

V = Tensión eficaz total entre la separación durante el ensayo (kV).

r_i = Radio del dieléctrico en consideración (mm).

$E_1, E_2, E_3, \dots, E_{n-1}$ = Permitividad eléctrica del medio.

$r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$ = Radio del medio en consideración (mm).

Así mismo puede extenderse el cálculo a otras separaciones radiales como puede ser la distancia del núcleo al arrollamiento de BT o del arrollamiento de AT al de regulación, etc. Se podrá calcular de forma individual el estrés en las separaciones según el tipo de material del medio, este será o el aceite mineral que llena la cuba del transformador o *pressboard*. La permitividad eléctrica del medio variará según este tipo de materiales:

- Para el aceite mineral la permitividad eléctrica es 2.2.
- Para el *pressboard* la permitividad eléctrica es 4.5.

Otra práctica que se puede realizar desde el lado de la seguridad es suponer que la separación a calcular está en un medio compuesto únicamente por aceite mineral, dando así el peor resultado posible desde el punto de vista del estrés eléctrico, a pesar de que el aislamiento real contenga o no barreras de *pressboard*.

4.11 Cálculo del diámetro de los arrollamientos y el espesor radial

El diámetro y la profundidad radial de los arrollamientos se calculará, al igual que la altura axial de los devanados según el tipo de arrollamiento que sea:

4.11.1 Bobinados en espiral

$$\Phi_{\text{interno-BT}} = \Phi_{\text{núcleo}} + 2 \cdot \text{separación}_{\text{núcleo-BT}} \quad (4.32)$$

Donde:

$\emptyset_{\text{interno-BT}}$ = Diámetro interno del devanado BT (mm).

$\emptyset_{\text{núcleo}}$ = Diámetro del núcleo de chapa magnética (mm).

4.11.1.1 Bobinados en espiral con conductos de refrigeración axiales

$$\emptyset_{\text{externo-BT}} = \emptyset_{\text{interno-BT}} + 2(m n t K D) \quad (4.33)$$

Donde:

$\emptyset_{\text{interno-BT}}$ = Diámetro interno del devanado BT (mm).

$\emptyset_{\text{externo-BT}}$ = Diámetro externo del devanado BT (mm).

m = Número de capas en el arrollamiento.

n = Número de conductores sobre la dirección radial por vuelta.

t = Espesor de un conductor paralelo recubierto con el aislamiento (mm).

K = Número de conductos de refrigeración en la dirección axial.

D = Tamaño del conducto en la dirección axial (mm).

4.11.1.2 Bobinados en espiral sin conductos de refrigeración axiales

$$\emptyset_{\text{externo-BT}} = \emptyset_{\text{interno-BT}} + 2(m n t + (m - 1)t_1) \quad (4.34)$$

Donde:

$\emptyset_{\text{interno-BT}}$ = Diámetro interno del devanado BT (mm).

$\emptyset_{\text{externo-BT}}$ = Diámetro externo del devanado BT (mm).

m = Número de capas en el arrollamiento.

n = Número de conductores sobre la dirección radial por vuelta.

t = Espesor de un conductor paralelo recubierto con el aislamiento (mm).

t_1 = Espesor del aislamiento entre capas cuando no se posean conductos de refrigeración (mm).

4.11.2 Bobinados helicoidales

4.11.2.1 Bobinados en hélice con conductos de refrigeración

$$\emptyset_{\text{externo-BT}} = \emptyset_{\text{interno-BT}} + 2(m n t K D) \quad (4.35)$$

Donde:

$\emptyset_{\text{interno-BT}}$ = Diámetro interno del devanado BT (mm).

$\emptyset_{\text{externo-BT}}$ = Diámetro externo del devanado BT (mm).

m = Número de capas en el arrollamiento.

n = Número de conductores sobre la dirección radial por vuelta.

t = Espesor de un conductor paralelo recubierto con el aislamiento (mm).

K = Número de conductos de refrigeración en la dirección axial.

D = Tamaño del conducto en la dirección axial (mm).

4.11.2.2 Bobinados en hélice sin conductos de refrigeración

$$\emptyset_{\text{externo-BT}} = \emptyset_{\text{interno-BT}} + 2(m n t + (m - 1)t_1) \quad (4.36)$$

Donde:

$\emptyset_{\text{interno-BT}}$ = Diámetro interno del devanado BT (mm).

$\emptyset_{\text{externo-BT}}$ = Diámetro externo del devanado BT (mm).

m = Número de capas en el arrollamiento.

n = Número de conductores sobre la dirección radial por vuelta.

t = Espesor de un conductor paralelo recubierto con el aislamiento (mm).

t_1 = Espesor del aislamiento entre capas cuando no se posean conductos de refrigeración (mm).

$$PR = \frac{\emptyset_{\text{externo-BT}} + \emptyset_{\text{interno-BT}}}{2} \quad (4.37)$$

Donde:

PR = Profundidad radial del arrollamiento (mm).

$\emptyset_{\text{interno-BT}}$ = Diámetro interno del devanado BT (mm).

$\emptyset_{\text{externo-BT}}$ = Diámetro externo del devanado BT (mm).

$$LVM = (\emptyset_{\text{interno-BT}} + PR)\pi \quad (4.38)$$

Donde:

LVM = Longitud de vuelta media (mm).

PR = Profundidad radial del arrollamiento (mm).

$\emptyset_{\text{interno-BT}}$ = Diámetro interno del devanado BT (mm).

$$\emptyset_{\text{interno-AT}} = \emptyset_{\text{externo-BT}} + 2 \cdot \text{separación}_{\text{BT-AT}} \quad (4.39)$$

Donde:

$\emptyset_{\text{interno-AT}}$ = Diámetro interno del devanado AT (mm).

$\emptyset_{\text{externo-BT}}$ = Diámetro externo del devanado BT (mm).

4.11.3 Bobinados en lámina

4.11.3.1 Bobinados en lámina sin conductos de refrigeración

$$\emptyset_{\text{externo-AT}} = \emptyset_{\text{interno-AT}} + 2(n t + (n - 1)t_1) \quad (4.40)$$

Donde:

$\emptyset_{\text{interno-AT}}$ = Diámetro interno del devanado AT (mm).

$\emptyset_{\text{externo-AT}}$ = Diámetro externo del devanado AT (mm).

n = Número de capas.

t = Espesor de un conductor paralelo recubierto con el aislamiento (mm).

t_1 = Espesor del aislamiento entre capas cuando no se posean conductos de refrigeración (mm).

4.11.3.2 Bobinados en lámina con conductos de refrigeración

$$\emptyset_{\text{externo-AT}} = \emptyset_{\text{interno-AT}} + 2(n t + KD + (n - 1(K + 1))t_1) \quad (4.41)$$

Donde:

$\emptyset_{\text{interno-AT}}$ = Diámetro interno del devanado AT (mm).

$\emptyset_{\text{externo-AT}}$ = Diámetro externo del devanado AT (mm).

n = Número de capas.

t = Espesor de un conductor paralelo recubierto con el aislamiento (mm).

t_1 = Espesor del aislamiento entre capas cuando no se posean conductos de refrigeración (mm).

K = Número de conductos de refrigeración.

D = Espesor del conductor de refrigeración (mm).

4.11.4 Bobinados de espiras entrelazadas

$$\emptyset_{\text{externo-AT}} = \emptyset_{\text{interno-AT}} + 2(d n + (n - 1)t_1 + KD) \quad (4.42)$$

Donde:

$\emptyset_{\text{interno-AT}}$ = Diámetro interno del devanado AT (mm).

$\emptyset_{\text{externo-AT}}$ = Diámetro externo del devanado AT (mm).

d = Diámetro del conductor recubierto (mm).

t_1 = Espesor del aislamiento entre capas cuando no se posean conductos de refrigeración (mm).

K = Número de conductos de refrigeración.

D = Espesor del conductor de refrigeración (mm).

4.11.5 Bobinados en disco

$$\emptyset_{\text{externo-AT}} = \emptyset_{\text{interno-AT}} + 2(pnt + KD) \quad (4.43)$$

Donde:

$\varnothing_{\text{interno-AT}}$ = Diámetro interno del devanado AT (mm).

$\varnothing_{\text{externo-AT}}$ = Diámetro externo del devanado AT (mm).

n = Número de vueltas por disco.

t = Espesor de un conductor recubierto (mm).

p = Número de conductores paralelos en la dirección radial.

K = Número de conductos de refrigeración.

D = Espesor del conductor de refrigeración (mm).

4.12 Aislamiento entre capas

El aislamiento utilizado entre las diferentes capas de los devanados será preferentemente el papel "Kraft", podrá utilizarse papel esmaltado siempre que se requiera una elevada resistencia a esfuerzos mecánicos en los devanados.

El ancho del aislamiento entre diferentes capas se determinará según los siguientes factores:

- Tensión máxima de ensayo entre las diferentes capas al momento del ensayo de sobretensión.

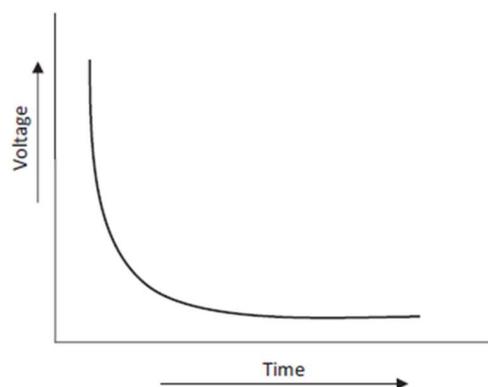


FIGURA 4.19. EVOLUCIÓN TÍPICA DE LA TENSIÓN PARA UN TIEMPO T EN UN ENSAYO DE SOBRETENSIÓN.

- Tensión de impulso entre las capas durante el ensayo de impulso, la norma (UNE-EN 60076-3, 2014) indica dos tipos de impulso, el de onda corta y el de onda plena. Este factor será importante para las dos primeras capas cerca de la línea.

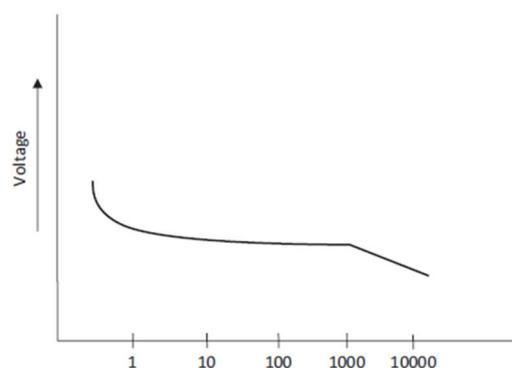


FIGURA 4.20. CURVA TÍPICA TENSIÓN-TIEMPO DEL ENSAYO DE IMPULSO PARA UNA SEPARACIÓN EN ACEITE.

c) Aislamiento provisto en los conductores.

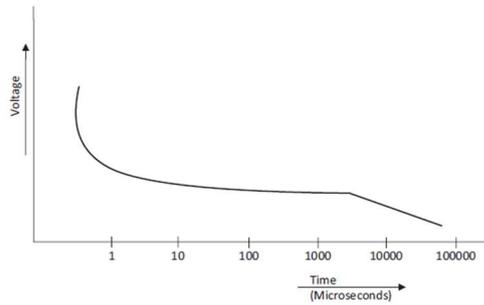


FIGURA 4.21. CURVA TÍPICA TENSIÓN-TIEMPO DEL ENSAYO DE IMPULSO PARA UNA SEPARACIÓN CON AISLANTE PRESSBOARD.

4.12.1 Cálculo del aislamiento entre capas para la tensión a los ensayos de sobretensión

El aislamiento entre diferentes capas necesario para soportar exitosamente el ensayo a sobretensión se podrá obtener mediante la ecuación (4.44):

$$t = \frac{2n(V/T)E_{ensayo}}{EK} - t_1 \quad (4.44)$$

Donde:

t = Espesor del aislamiento entre capas (mm).

n = Número de vueltas por capa (usar el máximo).

V/T = Tensión por vueltas.

E_{ensayo} = Tensión de ensayo (V).

E = Tensión nominal de los devanados (V).

t_1 = Espesor del aislamiento de los conductores (mm).

K = Estrés máximo permitido en el aislamiento entre capas durante el ensayo de sobretensión (V/mm).

Para conductores esmaltados, deberá ser usado el espesor del recubrimiento de papel equivalente para los cálculos. Para el aislamiento intermedio se usará un $t_1 = 0.125$ mm.

K tendrá los siguientes valores:

- 4500 V/mm para transformadores convencionales sin llenado en vacío.
- 5000 V/mm para transformadores sellados (CSP) sin llenado en vacío.
- 5500 V/mm para transformadores con llenado en vacío.

El valor mínimo de “ t ” no deberá ser nunca menor a 0.15mm.

Cuando el espesor del aislamiento entre capas calculado sea mayor a 0.4mm, podrá utilizarse aislamiento gradual entre capas de manera que el requerimiento de aislamiento se vea reducido tal y como se muestra en la Figura 4.22:

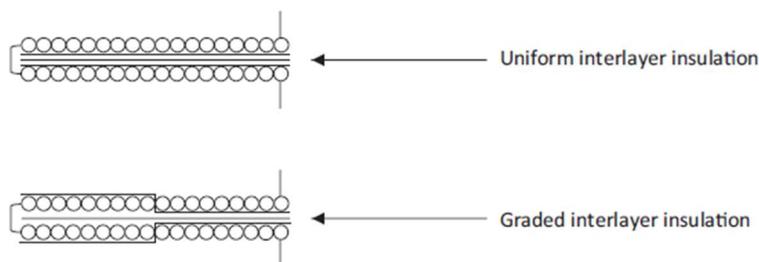


FIGURA 4.22. DIFERENTES TIPOS DE AISLAMIENTO INTERCAPA.

4.12.2 Aislamiento entre las dos primeras capas cercanas al final de la línea para resistencia a ensayos de impulsos.

El espesor del aislamiento para las dos últimas capas se calculará mediante la formula:

$$t = \frac{P (BIL) \propto \beta n}{20 T_{\min}} - t_1 \quad (4.45)$$

Donde:

t = Espesor del aislamiento entre capas (mm).

$P = 1$ para transformadores trifásicos conectados en triángulo.

$P = 0.7$ para transformadores trifásicos conectados en estrella.

$P = 1$ para transformadores monofásicos.

BIL = "Basic Impulse Level" Máximo valor de la tensión para el ensayo de impulsos (kV).

$\alpha = 1.5$

$\beta = 1.5$ para transformadores trifásicos.

$\beta = 1.8$ para transformadores monofásicos.

n = Número de vueltas por capa (usar el máximo).

T_{\min} = Número de vueltas en la posición más baja.

t_1 = Espesor del aislamiento de los conductores (mm).

De los valores calculados mediante las ecuaciones (4.44) y (4.45), se seleccionará el valor máximo entre estos dos.

4.13 Cálculo del diámetro y la profundidad radial de las bobinas

Para calcular los diámetros y las profundidades radiales en los devanados deberemos utilizar los siguientes conceptos:

D_i = Diámetro interno (mm).

D_o = Diámetro externo (mm).

PR = Profundidad radial del devanado (mm).

A partir de ellos se podrá definir según el orden de calado de los diferentes bobinados que conformarán la columna de una fase:

4.13.1 Cálculo del diámetro interior

4.13.1.1 Cálculo del devanado más cercano al núcleo

$$D_i = D_{\text{núcleo}} + 2(\Delta_{\text{núcleo-BT}}) \quad (4.46)$$

Donde:

D_i = Diámetro interior del devanado (mm).

$D_{\text{núcleo}}$ = Diámetro del círculo que inscribe el núcleo (mm).

$\Delta_{\text{núcleo-BT}}$ = Separación entre el núcleo y el devanado BT necesaria (mm).

4.13.1.2 Cálculo de un devanado intermedio

$$D_{i(\text{ext})} = D_{o(\text{int})} + 2(\Delta_{\text{int-ext}}) \quad (4.47)$$

Donde:

$D_{i(\text{ext})}$ = Diámetro interior del devanado exterior (mm).

$D_{o(\text{int})}$ = Diámetro exterior del devanado interior (mm).

$\Delta_{\text{int-ext}}$ = Separación entre el devanado interior y exterior (mm).

4.13.1.3 Cálculo del devanado más alejado del núcleo

$$D_{\text{colum.}} = D_{o(\text{ext})} + 2(\Delta_{\text{interfases}}) \quad (4.48)$$

Donde:

$D_{\text{colum.}}$ = Distancia entre las columnas del transformador (mm).

$D_{o(\text{ext})}$ = Diámetro exterior del devanado exterior (mm).

$\Delta_{\text{interfase}}$ = Separación entre mínima necesaria entre las fases del transformador (mm).

4.13.2 Cálculo del diámetro exterior

Se podrán distinguir diferentes procesos de cálculo según la forma de los arrollamientos:

4.13.2.1 Devanados en espiral o helicoidales con conductos de refrigeración.

$$D_o = D_i + 2(m n t + K D) \quad (4.49)$$

Donde:

D_o = Diámetro exterior del devanado (mm).

D_i = Diámetro interior del devanado (mm).

m = Número de capas en el devanado.

n = Número de conductores en la dirección radial por vuelta.

t = Espesor de un conductor paralelo recubierto aislado (mm).

K = Número de conductos de refrigeración en la dirección axial.

D = Dimensión de los conductos de refrigeración en la dirección axial (mm).

4.13.2.2 Devanados en espiral o helicoidales sin conductos de refrigeración.

$$D_o = D_i + 2(m n t + (m - 1)t_1) \quad (4.50)$$

Donde:

D_o = Diámetro exterior del devanado (mm).

D_i = Diámetro interior del devanado (mm).

m = Número de capas en el devanado.

n = Número de conductores en la dirección radial por vuelta.

t = Espesor de un conductor paralelo recubierto aislado (mm).

t_1 = Espesor del aislamiento entre capas cuando no se proveen de conductos de refrigeración (mm).

4.13.2.3 Devanados en disco

$$D_o = D_i + 2(p n t + K D) \quad (4.51)$$

Donde:

D_o = Diámetro exterior del devanado (mm).

D_i = Diámetro interior del devanado (mm).

p = Número de conductores paralelos.

n = Número de vueltas por disco.

t = Espesor de un conductor recubierto aislado (mm).

K = Número de conductos de refrigeración en la dirección axial.

D = Espesor de los conductos de refrigeración en la dirección axial (mm).

4.13.3 Cálculo de la profundidad radial

Por definición, la profundidad radial de un devanado será el punto medio del devanado respecto de su eje central, escribiendo esto en una fórmula obtendremos:

$$PR = \frac{D_o + D_i}{2} \quad (4.52)$$

Donde:

PR = Profundidad radial del devanado (mm).

D_o = Diámetro exterior del devanado (mm).

D_i = Diámetro interior del devanado (mm).

4.13.4 Cálculo de la longitud media por vuelta

Para el cálculo analítico del transformador, se utilizará la longitud media por vuelta, pues en esta se asume que la cantidad de longitud por vuelta extra por encima de la profundidad radial se compensa con la longitud restante por debajo de ella. El cálculo aumentaría considerablemente de dificultad en caso de que se tuviese que calcular la longitud de los conductores para cada vuelta del conductor.

Por definición la longitud media por vuelta se formulará como:

$$LMV = \pi R_m^2 = \pi \frac{D_m^2}{4} = \pi \frac{\left(\frac{D_o + D_i}{2}\right)^2}{4} = \pi(D_o + D_i)^2 \quad (4.53)$$

Donde:

LMV = Longitud media por vuelta en el devanado de (mm).

R_m = Radio medio (mm).

D_m = Diámetro medio (mm).

D_o = Diámetro exterior del devanado (mm).

D_i = Diámetro interior del devanado (mm).

Al reescribir la ecuación (4.53) en función de la profundidad radial:

$$LMV = \pi(D_i + PR) \quad (4.54)$$

Donde:

LMV = Longitud media por vuelta en el devanado (mm).

D_i = Diámetro interior del devanado (mm).

PR = Profundidad radial del devanado (mm).

4.14 Peso del conductor descubierto, el recubrimiento y la resistencia de los devanados

El peso total del conductor se calculará usando la longitud media por vuelta, el número de vueltas, el área de la sección transversal del conductor y la densidad del material.

4.14.1 Peso total del conductor descubierto

$$V_c = LMV \times n \times A_{efectiva} \quad (4.55)$$

Donde:

V_c = Volumen del conductor (mm³).

LMV = Longitud media por vuelta (mm).

n = Número de vueltas.

$A_{efectiva}$ = Área efectiva total del conductor (mm^2).

Una vez calculado el volumen del conductor, mediante la densidad de este se calculará el peso total en cada uno de los arrollamientos. La densidad será para el cobre:

$$\delta_c = 8966 \text{ kg}/m^3 = 8.966 \times 10^{-6} \text{ kg}/mm^3 \quad (4.56)$$

Donde:

δ_c = densidad del cobre (kg/m^3).

Mientras que para el aluminio:

$$\delta_a = 2699 \text{ kg}/m^3 = 2.699 \times 10^{-6} \text{ kg}/mm^3 \quad (4.57)$$

Donde:

δ_a = densidad del aluminio (kg/m^3).

$$P_{fase} = V_c \times \delta \quad (4.58)$$

Donde:

P_{fase} = Peso total de una de las fases (kg).

V_c = Volumen total del conductor descubierto (mm^3).

δ = densidad del material (kg/mm^3).

Para calcular el peso total del conductor:

$$P_c = 3P_{fase} \quad (4.59)$$

Donde:

P_c = Peso total del conductor (kg).

P_{fase} = Peso total de una de las fases (kg).

4.14.2 Peso total del aislamiento.

Se podrá calcular el peso total del aislamiento siguiendo el mismo proceso que en el apartado 4.14.1, se deberá hallar el volumen que ocupa únicamente el aislamiento dentro del conductor.

$$V_{c(Tot)} = LMV \times n \times A_{c(Tot)} \quad (4.60)$$

$V_{c(Tot)}$ = Volumen total del conductor (mm^3).

LMV = Longitud media por vuelta (mm).

n = Número de vueltas.

$A_{c(Tot)}$ = Área total del conductor recubierto (mm^2).

$$V_a = V_{c(Tot)} - V_c \quad (4.61)$$

Donde:

V_a = Volumen del aislamiento (mm^3).

V_c = Volumen del conductor (mm^3).

$V_{c(Tot)}$ = Volumen total del conductor (mm^3).

Llegado este punto, solo se deberán seguir los cálculos realizados en el apartado 4.14.1 una vez más, sustituyendo en estos los valores para el conductor, por los valores para el aislamiento. La densidad medida del papel *Kraft* utilizado para el aislamiento será según la norma ISO 534:2011 de entre 630 a 870 kg/m^3 .

4.14.3 Cálculo de la resistencia total en los devanados

El cálculo de la resistencia en los devanados se hará siguiendo la fórmula de esta:

$$R_d = \frac{\rho l}{A} \quad (4.62)$$

Donde:

R_d = Resistencia del devanado (Ω).

ρ = Resistividad del material (Ωcm).

$\rho = 2.1 \times 10^{-6} \Omega cm$ para el cobre a $75^\circ C$.

$\rho = 3.46 \times 10^{-6} \Omega cm$ para el aluminio a $75^\circ C$.

l = longitud total del conductor (cm).

A = Área de la sección transversal del conductor (cm^2).

La longitud total del conductor en cm vendrá dada de la siguiente forma:

$$l = \frac{LMV \times N}{10} \quad (4.63)$$

Donde:

LMV = Longitud media por vuelta (mm).

N = Número de vueltas.

Para calcular la resistencia total se deberá sumar la resistencia de cada una de las fases, esta será la suma de todos los arrollamientos que se sitúen sobre una columna del núcleo.

$$R_{fase} = \sum_{i=1}^n R_i \quad (4.64)$$

Donde:

R_{fase} = Resistencia de la fase colocada en la columna del núcleo (Ω).

R_i = Resistencia del arrollamiento i -ésimo calado sobre la columna de una misma fase (Ω).

Se obtendrá así la resistencia total del conductor:

$$R_{Tot} = 3R_{fase} \quad (4.65)$$

Donde:

R_{fase} = Resistencia de la fase colocada en la columna del núcleo (Ω).

R_{Tot} = Resistencia total del conductor (Ω).

4.14.4 Desviaciones del cálculo analítico para la resistencia y el peso

Cuando se calcule el peso total del conductor descubierto, así como recubierto y la resistencia, usada para el posterior cálculo de las pérdidas I^2R , se deberá tener en consideración la longitud y el peso de los conductores de guía, aquellos que conecten los comienzos y finales de los devanados a los terminales, así como las tomas de regulación.

- Para transformadores de poca potencia y tensión se podrá estimar el peso de los conductores de guía como un 2% del peso total del conductor de BT.
- Para los LPT se deberá calcular la longitud del conductor de guía para el devanado BT tanto a los terminales como a las barras neutras para estimar el peso del conductor de BT.

5. Cálculo de las pérdidas en carga

5.1 Cálculo de las pérdidas por efecto Joule

Cualquier conductor o metal a través del que circule una corriente eléctrica estará sometido a un aumento de su temperatura, esto, a consecuencia de las pérdidas en forma de calor en dichos elementos.

Conocido como efecto Joule, recibe su nombre por James Prescott Joule, quien fue un importante físico y el primero en estudiar y por ende descubrir el calentamiento resistivo en 1842. Se debe principalmente a que parte de la energía cinética que transportan los electrones se pierde en forma de choques que sufren estos con los átomos del material que conforma el elemento donde se encuentran, convirtiendo esta energía cinética en vibración y, por tanto, en calor.

Las pérdidas por efecto Joule se calcularán como el total de las pérdidas por resistencia a corriente continua en cada uno de los devanados. La corriente de fase correspondiente a las diferentes posiciones en las tomas de regulación se deberá tener en consideración para los cálculos. Las pérdidas, además, deberán ser calculadas a una temperatura de referencia. Según la norma (UNE-EN 60076-1, 2013), la temperatura de referencia con un calentamiento medio asignado a los arrollamientos menor o igual a 65°K para transformadores sumergidos en aceite será de 75°C, este valor podrá variar en otros estándares como el ANSI.

Las pérdidas por efecto Joule podrán estimarse conociendo el peso del conductor total y la densidad de corriente, este método aparece en el libro de (Nair, 2021). Para el diseño eléctrico, el cálculo se realizará siempre usando el valor de la resistencia calculada en los devanados o por fase, mientras que el método mencionado en el libro el peso solo será usado para estimaciones o comprobaciones, este se calcula como:

$$I^2R = K\delta^2W(W) \quad (5.1)$$

Donde:

I^2R = Pérdidas por calentamiento en los devanados (W).

$K = 2.4$ para el cobre y 13.0 para el aluminio.

