

CÁLCULO Y ANÁLISIS MEDIANTE FEMM DE UN TRANSFORMADOR SUMERGIDO EN ACEITE DE 5MVA, 45/20 KV

PROYECTO FINAL DE CARRERA

Realizado por:

JOSÉ MARÍA PAMPLONA MARCO

Tutor:

ANTONIO USÓN SARDAÑA

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL ELECTRICIDAD

SEPTIEMBRE 2011

Universidad de
Zaragoza



Agradecimientos

Me gustaría expresar mi más profundo agradecimiento a Antonio Usón por la labor prestada, tanto de profesor durante la carrera, como de director de proyecto.

A los profesionales del departamento de “Service de Zaragoza”, por su esfuerzo y las horas de trabajo invertidas desinteresadamente en mi formación durante el periodo que estuve en ABB.

Y sobre todo a mi familia, novia y amigos, por apoyarme durante estos años.



ÍNDICE GENERAL

Nomenclatura	8
Capítulo 1	10
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	11
1.1. Objetivo del proyecto	11
1.2. Introducción histórica del transformador	12
1.3. Problemática del diseño de un transformador.....	13
1.4. Principio de funcionamiento.....	14
1.4.1. <i>Circuito magnético</i>	16
1.4.1.1. Uniones:	18
1.4.1.2. Formas de circuitos magnéticos:.....	18
1.4.1.3. Sección.....	20
1.4.2. <i>Arrollamientos</i>	21
1.4.2.1. General:.....	21
1.4.2.2. Tipos de aislamientos:	22
1.4.2.3. Tipos de conductores:.....	23
1.4.2.4. Selección de la densidad de corriente.....	25
1.4.2.5. Arrollamiento de BT	25
1.4.2.6. Arrollamiento de AT	27
1.4.3. Otras partes activas y accesorios	28
1.4.3.1. Bornas	28
1.4.3.1.1. Borna BT DT 30Nf / 650	28
1.4.3.1.2. Borna AT 52 kV / 1000 A (línea de fuga: 1.430 mm).....	29
1.4.3.2. Cuba	30
1.4.3.3. Equipo de refrigeración.....	30
1.4.3.4. Depósito de expansión	30
1.4.3.5. Protecciones	31
1.4.3.5.1. Relé Buchholz	31
1.4.3.5.2. Dispositivo de recogida de gases	32
1.4.3.5.3. Válvula de sobrepresión	32
1.4.3.5.4. Termómetro de aceite	33
1.4.3.5.5. Niveles de aceite	34
1.4.3.5.6. Conmutador de vacío	35
1.5. Introducción del método de los elementos finitos.....	36
Capítulo 2	38



2. CÁLCULOS DEL TRANSFORMADOR EN LÍQUIDO AISLANTE DE 45/20kV CON POTENCIA 5 MVA	39
2.1. Circuito magnético	39
2.1.1. Selección de la tensión por espira	40
2.1.2. Selección de la inducción	41
2.1.3. Datos constructivos:	46
2.1.4. Datos eléctricos	47
2.2. Arrollamiento de B.T.	47
2.3. Arrollamiento de AT Principal	49
2.4. Pérdidas en los arrollamientos en carga	55
2.4.1. Pérdidas en el arrollamiento de B.T.	57
2.4.2. Pérdidas en el arrollamiento de A.T.	57
2.5. Errores de relación	59
Capítulo 3	61
3. ANÁLISIS MEDIANTE FEMM	62
3.1. Introducción	62
3.1.1. Propósito	62
3.1.2. Script	62
3.1.3. Estructura del script	62
3.2. Tensión de cortocircuito	70
3.2.1. ¿Cómo se calcula hasta ahora?	70
3.2.2. Cálculo de la tensión de cortocircuito por medio de simulaciones magnética	72
3.2.2.1. Simulaciones simples	72
3.2.2.2. Simulaciones complejas	73
3.2.3. Método del cálculo	73
3.3. Pérdidas Adicionales	74
3.3.1. División de las pérdidas adicionales	76
3.3.1.1. Adicionales debido a las pérdidas de flujo axial	76
3.3.1.2. Adicionales debido a las pérdidas de flujo radial	78
3.3.1.3. Pérdidas adicionales debido a compensación imperfecta de las amperivoltas	83
3.3.2. ¿Cómo se calculan hasta ahora?	84
3.3.3. Cálculo de las pérdidas adicionales mediante simulaciones magnéticas	84
3.3.4. Validación del método de cálculo	85
3.3.5. Variación de las pérdidas adicionales mediante la frecuencia	85
3.3.6. Distribución de las pérdidas	88
3.4. Validación de los cálculos de la tensión de cortocircuito mediante FEMM	92
3.5. Posibles soluciones para reducir las pérdidas adicionales	95