δ = Densidad de corriente (A/mm²).

W = Peso total del conductor descubierto (kg).

La fórmula (5.1) podrá obtenerse mediante las siguientes ecuaciones:

$$I^2R = I^2 \frac{\rho l}{A} \quad (5.2)$$

Donde:

I^2R = Pérdidas por calentamiento en los devanados (W).

I = Corriente de fase que circula a través del conductor (A).

ρ = Resistividad del material conductor (61Ωm) a 25°C

l = Longitud total del conductor (mm).

A = Área del conductor descubierto (mm²).

Y:

$$lAD = W \quad (5.3)$$

Donde:

W = Peso total del conductor (kg).

l = Longitud total del conductor (mm).

D = Densidad del material (kg/m³).

A = Área del conductor descubierto (mm²).

Conociendo que:

$$l \propto \frac{W}{AD} \quad (5.4)$$

Donde:

W = Peso total del conductor (kg).

l = Longitud total del conductor (mm).

D = Densidad del material (kg/m³).

A = Área del conductor descubierto (mm²).

Al sustituir los términos de las ecuaciones (5.2),(5.3) y (5.4) en la ecuación inicial (5.1) se obtiene:

$$I^2R = I^2 \frac{\rho W}{A^2 D} = \frac{\delta^2 \rho W}{D} = K \delta^2 W(W) \quad (5.5)$$

Donde:

I^2R = Pérdidas por calentamiento en los devanados (W).

I = Corriente de fase que circula a través del conductor (A).

ρ = Resistividad del material conductor (61Ωm) a 25°C.

A = Área del conductor descubierto (mm²).

D = Densidad del material (kg/m³).

K = 2.4 para el cobre y 13.0 para el aluminio.

δ = Densidad de corriente (A/mm²).

W = Peso total del conductor descubierto (kg).

Cuando los valores de ρ y D se sustituyan para el cobre y el aluminio, los valores de K nos arrojarán unos valores de 2.4 y 13.0 respectivamente a una temperatura de referencia acorde a la normativa (UNE-EN 60076-1, 2013) de 75°C.

5.2 Cálculo de las pérdidas por corrientes parásitas y por dispersión

Las pérdidas por corrientes parásitas, también conocidas como corrientes de Eddy, y las perdidas por dispersión serán producto de fugas en una parte del flujo que concatena los devanados, denominado flujo de dispersión, este circulará a través de las tapas de las bornas, el tanque, las láminas que conforman el núcleo y cualquier otra parte metálica próxima al flujo que atraviesan los devanados.

La distribución espacial del flujo tanto en el eje axial como radial será necesaria para el cálculo exacto de las pérdidas de este capítulo, especialmente cuando la distribución de amperios-vuelta sea asimétrica y cuando la densidad del flujo magnético que acaba en fuga sea elevada. A partir de esta distribución, se podrá calcular mediante “FEM”, métodos de elementos finitos, las pérdidas con una proximidad mayor a las pérdidas reales, pudiendo ser objeto de un proyecto totalmente único aparte.

En este proyecto se calcularán las pérdidas mediante un cálculo analítico tal y como muestra el libro de (Nair, 2021), en este se asumirá la distribución espacial del flujo, y, gracias a una serie de fórmulas demostradas empíricamente, se conducirá a una solución próxima a la realidad, aunque no tan exacta como podría ser por elementos finitos.

5.2.1 Pérdidas por corrientes de parásitas en los devanados

Se calcularán usando una de las fórmulas alternativas que nos ofrece la literatura de (Nair, 2021) para las pérdidas de las corrientes de Eddy en los devanados de cobre. Se utilizará aquella que haga uso de la mayor cantidad de variables resueltas al momento del cálculo.

$$P_{eddy} = 3.1 \left(\frac{f}{50}\right)^2 \left(\frac{t}{10}\right)^{3.84} (n_r m_l)^{2.07} I^2 R \quad (5.6)$$

Donde:

f = Frecuencia (Hz)

t = Espesor del conductor (mm)

n_r = Número de conductores paralelos en dirección radial.

m_l = Número de capas en el devanado.

$(n_r m_l)$ = Número total de conductores en la dirección radial.

$I^2 R$ = Pérdidas por efecto Joule en el devanado (W).

5.2.2 Pérdidas por dispersión en las tapas de las bornes

Normalmente se usará acero de fundición, conocido como “Hot Steel” o “Construction Steel” según los índices de materiales para transformadores que se utilizan en la calderería del tanque

y las tapas. Para el cálculo de las pérdidas se definirá si esta calderería de las tapas es de acero fundido o de acero inoxidable.

En caso de que la calderería fuese de acero fundido:

$$W_{\text{tapa-bornas}}(W) = 0.045I^{1.25} \left(\frac{f}{50}\right)^{1.5} \quad (5.7)$$

Donde:

f = Frecuencia (Hz).

I = Corriente de fase nominal a través de la borna (A).

Mientras que en el caso de que la calderería fuese de acero inoxidable:

$$W_{\text{tapa-bornas}}(W) = 0.045I^{1.25} \left(\frac{f}{50}\right)^{1.5} \cdot 0.5 \quad (5.8)$$

Donde:

f = Frecuencia (Hz).

I = Corriente de fase nominal a través de la borna (A).

5.2.3 Pérdidas por dispersión en las vigas de aprieto.

Dentro de la cuba del transformador, además de las partes activas (bobinas y núcleo) habrá que disponer de una estructura que amarre y soporte el núcleo, se podrán encontrar dos opciones de amarre para las vigas de aprieto que impactarán en las pérdidas:

- Si las vigas de aprieto dispusieran de varas de fijación o “Tie rods”, Figura 5.1, no se considerarán las pérdidas por dispersión en las vigas.



FIGURA 5.1. DETALLE DEL NÚCLEO Y SUJECIÓN DE LA PARTE ACTIVA MEDIANTE VARAS DE FIJACIÓN.

- En caso de que se suministraran placas de amarre o “Flitch plate” para la sujeción de las vigas de aprieto, como se muestra en la Figura 5.2:

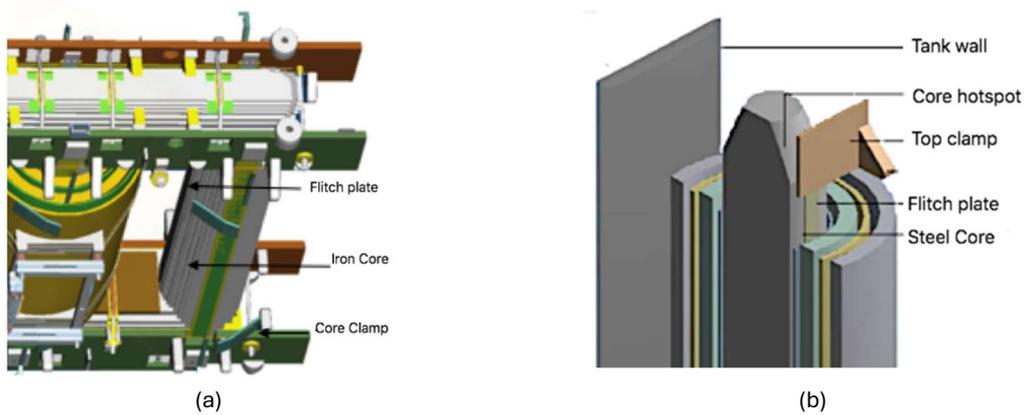


FIGURA 5.2. DETALLE DEL NÚCLEO Y SUJECIÓN DE LA PARTE ACTIVA MEDIANTE PLACAS DE AMARRE.

Las pérdidas en las placas de amarre siempre que estas estén compuestas de acero se calcularán según la ecuación:

$$P_{pa} = 2.6 \times 10^4 W^{2.4} B^2 \quad (5.9)$$

Donde:

P_{pa} = Pérdidas por dispersión en la placa de amarre de acero (kW/m)

W = Ancho de la placa de amarre (m).

B = Densidad de flujo en la placa de amarre (T).

Mientras que si las placas de fuesen de acero inoxidable:

$$P_{pa} = 1.44 \times 10^5 W^4 B^2 \quad (5.10)$$

Donde:

P_{pa} = Pérdidas por dispersión en la placa de amarre de acero inoxidable (kW/m)

W = Ancho de la placa de amarre (m).

B = Densidad de flujo en la placa de amarre (T).

La densidad de flujo en la placa se calculará a partir de la densidad de flujo existente en el núcleo, siguiendo la relación de la permitividad en el material y la densidad en este:

$$\frac{B_1}{B_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \quad (5.11)$$

Donde:

B_1 = Densidad de flujo magnético en el núcleo (T).

B_2 = Densidad de flujo magnético en la placa de enganche (T).

μ_1 = Permeabilidad relativa en el núcleo ≈ 5000 .

μ_2 = Permeabilidad relativa en la placa de amarre ≈ 200 .

Calculadas las pérdidas en función de la longitud, se multiplicará por la longitud total de la placa de amarre para obtener el valor de las pérdidas totales en las placas de amarre para cada una de las columnas del núcleo.

La diferencia entre la disposición o no de “*Fitch plates*” se puede observar en el estudio de (Phani Kumar Mokkaaty, y otros, 2015) en la Figura 5.3. El objeto del estudio era observar las diferencias entre los diferentes “*Shieldings*” utilizados para la disminución de las pérdidas, si bien irrelevante para nuestro proyecto, facilita una imagen clara del motivo de consideración de estas pérdidas.

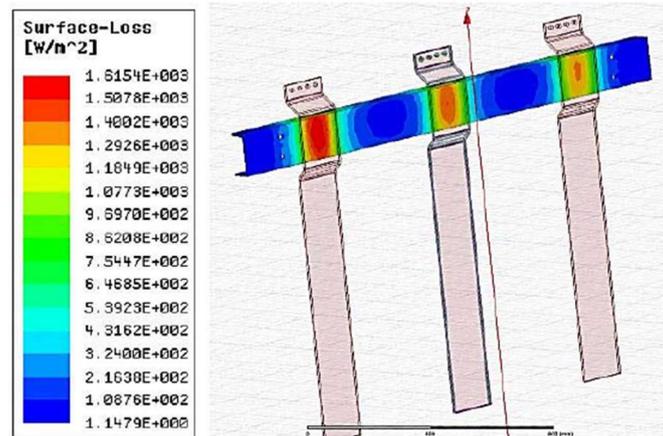


FIGURA 5.3. DETALLE DE LA DENSIDAD DE DISTRIBUCIÓN DE PÉRDIDAS SUPERFICIALES DEBIDO A LAS PLACAS DE AMARRE.

Además de este, existen algunos estudios que tratan al detalle el uso de “*Fitch plates*”, como el de (Koppikar, Kulkarni, Srinivas, Khaparde, & Jain, 1999).

5.2.4 Pérdidas por corriente circulante en bobinados de disco continuo

Estas se producirán por la inducción de la corriente que recorre los conductores espaciados radialmente que conforman un disco, se calcularán de la siguiente forma:

$$P_{cc} = 2.4 \times 10^6 \times \frac{1}{180} (kr)^4 \left(1 - \frac{5}{n^2} - \frac{4}{n^4}\right) \times I^2 R \quad (5.12)$$

Donde:

P_{cc} = Pérdidas por corriente circulante (W).

r = Dimensión radial de las espiras aisladas (m).

n = Número de vueltas en la dirección radial.

$I^2 R$ = Pérdidas por efecto Joule en el devanado (W).

$$r = n(t + t_i) \quad (5.13)$$

Donde:

n = Número de vueltas en la dirección radial.

t = Espesor de un conductor (m).

t_i = Espesor del aislamiento entre conductores (m).

El factor k se expresará de la siguiente forma:

$$k = 0.48 \times 10^{-4} \sqrt{\frac{h_c}{h_w}} \left(\frac{t}{t + t_i} \right) \frac{f}{\rho} \quad (5.14)$$

Donde:

f = Frecuencia (Hz).

ρ = Resistividad del material conductor (66Ωm) a 25°C.

h_c = Altura total del cobre en la dirección axial (m).

h_w = Altura total del bobinado en la dirección axial (m).

t = Espesor de un conductor (m).

t_i = Espesor del aislamiento entre conductores (m).

Tanto $\sqrt{\frac{h_c}{h_w}}$ como $\left(\frac{t}{t+t_i} \right)$ son factores espaciales en las direcciones axial y radial respectivamente.

5.2.5 Pérdidas en el tanque

La literatura científica se presenta con un número considerable de alternativas sobre distintas fórmulas empíricas, con el objetivo de calcular analíticamente las pérdidas en el tanque (Maximov, y otros, 2021), así como se presentan variaciones entre un fabricante y otro, todas ellas conducirán a un resultado próximo entre sí, se utilizará para el diseño aquella fórmula empírica más favorable, que será aquella que haga uso de variables ya calculadas previamente en el proceso de diseño. La ecuación que nos aportará el valor de estas pérdidas será:

$$P_t = N \times \left(\frac{f}{50} \right)^{1.5} \frac{I^2 T^2}{H} \times 10^{-4} (W) \quad (5.15)$$

Donde:

P_t = Pérdidas por dispersión de flujo en el tanque (W).

N = número de caras de los bobinados expuestas al tanque, de la forma:

- $N = 6$ si los arrollamientos tuvieran una distancia cercana o igual al tanque en todas las dimensiones.
- $N = 5$ si existiese cambiador de tomas situado en el lado corto del tanque.

I = Corriente de fase (A).

T = Número de vueltas por fase.

H = Altura de la ventana (mm).

f = Frecuencia (Hz).

5.2.6 Pérdidas en el tanque debido a buses de alta intensidad

En el caso de que los buses o barras de alta tensión se sitúan muy cerca de la cuba del transformador, estos producirán una serie de pérdidas por dispersión en las cercanías con el tanque. No se realizará su cálculo en este proyecto pues requiere de un diseño en detalle de la parte activa del transformador y desde el punto de vista de un diseño inicial se puede aproximar el cálculo de forma total.

5.2.7 Pérdidas totales por dispersión del flujo

Existe una fórmula empírica para calcular las pérdidas totales recogida en la mayoría de los manuales de diseño de transformadores, así como en el libro de (Nair, 2021).

$$P_{d\ Tot} = K \left[\frac{IT}{1000h} \right]^2 D \left[a + \frac{b+c}{3} \right] \quad (5.16)$$

Donde:

$P_{d\ Tot}$ = Pérdidas totales por dispersión de flujo (W)

K = Factor de dimensionamiento, 25 hasta 20MVA, 40 hasta 40MVA y 50 a partir de 40MVA

a = Separación entre los devanados (mm)

b = Profundidad radial del devanado 1 (mm)

c = Profundidad radial del devanado 2 (mm)

D = Diámetro medio del flujo de dispersión (mm)

h = Distancia entre los amarres inferior y superior del núcleo o altura de la ventana (mm).

Esta ecuación aportará una correcta estimación de las pérdidas totales, a la que el diseñador decidirá si aplicar o no un factor de seguridad para el valor garantizado, al uso de esta fórmula se asumirá que el transformador estará formado por dos devanados únicamente. En el caso de que existiera un devanado separado de regulación calado encima del devanado exterior o entre este y el interior, se tomará como profundidad radial del devanado al que esté conectado el devanado de regulación la distancia máxima entre el interior y el exterior de uno a otro, como si se tratará de un único devanado e independientemente de la separación existente entre ellos.

6. Cálculo de la reactancia

Independientemente del tipo de bobinado, los devanados del transformados estarán formados por un número finito de espiras, a través de las cuales circula una corriente alterna senoidal, esta hará que los conjuntos de espiras funcionen prácticamente como una reactancia desde el punto de vista eléctrico. Esta será la causante de la mayoría de las pérdidas en carga durante el ciclo de vida del transformador, ya que supondrá un peso mucho mayor respecto a la resistencia que aportan los devanados al cálculo de la impedancia.

El proceso de estudio y cálculo de la reactancia de los devanados partirá desde la configuración más simple que se puede encontrar en un transformador de potencia, un transformador de dos devanados, ampliando y diferenciando el método de cálculo a medida que se añadan aquellas características que separen la configuración de los arrollamientos previamente definidos, del caso ideal, hasta llegar a un cálculo que cuente con todas las variables consideradas en el tipo de arrollamientos seleccionados durante la fase de diseño.

6.1 Cálculo de la reactancia de un transformador con dos devanados

Este método se situará en el análisis más simplificado y, por tanto, será el que mayor error acometerá respecto al resultado real, a pesar de esto, el utilizarlo puede ser de ayuda ya que da pie a una buena aproximación. Se partirá un transformador con dos devanados únicamente, donde la distribución de los amperios vuelta en ellos estará balanceada.

El cálculo de la reactancia en tanto por ciento se hará siguiendo la fórmula:

$$x = 8\pi^2 f \frac{I_f}{V_f} T_f^2 K \Delta \times 10^{-8} (\%) \quad (6.1)$$

Donde:

x = % Reactancia.

f = Frecuencia (Hz)

I_f = Intensidad de fase (A)

V_f = Tensión de fase (V)

T_f = Número de vueltas en la fase dada, del inglés "Turns"

La corriente, la tensión y el número de vueltas por fase, deberán corresponder a la toma de regulación calculada correspondiente, tanto para el devanado de BT como de AT.

La ecuación anterior podrá reescribirse en virtud de la tensión por vuelta dado que:

$$V_{vuelta} = \frac{V_f}{T_f} \quad (6.2)$$

Al despejar y sustituir (6.2) en la ecuación (6.1), esta quedará de la siguiente forma:

$$x = 8\pi^2 f \frac{I_f}{V_{vuelta} \cdot T_f} T_f^2 K \Delta \times 10^{-8} (\%) \quad (6.3)$$

Para calcular K, conocido como factor de Rogowski se hará uso de la siguiente fórmula:

$$K = 1 - \frac{PR_{BT} + PR_{BT-AT} + PR_{AT}}{\pi \left(\frac{h_{BT} + h_{AT}}{2} \right)} \quad (6.4)$$

Donde:

PR_{BT} = Profundidad radial del arrollamiento BT (mm).

PR_{BT-AT} = Distancia de separación entre los devanados de BT y AT (mm).

PR_{AT} = Profundidad radial del arrollamiento AT (mm).

h_{BT} = Altura axial eléctrica del devanado BT (mm).

h_{AT} = Altura axial eléctrica del devanado AT (mm).

Más adelante se estudiará el término de altura axial efectiva de los devanados, en la ecuación (6.4) este correspondería a la altura media entre los devanados, definiendo este término:

$$L = \frac{h_{BT} + h_{AT}}{2} \quad (6.5)$$

Donde:

L = Altura efectiva eléctrica (mm).

h_{BT} = Altura axial eléctrica del devanado BT (mm).

h_{AT} = Altura axial eléctrica del devanado AT (mm).

Al reescribir la ecuación (6.4), según el término obtenido en la ecuación (6.5), se obtendrá una nueva fórmula semejante:

$$K = 1 - \frac{PR_{BT} + PR_{BT-AT} + PR_{AT}}{\pi L} \quad (6.6)$$

Donde:

PR_{BT} = Profundidad radial del arrollamiento BT (mm).

PR_{BT-AT} = Distancia de separación entre los devanados de BT y AT (mm).

PR_{AT} = Profundidad radial del arrollamiento AT (mm).

L = Altura efectiva eléctrica (mm).

El proceso para obtener la fórmula (6.6) se menciona, de cara a disponer de varios métodos de cálculo la reactancia, todos en base a unas mismas variables. Este cálculo será el menos aproximado, de forma que podrá utilizarse como comprobación del valor final obtenido mediante aquellos métodos más exactos que se verán más adelante en este capítulo.

El término Delta se obtendrá de la siguiente forma:

$$\Delta = \frac{PR_{BT} \cdot LM_{BT}}{3h_{BT}} + \frac{PR_{BT-AT} \cdot LM_{BT-AT}}{\left(\frac{h_{BT} + h_{AT}}{2}\right)} + \frac{PR_{AT} \cdot LM_{AT}}{3h_{AT}} \quad (6.7)$$

Donde:

PR_{BT} = Profundidad radial del arrollamiento BT (mm).

PR_{BT-AT} = Distancia de separación entre los devanados de BT y AT (mm).

PR_{AT} = Profundidad radial del arrollamiento AT (mm).

LM_{BT} = Longitud media del devanado BT (mm).

LM_{BT-AT} = Longitud media de la separación entre el devanado BT y AT (mm).

LM_{AT} = Longitud media del devanado AT (mm).

h_{BT} = Altura axial eléctrica del devanado BT (mm).

h_{AT} = Altura axial eléctrica del devanado AT (mm).

Como se había definido en la selección 4.9.1, en caso de que el arrollamiento sea en espiral o helicoidal la altura axial física será superior a la altura axial eléctrica, sumando a esta una espira. El cálculo de la reactancia se realizará utilizando la altura eléctrica restando la anchura de una espira de la altura axial para este caso.

6.1.1 Correcciones en la fórmula de Rogowski

La ecuación (6.7) será la más básica que el diseñador podrá utilizar para el cálculo de la reactancia en un transformador con dos devanados, sin embargo, aquí se estará asumiendo un caso poco real, si bien funcionará como una buena aproximación, existen correcciones menores a la fórmula en caso de que la estructura de los devanados se desvíe del caso ideal.

Algunas correcciones descritas en la literatura (Nair, 2021) serán explicadas sin entrar al detalle, pues para ello están los siguientes métodos a estudiar, las principales desviaciones serán:

- Cuando la altura axial de los devanados sea considerablemente pequeña y la profundidad radial de estos alta, el factor de Rogowski puede no llevar a un cálculo preciso, siendo necesario utilizar una fórmula más precisa para su cálculo.
- En el caso de que haya un desbalance en los amperios vuelta debido a las tomas de regulación desde el cuerpo del devanado, se deberá multiplicar por unos factores de corrección.

6.2 Cálculo de la reactancia con diferentes distribuciones de amperios vuelta

Es usual en los grandes transformadores de potencia, debido en parte a la unicidad del producto y las especificaciones individuales para cada cliente, que la distribución de los amperios vuelta de los devanados no sea homogénea, tal como sucede en el capítulo 6.1.

La distribución no homogénea de los amperios vuelta puede ser debida a la posición de las tomas de regulación, la formación de un devanado en capas radiales o varios arrollamientos conectados axialmente.

Hay que mencionar que los diagramas de amperios-vuelta pueden derivar de un método más general de cálculo analítico como se muestra en algunos manuales de diseño y como se detalla en la Figura 6.1. Se obviarán los términos de la Figura 6.1, pues no se utilizará para ningún cálculo, simplemente con motivo de tener en mente la variedad de configuraciones que se pueden obtener:

GENERALISED AMPRE TURN DIAGRAM AND METHOD FOR CALCULATING $\Sigma(LMT.D)$

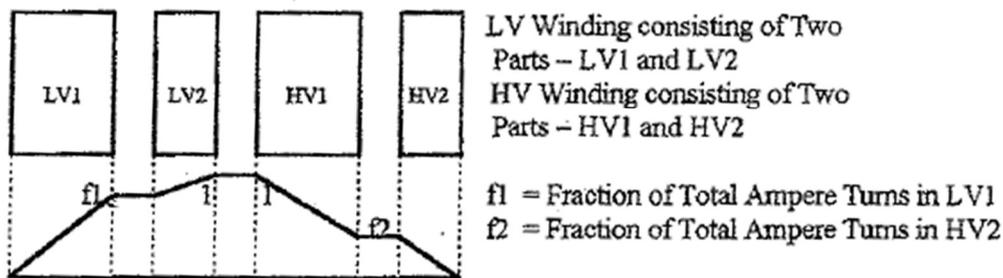


FIGURA 6.1. DIAGRAMA DE AMPERIOS VUELTA GENERALIZADO.

Para el cálculo de la reactancia se seguirá el método mencionado en el libro de (Nair, 2021). A medida que se avance en este capítulo se añadirán desviaciones al proceso de cálculo y las fórmulas hasta llegar a un caso específico adecuado para este proyecto.

6.3 Arrollamiento BT-AT-BT

Aunque el libro de (Nair, 2021) menciona este caso como una configuración de devanados BT-AT-BT, también conocido como devanado concéntrico doble, lo cierto es que el diagrama de la Figura 6.2 también puede pertenecer al caso donde exista un devanado de regulación ensamblado concéntricamente sobre el devanado de AT con un cambiador de tomas de tipo *reversing switch*. Con motivo del cálculo se utilizará el ejemplo con un devanado BT-AT-BT a modo de entender los subíndices, si bien en cualquier otro caso el cálculo sería exactamente el mismo, únicamente variando los subíndices de los términos.

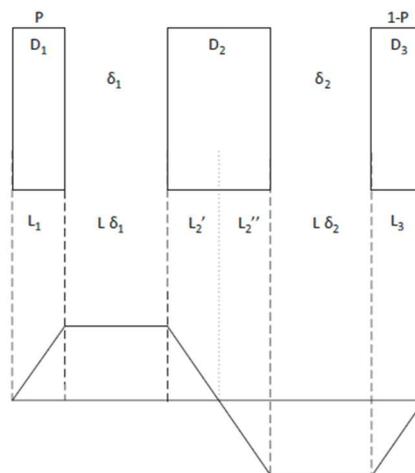


FIGURA 6.2. AMPERIOS VUELTA PARA UN ARROLLAMIENTO TIPO BT-AT-BT.

La distribución en los devanados se obtendrá a partir dos nuevos términos correspondientes al porcentaje del devanado completo que aportan al cálculo de los amperios vuelta:

$$PR'_{AT} + PR''_{AT} = PR_{AT} \quad (6.8)$$

Donde:

PR_{AT} = Profundidad radial del arrollamiento AT completo (mm).

$PR_{AT'}$ = Profundidad radial del arrollamiento AT correspondiente al arrollamiento de BT más interno (mm).

$PR_{AT''}$ = Profundidad radial del arrollamiento AT correspondiente al arrollamiento de BT más externo (mm).

$$PR'_{AT} = PR_{AT} \cdot f_{AT} \quad (6.9)$$

Donde:

$PR_{AT'}$ = Profundidad radial del arrollamiento AT correspondiente al arrollamiento de BT más interno (mm).

PR_{AT} = Profundidad radial del arrollamiento AT completo (mm).

f_{AT} = Fracción de los amperios vuelta totales del devanado de AT correspondientes al arrollamiento BT más interno.

$$PR''_{AT} = PR_{AT} \cdot (1 - f_{AT}) \quad (6.10)$$

Donde:

$PR_{AT''}$ = Profundidad radial del arrollamiento AT correspondiente al arrollamiento de BT más externo (mm).

PR_{AT} = Profundidad radial del arrollamiento AT completo (mm).

f_{AT} = Fracción de los amperios vuelta totales del devanado de AT correspondientes al arrollamiento BT más interno.

Al reescribir Delta quedará:

$$\Delta = \frac{f_{AT}^2}{h} \left(\frac{PR_{BT1} \cdot LM_{BT1}}{3} + PR_{BT1-AT} \cdot LM_{BT1-AT} + \frac{PR'_{AT} \cdot LM'_{AT}}{3} \right) + \frac{(1 - f_{AT}^2)}{h} \left(\frac{PR''_{AT} \cdot LM''_{AT}}{3} + PR_{AT-BT} \cdot LM_{AT-B} + \frac{PR_{BT2} \cdot LM_{BT2}}{3} \right) \quad (6.11)$$

Donde:

f_{AT} = Fracción de los amperios vuelta totales del devanado de AT correspondientes al arrollamiento BT más interno.

h = Altura media del devanado (mm).

PR_{BT1} = Profundidad radial del arrollamiento interno BT (mm).

PR_{BT1-AT} = Distancia de separación entre el arrollamiento interno de BT y AT (mm).

$PR_{AT'}$ = Profundidad radial del arrollamiento AT correspondiente al arrollamiento de BT más interno (mm).

$PR_{AT''}$ = Profundidad radial del arrollamiento AT correspondiente al arrollamiento de BT más externo (mm).

PR_{AT-BT2} = Distancia de separación entre el arrollamiento AT y el externo de BT (mm).

PR_{BT2} = Profundidad radial del arrollamiento externo BT (mm).

LM_{BT1} = Longitud media del arrollamiento interno BT (mm).

LM_{BT1-AT} = Longitud media de la separación entre el arrollamiento interno de BT y AT (mm).

$LM_{AT'}$ = Longitud media del arrollamiento AT correspondiente al arrollamiento de BT más interno (mm).

$LM_{AT''}$ = Longitud media del arrollamiento AT correspondiente al arrollamiento de BT más externo (mm).

LM_{AT-BT2} = Longitud media de la separación entre el arrollamiento AT y el externo de BT (mm).

LM_{BT2} = Longitud media del arrollamiento externo BT (mm).

Esto no será más que una modificación de la formula mostrada en el apartado 6.1, además, otra suposición que se comete es que la altura de los devanados será la misma para todos y cada uno de ellos.

6.4 Arrollamientos realizados en dos devanados diferentes con separación entre ellos

Al igual que ocurría en el apartado 6.3, el libro de (Nair, 2021) solo se menciona dos de las opciones que derivan del método general, estas son el caso en el que se dispongan de arrollamientos con conductos axiales de refrigeración o arrollamientos compuestos por dos devanados diferentes con una separación entre ellos, tal y como menciona el título de la sección 6.4, este último será el caso más general para esta disposición de amperios vuelta, siendo su característica principal el hecho de que tenemos un devanado dividido en 2 radialmente, debido a una separación existente.

Otras posibles configuraciones con un diagrama de amperios vuelta igual al que se representa en la Figura 6.3 son, una configuración BT-AT-Taps donde el devanado de regulación pertenece al lado de AT con un cambiador de tomas lineal y una configuración AT-BT-Taps, donde el devanado de regulación y el cambiador de tomas poseen la misma configuración que el anterior.

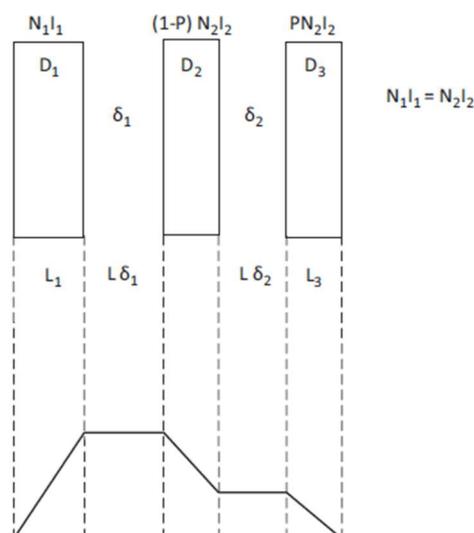


FIGURA 6.3. DIAGRAMA AMPERIOS-VUELTA PARA UN ARROLLAMIENTO BT-AT-TAPS.

En este caso Delta se calculará de la siguiente forma:

$$\Delta = \frac{1}{h} \left(\frac{PR_{BT} \cdot LM_{BT}}{3} + PR_{BT-AT1} \cdot LM_{BT-AT1} + \frac{PR_{AT1} \cdot LM_{AT}}{3} (1 + f_{AT} + f_{AT}^2) + f_{AT1}^2 \left(PR_{AT1-AT2} \cdot LM_{AT1-AT2} + \frac{PR_{AT2} \cdot LM_{AT2}}{3} \right) \right) \quad (6.12)$$

Donde:

f_{AT1} = Fracción de los amperios vuelta totales del devanado de AT correspondientes al arrollamiento sin regulación. (mm).

h = Altura media del devanado (mm).

PR_{BT} = Profundidad radial del arrollamiento BT (mm).

PR_{BT-AT1} = Distancia de separación entre el arrollamiento de BT y el interno de AT (mm).

PR_{AT1} = Profundidad radial del arrollamiento interno AT (mm).

$PR_{AT1-AT2}$ = Distancia de separación entre el arrollamiento interno de AT y el externo de AT (mm).

PR_{AT2} = Profundidad radial del arrollamiento externo AT (mm).

LM_{BT} = Longitud media del arrollamiento BT (mm).

LM_{BT-AT1} = Longitud media de la separación entre el arrollamiento de BT y el interno de AT (mm).

LM_{AT1} = Longitud media del arrollamiento interno AT (mm).

$LM_{AT1-AT2}$ = Longitud media de la separación entre el arrollamiento interno de AT y el externo de AT (mm).

LM_{AT2} = Longitud media del arrollamiento externo AT (mm).

6.5 Reactancia de devanados en diferentes arrollamientos con una disminución de la altura de estos hacia las capas exteriores

Este será el primer caso para el cual se utilizará una ecuación diferente a los anteriores apartados 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4 para calcular la reactancia en tanto por ciento, siendo la ecuación:

$$X = 1.1938 \times 10^{-4} \times \left(\frac{f}{50} \right) \frac{I_f T_f \varepsilon D_m}{V \times L} \quad (6.13)$$

Donde:

f = Frecuencia (Hz).

I_f = Corriente de fase (A).

T_f = Vueltas correspondientes a la corriente de la fase.

V/T = Relación entre la tensión y el número de vueltas calculada (V/vuelta).

L = Altura axial efectiva del devanado (mm).

La altura axial efectiva del devanado para este caso se define como:

$$L = R \left(\frac{N_T}{N_1} \right) + \frac{PR_{BT} + PR_{BT-AT} + PR_{AT}}{3} \quad (6.14)$$

Donde:

R = Altura del devanado con menor altura (mm).

N_T = Número de vueltas totales en el devanado.

N_1 = Número de vueltas totales a la altura R .

PR_{BT} = Profundidad radial del arrollamiento BT (mm).

PR_{AT} = Profundidad radial del arrollamiento AT (mm).

PR_{BT-AT} = Profundidad radial de la separación entre los arrollamientos BT y AT (mm).

El siguiente término de la ecuación se calculará como:

$$\varepsilon D_m = \left[\frac{DM_{BT} \cdot PR_{BT}}{3} + DM_{BT-AT} \cdot PR_{BT-AT} + Y \right] \quad (6.15)$$

Donde:

DM_{BT} = Diámetro medio del devanado BT (mm).

DM_{BT-AT} = Diámetro medio de la separación entre los devanados BT y AT (mm).

PR_{BT} = Profundidad radial del arrollamiento BT (mm).

PR_{BT-AT} = Profundidad radial de la separación entre los arrollamientos BT y AT (mm).

El término “Y” de la ecuación (6.15) se calculará como:

$$Y = \frac{1}{3} DM_{AT} \sum_{i=1}^{i=n} PR_{di} + DM_{s1} PR_{s1} \left(\frac{\sum_{i=2}^{i=n} n_i}{\sum_{i=1}^{i=n} n_i} \right)^2 + DM_{s2} PR_{s2} \left(\frac{\sum_{i=3}^{i=n} n_i}{\sum_{i=1}^{i=n} n_i} \right)^2 + \dots \quad (6.16)$$

$$+ DM_{s(n-1)} PR_{s(n-1)} \left(\frac{n_n}{\sum_{i=1}^{i=n} n_i} \right)^2$$

Donde:

DM_{AT} = Diámetro medio del devanado AT (mm).

$DM_{s1}, DM_{s2}, DM_{s3}, DM_{s4}, \dots, DM_{s(n-1)}$ = Diámetro medio de la separación entre los diferentes arrollamientos o capas que conforman el devanado de AT (mm).

$PR_{d1}, PR_{d2}, PR_{d3}, PR_{d4}, \dots, PR_{dn}$ = Profundidad radial de los arrollamientos 1, 2, 3, 4...n (mm).

$PR_{s1}, PR_{s2}, PR_{s3}, \dots, PR_{sn}$ = Profundidad radial de las separaciones entre los arrollamientos 1, 2, 3...(n-1) (mm).

$n_1, n_2, n_3, n_4, \dots, n_n$ = Número de vueltas en los arrollamientos 1, 2, 3, 4...n (mm).

Por ejemplo, para un caso concreto de 4 capas Y se calculará como:

$$Y = \frac{1}{3} DM_{AT} \sum_{i=1}^{i=n} PR_{di} + DM_{s1} PR_{s1} \left(\frac{n_2 + n_3 + n_4}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4} \right)^2 \quad (6.17)$$

$$+ DM_{s2} PR_{s2} \left(\frac{n_3 + n_4}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4} \right)^2$$

$$+ DM_{s3} PR_{s3} \left(\frac{n_4}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4} \right)^2$$

7. Cálculo de las dimensiones de la ventana del núcleo, las pérdidas en el núcleo, eficiencia y regulación.

7.1 Cálculo de las dimensiones de la ventana del núcleo y el peso del núcleo

En los transformadores de potencia tipo columna se podrán encontrar diferentes configuraciones de núcleos ferromagnéticos, dependientes de dos variables principales, el número de fases y el número de columnas. Aumentar el número de columnas por encima del número de fases ayudará a disminuir la influencia que tiene el flujo de dispersión sobre la máquina, ya que facilitará un camino de menos reluctancia al flujo magnético fuera de los devanados. Además, se podrán encontrar núcleos fuera de estas categorías, como serán los núcleos amorfos o los núcleos de igual distancia entre columnas.

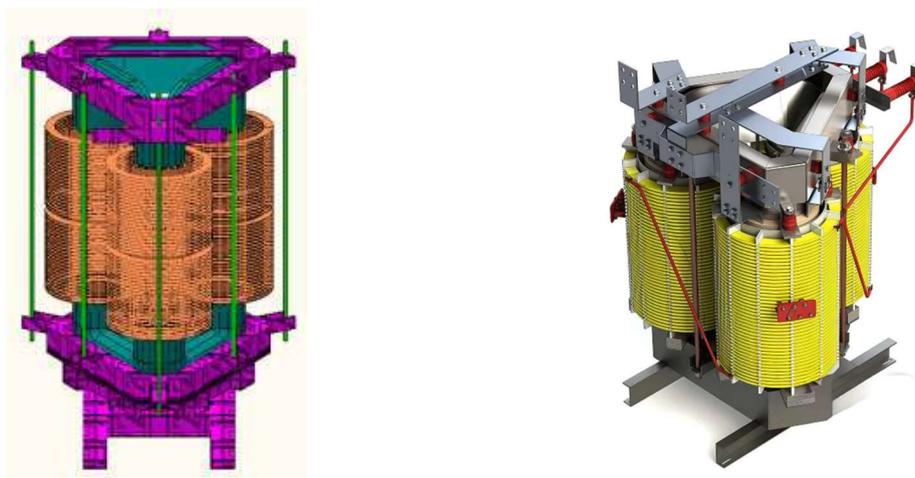


FIGURA 7.1. NÚCLEOS CON IGUAL DISTANCIA ENTRE SUS COLUMNAS.

Las clasificaciones más comunes de los núcleos forman los transformadores serán:

- Monofásicos de 2 columnas, se fabricarán con un devanado situado en cada columna.
- Monofásicos de 3 columnas, donde se situarán ambos devanados en una única columna central.
- Trifásicos de 3 columnas, en estos se situarán cada una de las fases compuestas por sus diferentes devanados en una columna diferente cada una.
- Trifásicos de 5 columnas, las bobinas se calarán de la misma forma que en los trifásicos de 3 columnas, únicamente dispondrá de dos columnas en los lados exteriores del 50% del ancho que las columnas principales.



(a)



(b)

FIGURA 7.2. TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS DE 3 COLUMNAS (A) DURANTE EL CALADO DE LAS BOBINAS EN EL NÚCLEO Y (B) CON EL CALADO COMPLETO.



(a)



(b)

FIGURA 7.3. TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS DE 3 COLUMNAS (A) DURANTE EL CALADO DE LAS BOBINAS EN EL NÚCLEO Y (B) CON EL CALADO COMPLETO.

7.1.1 Núcleo de tres fases y tres columnas

La altura de la ventana se calculará como:

$$A_v = A_{axial\ máx.} + S_{devanado-yugo(inferior)} + S_{devanado-yugo(superior)} \quad (7.1)$$

Donde:

A_v = Altura de la ventana del núcleo (mm).

$A_{axial\ máx.}$ = Altura axial del devanado de mayor altura (mm).

$S_{devanado-yugo(inferior)}$ = Separación entre el devanado y el yugo en la parte inferior de este (mm).

$S_{devanado-yugo(superior)}$ = Separación entre el devanado y la parte superior del yugo (mm).

Mientras que la distancia entre las columnas que conforman el núcleo podrá calcularse como:

$$D_{col.} = PR_{ext.} + S_{f-f} \quad (7.2)$$

Donde:

$D_{col.}$ = Distancia entre las columnas del núcleo (mm).

$PR_{ext.}$ = Profundidad radial del devanado más exterior que conforma el conjunto de bobinas (mm).

S_{f-f} = Separación entre las distintas fases del transformador(mm).

El peso total del núcleo se podrá calcular sumando el peso del núcleo donde las láminas estarán orientadas en la misma dirección que el grano y perpendiculares a este.

$$P_{nucleo} = P_{\perp} + P_{\parallel} \quad (7.3)$$

Donde:

P_{nucleo} = Peso total del núcleo (kg).

P_{\perp} = Peso total de las láminas del núcleo con orientación perpendicular al grano del acero (kg).

P_{\parallel} = Peso total de las láminas del núcleo con orientación paralela al grano del acero (kg).

El peso de las láminas paralelas a la orientación del grano será:

$$P_{\parallel} = [3 \cdot A_v + 4(D_{col.} - a_{m\acute{a}x.})]7.65 A_{efectiva} \times 10^{-4}(kg) \quad (7.4)$$

Donde:

P_{\parallel} = Peso total de las láminas del núcleo con orientación paralela al grano del acero (kg).

A_v = Altura de la ventana del núcleo (mm).

$D_{col.}$ = Distancia entre las columnas del núcleo (mm).

$a_{m\acute{a}x.}$ = Ancho del escalón del núcleo máximo (mm).

$A_{efectiva}$ = Área efectiva de la sección transversal que inscribe al núcleo (cm²).

El peso de las láminas perpendiculares a la orientación del grano será:

$$P_{\perp} = 7.65 \times 6 \cdot a_{m\acute{a}x.} \times A_{efectiva} \times 10^{-4}(kg) \quad (7.5)$$

Donde:

P_{\perp} = Peso total de las láminas del núcleo con orientación perpendicular al grano del acero (kg).

$a_{m\acute{a}x.}$ = Ancho del escalón del núcleo máximo (mm).

$A_{efectiva}$ = Área efectiva de la sección transversal que inscribe al núcleo (cm²).

7.1.2 Núcleo de tres fases y cinco columnas

Al suponer que las columnas centrales conformarán un 100% y las laterales un 50%:

$$L = 4A_v + 2.4D_{col.} + 2.4D_{columnas\ exteriores} + 1.2a_{m\acute{a}x.} \quad (7.6)$$

Donde:

L = Longitud media del núcleo (mm).

A_v = Altura de la ventana del núcleo (mm).

$D_{col.}$ = Distancia entre las columnas del núcleo (mm).

$D_{columnas\ exteriores}$ = Distancia de las columnas centrales a las exteriores del núcleo(mm).

$a_{m\acute{a}x.}$ = Ancho del escalón del núcleo máximo (mm).

El peso del núcleo se calculará ahora como:

$$P_{núcleo} = 7.65 \times 10^{-4} \times A_{efectiva} \times L \quad (7.7)$$

Donde:

$P_{núcleo}$ = Peso total del núcleo (kg).

$A_{efectiva}$ = Área efectiva de la sección transversal que inscribe al núcleo (cm²).

L = Longitud media del núcleo (mm).

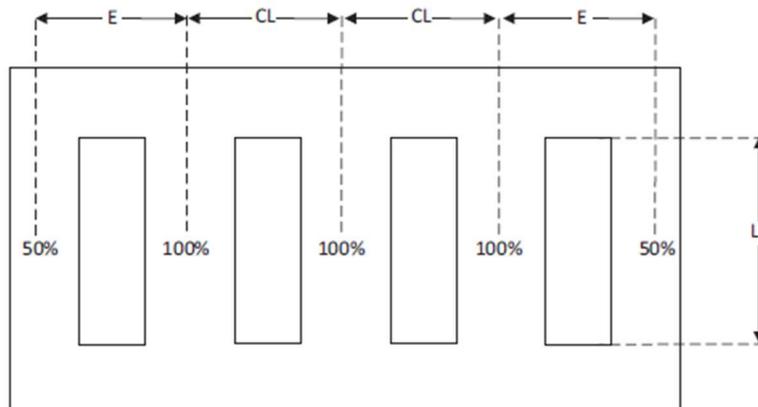


FIGURA 7.4. DIMENSIONES RELATIVAS TÍPICAS DEL ANCHO DE LAS COLUMNAS PARA UN NÚCLEO DE 3 FASES Y 5 COLUMNAS.

7.2 Cálculo de las pérdidas en el núcleo

A partir de las láminas de “CRGO Steel”, podremos obtener las pérdidas específicas en la orientación del grano mediante gráficas o tablas facilitadas a través de ensayos de Epstein por parte del fabricante. Cuando se construya el núcleo, el flujo magnético en las juntas de las diferentes orientaciones y alrededor de estas, desviará su orientación de la dirección del grano. Por tanto, se generará un flujo de dispersión que aumentará las pérdidas en el núcleo, es decir, las pérdidas en vacío o por energización de la máquina.

7.2.1 Cálculo de las pérdidas mediante un factor de fabricación medio

Este primer método para calcular las pérdidas en el núcleo asumirá que la longitud de las columnas permanece constante, así como la distancia entre estas, de tal forma que las pérdidas solo serán múltiplos de las pérdidas específicas para un diámetro de núcleo dado. Los factores de construcción serán más pequeños conforme los diámetros de los núcleos aumenten en tamaño.

Los factores de construcción típicos usados para los cálculos de las pérdidas en vacío se dan en la Figura 7.5 que aparece en el libro de (Nair, 2021). Además, estos valores solo deberán ser usados para cálculos de transformadores trifásicos de 3 columnas.

Building Factors for Different Grades for Different Core Circles

Core Circle (mm)	Building Factor "K"		
	M4	MOH	23ZDKH90
75-95	1.35	1.4	1.45
96-105	1.32	1.35	1.40
106-130	1.32	1.32	1.40
131-160	1.32	1.32	1.40
161-200	1.30	1.30	1.35
201-250	1.28	1.28	1.33
251-300	1.25	1.25	1.30
301-400	1.25	1.25	1.30

For laser grade material, the building factor is about 5% more than the values, for M4 MOH, etc. The building factor for step-lap joints is about 12%–15% lower than the above values.

FIGURA 7.5. TABLA CON DIFERENTES FACTORES DE CONSTRUCCIÓN PARA DIFERENTES DIÁMETROS Y GRADOS DEL NÚCLEO.

Los factores requerirán de revisiones periódicas basadas en valores ensayados y cambiarán según el material usado para la construcción del núcleo.

Las pérdidas en el núcleo podrán formularse entonces como:

$$P_{nucleo} = K \cdot S \times P_{nucleo} \quad (7.8)$$

Donde:

P_{nucleo} = Pérdidas totales del núcleo del transformador (W).

K = Factor de fabricación total.

S = Pérdidas específicas del material que, para una densidad de corriente dada y certificada por el fabricante, o facilitada mediante graficas en caso de que no exista un ensayo certificado por este (W/kg).

P_{nucleo} = Peso total del núcleo del transformador (kg).

7.2.2 Cálculo de las pérdidas mediante la suma de las pérdidas en láminas de chapa con orientación en la dirección del grano y perpendicular a esta

Este otro método calculará las pérdidas en vacío sumando las pérdidas en aquellas láminas de chapa magnética orientadas en la dirección del grano y las de las chapas con orientación perpendicular a esta.

Se asumirá que las pérdidas en las láminas paralelas a la dirección del grano serán iguales a las pérdidas indicadas por los fabricantes en las gráficas o los ensayos de Epstein, estos vendrán facilitados para una densidad de flujo concreta y en caso de no disponer del valor concreto se utilizará una interpolación lineal. Las pérdidas en aquellas láminas que se sitúen perpendiculares a la dirección del grano se calcularán asumiendo además un factor de construcción que considerará el efecto del flujo magnético en las esquinas del núcleo:

$$P_{nucleo} = S \times P_{paralelo} + K_2 \cdot S \times P_{perpendicular} \quad (7.9)$$

Donde:

P_{nucleo} = Pérdidas totales del núcleo del transformador (W).

S = Pérdidas específicas del material que, para una densidad de corriente dada y certificada por el fabricante, o facilitada mediante graficas en caso de que no exista un ensayo certificado por este (W/kg).

P_{paralelo} = Pérdidas totales de las láminas que conforman el núcleo cuya orientación es la misma que la dirección del grano (kg).

K_2 = Factor de fabricación para la desviación del flujo de la dirección del grano en las esquinas del núcleo.

$P_{\text{perpendicular}}$ = Pérdidas totales de las láminas que conforman el núcleo cuya orientación es perpendicular a la dirección del grano (kg).

7.3 Cálculo de la corriente de vacío (o de excitación)

Las pérdidas en vacío o no-load (sin carga), sucederán durante y tras la energización del transformador, por tanto, aunque la máquina esté a circuito abierto circulará a través de su devanado de excitación una pequeña corriente. La corriente que circulará en cualquier devanado usado para la excitación de la máquina mientras que su otro devanado permanece a circuito abierto es conocida como corriente de excitación o vacío. Esta corriente será la encargada de mantener el flujo magnético en el núcleo del transformador.

Normalmente se expresará la corriente de excitación en por unidad o como porcentaje de la corriente nominal asignada al devanado en el cual se realiza la medición.

La corriente de excitación se calculará siguiendo la fórmula:

$$I_0(\%) = \frac{\left[P_{\text{núcleo}} \times \left(\frac{VA}{kg} \right) \times K \right] \times 100\%}{\sqrt{3}V_L I_L} \quad (7.10)$$

Donde:

I_0 = Corriente de excitación (%).

$P_{\text{núcleo}}$ = Peso total del núcleo (kg).

VA/kg = Excitación en voltio amperios del material que conforma el núcleo a la densidad de corriente fijada (VA/kg).

K = Factor de construcción para la excitación VA.

V_L = Tensión de línea (V).

I_L = Corriente de línea (A).

Los valores de K variarán de la siguiente forma:

$$K = \begin{cases} 3.0; & 70mm < \phi_{\text{núcleo}} < 130mm \\ 2.5; & 130mm < \phi_{\text{núcleo}} < 250mm \\ 2.0; & \phi_{\text{núcleo}} > 250mm \end{cases} \quad (7.11)$$

Donde:

K = factor de construcción para la excitación VA.

Si se utilizase un apilado en "Step-lap" el factor podría considerarse un 60% del valor mostrado en la ecuación (7.11).

7.3.1 Desviaciones

Cuando la corriente de vacío deba estar garantizada, en caso de que el cliente haya especificado un límite superior para esta, la tolerancia aceptable será del +30%. Podrá darse el caso, aunque

inusual, de que este límite constituyese un factor de capitalización de pérdidas en algunas especificaciones de clientes.

Para densidades de flujo superiores a 1,75 Tesla la corriente de vacío aumentará considerablemente. La Figura 7.6 que aparece en el libro de (Nair, 2021) muestra las fórmulas para calcular las pérdidas específicas del núcleo en W/kg para diferentes grados de material a 50 Hz y un rango de densidad de flujo desde 1,2 T a 1,9 T.

**Formulas for Specific Core Loss for CRGO Materials between 1.2 Tesla and 1.9 Tesla,
W = Watts/kg, B = Flux Density in Tesla**

Core Grade	Core Loss W/kg at 50 Hz
M5	$W = 5.1634 - 15.94B + 19.41B^2 - 10.355B^3 + 2.15B^4$
M4	$W = 4.766 - 15.736B + 20.151B^2 - 11.21B^3 + 2.405B^4$
MOH	$W = 45.43 - 127.96B + 135.27B^2 - 63.2B^3 + 11.1B^4$
23ZH90	$W = 31.47 - 89.4B + 95.5B^2 - 45B^3 + 7.9B^4$
23ZDKH90	$W = 14.4 - 43.56B + 49.26B^2 - 24.35B^3 + 4.516B^4$
23ZH85	$W = -8.17 + 17.24B - 11.6B^2 - 2.5B^3 + 0.959B^4$
23ZDKH85	$W = 3.31 - 13.15B + 18.2B^2 - 10.3B^3 + 2.1B^4$
23ZDKH80	$W = 23.92 - 67.23B + 70.82B^2 - 32.8B^3 + 5.72B^4$
ZDKH75	$W = 30.77 - 86.14B + 90.49B^2 - 41.96B^3 + 7.31B^4$
20ZDKH75	$W = 12.468 - 38.75B + 44.84B^2 - 22.59B^3 + 4.25B^4$
20ZDKH70	$W = 13.721 - 42.48B + 48.9B^2 - 24.55B^3 + 4.59B^4$

FIGURA 7.6. TABLA DE CÁLCULO DE PÉRDIDAS ESPECÍFICAS SEGÚN EL MATERIAL QUE CONSTITUYE EL NÚCLEO.

Para el caso en el que la frecuencia de servicio sea de 60 Hz, los resultados podrán multiplicarse por 1,32 a efectos de estimación.