Conclusión	96
Bibliografía	98
Anexos	99



ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Los primeros transformadores.....	13
Fig. 2. Circuitos de un transformador.....	16
Fig. 3. Formas de los circuitos magnéticos.....	19
Fig. 4. Secciones de núcleos.....	20
Fig. 5. Núcleo magnético.....	21
Fig. 6. Hilo de cobre esmaltado.	21
Fig. 7. Hilo de aluminio esmaltado.....	23
Fig. 8. Pletina de cobre aislada con papel kraft ...	21
Fig. 9. Pletina de cobre aislada con esmalte.	23
Fig. 10. Banda de cobre	21
Fig. 11. Banda de aluminio.....	24
Fig. 12. Conductor transpuesto continuo (CTC) de cobre.....	24
Fig. 13. Pletina de cobre redondeada.....	25
Fig. 14. Arrollamiento de capas.....	26
Fig. 15. Arandelas base-sujeción del arrollamiento de cada fase.....	26
Fig. 16. Arrollamiento de alta.....	27
Fig. 17. Vista de las bornas de B.T y de A.T.....	28
Fig. 18. Borna de BT Fig. 19. Borna de BT de 30 kV / 630 A.....	29
Fig. 20. Borna AT 52 kV / 1000 A (línea de fuga: 1.430 mm).....	29
Fig. 21. Relé Buchholz.....	31
Fig. 22. Dispositivo de recogida de gases.....	32
Fig. 23. Esquema Válvula de sobrepresión.....	33
Fig. 24. Válvula de sobrepresión “Comem” tipo 80-T.....	33
Fig. 25. Termómetro Qualitrol modelo AKM Serie 34.....	34
Fig. 26. Nivel de aceite “Comem” tipo LA14-XSS.....	34
Fig. 27. Esquema de funcionamiento de un conmutador en vacío.....	35
Fig. 28. Conmutador de vacío, conexión en triángulo a 52 kV 315 A y 5 posiciones.....	36
Fig. 29. Curva de las pérdidas específicas totales en las diferentes chapas magnéticas.....	42
Fig. 30. Curva de las pérdidas específicas totales en W/kg respecto a la inducción de la chapa M5 a 50 Hz y 60 Hz.....	43
Fig. 31. Curva de magnetización en A/cm respecto a la inducción de la chapa M5 a 50 Hz.....	44



Fig. 32. Curva de las pérdidas específicas totales en VA/kg respecto a la inducción de la chapa M5 a 50 Hz y 60 Hz.	45
Fig. 33. Esquema de conexión del transformador.....	50
Fig. 34. Esquema de regulación del arrollamiento de A.T.....	53
Fig. 35. Dibujo general con los materiales asignados a cada parte en FEMM.	63
Fig. 36. Distribución del flujo en cada fase de un transformador.....	70
Fig. 37. Diagrama de campo magnético para un transformador de dos arrollamientos.	71
Fig. 38. Ejemplo de una simulación simple.....	72
Fig. 39. Ejemplo de una simulación compleja.....	73
Fig. 40. Campo magnético de dispersión de un arrollamiento en condiciones de cortocircuito.....	75
Fig. 41. Descomposición del campo magnético de dispersión.....	75
Fig. 42. División de las pérdidas adiciones.....	76
Fig. 43. Pérdidas debido al flujo axial.	77
Fig. 44. Distribución de la densidad de corriente a lo largo de la dirección radial	77
Fig. 45. El flujo radial se concentra en el extremo de las bobinas.....	78
Fig. 46. Detalle de los extremos del arrollamiento	79
Fig. 47. Distribución de la densidad de corriente en el arrollamiento de B.T. y A.T....	79
Fig. 48. Densidad de corriente en zona media del arrollamiento de B.T.	80
Fig. 49. Densidad de corriente en la zona externa del arrollamiento de B.T.	80
Fig. 50. Distribución de la densidad de corriente en dos pletinas en el extremo del arrollamiento de B.T.	81
Fig. 51. Distribución de la densidad de corriente en dos pletinas en la zona media del arrollamiento de B.T.	81
Fig. 52. Densidad de corriente distribuida en dos pletinas de la zona exterior del arrollamiento de B.T.	82
Fig. 53. Densidad de corriente distribuida a lo largo del arrollamiento de A.T.....	82
Fig. 54. Compensación perfecta de amperivuelas.	83
Fig. 55. Compensación imperfecta de amperivuelas.	84
Fig. 56. Esquema de la variación de las pérdidas en función de la frecuencia.	85
Fig. 57. Distribución de las pérdidas totales (B.T. y A.T.)	91
Fig. 58. Dibujo de femm indicando las áreas señaladas para obtener la energía magnética almacenada.	93
Fig. 59. Dibujo del femm que aparece el valor de energía magnética almacenada. ...	93