Normalmente se han utilizado los materiales de CRGO denominados como M4, M5 y M6, pero debido a las regulaciones ambientales actuales y a la necesidad de aumentar la eficiencia energética disminuyendo las pérdidas en los transformadores, factores que se han convertido en limitantes desde el punto de vista del diseño, la organización *Nippon Steel Corporation* desarrolló los materiales denominados Hi-B siendo estos un *CRGO Steel* de mayor calidad y mejores prestaciones eléctricas. Hoy en día existe una clara preferencia al uso de láminas con espesores de 20mm.

Además de las tablas recogidas en el libro, se podrán obtener algunos valores medidos bajo ciertas condiciones en cualquier catálogo de fabricantes como puede ser:

- <https://crgosteel.com/>
- <https://www.jfe-steel.co.jp/en/products/electrical/index.php>

Al visualizar el catálogo del fabricante indio se pueden obtener los datos para algunos tipos de *CRGO Steel*, donde el principal interés se situará en aquellas láminas de mayor calidad, conocidas como “*CRGO Hi-B-Steel*” Figura 7.7.

El acero CRGO está disponible en diferentes grados, los estándares internacionales que definen estos podrán ser:

- Japoneses (JIS).
- Americanos (ASTM).
- Alemanes (DIN).
- Británicos.

Thickness MM	CRGO Grade	Assumed KG/DM3	Maximum Core Loss		Minimum Induction at 800 A / m T
			At 1.5T	At 1.7T	
0.23	23ZDKH90	7.65		0.9	1.88
0.23 -0.009	23ZH90			0.9	1.88
	23ZH95			0.95	1.88
	M-0H			1	1.88
	M-1	7.65	0.71	1.06	1.8
	M-2		0.75	1.12	1.8
	M-3		0.79	1.04	1.8
0.27 -0.0106	27ZDKH95	7.65		0.95	1.88
	27ZH95			0.95	1.88
	27ZH100			1	1.8
	M-0H			1.03	1.88
	M-1H	7.65		1.09	1.88
	M-3		0.83	1.21	1.8
0.3 -0.0118	M-4		0.89	1.27	1.8
	30ZH100			1	1.88
	M-0H			1.05	1.88
	M-1H			1.11	1.88
	M-2H	7.65		1.17	1.88
	M-3		0.85	1.23	1.8
	M-4		0.9	1.32	1.8
	M-5		0.97	1.39	1.8
	M-1H			1.16	1.88
	M-2H			1.16	1.88
	M-3H			1.28	1.88
	M-5		1.01	1.45	1.8
	M-6		1.11	1.57	1.8

FIGURA 7.7. DETALLES DE LAS PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO PARA DIFERENTES TIPOS DE CHAPA COMUNES, A 1.5 T PARA CRGO STEEL CONVENCIONAL Y 1.7T PARA EL CRGO HI-B-STEEL.

Además de las pérdidas específicas a densidades de flujo de 1.5T y 1.7T que aparecen en la Figura 7.7, los fabricantes también facilitan curvas indicando las pérdidas en vatios para varias densidades de flujo, Para materiales Hi-B-CRGO estos datos aparecen en la Figura 7.8:

Thickness		Grade	Core Loss						Lamination Factor
			Max.	Typical				Typical	Typical
mm	mil		W (W/Kg)	W (W/Kg)	W (W/Kg)	W (W/Kg)	W (W/Kg)	B (T)	%
0.23	9	23ZDKH85	0.85	0.57	0.78	0.34	0.46	1.91	97.5
		23ZDKH90	0.90	0.58	0.80	0.35	0.48	1.91	
		23ZDMH85	0.85	0.57	0.78	0.34	0.46	1.91	
		23ZDMH90	0.90	0.59	0.81	0.35	0.48	1.91	97.4
		23ZH90	0.90	0.63	0.87	0.37	0.51	1.92	
		23ZH95	0.95	0.64	0.90	0.38	0.53	1.92	
		23M-OH	1.00	0.66	0.93	0.39	0.54	1.92	97.7
0.27	11	27ZDKH90	0.90	0.62	0.84	0.38	0.53	1.92	
		27ZDKH95	0.95	0.65	0.88	0.39	0.52	1.91	
		27ZDMH90	0.90	0.62	0.84	0.38	0.53	1.91	
		27ZDMH95	0.95	0.65	0.88	0.39	0.53	1.91	
		27ZH95	0.95	0.69	0.93	0.41	0.55	1.91	
		27M-OH	1.03	0.72	0.99	0.43	0.59	1.91	
		27M-1H	1.09	0.74	1.03	0.44	0.61	1.91	98.1
0.30	12	30ZH100	1.00	0.73	0.98	0.44	0.58	1.92	
		30M-OH	1.05	0.74	1.01	0.44	0.60	1.91	
0.35	11	35M-1H	1.16	0.85	1.13	0.52	0.68	1.92	98.3

FIGURA 7.8. PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE LOS MATERIALES HI-B CRGO.

8. Diseño Eléctrico mediante Matlab

8.1 Especificaciones

Lo primero será obtener las especificaciones del cliente para el diseño del transformador, para este ejemplo partimos de las siguientes especificaciones:

- kVA - 90000
- Phases - 3
- Frequency - 50 Hz
- Cooling - ONAN
- Primary volts - 132000 V (Delta)
- Secondary volts - 34500 V (Star)
- Vector group - Ynd11
- On circuit tap changer on HV - +10%/-10% variation in 1.25% steps
- Ambient temperature - 50°C
- Top oil rise - 45°C
- Average winding temperature rise - 50°C
- HV BIL - 200 kV
- HV AC test voltage - 75 kV
- LV BIL - 75kV
- LV AC test voltage -28kV
- No load loss - 40 kW (max)
- Load loss - 310 kW (max)
- Percentage impedance - 12.0%
- Maximum flux density - 1.65T

Convertir la especificación a valores límites en Matlab:

```
S_max = 90000 % kVA
```

```
S_max = 90000
```

```
num_fases = 3
```

```
num_fases = 3
```

```
f = 50 % Hz
```

```
f = 50
```

```
U_AT = 132000 % V
```

```
U_AT = 132000
```

U_BT = 34500 % V

U_BT = 34500

conexion_AT = "Y"

conexion_AT = "Y"

conexion_BT = "d"

conexion_BT = "d"

horaria = "1"

horaria = "1"

localizacion_cambiador_tomas = "HV"

localizacion_cambiador_tomas = "HV"

devanado_tomas_regulacion = "Outside"

devanado_tomas_regulacion = "Outside"

cambiador_tomas_max_V = 10 % %

cambiador_tomas_max_V = 10

cambiador_tomas_min_V = 10 % %

cambiador_tomas_min_V = 10

cambiador_tomas_paso = 1.25 % %

cambiador_tomas_paso = 1.2500

V_ensayo_AT_AC = 230000 % V

V_ensayo_AT_AC = 230000

V_ensayo_BT_AC = 70000 % V

V_ensayo_BT_AC = 70000

BIL_AT = 550000 %V

BIL_AT = 550000

BIL_BT = 170000 %V

BIL_BT = 170000

perdidas_nucleo_maximas_garantizadas = 40000 % W

perdidas_nucleo_maximas_garantizadas = 40000

```
perdidas_maximas_en_carga_garantizadas = 310000 % W
```

```
perdidas_maximas_en_carga_garantizadas = 310000
```

```
impedancia_maxima_garantizada = 12 % %
```

```
impedancia_maxima_garantizada = 12
```

```
B_max = 1.65 % T
```

```
B_max = 1.6500
```

8.2 Diseño del núcleo

8.2.1 Diámetro del núcleo

Seleccionamos el diámetro del círculo que inscribe al núcleo:

```
diametro_nucleo = 800 %mm
```

```
diametro_nucleo = 800
```

Seleccionamos el número de pasos:

```
num_pasos_nucleo =11
```

```
num_pasos_nucleo = 11
```

Para un número determinado entre 3 y hasta 11 escalones del núcleo se hará uso de la siguiente tabla:

```
pasos = [3; 5; 7; 9; 11];
areaBruta = [85.1; 90.8; 93.4; 94.8; 95.8];
numerosPasos = [0.906, 0.707, 0.424, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
0, 0;
0.949, 0.846, 0.707, 0.534, 0.314, 0, 0, 0, 0, 0,
0, 0;
0.967, 0.901, 0.814, 0.707, 0.581, 0.434, 0.254, 0, 0,
0, 0;
0.976, 0.929, 0.868, 0.762, 0.707, 0.605, 0.497, 0.370,
0.216, 0, 0;
0.982, 0.943, 0.893, 0.832, 0.762, 0.707, 0.648, 0.555,
0.450, 0.333, 0.190];
T = table(pasos, areaBruta, 'VariableNames', {'No_de_Pasos',
'%Area_Bruta'});
T1 = array2table(numerosPasos, 'VariableNames', {'1', '2', '3', '4', '5',
'6', '7', '8', '9', '10', '11'});

tablaFinal = [T T1];

display(tablaFinal);
```

tablaFinal = 5x13 table

	No_de_Pasos	%Area_Brut a	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	3	85.1000	0.906 0	0.707 0	0.424 0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	5	90.8000	0.949 0	0.846 0	0.707 0	0.534 0	0.314 0	0	0	0	0	0	0
3	7	93.4000	0.967 0	0.901 0	0.814 0	0.707 0	0.581 0	0.434 0	0.254 0	0	0	0	0
4	9	94.8000	0.976 0	0.929 0	0.868 0	0.762 0	0.707 0	0.605 0	0.497 0	0.370 0	0.216 0	0	0
5	11	95.8000	0.982 0	0.943 0	0.893 0	0.832 0	0.762 0	0.707 0	0.648 0	0.555 0	0.450 0	0.333 0	0.190 0

Asignamos a cada número de pasos su fila correspondiente en la tabla superior.

```
num_fila = 0;  
for i = 3: +2.0: num_pasos_nucleo  
    num_fila = num_fila + 1;  
end
```

Obtener mediante la tabla los anchos de los pasos, estos están estandarizados a múltiplos de 5 o 10mm.

```
multiplo = "10";
```

Determinado el múltiplo calculamos los anchos.

```
w(1) =  
round((diametro_nucleo.*tablaFinal{num_fila,"1"})./str2double(multiplo)) .*  
str2double(multiplo);  
w(2) =  
round((diametro_nucleo.*tablaFinal{num_fila,"2"})./str2double(multiplo)) .*  
str2double(multiplo);  
w(3) =  
round((diametro_nucleo.*tablaFinal{num_fila,"3"})./str2double(multiplo)) .*  
str2double(multiplo);  
w(4) =  
round((diametro_nucleo.*tablaFinal{num_fila,"4"})./str2double(multiplo)) .*  
str2double(multiplo);  
w(5) =  
round((diametro_nucleo.*tablaFinal{num_fila,"5"})./str2double(multiplo)) .*  
str2double(multiplo);
```

```

w(6) =
round((diametro_nucleo.*tablaFinal{num_fila,"6"})./str2double(multiplo)) .*
str2double(multiplo);
w(7) =
round((diametro_nucleo.*tablaFinal{num_fila,"7"})./str2double(multiplo)) .*
str2double(multiplo);
w(8) =
round((diametro_nucleo.*tablaFinal{num_fila,"8"})./str2double(multiplo)) .*
str2double(multiplo);
w(9) =
round((diametro_nucleo.*tablaFinal{num_fila,"9"})./str2double(multiplo)) .*
str2double(multiplo);
w(10) =
round((diametro_nucleo.*tablaFinal{num_fila,"10"})./str2double(multiplo)) .*
str2double(multiplo);
w(11) =
round((diametro_nucleo.*tablaFinal{num_fila,"11"})./str2double(multiplo)) .*
str2double(multiplo);

```

Una vez calculado el ancho, calcularemos el espesor de cada paso, para ello se aproximará a múltiplos de los espesores estandarizados para la chapa magnética, este dato lo facilita el fabricante de la chapa y suele ser 23, 27 y 30mm.

```

espesor_lamina_estandar = "0.23"; %mm

```

Definido el espesor estándar calcularemos el espesor de cada agrupación de anchos.

```

t = zeros(num_pasos_nucleo,1); % Prealocamos espacio en memoria para el
vector t
sum_t = 0;
for i = 1.0:+1.0:num_pasos_nucleo
    t(i) = floor((sqrt(diametro_nucleo^2-w(i)^2)-sum_t) ./
str2double(espesor_lamina_estandar)) .* str2double(espesor_lamina_estandar);
    sum_t = sum_t + t(i);
end

```

8.2.2 Cálculo del área bruta y neta del núcleo

Con esto, se tendrán todos los datos necesarios para calcular el área bruta total.

```

sum_area_bruta = 0;
area_bruta = zeros(num_pasos_nucleo,1);

for i = 1.0:+1.0:num_pasos_nucleo
    area_bruta(i) = t(i) .* w(i);
    sum_area_bruta = sum_area_bruta + area_bruta(i);
end

```

La relación del área neta respecto al área del diámetro inicial depende de dos factores, un primer factor de apilamiento que relaciona el área neta con el área bruta que ocupan los diferentes pasos y un segundo factor que relaciona la diferencia entre esta área bruta con el círculo que tomamos como suposición al principio:

El factor de apilamiento será normalmente:

```
K_s = 0.97;
```

De forma que el área neta total será:

```
sum_area_neta = 0;
area_neta = zeros(num_pasos_nucleo,1);

for i = 1.0:+1.0:num_pasos_nucleo
    area_neta(i) = area_bruta(i) .* K_s;
    sum_area_neta = sum_area_neta + area_neta(i);
end
```

Debido a los redondeos realizados por las diferentes estandarizaciones que se utilizan en las medidas de las láminas de chapa, este factor será algo menor que el óptimo indicado en la tabla, pero si lo hemos realizado correctamente se parecerá en gran medida.

Mostrando el resumen de los cálculos para el núcleo:

```
resumen_nucleo_labels = {'Step number', 'Area factor(%)', 'Core Circle x
factor', 'Lamination Width (mm)', 'Stack thickness(mm)', 'Gross Area
(mm^2)', 'Net Area(mm^2)'};
resumen_nucleo_data = [1,      tablaFinal{num_fila,"1"},
diametro_nucleo.*tablaFinal{num_fila,"1"}, w(1),  t(1),  area_bruta(1),
area_neta(1);
                        2,      tablaFinal{num_fila,"2"},
diametro_nucleo.*tablaFinal{num_fila,"2"}, w(2),  t(2),  area_bruta(2),
area_neta(2);
                        3,      tablaFinal{num_fila,"3"},
diametro_nucleo.*tablaFinal{num_fila,"3"}, w(3),  t(3),  area_bruta(3),
area_neta(3);
                        4,      tablaFinal{num_fila,"4"},
diametro_nucleo.*tablaFinal{num_fila,"4"}, w(4),  t(4),  area_bruta(4),
area_neta(4);
                        5,      tablaFinal{num_fila,"5"},
diametro_nucleo.*tablaFinal{num_fila,"5"}, w(5),  t(5),  area_bruta(5),
area_neta(5);
                        6,      tablaFinal{num_fila,"6"},
diametro_nucleo.*tablaFinal{num_fila,"6"}, w(6),  t(6),  area_bruta(6),
area_neta(6);
                        7,      tablaFinal{num_fila,"7"},
diametro_nucleo.*tablaFinal{num_fila,"7"}, w(7),  t(7),  area_bruta(7),
area_neta(7);
```

```

            8,      tablaFinal{num_fila,"8"},
diametro_nucleo.*tablaFinal{num_fila,"8"}, w(8),  t(8),  area_bruta(8),
area_neta(8);
            9,      tablaFinal{num_fila,"9"},
diametro_nucleo.*tablaFinal{num_fila,"9"}, w(9),  t(9),  area_bruta(9),
area_neta(9);
            10,     tablaFinal{num_fila,"10"},
diametro_nucleo.*tablaFinal{num_fila,"10"}, w(10), t(10), area_bruta(10),
area_neta(10);
            11,     tablaFinal{num_fila,"11"},
diametro_nucleo.*tablaFinal{num_fila,"11"}, w(11), t(11), area_bruta(11),
area_neta(11);
            "Total", "-",          "-",
"-",    sum_t,  sum_area_bruta, sum_area_neta];

resumen_nucleo =
array2table(resumen_nucleo_data,"VariableNames",resumen_nucleo_labels);
display(resumen_nucleo);

```

resumen_nucleo = 12x7 table

	Step number	Area factor (%)	Core Circle diameter	Lamination Width (mm)	Stack thickness (mm)	Gross Area (m ²)	Net Area (m ²)
1	"1"	"0.982"	"785.6"	"790"	"126.04"	"99571.6"	"96584.452"
2	"2"	"0.943"	"754.4"	"750"	"152.26"	"114195"	"110769.15"
3	"3"	"0.893"	"714.4"	"710"	"90.16"	"64013.6"	"62093.192"
4	"4"	"0.832"	"665.6"	"670"	"68.54"	"45921.8"	"44544.146"
5	"5"	"0.762"	"609.6"	"610"	"80.5"	"49105"	"47631.85"
6	"6"	"0.707"	"565.6"	"570"	"43.7"	"24909"	"24161.73"
7	"7"	"0.648"	"518.4"	"520"	"46.69"	"24278.8"	"23550.436"
8	"8"	"0.555"	"444"	"440"	"60.03"	"26413.2"	"25620.804"
9	"9"	"0.45"	"360"	"360"	"46.46"	"16725.6"	"16223.832"
10	"10"	"0.333"	"266.4"	"270"	"38.64"	"10432.8"	"10119.816"
11	"11"	"0.19"	"152"	"150"	"32.66"	"4899"	"4752.03"
12	"Total"	"-"	"-"	"-"	"785.68"	"480465.4"	"466051.438"

8.3 Diseño de los bobinados

8.3.1 Cálculo de los voltajes por vuelta

Calcular las tensiones por vuelta mediante la ecuación de la f.e.m. Los datos de esta serán el Área total previamente calculada, la frecuencia y la densidad de flujo máxima en el entrehierro

La densidad de flujo máximo y la frecuencia vienen impuestas por el cliente. La ecuación por tanto quedará de la forma:

```
V_vuelta = 4.44 .* f .* B_max .* sum_area_neta .* 1e-6;
```

8.3.2 Cálculo de las tensiones y corrientes de fase

```
% Devanado BT

valores_d = {'d'};
valores_y = {'y','w','e','yn','en','wn'};

I_L_BT = (S_max .* 1e3) ./ (sqrt(3) .* U_BT);

if ismember(conexion_BT,valores_d)
    V_BT = U_BT;
    I_F_BT = I_L_BT ./ sqrt(3);
end
if ismember(conexion_BT,valores_y)
    V_BT = U_BT ./ sqrt(3);
    I_F_BT = I_L_BT;
end

% Devanado AT

valores_D = {'D'};
valores_Y = {'Y','W','E'};

I_L_AT = (S_max .* 1e3) ./ (sqrt(3) .* U_AT);

if ismember(conexion_AT,valores_D)
    V_AT = U_AT;
    I_F_AT = I_L_AT ./ sqrt(3);
end
if ismember(conexion_AT,valores_Y)
    V_AT = U_AT ./ sqrt(3);
    I_F_AT = I_L_AT;
end

% Devanado Taps

if localizacion_cambiador_tomas == "HV"
```

```

    U_tap_N = U_AT;
    disp("Tomas de regulación en el lado HV");
end

```

Tomas de regulación en el lado HV

```

dU_tap_max = (cambiador_tomas_max_V .* U_tap_N) ./ 100;
dU_tap_min = (cambiador_tomas_min_V .* U_tap_N) ./ 100;

U_tap_max = U_tap_N + dU_tap_max;
U_tap_min = U_tap_N - dU_tap_min;

I_L_tap_N = (S_max .* 1e3) ./ (sqrt(3) .* U_tap_N);
I_L_tap_max = (S_max .* 1e3) ./ (sqrt(3) .* U_tap_max);
I_L_tap_min = (S_max .* 1e3) ./ (sqrt(3) .* U_tap_min);

if ismember(conexion_AT,valores_D) || ismember(conexion_BT,valores_d)
    V_tap_N = U_tap_N;
    V_tap_max = U_tap_max;
    V_tap_min = U_tap_min;

    I_F_tap_N = I_L_tap_N ./ sqrt(3);
    I_F_tap_max = I_L_tap_max ./ sqrt(3);
    I_F_tap_min = I_L_tap_min ./ sqrt(3);
end
if ismember(conexion_AT,valores_Y)
    V_tap_N = U_tap_N ./ sqrt(3);
    V_tap_max = U_tap_max ./ sqrt(3);
    V_tap_min = U_tap_min ./ sqrt(3);

    I_F_tap_N = I_L_tap_N;
    I_F_tap_max = I_L_tap_max;
    I_F_tap_min = I_L_tap_min;
end

% Resumen de las tensiones e intensidades de línea y fase

if localizacion_cambiador_tomas == "HV"
    resumen_valores_linea_fase_labels = {'Descripcion', 'LV', 'HV Máx. TAP',
    'HV Nominal TAP', 'HV Mín. TAP'};
    resumen_valores_linea_fase_data = ["Tensión de línea",      U_BT,
U_tap_max,      U_tap_N,      U_tap_min;
    "Tensión de fase",      V_BT,
V_tap_max,      V_tap_N,      V_tap_min;
    "Intensidad de línea",  I_L_BT,
I_L_tap_max,    I_L_tap_N,    I_L_tap_min;
    "Intensidad de fase",  I_F_BT,
I_F_tap_max,    I_F_tap_N,    I_F_tap_min];

```

```

resumen_valores_linea_fase =
array2table(resumen_valores_linea_fase_data,"VariableNames",resumen_valores_l
inea_fase_labels);
display(resumen_valores_linea_fase);
end

```

resumen_valores_linea_fase = 4x5 table

	Descripción	LV	HV Máx. TAP	HV Nominal TAP	HV Mín. TAP
1	"Tensión de línea"	"34500"	"145200"	"132000"	"118800"
2	"Tensión de fase"	"34500"	"83831.2591"	"76210.2355"	"68589.212"
3	"Intensidad de línea"	"1506.1311"	"357.8617"	"393.6479"	"437.3866"
4	"Intensidad de fase"	"869.5652"	"357.8617"	"393.6479"	"437.3866"

8.4 Cálculo del número de vueltas

8.4.1 Cálculo del número de vueltas Devanado LV

```

if ismember(conexion_BT,valores_d) || ismember(conexion_BT,valores_y)
vuelas_BT = V_BT ./ V_vuelta;
end

```

Para calcular las vueltas en los devanados LV, debemos partir de que los números de vueltas no pueden ser valores con decimales, debemos redondear al entero más próximo, esto sujeto a:

- Cuando la densidad de flujo se calcula en base al redondeo del número de vueltas, esta no puede superar los valores calculados de Voltios por vuelta.
- Es preferible seleccionar un número par de vueltas para el lado LV, cuando el número de capas es par. Si el número de capas es simple o en disco, podemos usar un número impar.
- Para devanados en zig zag, el número de vueltas en el lado LV debería ser preferiblemente múltiplo de 4 cuando se usa bobinados de 2 capas.

```

vuelas_BT = ceil(vuelas_BT ./ 2) .*2;

```

8.4.2 Cálculo del valor real de tensión por vuelta y densidad de flujo máxima real

Ahora deberemos comprobar que la densidad de flujo máxima calculada no se supera la impuesta por el cliente

```

V_vuelta_real = V_BT ./ vuelas_BT;
B_real = V_vuelta_real ./ (4.44 .* f .* sum_area_neta .* 1e-6); % T
Flujo_real = B_real .* sum_area_neta .* 1e-6 .* 1e2; % Megalines
if (B_real > B_max)

```

```

disp("La solución no es viable");
else
disp("La solución es correcta");
end

```

La solución es correcta

8.4.3 Cálculo del número de vueltas Devanado HV

```

if (localizacion_cambiador_tomas ~= "HV") % Si no hay tap changer en el
lado HV

    if ismember(conexion_AT,valores_D) || ismember(conexion_AT,valores_Y)
% Para conexión en delta o estrella
    vueltas_AT_N = ceil(vueltas_BT .* (V_AT ./ V_BT))
    end
end
if (localizacion_cambiador_tomas == "HV") % Si hay tap changer en el lado
HV

    if ismember(conexion_AT,valores_D) || ismember(conexion_AT,valores_Y)
% Para conexión en delta o estrella
    vueltas_AT_N = ceil(vueltas_BT .* (V_tap_N ./ V_BT))
    vueltas_AT_max = ceil(vueltas_BT .* (V_tap_max ./ V_BT))
    vueltas_AT_min = ceil(vueltas_BT .* (V_tap_min ./ V_BT))
    end
end
end

```

vueltas_AT_N = 451

vueltas_AT_max = 496

vueltas_AT_min = 406

8.4.4 Cálculo del número de vueltas en las tomas de regulación

Normalmente, los transformadores disponen de tomas para cambiar la relación de tensión. Antes de iniciar el diseño, deberá comprobarse la siguiente información:

1. Si las tomas son en carga o en vacío
2. Rango de las tomas (límites superior e inferior)
3. % tomas de regulación
4. Número total de posiciones en las tomas.
5. Si la variación de tensión es de la forma de flujo constante, flujo variable o combinado.

```

tipo_cambiador_tomas = "Linear";

if tipo_cambiador_tomas == "Linear"
    vueltas_devanado_AT = vueltas_AT_min
    vueltas_devanado_BT = vueltas_BT
    vueltas_devanado_Taps = vueltas_AT_max - vueltas_AT_min
end

```

```

else    % Reverse Switching
    vueltas_devanado_AT = vueltas_AT_N
    vueltas_devanado_BT = vueltas_BT
    vueltas_devanado_Taps = vueltas_AT_N - vueltas_AT_min
end

```

```
vueltas_devanado_AT = 406
```

```
vueltas_devanado_BT = 204
```

```
vueltas_devanado_Taps = 90
```

8.4.5 Categorías de variación de tensión

```

if (localizacion_cambiador_tomas == "HV")    % Si hay tap changer en el lado
HV
    if ismember(conexion_AT, valores_D) || ismember(conexion_AT, valores_Y)
    % Para conexión en delta o estrella

        % Prealocamos el espacio en memoria para el vector de taps
        vueltas_HV_tap = zeros(((cambiador_tomas_max_V +
cambiador_tomas_min_V) ./ cambiador_tomas_paso) + 1, 1);
        V_tap = zeros(((cambiador_tomas_max_V + cambiador_tomas_min_V) ./
cambiador_tomas_paso) + 1, 1);
        V_tap_real = zeros(((cambiador_tomas_max_V + cambiador_tomas_min_V)
./ cambiador_tomas_paso) + 1, 1);
        Tap_error = zeros(((cambiador_tomas_max_V + cambiador_tomas_min_V)
./ cambiador_tomas_paso) + 1, 1);
        sum_V_tap = 0;

        % Calculamos el numero de vueltas en cada paso del cambiador de
tomas
        for i=1.0:+1.0:(((cambiador_tomas_max_V + cambiador_tomas_min_V) ./
cambiador_tomas_paso) + 1)
            V_tap(i) = V_tap_max - sum_V_tap;
            sum_V_tap = cambiador_tomas_paso .* 1e-2 .* V_tap_N .* i;
            vueltas_HV_tap(i) = round((vueltas_BT .* (V_tap(i) ./ V_BT)));
            V_tap_real(i) = vueltas_HV_tap(i) .* V_vuelta_real;
            Tap_error(i) = ((V_tap_real(i) - V_tap(i)) ./ V_tap(i)) .* 100;
        end
    end
end
end

```

Resumen del número de vueltas en el tap changer

```

resumen_num_vueltas_labels = {'Nº Toma', 'Nº vueltas', 'Tensión de fase
calculada (V)', 'Tensión de fase real (V)', 'Error (%)'};
resumen_num_vueltas_data = zeros((((cambiador_tomas_max_V +
cambiador_tomas_min_V) ./ cambiador_tomas_paso) + 1), 4);

```

```

for i=1.0:+1.0:(((cambiador_tomas_max_V + cambiador_tomas_min_V) ./
cambiador_tomas_paso) + 1)
    resumen_num_vueltas_data(i,1) = i;
    resumen_num_vueltas_data(i,2) = vueltas_HV_tap(i);
    resumen_num_vueltas_data(i,3) = V_tap(i);
    resumen_num_vueltas_data(i,4) = V_tap_real(i);
    resumen_num_vueltas_data(i,5) = Tap_error(i);
end
resumen_num_vueltas =
array2table(resumen_num_vueltas_data, "VariableNames", resumen_num_vueltas_labels);
display(resumen_num_vueltas);

```

resumen_num_vueltas = 17x5 table

	Nº Toma	Nº vueltas	Tensión de fase calculada (V)	Tensión de fase real (V)	Error (%)
1	1	496	8.3831e+04	8.3882e+04	0.0609
2	2	490	8.2879e+04	8.2868e+04	-0.0133
3	3	484	8.1926e+04	8.1853e+04	-0.0892
4	4	479	8.0973e+04	8.1007e+04	0.0420
5	5	473	8.0021e+04	7.9993e+04	-0.0351
6	6	468	7.9068e+04	7.9147e+04	0.0998
7	7	462	7.8115e+04	7.8132e+04	0.0216
8	8	456	7.7163e+04	7.7118e+04	-0.0586
9	9	451	7.6210e+04	7.6272e+04	0.0811
10	10	445	7.5258e+04	7.5257e+04	-0.0003
11	11	439	7.4305e+04	7.4243e+04	-0.0839
12	12	434	7.3352e+04	7.3397e+04	0.0609
13	13	428	7.2400e+04	7.2382e+04	-0.0240
14	14	422	7.1447e+04	7.1368e+04	-0.1112
15	15	417	7.0494e+04	7.0522e+04	0.0391
16	16	411	6.9542e+04	6.9507e+04	-0.0496
17	17	406	6.8589e+04	6.8662e+04	0.1058

8.5 Selección de la densidad de corriente

Lo más importante a la hora de seleccionar la densidad de corriente depende de:

1. Capitalización del valor de las pérdidas en carga y el coste del material de cobre o el valor de pérdidas en carga garantizadas.
2. Gradiente en el bobinado.
3. Requerimientos de aguante a corto circuito.

Podemos hacer uso de unos valores típicos para la densidad de corriente dependiendo del material, estos suelen ser:

- Aluminio -1.5 - 2.0 A/mm²
- Cobre - 2.0 - 3.6 A/mm²

```
material_conductor = "Cobre"
```

```
material_conductor = "Cobre"
```

```
if (material_conductor == "Aluminio")
    densidad_corriente = 1.78
    densidad_material_conductor = 2.7 .* 1e-6 % Kg/mm^3
else % Cobre
    densidad_corriente = 3
    densidad_material_conductor = 8.96 .* 1e-6 % Kg/mm^3
end
```

```
densidad_corriente = 3
```

```
densidad_material_conductor = 8.9600e-06
```

Densidades de corriente más elevadas pueden usarse si las pérdidas, el gradiente y los valores de estrés frente a cortocircuito están bajo límites aceptables.

En caso de que el cliente especifique un precio por las pérdidas en carga:

```
precio_perdidas_carga = 0 %EUR/kW
```

```
precio_perdidas_carga = 0
```

Conociendo el precio del cobre para la fecha de fabricación del trafo

```
coste_cobre = 0 %EUR/kg
```

```
coste_cobre = 0
```

Y con un factor de valor añadido, el cual varía de un fabricante a otro

```
K = 0
```

```
K = 0
```

Calculamos la densidad de corriente de la siguiente forma

```

if (precio_perdidas_carga ~= 0)
    if (material_conductor == "Cobre")
        densidad_corriente = sqrt((K .* coste_cobre) ./ (2.4 .*
precio_perdidas_carga))
    else % Aluminio
        densidad_corriente = sqrt((K .* coste_cobre) ./ (13 .*
precio_perdidas_carga))
    end
end
end

```

8.6 Selección del tipo y el tamaño de los conductores

Para los conductores descubiertos la sección transversal del conductor se obtiene dividiendo la corriente de fase por la densidad de corriente:

```

max_value = [I_F_tap_max, I_F_tap_min, I_F_tap_N, I_F_AT];
area_conductor_descubierto_AT = max(max_value) ./ densidad_corriente

```

```
area_conductor_descubierto_AT = 145.7955
```

```
area_conductor_descubierto_BT = I_F_BT ./ densidad_corriente
```

```
area_conductor_descubierto_BT = 289.8551
```

Esta área será en muchos casos muy superior a las dimensiones estándar de conductores por lo que podremos crear un área que sea la suma de diferentes conductores colocados paralelos al eje del radio de la bobina o paralelos al eje vertical de esta hasta que tengamos el área suficiente para la densidad de corriente deseada.

El diseñador deberá determinar cuál es el tipo de conductor a elegir, además del recubrimiento y de la forma de estos.

```

% Tipo de conductores
tipo_conductor_AT = "PICC"

```

```
tipo_conductor_AT = "PICC"
```

```
tipo_conductor_BT = "CTC"
```

```
tipo_conductor_BT = "CTC"
```

```
tipo_conductor_Taps = "PICC"
```

```
tipo_conductor_Taps = "PICC"
```

Para conductores rectangulares, las dimensiones de las pletinas serán:

```
altura_conductor_descubierto_AT = 10 %mm
```

```
altura_conductor_descubierto_AT = 10
```

```
espesor_conductor_descubierto_AT = 2.1 %mm
```

```
espesor_conductor_descubierto_AT = 2.1000
```

```
if ((altura_conductor_descubierto_AT / espesor_conductor_descubierto_AT) >=
2)

    if ((altura_conductor_descubierto_AT / espesor_conductor_descubierto_AT)
<= 6)
        disp("El ancho y el espesor del conductor son correctos")
    else
        disp("Seleccione un ancho o espesor diferentes")
    end
else
    disp("Seleccione un ancho o espesor diferentes")
end
```

El ancho y el espesor del conductor son correctos

```
altura_conductor_descubierto_BT = 6.8 %mm
```

```
altura_conductor_descubierto_BT = 6.8000
```

```
espesor_conductor_descubierto_BT = 2.1 %mm
```

```
espesor_conductor_descubierto_BT = 2.1000
```

```
if ((altura_conductor_descubierto_BT / espesor_conductor_descubierto_BT) >=
2)

    if ((altura_conductor_descubierto_BT / espesor_conductor_descubierto_BT)
<= 6)
        disp("El ancho y el espesor del conductor son correctos")
    else
        disp("Seleccione un ancho o espesor diferentes")
    end
else
    disp("Seleccione un ancho o espesor diferentes")
end
```

El ancho y el espesor del conductor son correctos

```
altura_conductor_descubierto_Taps = 8 %mm
```

```
altura_conductor_descubierto_Taps = 8
```

```
espesor_conductor_descubierto_Taps = 2.2 %mm
```

```
espesor_conductor_descubierto_Taps = 2.2000
```

```

if ((altura_conductor_descubierto_Taps / espesor_conductor_descubierto_Taps)
>= 2)

    if ((altura_conductor_descubierto_Taps /
espesor_conductor_descubierto_Taps) <= 6)
        disp("El ancho y el espesor del conductor son correctos")
    else
        disp("Seleccione un ancho o espesor diferentes")
    end
else
    disp("Seleccione un ancho o espesor diferentes")
end

```

El ancho y el espesor del conductor son correctos

8.6.1 Cálculo del área transversal del conductor

Se calculará el área efectiva de un conductor rectangular.

El área efectiva para conductores rectangulares será menor que el producto del ancho por el espesor debido al redondeo de las esquinas. Esto se hará para evitar cantos afilados que pudiesen causar cortes en el aislamiento o puntos calientes debido a concentración de campo eléctrico. Ésta área será utilizada para los cálculos eléctricos de diseño del transformador.

```

%Devanado HV

if (espesor_conductor_descubierto_AT >= 3.5)
    area_efectiva_conductor_AT = (altura_conductor_descubierto_AT *
espesor_conductor_descubierto_AT - 0.85)
elseif (espesor_conductor_descubierto_AT >= 2.25 &&
espesor_conductor_descubierto_AT <= 3.4)
    area_efectiva_conductor_AT = (altura_conductor_descubierto_AT *
espesor_conductor_descubierto_AT - 0.55)
elseif (espesor_conductor_descubierto_AT >= 1.6 &&
espesor_conductor_descubierto_AT <= 2.24)
    area_efectiva_conductor_AT = (altura_conductor_descubierto_AT *
espesor_conductor_descubierto_AT - 0.35)
else % Para espesro_conductor_descubierto_HV <1.6
    area_efectiva_conductor_AT = (altura_conductor_descubierto_AT *
espesor_conductor_descubierto_AT - 0.20)
end

```

area_efectiva_conductor_AT = 20.6500

```

% Devanado LV

```

```

if (espesor_conductor_descubierto_BT >= 3.5)

```

```

    area_efectiva_conductor_BT = (altura_conductor_descubierto_BT *
espesor_conductor_descubierto_BT - 0.85)
    elseif (espesor_conductor_descubierto_BT >= 2.25 &&
espesor_conductor_descubierto_BT <= 3.4)
        area_efectiva_conductor_BT = (altura_conductor_descubierto_BT *
espesor_conductor_descubierto_BT - 0.55)
    elseif (espesor_conductor_descubierto_BT >= 1.6 &&
espesor_conductor_descubierto_BT <= 2.24)
        area_efectiva_conductor_BT = (altura_conductor_descubierto_BT *
espesor_conductor_descubierto_BT - 0.35)
    else % Para espesro_conductor_descubierto_HV <1.6
        area_efectiva_conductor_BT = (altura_conductor_descubierto_BT *
espesor_conductor_descubierto_BT - 0.20)
    end

```

area_efectiva_conductor_BT = 13.9300

```

% Taps

if (espesor_conductor_descubierto_Taps >= 3.5)
    area_efectiva_conductor_Taps = (altura_conductor_descubierto_Taps *
espesor_conductor_descubierto_Taps - 0.85)
elseif (espesor_conductor_descubierto_Taps >= 2.25 &&
espesor_conductor_descubierto_Taps <= 3.4)
    area_efectiva_conductor_Taps = (altura_conductor_descubierto_Taps *
espesor_conductor_descubierto_Taps - 0.55)
elseif (espesor_conductor_descubierto_Taps >= 1.6 &&
espesor_conductor_descubierto_Taps <= 2.24)
    area_efectiva_conductor_Taps = (altura_conductor_descubierto_Taps *
espesor_conductor_descubierto_Taps - 0.35)
else % Para espesro_conductor_descubierto_HV <1.6
    area_efectiva_conductor_Taps = (altura_conductor_descubierto_Taps *
espesor_conductor_descubierto_Taps - 0.20)
end

```

area_efectiva_conductor_Taps = 17.2500

Las áreas obtenidas serán de únicamente un conductor, sin contar con la conformación de un área superior mediante unión de diferentes conductores

8.6.2 Selección del tipo de bobinado y su configuración

```

% Tipo de bobinados
tipo_bobinado_BT = "discos";
tipo_bobinado_AT = "discos";
tipo_bobinado_Taps = "discos";

```

Una vez seleccionado el tipo de bobinado se determinará si lo hubiese el número de circuitos en paralelo que conforman los mazos:

```

% Devanado LV

% Número y tipo de circuitos paralelos
num_ctos_paralelos_dir_axial_BT = 2;
num_ctos_paralelos_dir_radial_BT = 14;

% Segun el tipo de bobinados
if(tipo_bobinado_BT == "capas")
    num_capas_BT = 0;
    % Negamos el resto de opciones
    num_vueltas_disco_BT = "-";
    num_disco_BT = "-";
elseif(tipo_bobinado_BT == "discos")
    num_disco_BT = 80
    num_vueltas_disco_BT = vueltas_devanado_BT ./ num_disco_BT

    % Negamos el resto de opciones
    num_capas_BT = "-";

end

```

```
num_disco_BT = 80
```

```
num_vueltas_disco_BT = 2.5500
```

```

% Devanado HV

% Número y tipo de circuitos paralelos (esto solo afecta a la sección total
% del conductor que condiciona la densidad de corriente)
num_ctos_paralelos_dir_axial_AT = 2;
num_ctos_paralelos_dir_radial_AT = 4;
% Num segun bobinado
if(tipo_bobinado_AT == "capas")
    num_capas_AT = 0;
    % Negamos el resto de opciones
    num_vueltas_disco_AT = "-";
    num_disco_AT = "-";
elseif(tipo_bobinado_AT == "discos")
    num_disco_AT = 45
    num_vueltas_disco_AT = vueltas_devanado_AT ./ num_disco_AT
    % Negamos el resto de opciones
    num_capas_AT = "-";

end

```

```
num_disco_AT = 45
```

```
num_vueltas_disco_AT = 9.0222
```

```

% Devanado taps

% Número y tipo de circuitos paralelos
num_ctos_paralelos_dir_axial_Taps = 2;
num_ctos_paralelos_dir_radial_Taps = 4;

% Segun el tipo de bobinados
if(tipo_bobinado_Taps == "capas")
    num_capas_Taps = 0;
    % Negamos el resto de opciones
    num_vueltas_disco_Taps = "-";
    num_disco_Taps = "-";
elseif(tipo_bobinado_Taps == "discos")
    num_disco_Taps = 32
    num_vueltas_disco_Taps = vueltas_devanado_Taps ./ num_disco_Taps

    % Negamos el resto de opciones
    num_capas_Taps = "-";
end

```

```
num_disco_Taps = 32
```

```
num_vueltas_disco_Taps = 2.8125
```

Calcular el área efectiva real y comparar con la que necesaria según la densidad de corriente

```

% Devanado BT

if tipo_conductor_BT == "CTC"    % Conductores CTC
    area_efectiva_total_BT = (num_ctos_paralelos_dir_axial_BT .*
num_ctos_paralelos_dir_radial_BT - 1) .* area_efectiva_conductor_BT
else    % Conductores PICC y Bunched
    area_efectiva_total_BT = num_ctos_paralelos_dir_axial_BT .*
num_ctos_paralelos_dir_radial_BT .* area_efectiva_conductor_BT
end

```

```
area_efectiva_total_BT = 376.1100
```

```

% Devanado AT

if tipo_conductor_AT == "CTC"    % Conductores CTC
    area_efectiva_total_AT = (num_ctos_paralelos_dir_axial_AT .*
num_ctos_paralelos_dir_radial_AT - 1) .* area_efectiva_conductor_AT
else    % Conductores PICC y Bunched
    area_efectiva_total_AT = num_ctos_paralelos_dir_axial_AT .*
num_ctos_paralelos_dir_radial_AT .* area_efectiva_conductor_AT
end

```

```
area_efectiva_total_AT = 165.2000
```

```

% Devanado de Tomas

if tipo_conductor_AT == "CTC" % Conductores CTC
    area_efectiva_total_Taps = (num_ctos_paralelos_dir_axial_Taps .*
num_ctos_paralelos_dir_radial_Taps - 1) .* area_efectiva_conductor_Taps
else % Conductores P ICC y Bunched
    area_efectiva_total_Taps = num_ctos_paralelos_dir_axial_Taps .*
num_ctos_paralelos_dir_radial_Taps .* area_efectiva_conductor_Taps
end

```

```
area_efectiva_total_Taps = 138
```

Una vez tenemos el área efectiva sea cual sea el tipo del conductor, hallar la densidad de corriente en cada devanado, dividiendo la corriente entre el área efectiva.

```
densidad_corriente_AT = I_F_tap_N ./ area_efectiva_total_AT
```

```
densidad_corriente_AT = 2.3829
```

```
densidad_corriente_BT = I_F_BT ./ area_efectiva_total_BT
```

```
densidad_corriente_BT = 2.3120
```

```
densidad_corriente_Taps = I_F_tap_N ./ area_efectiva_total_Taps
```

```
densidad_corriente_Taps = 2.8525
```

Conductor recubierto:

El recubrimiento de papel o de esmalte con o sin epoxi usado como aislamiento para los conductores deberá elegirse siguiendo:

- Especificación del cliente.
- Si el cliente no presenta especificación en el tipo de recubrimiento, la selección la determinará el precio. Siendo el objetivo la más económica. El tamaño total del conductor recubierto de esmalte es menor que el del papel, pudiendo evaluarlo con el fin del alcanzar un precio final más bajo.
- Resulta económicamente inviable usar conductores recubiertos en papel para diámetros de conductor menores al 1.0mm

```

% Tipo de recubrimientos de los conductores individuales
tipo_recubrimiento_conductor_BT = "Papel"

```

```
tipo_recubrimiento_conductor_BT = "Papel"
```

```
tipo_recubrimiento_conductor_AT = "Papel"
```

```
tipo_recubrimiento_conductor_AT = "Papel"
```

```
tipo_recubrimiento_conductor_Taps = "Papel"
```

```
tipo_recubrimiento_conductor_Taps = "Papel"
```

```
% Tipo de recubrimiento de la agrupación de conductores
tipo_recubrimiento_grupo_conductores_BT = "None"
```

```
tipo_recubrimiento_grupo_conductores_BT = "None"
```

```
tipo_recubrimiento_grupo_conductores_AT = "Papel"
```

```
tipo_recubrimiento_grupo_conductores_AT = "Papel"
```

```
tipo_recubrimiento_grupo_conductores_Taps = "None"
```

```
tipo_recubrimiento_grupo_conductores_Taps = "None"
```

```
% Densidades
```

```
if(tipo_recubrimiento_conductor_BT == "Papel")
    densidad_material_aislante_conductor_BT = 0.75.* 1e-6;
elseif(tipo_recubrimiento_conductor_BT == "None")
    densidad_material_aislante_conductor_BT = 0;
else    % Esmaltado con epoxy
    densidad_material_aislante_conductor_BT =1.2.* 1e-6;
end
```

```
if(tipo_recubrimiento_conductor_AT == "Papel")
    densidad_material_aislante_conductor_AT = 0.75.* 1e-6;
elseif(tipo_recubrimiento_conductor_AT == "None")
    densidad_material_aislante_conductor_AT = 0;
else    % Esmaltado con epoxy
    densidad_material_aislante_conductor_AT =1.2.* 1e-6;
end
```

```
if(tipo_recubrimiento_conductor_Taps == "Papel")
    densidad_material_aislante_conductor_Taps = 0.75.* 1e-6;
elseif(tipo_recubrimiento_conductor_Taps == "None")
    densidad_material_aislante_conductor_Taps = 0;
else    % Esmaltado con epoxy
    densidad_material_aislante_conductor_Taps =1.2.* 1e-6;
end
```

```
if(tipo_recubrimiento_grupo_conductores_BT == "Papel")
    densidad_material_aislante_mazo_BT = 0.75.* 1e-6;
elseif(tipo_recubrimiento_grupo_conductores_BT == "None")
    densidad_material_aislante_mazo_BT = 0;
else    % Esmaltado con epoxy
    densidad_material_aislante_mazo_BT =1.2.* 1e-6;
end
```

```
if(tipo_recubrimiento_grupo_conductores_AT == "Papel")
```

```

    densidad_material_aislante_mazo_AT = 0.75.* 1e-6;
elseif(tipo_recubrimiento_grupo_conductores_AT == "None")
    densidad_material_aislante_mazo_AT = 0;
else    % Esmaltado con epoxy
    densidad_material_aislante_mazo_AT =1.2.* 1e-6;
end

if(tipo_recubrimiento_grupo_conductores_Taps == "Papel")
    densidad_material_aislante_mazo_Taps = 0.75.* 1e-6;
elseif(tipo_recubrimiento_grupo_conductores_Taps == "None")
    densidad_material_aislante_mazo_Taps = 0;
else    % Esmaltado con epoxy
    densidad_material_aislante_mazo_Taps =1.2.* 1e-6;
end

% Cálculo de las dimensiones del aislamiento de los conductores
% individuales

if (tipo_recubrimiento_conductor_AT == "Papel")
    if (V_AT >= 11000 && V_AT < 22000)
        size_increase_AT = 0.4; %mm
    elseif (V_AT >= 22000 && V_AT < 33000)
        size_increase_AT = 0.5; %mm
    else    % V_HV >= 33000
        size_increase_AT = 0.6; %mm
    end
end

if (tipo_recubrimiento_conductor_BT == "Papel")
    if (V_BT < 11000)
        if(S_max < 100) %kVA
            size_increase_BT = 0.3; %mm
        elseif(S_max > 100) %kVA
            size_increase_BT = 0.4; %mm
        end
    elseif (V_BT >= 11000 && V_BT < 22000)
        size_increase_BT = 0.4; %mm
    elseif (V_BT >= 22000 && V_BT < 33000)
        size_increase_BT = 0.5; %mm
    else    % V_HV >= 33000
        size_increase_BT = 0.6; %mm
    end
elseif(tipo_recubrimiento_conductor_BT == "Esmalte(epoxy)")
    if (V_BT < 11000)
        size_increase_BT = 0.11; %mm
    end
end
end

```

```

if (tipo_recubrimiento_conductor_Taps == "Papel")
    if (V_AT >= 11000 && V_AT < 22000)
        size_increase_Taps = 0.4; %mm
    elseif (V_AT >= 22000 && V_AT < 33000)
        size_increase_Taps = 0.5; %mm
    else % V_HV >= 33000
        size_increase_Taps = 0.6; %mm
    end
end

% Selección de las dimensiones del aislamiento para el mazo

if tipo_recubrimiento_grupo_conductores_BT == "None"
    overall_size_increase_BT = 0
else
    overall_size_increase_BT = 0.8 % mm
end

```

```
overall_size_increase_BT = 0
```

```

if tipo_recubrimiento_grupo_conductores_AT == "None"
    overall_size_increase_AT = 0
else
    overall_size_increase_AT = 0.6 % mm
end

```

```
overall_size_increase_AT = 0.6000
```

```

if tipo_recubrimiento_grupo_conductores_Taps == "None"
    overall_size_increase_Taps = 0
else
    overall_size_increase_Taps = 0.15 % mm
end

```

```
overall_size_increase_Taps = 0
```

Con esto podemos calcular el tamaño de los conductores con el recubrimiento

```

% Dimensiones de los conductores aislados

altura_conductor_recubierto_BT = altura_conductor_descubierto_BT +
size_increase_BT

```

```
altura_conductor_recubierto_BT = 7.4000
```

```

espesor_conductor_recubierto_BT = espesor_conductor_descubierto_BT +
size_increase_BT

```

```
espesor_conductor_recubierto_BT = 2.7000
```

```
altura_conductor_recubierto_AT = altura_conductor_descubierto_AT +  
size_increase_AT
```

```
altura_conductor_recubierto_AT = 10.6000
```

```
espesor_conductor_recubierto_AT = espesor_conductor_descubierto_AT +  
size_increase_AT
```

```
espesor_conductor_recubierto_AT = 2.7000
```

```
altura_conductor_recubierto_Taps = altura_conductor_descubierto_Taps +  
size_increase_Taps
```

```
altura_conductor_recubierto_Taps = 8.6000
```

```
espesor_conductor_recubierto_Taps = espesor_conductor_descubierto_Taps +  
size_increase_Taps
```

```
espesor_conductor_recubierto_Taps = 2.8000
```

Además, podremos calcular las diferentes vueltas por capa basándonos en el lado de LV que siempre será el que menos número de vueltas tenga

Ahora calcularemos el área del conductor recubierto si este está conforme a circuitos paralelos

```
% Dimensiones totales de los conductores descubiertos
```

```
altura_total_conductor_descubierto_BT = num_ctos_paralelos_dir_axial_BT .*  
altura_conductor_descubierto_BT
```

```
altura_total_conductor_descubierto_BT = 13.6000
```

```
espesor_total_conductor_descubierto_BT = num_ctos_paralelos_dir_radial_BT .*  
espesor_conductor_descubierto_BT
```

```
espesor_total_conductor_descubierto_BT = 29.4000
```

```
altura_total_conductor_descubierto_AT = num_ctos_paralelos_dir_axial_AT .*  
altura_conductor_descubierto_AT
```

```
altura_total_conductor_descubierto_AT = 20
```

```
espesor_total_conductor_descubierto_AT = num_ctos_paralelos_dir_radial_AT .*  
espesor_conductor_descubierto_AT
```

```
espesor_total_conductor_descubierto_AT = 8.4000
```

```
altura_total_conductor_descubierto_Taps = num_ctos_paralelos_dir_axial_Taps  
.* altura_conductor_descubierto_Taps
```

```
altura_total_conductor_descubierto_Taps = 16
```

```
espesor_total_conductor_descubierto_Taps =  
num_ctos_paralelos_dir_radial_Taps .* espesor_conductor_descubierto_Taps
```

```
espesor_total_conductor_descubierto_Taps = 8.8000
```

```
% Dimensiones totales de los conductores recubiertos
```

```
altura_total_conductor_recubierto_BT = num_ctos_paralelos_dir_axial_BT .*  
altura_conductor_recubierto_BT + overall_size_increase_BT
```

```
altura_total_conductor_recubierto_BT = 14.8000
```

```
espesor_total_conductor_recubierto_BT = num_ctos_paralelos_dir_radial_BT .*  
espesor_conductor_recubierto_BT + overall_size_increase_BT
```

```
espesor_total_conductor_recubierto_BT = 37.8000
```

```
altura_total_conductor_recubierto_AT = num_ctos_paralelos_dir_axial_AT .*  
altura_conductor_recubierto_AT + overall_size_increase_AT
```

```
altura_total_conductor_recubierto_AT = 21.8000
```

```
espesor_total_conductor_recubierto_AT = num_ctos_paralelos_dir_radial_AT .*  
espesor_conductor_recubierto_AT + overall_size_increase_AT
```

```
espesor_total_conductor_recubierto_AT = 11.4000
```

```
altura_total_conductor_recubierto_Taps = num_ctos_paralelos_dir_axial_Taps  
.* altura_conductor_recubierto_Taps + overall_size_increase_Taps
```

```
altura_total_conductor_recubierto_Taps = 17.2000
```

```
espesor_total_conductor_recubierto_Taps = num_ctos_paralelos_dir_radial_Taps  
.* espesor_conductor_recubierto_Taps + overall_size_increase_Taps
```

```
espesor_total_conductor_recubierto_Taps = 11.2000
```