Índice de tablas

Tabla 1. Características generales de la chapa M5 y chapa laser.	46
Tabla 2. Diseño del núcleo magnético calculado.	47
Tabla 3. Tabla de estandarización de pletinas de cobre.	54
Tabla 4. Datos del transformador.	59
Tabla 5. Relación espiras y tensión.	59
Tabla 6. Errores de relación en el transformador.	60
Tabla 7. Tabla de las pérdidas variando la frecuencia a 133 Hz.	86
Tabla 8. Tabla de pérdidas en el arrollamiento de B.T. variando la frecuencia.	86
Tabla 9. Tabla de pérdidas en el arrollamiento de A.T. variando la frecuencia.	87
Tabla 10. Tabla de las pérdidas variando la frecuencia a 500 Hz.	87
Tabla 11. Pérdidas en el transformador en la posición + de la regulación.	88
Tabla 12. Pérdidas en el transformador en la posición N de la regulación.	89
Tabla 13. Pérdidas en el transformador en la posición - de la regulación.	89
Tabla 14. Pérdidas en el transformador en el arrollamiento de B.T.	90
Tabla 15. Pérdidas en el transformador en el arrollamiento de A.T.	90
Tabla 16. Distribución de las pérdidas en el arrollamiento de B.T. por capas.	91
Tabla 17. Distribución de las pérdidas en el arrollamiento de A.T. por capas.	92
Tabla 18. Cálculo de la U_{cc} (%).	94
Tabla 19. Tensión de cortocircuito en la Pos N.	94
Tabla 20. Tensión de cortocircuito y el error.	94



Nomenclatura

A_c	Sección transversal. Unidades S.I.: Metro cuadrado [m^2]
B	Inducción magnética o densidad de flujo magnético. Unidades S.I.: Tesla [T]
$B_{dis\ MAX}$	Inducción magnética o densidad de flujo magnético máxima. Unidades S.I.: Tesla [T]
D_m	Diámetro medio del arrollamiento. Unidades S.I.: Metro [m]
E_t	Tensión por espira. Unidades S.I.: Voltio [V]
d	Diámetro. Unidades S.I.: Metro [m]
$f.m.m.$	Fuerza electromotriz. Unidades S.I.: Voltio [V]
f	Frecuencia. Unidades S.I.: Hercios [Hz]
h	Altura del arrollamiento. Unidades S.I.: Metro [m]
I	Intensidad de corriente eléctrica. Unidades S.I.: Amperio [A]
I_C	Resistencia de un conductor. Unidades S.I.: Ohmio [Ω]
I_L	Intensidad de línea. Unidades S.I.: Amperio [A]
I_F	Intensidad de fase. Unidades S.I.: Amperio [A]
I_P	Intensidad de corriente eléctrica que circula por el arrollamiento primario de un transformador. Unidades S.I.: Amperio [A]
I_S	Intensidad de corriente eléctrica que circula por el arrollamiento secundario de un transformador. Unidades S.I.: Amperio [A]
J	Densidad de corriente eléctrica. Unidades S.I.: [A/m^2]
K	Constante de aproximación
l	Longitud. Unidades S.I.: Metro [m]
L	Inductancia de una bobina. Unidades S.I.: Henrio [H]
mf	Número de fases
N	Número de espiras
P	Potencia eléctrica. Unidades S.I.: Vatio [W]
$P_{adicionales}$	Pérdidas adicionales. Unidades S.I.: Vatio [W]
P_{C3}	Peso del cobre de los 3 arrollamientos. Unidades S.I.: Kilogramo [kg]
P_{Cu}	Pérdidas en el arrollamiento. Unidades S.I.: Vatio [W]
P_{dc}, P_{Ω}	Pérdidas óhmicas. Unidades S.I.: Vatio [W]
P_{Fe}	Pérdidas en el núcleo. Unidades S.I.: Vatio [W]
$P_{TOTALES}$	Pérdidas totales. Unidades S.I.: Vatio [W]
R	Resistencia. Unidades S.I.: Ohmio [Ω]
R_F	Resistencia por fase. Unidades S.I.: Ohmio [Ω]