8.7 Cálculo altura axial de los bobinados

Para calcular la altura de la ventana, dependeremos del tipo de los bobinados. Todas las alturas que calcularemos a continuación son las finales de los arroyamientos, tras el secado y el prensado.

```
% Primero seleccionaremos y definiremos los spacers
```

```
% Altura de los espaciadores
```

```
altura_spacer_BT = 3 %mm
```

```
altura_spacer_BT = 3
```

```
altura_spacer_AT = 4 %mm
```

```
altura_spacer_AT = 4
```

```
altura_spacer_Taps = 4 %mm
```

```
altura_spacer_Taps = 4
```

```
% Grado del material de los espaciadores
```

```
press_board_spacer_BT = "K"
```

```
press_board_spacer_BT = "K"
```

```
press_board_spacer_AT = "K"
```

```
press_board_spacer_AT = "K"
```

```
press_board_spacer_Taps = "K"
```

```
press_board_spacer_Taps = "K"
```

```
% Factor de compresion del aislamiento de los conductores
```

```
factor_compresion_aislamiento_BT = 10 % %
```

```
factor_compresion_aislamiento_BT = 10
```

```
factor_compresion_aislamiento_AT = 10 % %
```

```
factor_compresion_aislamiento_AT = 10
```

```
factor_compresion_aislamiento_Taps = 10 % %
```

```
factor_compresion_aislamiento_Taps = 10
```

```
% Calculamos la compresion del aislamiento y los espaciadores
```

```
if(press_board_spacer_AT == "K" || press_board_spacer_BT == "K" ||  
press_board_spacer_Taps == "K")
```

```
    factor_compresion_espaciadores = 3 % %
```

```
else    %Press board de grado 3
```

```
    factor_compresion_espaciadores = 5 % %
```

```
end
```

```
factor_compresion_espaciadores = 3
```

```
% Devanado BT
```

```
if(tipo_bobinado_BT == "discos")
```

```

% Tipo de bobinado por discos continuos

% Cálculos precompresión
altura_axial_bobinado_recubierto_BT =
(altura_total_conductor_recubierto_BT .* num_disco_BT)
altura_axial_bobinado_descubierto_BT =
(altura_total_conductor_descubierto_BT .* num_disco_BT)
altura_axial_espaciadores_BT = altura_spacer_BT .* (num_disco_BT - 1)
altura_axial_aislamiento_BT = altura_axial_bobinado_recubierto_BT -
altura_axial_bobinado_descubierto_BT
altura_axial_total_precompresion_BT =
altura_axial_bobinado_recubierto_BT + altura_axial_espaciadores_BT

% Cálculos Postcompresión
altura_axial_aislamiento_postcompresion_BT = altura_axial_aislamiento_BT
.* (1 - factor_compresion_aislamiento_BT .* 1e-2)
altura_axial_espaciadores_postcompresion_BT =
altura_axial_espaciadores_BT .* (1 - factor_compresion_espaciadores .* 1e-2)
altura_axial_total_postcompresion_BT =
round(altura_axial_bobinado_descubierto_BT +
altura_axial_aislamiento_postcompresion_BT +
altura_axial_espaciadores_postcompresion_BT)
elseif(tipo_bobinado_BT == "capas")

%AÑADIR BOBINADO EN CAPA

else

end

```

```

altura_axial_bobinado_recubierto_BT = 1184
altura_axial_bobinado_descubierto_BT = 1088
altura_axial_espaciadores_BT = 237
altura_axial_aislamiento_BT = 96
altura_axial_total_precompresion_BT = 1421
altura_axial_aislamiento_postcompresion_BT = 86.4000
altura_axial_espaciadores_postcompresion_BT = 229.8900
altura_axial_total_postcompresion_BT = 1404

```

```

% Devanado AT

if(tipo_bobinado_AT == "discos")

% Tipo de bobinado por discos continuos

% Cálculos precompresión

```

```

    altura_axial_bobinado_recubierto_AT =
    (altura_total_conductor_recubierto_AT .* num_disco_AT)
    altura_axial_bobinado_descubierto_AT =
    (altura_total_conductor_descubierto_AT .* num_disco_AT)
    altura_axial_espaciadores_AT = altura_spacer_AT .* (num_disco_AT - 1)
    altura_axial_aislamiento_AT = altura_axial_bobinado_recubierto_AT -
    altura_axial_bobinado_descubierto_AT
    altura_axial_total_precompresion_AT =
    altura_axial_bobinado_recubierto_AT + altura_axial_espaciadores_AT

    % Cálculos Postcompresión
    altura_axial_aislamiento_postcompresion_AT = altura_axial_aislamiento_AT
    .* (1 - factor_compresion_aislamiento_AT .* 1e-2)
    altura_axial_espaciadores_postcompresion_AT =
    altura_axial_espaciadores_AT .* (1 - factor_compresion_espaciadores .* 1e-2)
    altura_axial_total_postcompresion_AT =
    round(altura_axial_bobinado_descubierto_AT +
    altura_axial_aislamiento_postcompresion_AT +
    altura_axial_espaciadores_postcompresion_AT)
    elseif(tipo_bobinado_AT == "capas")

    %AÑADIR BOBINADO EN CAPA

else

end

```

```

altura_axial_bobinado_recubierto_AT = 981
altura_axial_bobinado_descubierto_AT = 900
altura_axial_espaciadores_AT = 176
altura_axial_aislamiento_AT = 81
altura_axial_total_precompresion_AT = 1157
altura_axial_aislamiento_postcompresion_AT = 72.9000
altura_axial_espaciadores_postcompresion_AT = 170.7200
altura_axial_total_postcompresion_AT = 1144

```

```

% Devanado Taps

if(tipo_bobinado_Taps == "discos")

    % Tipo de bobinado por discos continuos

    % Cálculos precompresión

```

```

    altura_axial_bobinado_recubierto_Taps =
    (altura_total_conductor_recubierto_Taps .* num_disco_Taps)
    altura_axial_bobinado_descubierto_Taps =
    (altura_total_conductor_descubierto_Taps .* num_disco_Taps)
    altura_axial_espaciadores_Taps = altura_spacer_Taps .* (num_disco_Taps
- 1)
    altura_axial_aislamiento_Taps = altura_axial_bobinado_recubierto_Taps -
altura_axial_bobinado_descubierto_Taps
    altura_axial_total_precompresion_Taps =
altura_axial_bobinado_recubierto_Taps + altura_axial_espaciadores_Taps

    % Cálculos Postcompresión
    altura_axial_aislamiento_postcompresion_Taps =
altura_axial_aislamiento_Taps .* (1 - factor_compresion_aislamiento_Taps .*
1e-2)
    altura_axial_espaciadores_postcompresion_Taps =
altura_axial_espaciadores_Taps .* (1 - factor_compresion_espaciadores .* 1e-
2)
    altura_axial_total_postcompresion_Taps =
round(altura_axial_bobinado_descubierto_Taps +
altura_axial_aislamiento_postcompresion_Taps +
altura_axial_espaciadores_postcompresion_Taps)
    elseif(tipo_bobinado_Taps == "capas")

    %AÑADIR BOBINADO EN CAPA

else

end

```

```

altura_axial_bobinado_recubierto_Taps = 550.4000
altura_axial_bobinado_descubierto_Taps = 512
altura_axial_espaciadores_Taps = 124
altura_axial_aislamiento_Taps = 38.4000
altura_axial_total_precompresion_Taps = 674.4000
altura_axial_aislamiento_postcompresion_Taps = 34.5600
altura_axial_espaciadores_postcompresion_Taps = 120.2800
altura_axial_total_postcompresion_Taps = 667

```

```

% Añadimos en caso de que existan extra bloques de madera para modificar la
% altura total de los devanados

```

```

extra_bloque_BT = "Si"

```

```

extra_bloque_BT = "Si"

```

```
extra_bloque_AT = "Si"
```

```
extra_bloque_AT = "Si"
```

```
extra_bloque_Taps = "No"
```

```
extra_bloque_Taps = "No"
```

```
num_bloque_extra_BT = 2
```

```
num_bloque_extra_BT = 2
```

```
num_bloque_extra_AT = 2
```

```
num_bloque_extra_AT = 2
```

```
num_bloque_extra_Taps = 0
```

```
num_bloque_extra_Taps = 0
```

```
altura_extra_bloque_BT = 3
```

```
altura_extra_bloque_BT = 3
```

```
altura_extra_bloque_AT = 15
```

```
altura_extra_bloque_AT = 15
```

```
altura_extra_bloque_Taps = 0
```

```
altura_extra_bloque_Taps = 0
```

```
if (extra_bloque_BT == "Si")
```

```
    altura_axial_total_precompresion_BT =  
altura_axial_total_precompresion_BT + num_bloque_extra_BT .*  
altura_extra_bloque_BT  
    altura_axial_total_postcompresion_BT =  
altura_axial_total_precompresion_BT + num_bloque_extra_BT .*  
altura_extra_bloque_BT  
end
```

```
altura_axial_total_precompresion_BT = 1427
```

```
altura_axial_total_postcompresion_BT = 1433
```

```
if (extra_bloque_AT == "Si")
```

```
    altura_axial_total_precompresion_AT =  
altura_axial_total_precompresion_AT + num_bloque_extra_AT .*  
altura_extra_bloque_AT
```

```

    altura_axial_total_postcompresion_AT =
altura_axial_total_postcompresion_AT + num_bloque_extra_AT .*
altura_extra_bloque_AT
end

```

```
altura_axial_total_precompresion_AT = 1187
```

```
altura_axial_total_postcompresion_AT = 1174
```

```

if (extra_bloque_Taps == "Si")
    altura_axial_total_precompresion_Taps =
altura_axial_total_precompresion_Taps + num_bloque_extra_Taps .*
altura_extra_bloque_Taps
    altura_axial_total_postcompresion_Taps =
altura_axial_total_postcompresion_Taps + num_bloque_extra_Taps .*
altura_extra_bloque_Taps
end

```

8.7.1 Distancias eléctricas en transformadores trifásicos de potencia llenos de aceite aislante

Utilizaremos valores de un transformador de referencia y comprobaremos el estrés eléctrico que presentan más adelante

```
separacion_nucleo_BT = 20    % Dimension radial
```

```
separacion_nucleo_BT = 20
```

```
separacion_BT_AT = 45      % Dimension radial
```

```
separacion_BT_AT = 45
```

```
separacion_AT_Taps = 45    % Dimension radial
```

```
separacion_AT_Taps = 45
```

```
separacion_AT_yugo_superior = 160    % Dimension axial
```

```
separacion_AT_yugo_superior = 160
```

```
separacion_AT_yugo_inferior = 89     % Dimension axial
```

```
separacion_AT_yugo_inferior = 89
```

```
separacion_BT_yugo_superior = 160    % Dimension axial
```

```
separacion_BT_yugo_superior = 160
```

```
separacion_BT_yugo_inferior = 80     % Dimension axial
```

```
separacion_BT_yugo_inferior = 80
```

```
separacion_AT_lado_largo_tanque = 150
```

```
separacion_AT_lado_largo_tanque = 150
```

```
separacion_AT_Taps_lead = 55
```

```
separacion_AT_Taps_lead = 55
```

```
separacion_Taps_tanque = 95
```

```
separacion_Taps_tanque = 95
```

```
separacion_bobinado_lado_corto_tanque_lado_sin_tomas = 75
```

```
separacion_bobinado_lado_corto_tanque_lado_sin_tomas = 75
```

```
separacion_bobinado_lado_corto_tanque_lado_con_tomas = 150
```

```
separacion_bobinado_lado_corto_tanque_lado_con_tomas = 150
```

8.8 Aislamiento entre capas

```
% Definimos el valor de K según el tipo de transformador
K_ensayo = "5500"; % V/mm

if tipo_bobinado_AT == "capas"
    % Devanado BT
    espesor_aislamient_BT_min = 0.15; % mm
    espesor_aislamiento_BT = (2 .* vueltas_BT .* V_vuelta_real .*
V_ensayo_BT) ./ (V_BT .* str2double(K_ensayo)) -
(espesor_conductor_recubierto_BT - espesor_conductor_descubierto_BT); % mm

    if espesor_aislamient_BT_min > espesor_aislamiento_BT
        espesor_nominal_aislamiento_BT = espesor_aislamient_BT_min % mm
    else
        espesor_nominal_aislamiento_BT = ceil(espesor_aislamiento_BT .* 1e1)
.* 1e-1 % mm
    end
end
if tipo_bobinado_BT == "capas"
    % Devanado AT
    espesor_aislamient_AT_min = 0.15; % mm
    espesor_aislamiento_AT = (2 .* vueltas_AT_min .* V_vuelta_real .*
V_ensayo_AT) ./ (V_tap_max .* str2double(K_ensayo)) -
(espesor_conductor_recubierto_AT - espesor_conductor_descubierto_AT); % mm

    if espesor_aislamient_AT_min > espesor_aislamiento_AT
        espesor_nominal_aislamiento_AT = espesor_aislamient_AT_min % mm
    else
        espesor_nominal_aislamiento_AT = ceil(espesor_aislamiento_AT .* 1e1)
.* 1e-1 % mm
    end
end
```

```

if tipo_bobinado_Taps == "capas"
    % Devanado Taps
    espesor_aislamient_Taps_min = 0.15; % mm
    espesor_aislamiento_Taps = (2 .* vueltas_Taps .* V_vuelta_real .*
V_ensayo_AT) ./ (V_tap_max .* str2double(K_ensayo)) -
(espesor_conductor_recubierto_BT - espesor_conductor_descubierto_BT); % mm

    if espesor_aislamient_Taps_min > espesor_aislamiento_Taps
        espesor_nominal_aislamiento_Taps = espesor_aislamient_Taps_min % mm
    else
        espesor_nominal_aislamiento_Taps = ceil(espesor_aislamiento_Taps .*
1e1) .* 1e-1 % mm
    end
end

% Calculo de las dos capas cercanas al final

% Definimos los factores según el tipo de devanado

% P
factor_P_BT = 1;
factor_P_AT = 0.7;

% alpha
alpha = 1.5;

% beta
beta = 1.5;

if tipo_bobinado_BT == "capas"
    % Devanado BT
    espesor_capas_finales_BT = (factor_P_BT .* BIL_BT .* 1e-3 .* alpha .*
beta .* vueltas_BT) ./ (20 .* vueltas_BT) -
(espesor_total_conductor_recubierto_BT -
espesor_total_conductor_descubierto_BT)
end
if tipo_bobinado_AT == "capas"
    % Devanado AT
    espesor_capas_finales_AT = (factor_P_AT .* BIL_AT .* 1e-3 .* alpha .*
beta .* vueltas_AT_max) ./ (20 .* vueltas_AT_min) -
(espesor_total_conductor_recubierto_AT -
espesor_total_conductor_descubierto_AT)
end

```

8.9 Cálculo del diámetro y la profundidad radial de los arrollamientos

```

% Devanado BT

```

```

if(tipo_bobinado_BT == "discos")
    diametro_interior_BT = diametro_nucleo + 2 .* separacion_nucleo_BT;
    diametro_exterior_BT = diametro_interior_BT + 2 .*
(espesor_total_conductor_recubierto_BT .* ceil(num_vueltas_disco_BT));
    RD_BT = (diametro_exterior_BT - diametro_interior_BT) ./ 2;
end

% Devanado AT

if(tipo_bobinado_AT == "discos")
    diametro_interior_AT = diametro_exterior_BT + 2 .* separacion_BT_AT;
    diametro_exterior_AT = diametro_interior_AT + 2 .*
(espesor_total_conductor_recubierto_AT .* ceil(num_vueltas_disco_AT));
    RD_AT = (diametro_exterior_AT - diametro_interior_AT) ./ 2;
end

% Devanado Taps

if(tipo_bobinado_Taps == "discos")
    diametro_interior_Taps = diametro_exterior_AT + 2 .* separacion_AT_Taps;
    diametro_exterior_Taps = diametro_interior_Taps + 2 .*
(espesor_total_conductor_recubierto_Taps .* ceil(num_vueltas_disco_Taps));
    RD_Taps = (diametro_exterior_Taps - diametro_interior_Taps) ./ 2;
end

% Exterior bobinado

separacion_entre_fases = 20; % mm
distancia_entre_columnas = diametro_exterior_Taps + 2 .*
separacion_entre_fases;

% Resumen dimensiones de los arrollamientos

resumen_dimension_bobinados_row_labels = {'Diámetro del núcleo', 'Separación
núcleo-BT', 'Diámetro interior BT', 'Profundidad radial BT', 'Diámetro exterior
BT', 'Separación BT-AT', 'Diámetro interior AT', 'Profundidad radial
AT', 'Diámetro exterior AT', 'Separación AT-Tomas', 'Diámetro interior
Tomas', 'Profundidad radial Tomas', 'Diámetro exterior Tomas', 'Separación
fases-fase', 'Distancia entre columnas'};
resumen_dimension_bobinados_data = {diametro_nucleo;
    separacion_nucleo_BT;
    diametro_interior_BT;
    RD_BT;
    diametro_exterior_BT;
    separacion_BT_AT;
    diametro_interior_AT;
    RD_AT;
    diametro_exterior_AT;
    separacion_AT_Taps;

```

```

d diametro_interior_Taps;
RD_Taps;
d diametro_exterior_Taps;
s separacion_entre_fases;
d distancia_entre_columnas};

resumen_dimension_bobinados_tabla =
array2table(resumen_dimension_bobinados_data, "RowNames", resumen_dimension_bob
inados_row_labels, "VariableNames", "mm")

```

resumen_dimension_bobinados_tabla = 15x1 table

	mm
1 Diámetro del núcleo	800
2 Separación núcleo-BT	20
3 Diámetro interior BT	840
4 Profundidad radial BT	113.4000
5 Diámetro exterior BT	1.0668e+03
6 Separación BT-AT	45
7 Diámetro interior AT	1.1568e+03
8 Profundidad radial AT	114
9 Diámetro exterior AT	1.3848e+03
10 Separación AT-Tomas	45
11 Diámetro interior Tomas	1.4748e+03
12 Profundidad radial Tomas	33.6000
13 Diámetro exterior Tomas	1542
14 Separación fases-fase	20
15 Distancia entre columnas	1582

8.10 Cálculo del estrés eléctrico del aislamiento entre arrollamientos

Podremos calcular ahora el estrés eléctrico entre las separaciones suponiendo una distancia de seguridad sin aislamiento de pressboard

```
% Definimos la permeabilidad eléctrica relativa del aceite mineral y el
```

```
% pressboard
```

```
E_aceite_mineral = 2.2
```

```
E_aceite_mineral = 2.2000
```

```
E_pressboard = 4.5
```

```
E_pressboard = 4.5000
```

```
% Estrés en el aislamiento entre el núcleo y el arrollamiento de BT
```

```
e_nucleo_BT = (V_ensayo_BT_AC .* 1e-3) ./ (((diametro_nucleo ./ 2) .*  
E_aceite_mineral) .* ((1 ./ E_aceite_mineral) .* (log(((diametro_nucleo ./ 2)  
+ separacion_nucleo_BT) ./ (diametro_nucleo ./ 2)))))) %kV/mm
```

```
e_nucleo_BT = 3.5868
```

```
caida_tension_nucleo_BT = separacion_nucleo_BT .* e_nucleo_BT %kV
```

```
caida_tension_nucleo_BT = 71.7358
```

```
% Estrés en el aislamiento entre el arrollamiento de BT y el de AT
```

```
e_BT_AT = (V_ensayo_AT_AC .* 1e-3) ./ (((diametro_exterior_BT ./ 2) .*  
E_aceite_mineral) .* ((1 ./ E_aceite_mineral) .* (log((diametro_interior_AT  
./ 2) ./ (diametro_exterior_BT ./ 2)))))) %kV/mm
```

```
e_BT_AT = 5.3238
```

```
caida_tension_BT_AT = separacion_BT_AT .* e_BT_AT %kV
```

```
caida_tension_BT_AT = 239.5710
```

```
% Estrés en el aislamiento entre el arrollamiento de AT y el de regulación
```

```
e_AT_Taps = (V_ensayo_AT_AC .* 1e-3) ./ (((diametro_exterior_AT ./ 2) .*  
E_aceite_mineral) .* ((1 ./ E_aceite_mineral) .* (log((diametro_interior_Taps  
./ 2) ./ (diametro_exterior_AT ./ 2)))))) %kV/mm
```

```
e_AT_Taps = 5.2755
```

```
caida_tension_AT_Taps = separacion_AT_Taps .* e_AT_Taps %kV
```

```
caida_tension_AT_Taps = 237.3956
```

```
if(e_nucleo_BT > 5.5 || e_BT_AT > 5.5 || e_AT_Taps > 5.5)  
    disp("Seleccione una distancia de aislamiento entre arrollamientos y  
núcleo diferentes")
```

```

else
    disp("Las distancias de aislamiento son correctas")
end

```

Las distancias de aislamiento son correctas

8.11 Cálculo del peso total del conductor descubierto, recubierto y resistencia del arrollamiento

El peso total del conductor descubierto se calcula usando la media de la longitud de vueltas, el número de vueltas, el área de la sección transversal de la vuelta y la densidad del material.

```

% Peso del conductor de cobre descubierto

% Cálculos por fase

% Devanado AT

media_longitud_vuelta_AT = 2 .* pi .* ((diametro_exterior_AT - RD_AT) ./ 2);
longitud_conductor_fase_AT = media_longitud_vuelta_AT .* vueltas_AT_min;
volumen_total_conductor_fase_AT = longitud_conductor_fase_AT .*
area_efectiva_total_AT;
peso_total_conductor_descubierto_fase_AT = volumen_total_conductor_fase_AT
.* densidad_material_conductor;

% Total de las tres fases

peso_total_conductor_descubierto_AT =
peso_total_conductor_descubierto_fase_AT .*3;

% Devanado BT

media_longitud_vuelta_BT = 2 .* pi .* ((diametro_exterior_BT - RD_BT) ./ 2);
longitud_conductor_fase_BT = media_longitud_vuelta_BT .* vueltas_BT;
volumen_total_conductor_fase_BT = longitud_conductor_fase_BT .*
area_efectiva_total_BT;
peso_total_conductor_descubierto_fase_BT = volumen_total_conductor_fase_BT
.* densidad_material_conductor;

% Total de las tres fases

peso_total_conductor_descubierto_BT =
peso_total_conductor_descubierto_fase_BT .*3;

% Devanado Taps

media_longitud_vuelta_Taps = 2 .* pi .* ((diametro_exterior_Taps - RD_Taps)
./ 2);

```

```

longitud_conductor_fase_Taps = media_longitud_vuelta_Taps .*
vuelatas_devanado_Taps;
volumen_total_conductor_fase_Taps = longitud_conductor_fase_Taps .*
area_efectiva_total_Taps;
peso_total_conductor_descubierto_fase_Taps =
volumen_total_conductor_fase_Taps .* densidad_material_conductor;

% Total de las tres fases

peso_total_conductor_descubierto_Taps =
peso_total_conductor_descubierto_fase_Taps .*3;

% Total devanados

peso_total_conductor_descubierto = peso_total_conductor_descubierto_AT +
peso_total_conductor_descubierto_BT + peso_total_conductor_descubierto_Taps;

% Peso del aislamiento

% Devanado AT

area_conductor_recubierto_AT = altura_conductor_recubierto_AT .*
espesor_conductor_recubierto_AT;
area_total_conductor_recubierto_AT = area_conductor_recubierto_AT .*
num_ctos_paralelos_dir_axial_AT .* num_ctos_paralelos_dir_radial_AT;
area_aislamiento_AT = area_total_conductor_recubierto_AT -
area_efectiva_total_AT;
volumen_total_aislamiento_AT = media_longitud_vuelta_AT .* vueltas_AT_min .*
area_aislamiento_AT;
peso_total_aislamiento_AT = volumen_total_aislamiento_AT .*
densidad_material_aislante_conductor_AT;
peso_total_conductor_recubierto_AT = peso_total_conductor_descubierto_AT +
peso_total_aislamiento_AT;

% Devanado BT

area_conductor_recubierto_BT = altura_conductor_recubierto_BT .*
espesor_conductor_recubierto_BT;
area_total_conductor_recubierto_BT = area_conductor_recubierto_BT .*
num_ctos_paralelos_dir_axial_BT .* num_ctos_paralelos_dir_radial_BT;
area_aislamiento_BT = area_total_conductor_recubierto_BT -
area_efectiva_total_BT;
volumen_total_aislamiento_BT = media_longitud_vuelta_BT .* vueltas_BT .*
area_aislamiento_BT;
peso_total_aislamiento_BT = volumen_total_aislamiento_BT .*
densidad_material_aislante_conductor_BT;
peso_total_conductor_recubierto_BT = peso_total_conductor_descubierto_BT +
peso_total_aislamiento_BT;

```

```
% Devanado AT
```

```
area_conductor_recubierto_Taps = altura_conductor_recubierto_Taps .*  
espesor_conductor_recubierto_Taps;  
area_total_conductor_recubierto_Taps = area_conductor_recubierto_Taps .*  
num_ctos_paralelos_dir_axial_Taps .* num_ctos_paralelos_dir_radial_Taps;  
area_aislamiento_Taps = area_total_conductor_recubierto_Taps -  
area_efectiva_total_Taps;  
volumen_total_aislamiento_Taps = media_longitud_vuelta_Taps .*  
vueltas_devanado_Taps .* area_aislamiento_Taps;  
peso_total_aislamiento_Taps = volumen_total_aislamiento_Taps .*  
densidad_material_aislante_conductor_Taps;  
peso_total_conductor_recubierto_Taps = peso_total_conductor_descubierto_Taps  
+ peso_total_aislamiento_Taps;
```

```
% Total devanados
```

```
peso_total_conductor_recubierto = peso_total_conductor_recubierto_AT +  
peso_total_conductor_recubierto_BT + peso_total_conductor_recubierto_Taps
```

```
peso_total_conductor_recubierto = 1.5136e+04
```

```
% Resumen peso
```

```
resumen_peso_row_labels = {'Peso del conductor descubierto', 'Peso del  
conductor recubierto'};  
resumen_peso_column_labels = {'AT', 'BT', 'Taps', 'Total'};  
resumen_peso_data = {peso_total_conductor_descubierto_AT,  
peso_total_conductor_descubierto_BT,  
peso_total_conductor_descubierto_Taps, peso_total_conductor_descubierto;  
peso_total_conductor_recubierto_AT,  
peso_total_conductor_recubierto_BT, peso_total_conductor_recubierto_Taps,  
peso_total_conductor_recubierto};  
resumen_peso_table =  
array2table(resumen_peso_data, "RowNames", resumen_peso_row_labels, "VariableNam  
es", resumen_peso_column_labels)
```

```
resumen_peso_table = 2x4 table
```

	AT	BT	Taps	Total
1 Peso del conductor descubierto	7.1977e+03	6.1773e+03	1.5820e+03	1.4957e+04
2 Peso del conductor recubierto	7.2752e+03	6.2613e+03	1.5995e+03	1.5136e+04

```
% Calculo resistencia
```

```
% Longitud de conductores
```

```
longitud_total_conductor_AT = 3 .* longitud_conductor_fase_AT
```

```
longitud_total_conductor_AT = 4.8627e+06
```

```
longitud_total_conductor_BT = 3 .* longitud_conductor_fase_BT
```

```
longitud_total_conductor_BT = 1.8331e+06
```

```
longitud_total_conductor_Taps = 3 .* longitud_conductor_fase_Taps
```

```
longitud_total_conductor_Taps = 1.2795e+06
```

```
longitud_total_conductor = longitud_total_conductor_AT +  
longitud_total_conductor_BT + longitud_total_conductor_Taps
```

```
longitud_total_conductor = 7.9752e+06
```

```
if(material_conductor == "Cobre")  
    resistividad = 2.1 .* 1e-5 % ohm/mm  
else  
    resistividad = 3.46 .* 1e-5 % ohm/mm  
end
```

```
resistividad = 2.1000e-05
```

```
% Resistencia  
resistencia_conductor_fase_AT = (resistividad .* longitud_conductor_fase_AT)  
./ area_efectiva_total_AT % ohm
```

```
resistencia_conductor_fase_AT = 0.2060
```

```
resistencia_conductor_fase_BT = (resistividad .* longitud_conductor_fase_BT)  
./ area_efectiva_total_BT % ohm
```

```
resistencia_conductor_fase_BT = 0.0341
```

```
resistencia_conductor_fase_Taps = (resistividad .*  
longitud_conductor_fase_Taps) ./ area_efectiva_total_Taps % ohm
```

```
resistencia_conductor_fase_Taps = 0.0649
```

```
resistencia_conductor_AT = (resistividad .* longitud_total_conductor_AT) ./  
area_efectiva_total_AT % ohm
```

```
resistencia_conductor_AT = 0.6181
```

```
resistencia_conductor_BT = (resistividad .* longitud_total_conductor_BT) ./  
area_efectiva_total_BT % ohm
```

```
resistencia_conductor_BT = 0.1023
```

```
resistencia_conductor_Taps = (resistividad .* longitud_total_conductor_Taps)
./ area_efectiva_total_Taps % ohm
```

```
resistencia_conductor_Taps = 0.1947
```

```
resistencia_total = resistencia_conductor_AT + resistencia_conductor_BT +
resistencia_conductor_Taps % ohm
```

```
resistencia_total = 0.9152
```

8.12 Cálculo del tamaño de la ventana y las pérdidas en el núcleo

8.12.1 Tamaño de la ventana y cálculo del peso del núcleo

Podemos tener diferentes configuraciones según el número de devanados y columnas:

- 3 fases y 3 columnas
- 1 fase y 2 columnas
- 1 fase y 3 columnas
- 3 fases y 5 columnas

El caso del proyecto es el de un transformador trifásico de 3 columnas

```
if(altura_axial_total_postcompresion_AT >
altura_axial_total_postcompresion_BT)
    altura_ventana_nucleo = altura_axial_total_postcompresion_AT +
separacion_AT_yugo_inferior + separacion_AT_yugo_superior
else
    altura_ventana_nucleo = altura_axial_total_postcompresion_BT +
separacion_BT_yugo_superior + separacion_BT_yugo_inferior
end
if(altura_axial_total_postcompresion_Taps >
altura_axial_total_postcompresion_BT ||
altura_axial_total_postcompresion_Taps >
altura_axial_total_postcompresion_AT)
```

```
altura_ventana_nucleo = 1673
```

```
disp("Seleccionar una configuración diferente para el devanado de
regulación");
end
```

El cálculo del peso del núcleo se realiza sumando el peso contra el grano y alineado con este.

```
peso_nucleo_alineado = (3 .* altura_ventana_nucleo + 4 .*
(distancia_entre_columnas - w(1))) .* 7.65 .* (sum_area_neta .* 1e-2) .* 1e-
4; % Kg
peso_nucleo_contra = 7.65 .* 6 .* w(1) .* (sum_area_neta .* 1e-2) .* 1e-4; %
Kg
```

```
peso_nucleo_total = peso_nucleo_alineado + peso_nucleo_contra % Kg
```

```
peso_nucleo_total = 4.6089e+04
```

8.12.2 Cálculo de las pérdidas en el núcleo

Cálculo de las pérdidas basado en el factor de construcción medio

```
% EXPLICAR QUE MATERIAL SE HA SELECCIONADO E INSERTAR LAS TABLAS
```

```
factor_medio_construccion = 1.3;
```

```
grado_nucleo = "23ZDKH85"
```

```
grado_nucleo = "23ZDKH85"
```

```
if(grado_nucleo == "M5")
    W_kg = 5.1634 - 15.94 .* B_real + 19.41 .* (B_real ^2) - 10.355 .*
(B_real^3) + 2.15 .* (B_real^4)
elseif(grado_nucleo == "M4")
    W_kg = 4.766 - 15.736 .* B_real + 20.151 .* (B_real ^2) - 11.21 .*
(B_real^3) + 2.405 .* (B_real^4)
elseif(grado_nucleo == "MOH")
    W_kg = 45.43 - 127.96 .* B_real + 135.27 .* (B_real ^2) - 63.2 .*
(B_real^3) + 11.1 .* (B_real^4)
elseif(grado_nucleo == "23ZH90")
    W_kg = 31.47 - 89.4 .* B_real + 95.5 .* (B_real ^2) - 45 .* (B_real^3) +
7.9 .* (B_real^4)
elseif(grado_nucleo == "23ZDKH90")
    W_kg = 14.4 - 43.56 .* B_real + 49.26 .* (B_real ^2) - 24.35 .*
(B_real^3) + 4.516 .* (B_real^4)
elseif(grado_nucleo == "23ZH85")
    W_kg = - 8.17 + 17.24 .* B_real - 11.6 .* (B_real ^2) - 2.5 .*
(B_real^3) + 0.959 .* (B_real^4)
elseif(grado_nucleo == "23ZDKH85")
    W_kg = 3.31 - 13.15 .* B_real + 18.2 .* (B_real ^2) - 10.3 .* (B_real^3)
+ 2.1 .* (B_real^4)
elseif(grado_nucleo == "23ZDKH80")
    W_kg = 23.92 - 67.23 .* B_real + 70.82 .* (B_real ^2) - 32.8 .*
(B_real^3) + 5.72 .* (B_real^4)
end
```

```
W_kg = 0.4507
```

```
perdidas_nucleo = factor_medio_construccion .* W_kg .* peso_nucleo_total %W
```

```
perdidas_nucleo = 2.7002e+04
```

8.12.3 Cálculo de la corriente de excitación (corriente en vacío)

```
% K varía según el diámetro del núcleo

if diametro_nucleo > 250 % mm
    K_nucleo = 2.0
elseif (diametro_nucleo > 130 && diametro_nucleo < 250) % mm
    K_nucleo = 2.5
else
    K_nucleo = 3.0
end
```

```
K_nucleo = 2
```

```
% Cálculo I_ex

I_ex = ((peso_nucleo_total .* (W_kg) .* K_nucleo) .* 100) ./ (sqrt(3) .*
U_BT .* I_L_BT) % %
```

```
I_ex = 0.0462
```

8.12.4 Resumen

```
resumen_nucleo_row_labels = {'Diámetro del núcleo', 'Altura de la
ventana', 'Distancia entre columnas', 'Ancho máximo de lámina del núcleo', 'Peso
total del núcleo', 'Grado del núcleo', 'W/kg a 1.6T', 'Corriente de
excitación', 'Perdidas en el núcleo', 'Máximas pérdidas en el núcleo
garantizadas'};
resumen_nucleo_data = {diametro_nucleo,                "mm";
    altura_ventana_nucleo,                "mm";
    distancia_entre_columnas,            "mm";
    w(1),                                  "mm";
    peso_nucleo_total,                    "kg";
    grado_nucleo,                          "-";
    W_kg,                                  "W/kg";
    I_ex,                                  "%";
    perdidas_nucleo,                       "W";
    perdidas_nucleo_maximas_garantizadas, "W"};
resumen_nucleo_tabla = array2table
(resumen_nucleo_data, "RowNames", resumen_nucleo_row_labels, "VariableNames", {'V
alor', 'Unidades'});
```

8.13 Cálculo de las pérdidas en carga

8.13.1 Cálculo de las pérdidas por ohm en los devanados

```
if(material_conductor == "Cobre")
    K = 2.4;
```

```
else
```

```
    K=13.0;
```

```
end
```

```
perdidas_I2_R_AT = (I_F_tap_N ^2) .* resistencia_conductor_AT
```

```
perdidas_I2_R_AT = 9.5785e+04
```

```
perdidas_I2_R_BT = (I_F_BT ^2) .* resistencia_conductor_BT
```

```
perdidas_I2_R_BT = 7.7390e+04
```

```
perdidas_I2_R_Taps = (I_F_tap_N ^2) .* resistencia_conductor_Taps
```

```
perdidas_I2_R_Taps = 3.0171e+04
```

```
perdidas_totales_I2_R = perdidas_I2_R_AT + perdidas_I2_R_BT  
+perdidas_I2_R_Taps
```

```
perdidas_totales_I2_R = 2.0335e+05
```

```
% Esta aproximación solo la hacemos a modo de comprobación, siempre deberá  
% usarse la formula (I^2)*R para calcular las perdidas por efecto Joule
```

```
perdidas_I2_R_AT_aprox = K .* (densidad_corriente_AT^2) .*  
peso_total_conductor_descubierto_AT
```

```
perdidas_I2_R_AT_aprox = 9.8084e+04
```

```
perdidas_I2_R_BT_aprox = K .* (densidad_corriente_BT^2) .*  
peso_total_conductor_descubierto_BT
```

```
perdidas_I2_R_BT_aprox = 7.9247e+04
```

```
perdidas_I2_R_Taps_aprox = K .* (densidad_corriente_Taps^2) .*  
peso_total_conductor_descubierto_Taps
```

```
perdidas_I2_R_Taps_aprox = 3.0895e+04
```

```
perdidas_totales_I2_R_aprox = perdidas_I2_R_AT_aprox +  
perdidas_I2_R_BT_aprox + perdidas_I2_R_Taps_aprox
```

```
perdidas_totales_I2_R_aprox = 2.0823e+05
```

```
dif_perdidas_I2_R_aprox = (perdidas_totales_I2_R_aprox ./  
perdidas_totales_I2_R) .* 100
```

```
dif_perdidas_I2_R_aprox = 102.4000
```

8.13.2 Cálculo de las pérdidas por corrientes de Eddy

```
perdidas_eddy_AT = 3.1 .* ((f ./ 50)^2) .*  
((espesor_conductor_descubierto_AT ./ 10)^3.84) .*  
((num_ctos_paralelos_dir_radial_AT .* num_vueltas_disco_AT)^2.07) .*  
(perdidas_I2_R_AT ./ 100)
```

perdidas_eddy_AT = 1.2409e+04

```
perdidas_eddy_BT = 3.1 .* ((f ./ 50)^2) .*  
((espesor_conductor_descubierto_BT ./ 10)^3.84) .*  
((num_ctos_paralelos_dir_radial_BT .* num_vueltas_disco_BT)^2.07) .*  
(perdidas_I2_R_BT ./ 100)
```

perdidas_eddy_BT = 9.8037e+03

```
perdidas_eddy_Taps = 3.1 .* ((f ./ 50)^2) .*  
((espesor_conductor_descubierto_Taps ./ 10)^3.84) .*  
((num_ctos_paralelos_dir_radial_Taps .* num_vueltas_disco_Taps)^2.07) .*  
(perdidas_I2_R_Taps ./ 100)
```

perdidas_eddy_Taps = 418.5398

```
perdidas_totales_eddy = perdidas_eddy_AT + perdidas_eddy_BT +  
perdidas_eddy_Taps
```

perdidas_totales_eddy = 2.2632e+04

8.13.3 Cálculo de las pérdidas por dispersión

Cálculo de las pérdidas por dispersión en las tapas de los terminales

```
% Perdidas bushing AT y BT
```

```
perdidas_tapa_bushing_AT = 0.045 .* I_F_AT^1.25 .* (f ./ 50)^1.5
```

perdidas_tapa_bushing_AT = 78.9037

```
perdidas_tapa_bushing_BT = 0.045 .* I_F_BT^1.25 .* (f ./ 50)^1.5
```

perdidas_tapa_bushing_BT = 212.4908

```
% Perdidas segun max y min ta
```

```
perdidas_tapa_bushing_tap_max_AT = 0.045 .* I_F_tap_max^1.25 .* (f ./  
50)^1.5
```

perdidas_tapa_bushing_tap_max_AT = 70.0417

```
perdidas_tapa_bushing_tap_min_AT = 0.045 .* I_F_tap_min^1.25 .* (f ./  
50)^1.5
```

perdidas_tapa_bushing_tap_min_AT = 90.0107

```

% Total
perdidas_totales_tapa_bushing = perdidas_tapa_bushing_AT +
perdidas_tapa_bushing_BT

```

```
perdidas_totales_tapa_bushing = 291.3946
```

Cálculo de las pérdidas por desviaciones en la placa de aprieto

```

% Consideramos barras de aprieto para este transformador por tanto las
% pérdidas en esta sección no son aplicables

```

Pérdidas por corriente inducida en discos continuos

```
resistividad_Cu = 2.1 .* 1e-8 % Ohm/m
```

```
resistividad_Cu = 2.1000e-08
```

```
% Devanado AT
```

```

K_space_factor_AT = 0.48 .* 1e-4 .*
sqrt(altura_axial_total_postcompresion_AT ./ (separacion_AT_yugo_inferior +
separacion_AT_yugo_superior + altura_axial_total_postcompresion_AT) .*
(espesor_conductor_descubierto_AT ./ espesor_conductor_recubierto_AT) .* (f
./ resistividad_Cu))

```

```
K_space_factor_AT = 1.8762
```

```

dimension_radial_vueltas AISLADAS_AT = num_vueltas_disco_AT .*
espesor_conductor_recubierto_AT .* 1e-3 % m

```

```
dimension_radial_vueltas AISLADAS_AT = 0.0244
```

```

perdidas_corriente_circulante_AT = 2.4 .* 1e6 .* (1 ./ 180) .*
(K_space_factor_AT .* dimension_radial_vueltas AISLADAS_AT)^4 .* (1 - (5 ./
(num_vueltas_disco_AT .* num_ctos_paralelos_dir_radial_AT)^2) + (4 ./
(num_vueltas_disco_AT .* num_ctos_paralelos_dir_radial_AT)^4)) .*
perdidas_I2_R_AT

```

```
perdidas_corriente_circulante_AT = 5.5511e+03
```

```
% Devanado BT
```

```

K_space_factor_BT = 0.48 .* 1e-4 .*
sqrt(altura_axial_total_postcompresion_BT ./ (separacion_BT_yugo_inferior +
separacion_BT_yugo_superior + altura_axial_total_postcompresion_BT) .*
(espesor_conductor_descubierto_BT ./ espesor_conductor_recubierto_BT) .* (f
./ resistividad_Cu))

```

```
K_space_factor_BT = 1.9117
```

```
dimension_radial_vueltas AISLADAS_BT = num_vueltas_disco_BT .*  
espesor_conductor_recubierto_BT .* 1e-3 % m
```

```
dimension_radial_vueltas AISLADAS_BT = 0.0069
```

```
perdidas_corriente_circulante_BT = 2.4 .* 1e6 .* (1 ./ 180) .*  
(K_space_factor_BT .* dimension_radial_vueltas AISLADAS_BT)^4 .* (1 - (5 ./  
(num_vueltas_disco_BT .* num_ctos_paralelos_dir_radial_BT)^2) + (4 ./  
(num_vueltas_disco_BT .* num_ctos_paralelos_dir_radial_BT)^4)) .*  
perdidas_I2_R_BT
```

```
perdidas_corriente_circulante_BT = 30.8469
```

```
% Devanado Taps
```

```
K_space_factor_Taps = 0.48 .* 1e-4 .*  
sqrt(altura_axial_total_postcompresion_Taps ./ (separacion_AT_yugo_inferior +  
separacion_AT_yugo_superior + altura_axial_total_postcompresion_Taps) .*  
(espesor_conductor_descubierto_Taps ./ espesor_conductor_recubierto_Taps) .*  
(f ./ resistividad_Cu))
```

```
K_space_factor_Taps = 1.7716
```

```
dimension_radial_vueltas AISLADAS_Taps = num_vueltas_disco_Taps .*  
espesor_conductor_recubierto_Taps .* 1e-3 % m
```

```
dimension_radial_vueltas AISLADAS_Taps = 0.0079
```

```
perdidas_corriente_circulante_Taps = 2.4 .* 1e6 .* (1 ./ 180) .*  
(K_space_factor_Taps .* dimension_radial_vueltas AISLADAS_Taps)^4 .* (1 - (5 ./  
(num_vueltas_disco_Taps .* num_ctos_paralelos_dir_radial_Taps)^2) + (4 ./  
(num_vueltas_disco_Taps .* num_ctos_paralelos_dir_radial_Taps)^4)) .*  
perdidas_I2_R_Taps
```

```
perdidas_corriente_circulante_Taps = 14.6417
```

```
% Total
```

```
perdidas_totales_corriente_circulante = perdidas_corriente_circulante_AT +  
perdidas_corriente_circulante_BT + perdidas_corriente_circulante_Taps
```

```
perdidas_totales_corriente_circulante = 5.5966e+03
```

Cálculo de pérdidas en el tanque

```
% Devanado BT
```

```
perdidas_tanque_BT = 5 .* ((f/50)^1.5) .* ((I_F_BT^2 .* vueltas_BT^2) ./  
altura_ventana_nucleo) .* 1e-4 % W
```

```
perdidas_tanque_BT = 9.4046e+03
```

```
% Devanado AT
```

```
perdidas_tanque_AT = 5 .* ((f/50)^1.5) .* ((I_F_AT^2 .* vueltas_AT_min^2) ./  
altura_ventana_nucleo) .* 1e-4 % W
```

```
perdidas_tanque_AT = 7.6338e+03
```

```
% Devanado Taps
```

```
perdidas_tanque_Taps = 5 .* ((f/50)^1.5) .* ((I_F_AT^2 .*  
vueltas_devanado_Taps^2) ./ altura_ventana_nucleo) .* 1e-4 % W
```

```
perdidas_tanque_Taps = 375.1241
```

```
% Total
```

```
perdidas_tanque_tot = perdidas_tanque_AT + perdidas_tanque_BT +  
perdidas_tanque_Taps % W
```

```
perdidas_tanque_tot = 1.7414e+04
```

Cálculo de las pérdidas totales por dispersión de flujo totales

```
% El valor de K varía según el rango de potencia del transformador
```

```
if (S_max <= 20000)  
    K = 25  
elseif((20000 > S_max) && S_max <= 40000)  
    K = 40  
else % S_max > 40000  
    K = 50  
end
```

```
K = 50
```

```
% Calculamos las pérdidas por dispersión totales aproximadas por la  
% fórmula
```

```
diametro_medio_separacion_BT_AT = diametro_exterior_BT + separacion_BT_AT ./  
2
```

```
diametro_medio_separacion_BT_AT = 1.0893e+03
```

```
perdidas_dispersion_tot = K .* ((I_F_AT .* vueltas_AT_min) ./ (1000 .*  
altura_ventana_nucleo))^2 .* diametro_medio_separacion_BT_AT .*  
(separacion_BT_AT + ((RD_AT + separacion_AT_Taps + RD_Taps) + RD_BT) ./ 3)
```

```
perdidas_dispersion_tot = 7.3065e+04
```

8.13.4 Cálculo de las pérdidas en carga

```
% Calculamos las pérdidas en carga totales y le aplicamos un factor de  
% seguridad del 1.5% para las pérdidas garantizadas
```

```
perdidas_carga_tot = (perdidas_totales_I2_R + perdidas_dispersion_tot +  
perdidas_totales_eddy) .* 1.015
```

```
perdidas_carga_tot = 3.0353e+05
```

```
% Separamos las pérdidas por dispersión totales en las que se pierden en el  
% tanque y las que no
```

```
perdidas_dispersion_otras_tot = perdidas_dispersion_tot -  
perdidas_tanque_tot
```

```
perdidas_dispersion_otras_tot = 5.5652e+04
```

```
% Resumen
```

```
resumen_perdidas_carga_row_label = {'Pérdidas por Joule', 'Pérdidas por  
corrientes de Eddy', 'Pérdidas por dispersión en el tanque', 'Otras pérdidas  
por dispersión', 'Pérdidas en carga totales', 'Máximas pérdidas en carga  
garantizadas'};
```

```
resumen_perdidas_carga_data = {perdidas_totales_I2_R;  
perdidas_totales_eddy;  
perdidas_tanque_tot;  
perdidas_dispersion_otras_tot;  
perdidas_carga_tot;  
perdidas_maximas_en_carga_garantizadas};
```

```
resumen_perdidas_carga_tabla =  
array2table(resumen_perdidas_carga_data, "RowNames", resumen_perdidas_carga_row  
_label, "VariableNames", "W")
```

```
resumen_perdidas_carga_tabla = 6x1 table
```

	W
1 Pérdidas por Joule	2.0335e+05
2 Pérdidas por corrientes de Eddy	2.2632e+04
3 Pérdidas por dispersión en el tanque	1.7414e+04
4 Otras pérdidas por dispersión	5.5652e+04
5 Pérdidas en carga totales	3.0353e+05

	W
6 Máximas pérdidas en carga garantizadas	310000

8.14 Cálculo de la reactancia

8.14.1 Cálculo de la reactancia mediante el método de devanados separados con capas reducidas el final

```
% Cálculo de los diámetros medios para las diferentes distancias radiales
```

```
diametro_medio_BT = (diametro_exterior_BT + diametro_interior_BT) ./ 2
```

```
diametro_medio_BT = 953.4000
```

```
diametro_medio_BT_AT = (diametro_exterior_BT + diametro_interior_AT) ./ 2
```

```
diametro_medio_BT_AT = 1.1118e+03
```

```
diametro_medio_AT = (diametro_exterior_AT + diametro_interior_AT) ./ 2
```

```
diametro_medio_AT = 1.2708e+03
```

```
diametro_medio_AT_Taps = (diametro_exterior_AT + diametro_interior_Taps) ./  
2
```

```
diametro_medio_AT_Taps = 1.4298e+03
```

```
diametro_medio_Taps = (diametro_exterior_Taps + diametro_interior_Taps) ./ 2
```

```
diametro_medio_Taps = 1.5084e+03
```

```
diametro_medio_AT_Tot = (diametro_exterior_Taps + diametro_interior_AT) ./ 2
```

```
diametro_medio_AT_Tot = 1.3494e+03
```

```
% Altura efectiva del devanado para el calculo de la reactancia
```

```
altura_devanados = [altura_axial_total_postcompresion_AT,  
altura_axial_total_postcompresion_BT,  
altura_axial_total_postcompresion_Taps];  
altura_efectiva = min(altura_devanados) .* (vueltas_AT_max ./  
((vueltas_AT_min ./ altura_axial_total_postcompresion_AT) .*  
altura_axial_total_postcompresion_Taps)) + (RD_BT + separacion_BT_AT + RD_AT  
+ separacion_AT_Taps + RD_Taps) ./ 3
```

```
altura_efectiva = 1.5512e+03
```

```
% Cálculo de Y y RD_m
```

```
Y = (1 ./ 3) .* diametro_medio_AT_Tot .* (RD_AT + RD_Taps) +
((diametro_exterior_AT + diametro_interior_Taps) ./ 2) .* separacion_AT_Taps
.* (((vueltas_devanado_Taps) ./ (vueltas_AT_max))^2)
```

Y = 6.8509e+04

```
RD_m = (((diametro_exterior_BT + diametro_interior_BT) ./ 2) .* RD_BT) ./ 3
+ separacion_BT_AT .* ((diametro_exterior_BT + diametro_interior_AT) ./ 2) +
Y
```

RD_m = 1.5458e+05

% Calculo de la reactancia para diferentes tomas de regulación

```
X_percentage = 1.1938 .* 1e-4 .* (f ./ 50) .* ((I_F_BT .* vueltas_BT .*
RD_m) ./ (V_vuelta_real .* altura_efectiva))
```

X_percentage = 12.4779

```
X_percentage_N = 1.1938 .* 1e-4 .* (f ./ 50) .* ((I_F_tap_N .* vueltas_AT_N
.* RD_m) ./ (V_vuelta_real .* altura_efectiva))
```

X_percentage_N = 12.4881

```
X_percentage_min_Tap = 1.1938 .* 1e-4 .* (f ./ 50) .* ((I_F_tap_min .*
vueltas_AT_min .* RD_m) ./ (V_vuelta_real .* altura_efectiva))
```

X_percentage_min_Tap = 12.4911

```
X_percentage_max_Tap = 1.1938 .* 1e-4 .* (f ./ 50) .* ((I_F_tap_max .*
vueltas_AT_max .* RD_m) ./ (V_vuelta_real .* altura_efectiva))
```

X_percentage_max_Tap = 12.4855

**% Comprobamos el valor de la reactancia mediante la aproximación a un trafo
% de dos devanados estándar por el método de Rogowski**

```
K = 1 - ((RD_BT + separacion_BT_AT + RD_AT + separacion_AT_Taps + RD_Taps)
./ (pi .* altura_efectiva))
```

K = 0.9280

```
D = (pi ./ altura_efectiva) .* (((RD_BT .* diametro_medio_BT) ./ 3) +
separacion_BT_AT .* diametro_medio_BT_AT + ((RD_AT + separacion_AT_Taps +
RD_Taps) ./ 3) .* diametro_medio_AT_Tot)
```