rt	Relación de transformación de un transformador de potencia, igual al cociente entre el número de vueltas del circuito secundario y el número de vueltas del circuito primario
S	Sección del conductor. Unidades S.I.: metrocuadrado [m^2]
S_{FE}	Superficie del hierro. Unidades S.I.: metro cuadrado [m^2]
S_N	Potencia aparente del transformador. Unidades S.I.: [kVA]
T	Temperatura. Unidades S.I.: Celsius [$^{\circ}C$]
U	Tensión. Unidades S.I.: Voltio [V]
$U_{CC}(\%)$	Tensión de cortocircuito, en tanto por ciento
$U_{RCC}(\%)$	Parte resistiva de la tensión de cortocircuito, en tanto por ciento
$U_{XCC}(\%)$	Parte inductiva de la tensión de cortocircuito, en tanto por ciento
W	Energía magnética almacenada. Unidades S.I.: Julio [J]
W_C	Masa de un arrollamiento. Unidades S.I.: Kilogramo [kg]
X_{CC1}	Reactancia del arrollamiento primario
$X_{CC2'}$	Reactancia del secundario reducido al primario
α	Factor Rogosky
δ	Peso específico del cobre ($8,9 \text{ kg/cm}^3$)
$\varepsilon(\%)$	Error relativo, en tanto por ciento, obtenido dividiendo la diferencia entre el valor medido o estimado y el valor de referencia o exacto entre el valor exacto
$\varepsilon_{g,dis}$	Tensión inducida por el flujo de dispersión. Unidades S.I.: Voltio [V]
ρ	Resistividad del material. Unidades S.I.: Ohmio por metro [$\Omega \cdot m$]
Φ_{dis}	Flujo magnético. Unidades S.I.: Webber [Wb]



Capítulo 1

Introducción general



Capítulo 1. Introducción general

1.INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. Objetivo del proyecto

El primer objetivo de este proyecto fin de carrera es obtener una panorámica global de la dificultad que tiene el diseño de un transformador, identificando los problemas sencillos y los más complejos, y viendo cuáles de estos problemas complejos se pueden resolver de forma aproximada mediante fórmulas aproximadas proporcionadas por los diferentes autores. Para los problemas complejos que por su envergadura se salgan

El segundo objetivo de este proyecto es la realización de los cálculos eléctricos necesarios para la fabricación de un transformador de potencia sumergido en aceite de 5MVA, 20/45kV.

Las principales características del transformador se exponen a continuación.

Especificación técnica del transformador:

Características

Transformador	Trifásico de potencia
Tipo	5000 / 52
Potencia [kVA]	5000
Líquido aislante Aceite	NynasNytro Taurus
Tipo de servicio	Continuo
Tensión primaria [V]	45.000
Conmutación en primario	$\pm 2.5 \% \pm 5 \%$
Tensión secundaria [V]	20.000
Nivel de aislamiento A.T. [kV]	FI 95 IR 250
Nivel de aislamiento B.T. [kV]	FI 50 IR 125
Frecuencia [Hz]	50
Grupo de conexión	Dyn11
Máx. Temperatura ambiente °C	40
Calentamiento arrollamientos/aceite [°C/°C]	65 / 60
Clase térmica del aislamiento	A
Tratamiento de la superficie	Procedimiento UNE-20.175. Acabado final RAL 7030
Altitud [m]	1183
Instalación	Exterior
Dimensiones aproximadas [mm]	Largo: 3075 Ancho: 2500 Alto: 3050
Peso aproximado (incluido aceite) [kg]	13200



Valores garantizados

Norma	UNE EN 60076
Tensión de cortocircuito [%]	7 (UNE EN 60076 Tol.)
Pérdidas en vacío [kW]	7 (UNE EN 60076 Tol.)
Pérdidas en carga (a 75 °C) [kW]	36 (UNE EN 60076 Tol.)