D = 349.7550

```
X_percentage_test = 8 .* (pi ^2) .* 50 .* ((I_F_BT) ./ (vueltas_BT .*
V_vuelta_real)) .* (vueltas_BT ^2) .* (K .* D) .* 1e-8
```

```
X_percentage_test = 13.4401
```

```
% Cálculo de la resistencia en %
```

```
R_percentage = perdidas_carga_tot ./ (S_max .* 10) % %
```

```
R_percentage = 0.3373
```

```
% Cálculo de la impedancia
```

```
Impedancia = sqrt(R_percentage ^2 + X_percentage ^2) % %
```

```
Impedancia = 12.4825
```

```
% Resumen
```

```
resumen_reactancia_row_labels = {'Resistencia', 'Reactancia', 'Reactancia  
regulación mínima', 'Reactancia regulación máxima', 'Impedancia'};  
resumen_reactancia_data = {R_percentage;  
                           X_percentage_N;  
                           X_percentage_min_Tap;  
                           X_percentage_max_Tap;  
                           Impedancia};  
resumen_reactancia_tabla =  
array2table(resumen_reactancia_data, "RowNames", resumen_reactancia_row_labels,  
"VariableNames", "(%)");
```

9. Output de diseño

9.1.1 Tensiones y corrientes del transformador

```
display(resumen_valores_linea_fase);
```

resumen_valores_linea_fase = 4x5 table

	Descripción	LV	HV Máx. TAP	HV Nominal TAP	HV Mín. TAP
1	"Tensión de línea"	"34500"	"145200"	"132000"	"118800"
2	"Tensión de fase"	"34500"	"83831.2591"	"76210.2355"	"68589.212"
3	"Intensidad de línea"	"1506.1311"	"357.8617"	"393.6479"	"437.3866"
4	"Intensidad de fase"	"869.5652"	"357.8617"	"393.6479"	"437.3866"

9.1.2 Número de vueltas y tomas de regulación

```
display(resumen_num_vueltas);
```

resumen_num_vueltas = 17x5 table

	Nº Toma	Nº vueltas	Tensión de fase calculada (V)	Tensión de fase real (V)	Error (%)
1	1	496	8.3831e+04	8.3882e+04	0.0609
2	2	490	8.2879e+04	8.2868e+04	-0.0133
3	3	484	8.1926e+04	8.1853e+04	-0.0892
4	4	479	8.0973e+04	8.1007e+04	0.0420
5	5	473	8.0021e+04	7.9993e+04	-0.0351
6	6	468	7.9068e+04	7.9147e+04	0.0998
7	7	462	7.8115e+04	7.8132e+04	0.0216
8	8	456	7.7163e+04	7.7118e+04	-0.0586
9	9	451	7.6210e+04	7.6272e+04	0.0811
10	10	445	7.5258e+04	7.5257e+04	-0.0003

	Nº Toma	Nº vueltas	Tensión de fase calculada (V)	Tensión de fase real (V)	Error (%)
11	11	439	7.4305e+04	7.4243e+04	-0.0839
12	12	434	7.3352e+04	7.3397e+04	0.0609
13	13	428	7.2400e+04	7.2382e+04	-0.0240
14	14	422	7.1447e+04	7.1368e+04	-0.1112
15	15	417	7.0494e+04	7.0522e+04	0.0391
16	16	411	6.9542e+04	6.9507e+04	-0.0496
17	17	406	6.8589e+04	6.8662e+04	0.1058

9.1.3 Diseño del núcleo y los arrollamientos

```

resumen_design_nucleo_arrollamiento_row_labels = {'Tensión de fase
(V)', 'Intensidad de fase (A)', 'Número de vueltas', 'Tipo de
arrollamiento', 'Altura conductor descubierto (mm)', 'Espesor conductor
descubierto (mm)', 'Altura conductor recubierto (mm)', 'Espesor conductor
recubierto (mm)', 'Número de circuitos paralelos en la dirección
axial', 'Número de circuitos paralelos en la dirección radial', 'Área efectiva
de la sección transversal del conductor (mm^2)', 'Densidad de corriente
(A/mm^2)', 'Número de discos', 'Número de vueltas por disco', 'Aislamiento entre
discos (mm)', 'Factor de reducción para el aislamiento del conductor
(%)', 'Factor de reducción para el bloque entre espiras (%)', 'Altura eléctrica
de los arrollamientos (mm)', 'Espesor radial de los arrollamientos
(mm)', 'Longitud del conductor por fase (mm)', 'Peso del conductor descubierto
(kg)', 'Peso del conductor recubierto (kg)', 'Resistencia por fase a 75°C
(ohmios)', 'Pérdidas por Joule (W)', 'Pérdidas por corrientes Eddy (W)'};
resumen_design_nucleo_arrollamiento_variable_labels = {'BT', 'AT', 'Taps'};

resumen_design_nucleo_arrollamiento_data = {V_BT,
V_tap_min, (V_tap_max - V_tap_min);
I_F_BT,
I_F_AT, I_F_tap_N;
vueltas_devanado_BT,
vueltas_devanado_AT, vueltas_devanado_Taps;
tipo_bobinado_BT,
tipo_bobinado_Taps;
altura_conductor_descubierto_BT,
altura_conductor_descubierto_AT, altura_conductor_descubierto_Taps;
espesor_conductor_descubierto_BT,
espesor_conductor_descubierto_Taps;
espesor_conductor_descubierto_AT,
espesor_conductor_descubierto_Taps;

```

```

altura_conductor_recubierto_AT,          altura_conductor_recubierto_BT,
espesor_conductor_recubierto_AT,        espesor_conductor_recubierto_BT,
num_ctos_paralelos_dir_axial_AT,        num_ctos_paralelos_dir_axial_BT,
num_ctos_paralelos_dir_radial_BT,        num_ctos_paralelos_dir_radial_AT,
num_ctos_paralelos_dir_radial_Taps;
area_efectiva_total_AT,                 area_efectiva_total_BT,
area_efectiva_total_Taps;
densidad_corriente_AT,                  densidad_corriente_BT,
densidad_corriente_Taps;
num_disco_AT,                            num_disco_BT,
num_disco_Taps;
num_vueltas_disco_AT,                   num_vueltas_disco_BT,
num_vueltas_disco_Taps;
altura_spacer_AT,                        altura_spacer_BT,
altura_spacer_Taps;
factor_compresion_aislamiento_BT,        factor_compresion_aislamiento_AT,
factor_compresion_aislamiento_Taps;
factor_compresion_espaciadores,          factor_compresion_espaciadores,
factor_compresion_espaciadores;
altura_axial_total_postcompresion_BT,    altura_axial_total_postcompresion_AT,
altura_axial_total_postcompresion_Taps;
RD_AT,                                    RD_BT,
RD_Taps;
longitud_conductor_fase_AT,              longitud_conductor_fase_BT,
longitud_conductor_fase_Taps;
peso_total_conductor_descubierto_BT,     peso_total_conductor_descubierto_AT,
peso_total_conductor_descubierto_Taps;
peso_total_conductor_recubierto_BT,      peso_total_conductor_recubierto_AT,
peso_total_conductor_recubierto_Taps;
resistencia_conductor_fase_AT,           resistencia_conductor_fase_BT,
resistencia_conductor_fase_Taps;
perdidas_I2_R_AT,                        perdidas_I2_R_BT,
perdidas_I2_R_Taps;
perdidas_eddy_AT,                        perdidas_eddy_BT,
perdidas_eddy_Taps;};
resumen_design_nucleo_arrollamiento_table =
array2table(resumen_design_nucleo_arrollamiento_data, "RowNames", resumen_desig
n_nucleo_arrollamiento_row_labels, "VariableNames", resumen_design_nucleo_arrol
lamiento_variable_labels)

```

resumen_design_nucleo_arrollamiento_table = 25x3 table

	BT	AT	Taps
1 Tensión de fase (V)	34500	6.8589e+04	1.5242e+04
2 Intensidad de fase (A)	869.5652	393.6479	393.6479
3 Número de vueltas	204	406	90
4 Tipo de arrollamiento	"discos"	"discos"	"discos"
5 Altura conductor descubierto (mm)	6.8000	10	8
6 Espesor conductor descubierto (mm)	2.1000	2.1000	2.2000
7 Altura conductor recubierto (mm)	7.4000	10.6000	8.6000
8 Espesor conductor recubierto (mm)	2.7000	2.7000	2.8000
9 Número de circuitos paralelos en la dirección axial	2	2	2
10 Número de circuitos paralelos en la dirección radial	14	4	4
11 Área efectiva de la sección transversal del conductor (mm²)	376.1100	165.2000	138
12 Densidad de corriente (A/mm²)	2.3120	2.3829	2.8525
13 Número de discos	80	45	32
14 Número de vueltas por disco	2.5500	9.0222	2.8125
15 Aislamiento entre discos (mm)	3	4	4
16 Factor de reducción para el aislamiento del conductor (%)	10	10	10
17 Factor de reducción para el bloque entre espiras (%)	3	3	3
18 Altura eléctrica de los arrollamientos (mm)	1433	1174	667
19 Espesor radial de los arrollamientos (mm)	113.4000	114	33.6000
20 Longitud del conductor por fase (mm)	6.1102e+05	1.6209e+06	4.2649e+05
21 Peso del conductor descubierto (kg)	6.1773e+03	7.1977e+03	1.5820e+03
22 Peso del conductor recubierto (kg)	6.2613e+03	7.2752e+03	1.5995e+03
23 Resistencia por fase a 75°C (ohmios)	0.0341	0.2060	0.0649
24 Pérdidas por Joule (W)	7.7390e+04	9.5785e+04	3.0171e+04
25 Pérdidas por corrientes Eddy (W)	9.8037e+03	1.2409e+04	418.5398

9.1.4 Peso del núcleo y pérdidas en vacío

```
display(resumen_nucleo_tabla);
```

resumen_nucleo_tabla = 10×2 table

	Valor	Unidades
1 Diámetro del núcleo	800	"mm"
2 Altura de la ventana	1673	"mm"
3 Distancia entre columnas	1582	"mm"
4 Ancho máximo de lámina del núcleo	790	"mm"
5 Peso total del núcleo	4.6089e+04	"kg"
6 Grado del núcleo	"23ZDKH85"	"-"
7 W/kg a 1.6T	0.4507	"W/kg"
8 Corriente de excitación	0.0462	"%"
9 Pérdidas en el núcleo	2.7002e+04	"W"
10 Máximas pérdidas en el núcleo garantizadas	40000	"W"

9.1.5 Pérdidas en carga

```
display(resumen_perdidas_carga_tabla);
```

resumen_perdidas_carga_tabla = 6×1 table

	W
1 Pérdidas por Joule	2.0335e+05
2 Pérdidas por corrientes de Eddy	2.2632e+04
3 Pérdidas por dispersión en el tanque	1.7414e+04
4 Otras pérdidas por dispersión	5.5652e+04
5 Pérdidas en carga totales	3.0353e+05
6 Máximas pérdidas en carga garantizadas	310000

9.1.6 Dimensiones de los arrollamientos

```
display(resumen_dimencion_bobinados_tabla);
```

resumen_dimencion_bobinados_tabla = 15×1 table

	mm
1 Diámetro del núcleo	800
2 Separación núcleo-BT	20
3 Diámetro interior BT	840
4 Profundidad radial BT	113.4000
5 Diámetro exterior BT	1.0668e+03
6 Separación BT-AT	45
7 Diámetro interior AT	1.1568e+03
8 Profundidad radial AT	114
9 Diámetro exterior AT	1.3848e+03
10 Separación AT-Tomas	45
11 Diámetro interior Tomas	1.4748e+03
12 Profundidad radial Tomas	33.6000
13 Diámetro exterior Tomas	1542
14 Separación fases-fase	20
15 Distancia entre columnas	1582

9.1.7 Impedancia

```
display(resumen_reactancia_tabla);
```

resumen_reactancia_tabla = 5×1 table

	(%)
1 Resistencia	0.3373
2 Reactancia	12.4881

	(%)
3 Reactancia regulación mínima	12.4911
4 Reactancia regulación máxima	12.4855
5 Impedancia	12.4825

10. Conclusiones

El diseño realizado con ayuda del *Livescript* cumple con la especificación, en todas las pérdidas tanto en vacío como en carga se sitúa por debajo de valor máximo garantizado, incluso la impedancia está dentro del rango permitido, pues según la norma (UNE-EN 60076-1, 2013) esta determina un $\pm 5\%$ de variabilidad al valor dado en la especificación y, dado que el cliente no especifica su propio rango se tomará en cuenta este valor.

El proyecto concluye el diseño de un transformador compuesto por tres arrollamientos, cuya distribución de amperios vuelta sigue el orden, desde el núcleo hacia a fuera, BT-AT-*Taps*(AT), un lado de baja tensión y otro de alta, sin devanados auxiliares o terciarios y con tomas de regulación en el lado de alta. Para la distribución de los amperios vuelta y consecuentemente el cálculo de la reactancia e impedancia de los arrollamientos se ha ajustado el proceso de diseño al caso más parecido, siendo este el de devanados separados por una distancia determinada y con una altura de arrollamiento menor conforme nos acercamos al devanado más externo de la columna. El tipo de bobinado de todos los devanados es en discos continuos, al tener unos niveles de tensión suficientemente elevados en los lados del transformador como para preferir su uso, eligiendo estos sobre los discos entrelazados dado que estos últimos aplican una dificultad elevada a la programación. El tipo de conductores elegidos serán de PICC para los devanados en alta tensión, puesto que por ellos circulará una menor intensidad y el efecto pelicular, entre otros, podrá mitigarse simplemente con varios conductores agrupados como *bunched*, para el arrollamiento de baja tensión sin embargo se utilizarán conductores de tipo CTC dado a la ventaja en las propiedades eléctricas que presentan estos sobre los PICC. El núcleo, con un diámetro de 800mm, estará compuesto por láminas de *Hi-b CRGO Steel* de 23mm de espesor, bajo el número de referencia 23ZDKH85, el uso de esta chapa sobre otras es debido únicamente a la gran disminución en pérdidas en vacío que ésta ocasionaba frente a otras posibles elecciones, tal y como se ha comprobado mediante iteraciones del *Livescript*, al observar cómo variaba el output dependiendo del material elegido para el núcleo. Para el ajuste fino de la reactancia se han utilizado bloques de madera intercalados a una altura media de los arrollamientos de baja y alta tensión, sin necesidad de añadirlo en el de regulación. Debido a la cantidad de tomas de regulación que necesitan los devanados de alta y el hecho de que el lado correspondiente esté conectado en estrella, se seleccionará un único cambiador de tomas en el transformador, uno para todas las fases, con un modo de conmutación lineal, dado las ventajas en la disminución de las pérdidas que este tipo ofrece sobre el resto de las conmutaciones, tal y como se pudo comprobar en las diferentes iteraciones del programa variando el tipo de *tap changer* desde un *reverse switch* a un lineal.

Aun con ayuda de programas de un cálculo como es Matlab, la cantidad de variables que influyen en el proceso de diseño eléctrico de un transformador es muy elevado. En términos de variables que modifiquen los resultados a obtener tal y como indica la especificación, este número disminuye, pues la mayoría de ellas se deben a límites de reglamento, seguridad, o técnicos. Se han requerido de numerosas iteraciones modificando estas variables

determinantes para llegar a alcanzar un diseño que cumpliera la especificación. Entender la relación entre el input de estas variables y el output de diseño ha sido fundamental.

Las variables o *inputs* que se pueden modificar cuando se requiera iterar hasta cumplir la especificación por lo general son:

- Tipo de arrollamientos.
- Número de circuitos paralelos en los arrollamientos
- Ancho y espesor de los conductores que conforman los arrollamientos.
- Aquellas variables que condicionen la altura de los arrollamientos. Como puede ser la cantidad de discos en un arrollamiento de discos continuos.
- Ancho del círculo que inscribe al núcleo.
- Aquellas variables que condicionen la dimensión axial de los bobinados. Como la separación entre arrollamientos o el número de vueltas en un disco para un arrollamiento de discos continuos.

Mientras que los *outputs* más limitantes en el proceso de diseño serán:

- Pérdidas en vacío.
- Perdidas en carga.
- Impedancia.

El libro de (Nair, 2021) comenta en uno de sus capítulos, como modificar únicamente las dimensiones de los conductores y del núcleo según se quiera variar las pérdidas en vacío o en carga hasta dar con aquellas que cumplan la especificación, quedando fuera de este debate la impedancia. Tal y como se puede observar en el proceso de diseño y las ecuaciones del capítulo 6, la impedancia posee un fuerte factor geométrico, así esta dependerá de las dimensiones axiales y radiales de la agrupación de bobinados y se modificará en mayor o menor medida. Si se quiere modificar tanto las pérdidas como la impedancia no se podrá hacer uso de lo mencionado en el libro y deberá realizarse un ajuste fino del diseño.

En la Tabla 3.1 se puede observar como el diseño cumple con los valores límites mencionados en la especificación.

TABLA 10.1. VALORES DE LA ESPECIFICACIÓN VS DISEÑO.

Término	Especificación	Diseño
<i>No-load loss (kW)</i>	40	27.002
<i>Load loss (kW)</i>	310	303.53
<i>Impedance (%)</i>	12.5	12.4825

Más allá de los resultados, es importante denotar que para llegar a éstos se ha requerido del estudio y posterior entendimiento completo, del proceso de diseño eléctrico para un transformador de potencia, algo difícil de reflejar en un texto.

11. Posibles proyectos futuros

Este primer proyecto relacionado con la temática del diseño eléctrico de transformadores de potencia puede abrir diversas ventanas a futuros proyectos, pues ha sido necesario limitar el alcance de este al de un proyecto de fin de grado. Algunas de las vías que este puede abrir, sin un orden concreto son:

- Generalización de las configuraciones para cualquier tipo de devanados, incluyendo los devanados en zigzag.
- Realización de un proyecto semejante, pero para el caso de un autotransformador trifásico sumergido en aceite.
- Estudio de diversos diseños con variación de la potencia para ver qué grado de variación aplica esta variable dentro del proceso de diseño.
- Generalización de la localización de los cambiadores de tomas, pudiendo estar en el devanado de AT, BT, o incluso terciario y auxiliar.
- Diseño de un transformador con más de dos devanados, terciario y o auxiliar.
- Cálculo de la eficiencia y la regulación en el transformador.
- Efectos de tipo impulso y descargas atmosféricas en los transformadores:
 - Efecto de las descargas atmosféricas en los devanados.
 - Circuito equivalente capacitivo de un transformador.
 - Cálculo de capacidades y de la distribución de la tensión.
- Corrientes entrantes o *Inrush Current* en los transformadores. Cálculo de las corrientes, frecuencia y transitorios, influencia en el diseño y métodos para la reducción de estas.
- Cálculo, dimensiones y diseño de la cuba del transformador, conservador, radiadores, y otros accesorios.
- Cálculo, dimensionado y diseño de la base de madera y los amarres del núcleo o *core clamp*.
- Cálculo del gradiente de temperatura en los bobinados, disipación del calor por área y cantidad de aceite mineral.
- Cálculo de la subida de presión, el estrés y la resistencia del tanque.
- Cálculo de las fuerzas de cortocircuito y resistencia de los transformadores a estas.
- Cálculo de la respuesta ante eventos sísmicos.
- Optimización del diseño.
- Cálculo de la huella de carbono durante la construcción de un transformador.

12. Bibliografía

- ABB Transformer and Engineering Services North America. (2010). *Transformer Handbook* (3rd ed.). New York, USA: ABB Ltd Transformers.
- ASTM B49-17. (s.f.). *Standard Specification for Copper Rod for Electrical Purposes*.
- Bonginkosi A., T., & Pitshou N., B. (2022). Stray Load Loss Valuation in Electrical Transformers: A Review. *Energies*, 15(7), 2333. doi:10.3390/en15072333
- Chakraborty, K. (2018). Comparative Study of Transformer Core Material. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 3(12), 33-38. doi:10.38124/ijisrt
- Chetan C, A., & M.L., J. (2008). Analysis of Stray Losses in Power Transformers by 3-D Magnetic Field Simulation. *Fifteenth National Power Systems Conference (NPSC)*, (págs. 498-503). Bombay.
- Dasgupta, I. (2002). *Design Of Transformers*. Tata Mcgraw Hill Education Pvt. Ltd.
- Hernández, I., de León, F., Cañedo, J. M., & Olivares-Galván, J. C. (2010). Modelling transformer core joints using Gaussian models for the magnetic flux density and permeability. *IET Electric Power Applications*. doi:10.1049/iet-epa.2010.0070
- Hsu, C.-H., Huang, Y.-M., Hsieh, M.-F., Adireddy, S., & Chrisey, D. (2017). Transformer sound level caused by core magnetostriction and winding stress displacement variation. *AIP Advances*, 7(5), 056681. doi:10.1063/1.4978759
- IEC 60076-21. (2018). *Power transformers - Part 21: Standard requirements, terminology, and test code for step-voltage regulators*.
- IEC 60076-8. (1997). *Power transformers - Part 8: Application guide*.
- IEC TS 60076-20. (2017). *Power transformers - Part 20: Energy efficiency*.
- IEC TS 60076-20:2017/COR1. (2018). *Corrigendum 1 - Power transformers - Part 20: Energy efficiency*.
- Kefalas, D. T., Loizos, G., & Kladas, G. A. (2011). Transformer Joints FE Analysis Using Pseudo-Source Technique. *IEEE Transactions on Magnetics*. doi:10.1109/TMAG.2010.2098020
- Koppikar, D., Kulkarni, S., Srinivas, P., Khaparde, S., & Jain, R. (1999). Evaluation of flitch plate losses in power transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 14(3), 996 - 1001. doi:10.1109/61.772345
- Maximov, S., Corona-Sánchez, M., Olivares-Galván, J., Melgoza-Vazquez, E., Escarela-Perez, R., & Jimenez-Mondragon, V. (2021). Mathematical Calculation of Stray Losses in Transformer Tanks with a Stainless Steel Insert. *Mathematics*, 9(2), 184. doi:10.3390/math9020184

- Nair, K. (2021). *Power & Distribution Transformers: Practical Design Guide*. Taylor & Francis Group, LLC.
- Olivares-Galván, J. C., Georgilakis, P. S., & Ocon-Valdez, R. (2009). A Review of Transformer Losses. *Electric Power Components and Systems*(37), 1046-1062. doi:10.1080/15325000902918990
- Orosz, T., Pánek, D., & Karban, P. (2020). FEM Based Preliminary Design Optimization in Case of Large Power Transformers. *Applied Sciences*, 10(4), 1361. doi:10.3390/app10041361
- Paulo A. Pasquotto de Lima, S. H. (2012). A Practical Application of the Rabin's Method for Inductance Calculation in Power Transformer Design. *Conference: 10º CBMag – Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*.
- Phani Kumar Mokkapaty, S., Weiss, J., Schramm, A., Magdaleno-Adame, S., Olivares-Galvan, J., & Schwarz, H. (2015). 3D Finite Element analysis of magnetic shunts and aluminum shields in clamping frames of distribution transformers. *2015 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)* (págs. 1-6). Ixtapa, Mexico: IEEE. doi:10.1109/ROPEC.2015.7395069
- Shiota, D., Tsuneta, S., Shimojo, M., Sako, N., Orozco Suárez, D., & Ishikawa, R. (2012). Polar Field Reversal Observations with HINODE. *The Astrophysical Journal*, 753(2), 157. doi:10.1088/0004-637X/753/2/157
- UNE 20003. (1954). *Cobre-tipo recocido e industrial, para aplicaciones eléctricas*.
- UNE-EN 60076-1. (2013). *Transformadores de potencia. Parte 1: Generalidades*.
- UNE-EN 60076-10. (2017). *Transformadores de potencia. Parte 10: Determinación de los niveles de ruido*.
- UNE-EN 60076-14. (2014). *Transformadores de potencia. Parte 14: Transformadores de potencia sumergidos en líquido aislante utilizando materiales aislantes de alta temperatura*.
- UNE-EN 60076-19. (2016). *Transformadores de potencia. Parte 19: Reglas para la determinación de incertidumbres en la medición de las pérdidas de los transformadores de potencia y las reactancias*.
- UNE-EN 60076-2. (2013). *Transformadores de potencia. Parte 2: Calentamiento de transformadores sumergidos en líquido*.
- UNE-EN 60076-3. (2014). *Transformadores de potencia. Parte 3: Niveles de aislamiento, ensayos dieléctricos y distancias de aislamiento en el aire*.
- UNE-EN 60076-4. (2005). *Transformadores de potencia. Parte 4: Guía para el ensayo de impulso tipo rayo e impulso tipo maniobra. Transformadores de potencia y reactancias*.
- UNE-EN 60076-5. (2008). *Transformadores de potencia. Parte 5: Aptitud para soportar cortocircuitos*.
- UNE-EN 60214-1. (2015). *Cambiadores de tomas. Parte 1: Requisitos de funcionamiento y métodos de ensayo*.
- UNE-EN IEC 60296. (2021). *Fluidos para aplicaciones electrotécnicas. Aceites minerales aislantes para equipos eléctricos*.

- UNE-IEC 60076-10-1. (2007). *Transformadores de potencia. Parte 10-1: Determinación de los niveles de ruido. Guía de aplicación. (IEC 60076-10-1:2005).*
- UNE-IEC 60076-7. (2010). *Transformadores de potencia. Parte 7: Guía de carga para transformadores de potencia sumergidos en aceites minerales.*
- UNE-IEC 60214-2. (2006). *Cambiadores de tomas. Parte 2: Guía de aplicación.*
- Valkovic, Z. (2000). Some Aspects of Stray Losses in Large Power Transformers. *3rd Japanese-Bulgarian-Macedonian Joint Seminar on Applied Electromagnetics*, (págs. 238-243). Ohrid, Macedonia.
- Yan, X., Yu, X., Shen, M., Xie, D., Bai, B., & Wang, Y. (2015). Calculation of stray losses in power transformer structural parts using finite element method combined with analytical method. *2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)* (págs. 320-324). Pattaya, Thailand: IEEE. doi:10.1109/ICEMS.2015.7385051

El presente proyecto pretende servir de introducción al diseño eléctrico de un transformador de potencia trifásico sumergido en aceite, como primera toma de contacto con este proceso y las dificultades que implica, así como su automatización.

En primer lugar, se detallarán los principales aspectos del diseño eléctrico de un transformador tipo columnas, entendiendo la teoría y el procedimiento de diseño, así como las desviaciones que pueden ocurrir durante el proyecto.

Posteriormente, se aplicará lo aprendido a una especificación para un transformador trifásico de 90MVA 132/34.5kV ONAF y se hará uso de la herramienta Livescript de Matlab para implementar un programa con el que alcanzar una solución final que cumpla con la especificación requerida.