Accesorios

3 Bornas AT 52 kV / 1000 A (línea de fuga: 1.430 mm)
4 Bornas BT 30 kV / 630 A
Conmutador sin tensión tipo ASP 5 posiciones 52 kV
Relé BuchholzComem C1-HAO
Indicador de nivel de aceite del transformador con contactos Comemmod. LA14-XSS
Desecador de aire aceite del transformador Comem modelo EM3DA
Termómetro Qualitrol modelo AKM Serie 34
Dispositivo de alivio de sobrepresión Comem 80T
Dispositivo de recogida de gases Comem
Válvula de vaciado/filtrado (2 unidades) DN-25
Válvula de independización dep. transformador-cuba (1 unidad) DN-25
Válvula vaciado depósito de expansión DN-15
Válvulas (desmontables) de independización radiadores HVR-80 DN 80 (16 unidades)
Soporte para gatos
Ruedas planas (\varnothing 250 x 130 mm de llanta) y orientables a 90°, separación entre ejes 1505 mm.
Anillas para elevación depósito de expansión
Ganchos en cuba para elevación del transformador completo
Placa de características

El último objetivo del proyecto es desarrollar métodos para el cálculo de tensión de cortocircuito y las pérdidas de un transformador sobre la base de simulaciones electromagnéticas mediante el método de elementos finitos (FEMM).

1.2. Introducción histórica del transformador

El Transformador es un Componente esencial del Sistema Eléctrico de Potencia, su historia empieza con **Michael Faraday** Siglo XIX.

Actualmente los Transformadores pueden manejar 500 veces la potencia y 15 veces el voltaje de los primeros Transformadores del Siglo XX.

Su peso por unidad de potencia se ha reducido en 10 veces, y su eficiencia es superior al 99%.

A continuación resumiremos algunas referencias históricas relevantes en el desarrollo de los transformadores:

- **James Clerk Maxwell (1831-1879).** En 1864 formuló la teoría del electromagnetismo.
- **Michael Faraday (1791-1867).** Inducción electromagnética, considerado padre de la ingeniería eléctrica.
- **George Westinghouse (1864-1914).** Inventor del sistema de frenos neumático para los trenes. Con Tesla desarrolla el sistema de Corriente Alterna (C.A.).
- **Marzo 1885. Karoly Zipernowski, Otto Blathy y Miksa Deri.**
De origen Húngaro.
Transformadores de 5 y 7.5 KVA, 1400 / 100, 100 Hz.

- **1886 William Stanley / G. Westinghouse.** En estados unidos, desarrollan el Primer transformador tipo núcleo. Figura 1 – izda.

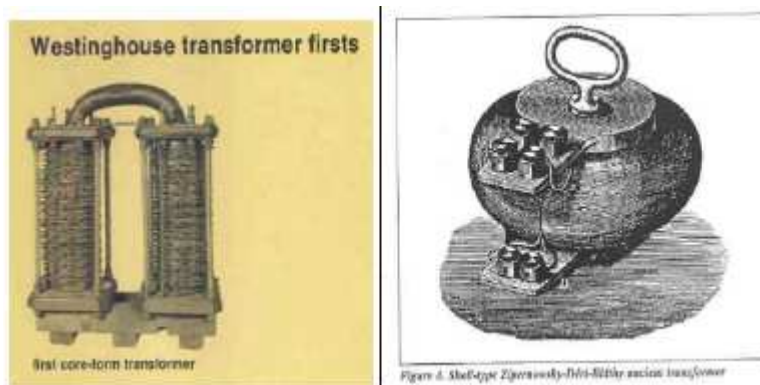


Fig. 1. Los primeros transformadores.

1.3. Problemática del diseño de un transformador

En la actualidad, con la liberación del mercado de energía eléctrica, reducir costes es esencial para poder ofrecer energía a un precio competitivo. En este sentido, los elementos en los cuales se puede conseguir un mayor ahorro son en los de mayor coste.

Los transformadores son los equipos más caros de una subestación eléctrica, y en ellos se ha producido un abaratamiento de precios muy importante en los últimos años en relación con el aumento del coste de la vida.

Hace algunas décadas optimizar los costes no era una prioridad a la hora de diseñar un transformador, el diseño estaba completamente enfocado a que el transformador fuese capaz de aguantar las condiciones de servicio, por lo que muchos de sus componentes, como por ejemplo los aislamientos, estaban sobredimensionados para evitar problemas. Hoy en día optimizar los costes es algo prioritario para una compañía eléctrica. Este hecho unido a la gran competencia existente entre las empresas que se dedican a la fabricación de transformadores, hace que dichas empresas tengan que optimizar su diseño para que sea lo más económico posible asegurando el mejor funcionamiento para poder hacerse un sitio en el mercado.

El diseño de un transformador es una tarea realmente complicada, hay que resolver problemas extremadamente complejos en diferentes campos de la ingeniería (electromagnéticos, electrostáticos, mecánicos, termodinámicos, etc.). Resolver todos estos problemas a mano es una tarea prácticamente imposible, por lo que caben dos soluciones:

- La primera solución a la hora de afrontar el diseño de un transformador es realizarlo basándose en la experiencia y en diseños anteriores, asumiendo una serie de hipótesis y coeficientes, apoyándose en tablas y gráficas experimentales. Esta es la solución que se ha utilizado durante décadas, y conduce a transformadores sobredimensionados y caros.



- La segunda solución es utilizar métodos numéricos para resolver cada uno de los problemas planteados. Entre los métodos numéricos más utilizados cabe destacar el de los elementos finitos.

El problema del diseño de un transformador no es sencillo, ya que, como se ha indicado, un transformador está sometido a solicitudes dieléctricas, térmicas y mecánicas, las soluciones que se podría adoptar para resolver un problema pueden influir negativamente en otro. Así, por ejemplo, para que un transformador soporte bien las solicitudes dieléctricas pudiera ser interesante reforzar el aislamiento sólido frente al aislamiento líquido, pero sin embargo esa solución empeora el problema de la refrigeración del transformador.

A lo largo de los años, los diseños de los transformadores han ido evolucionando debido fundamentalmente a dos causas:

- La aparición de nuevos materiales y su tratamiento, como por ejemplo la chapa magnética laminada en frío, tratamientos láser de la chapa, conductores CTC (continuously transposed conductor), cartón de alta densidad, aceros magnéticos, plásticos, pegamentos, resinas, etc.
- Nuevos métodos de cálculo, tanto dieléctricos como térmicos e incluso magnéticos (uso de shunts magnéticos dentro de la cuba).

Existen diferentes libros de diseño y cálculo de transformadores, algunos actuales y otros bastante más antiguos, existiendo ciertas diferencias de planteamiento entre ellos. Sin embargo, en ninguno de los que se han consultado se ha encontrado un modelo completo de cálculo de un transformador, pues en todos ellos en un momento u otro del diseño se realizan aproximaciones y se utilizan coeficientes para simplificar los cálculos cuya obtención no está al alcance del lector o se realiza un diseño en base a ejemplos en los que determinadas decisiones no están justificadas (por ejemplo tomar una distancia entre el arrollamiento de AT y la cuba no basado en cálculos ni en gráficas) ya que estas distancias mínimas están investigadas por las empresas que diseñan los transformadores y son totalmente confidenciales las distancias recomendables para un funcionamiento correcto del transformador.

En este proyecto se ponen las bases de cómo se lleva a cabo el diseño de un transformador y en la realización de los cálculos básicos del mismo.

1.4. Principio de funcionamiento

Un transformador se puede definir como un aparato estático destinado a transferir la energía eléctrica de un circuito a otro, utilizando, como enlace principal entre ambos, un flujo común de inducción.

La inducción electromagnética sólo se produce con un flujo variable, por lo tanto esta variación del flujo es esencial en todo transformador estático. Cuando el flujo es alterno, resulta el transformador propiamente dicho.

En un transformador de potencia se pueden distinguir varias partes o componentes diferenciados, como son la parte activa, cuba, tapa, equipo de refrigeración y accesorios periféricos.



La parte activa está formada por:

- Circuito magnético.
- Arrollamientos
- Otras partes activas (bornas)

Cuba, depósito de expansión y tapa.

Equipo de refrigeración (radiadores en este caso).

Los principales accesorios periféricos de nuestro transformador son los siguientes:

- Protecciones del transformador (relé Buchholz, aparatos de control de temperatura, niveles de aceite, válvulas de alivio de sobrepresión, etc.)
- 3 Bornas AT 52 kV / 1000 A (línea de fuga: 1.430 mm)
- 4 Bornas BT 30 kV / 630 A
- Conmutador sin tensión tipo ASP 5 posiciones 52 kV
- Válvula de vaciado/filtrado (2 unidades) DN-25
- Válvula de independización dep. transformador-cuba (1 unidad) DN-25
- Válvula vaciado depósito de expansión DN-15
- Válvulas (desmontables) de independización radiadores HVR-80 DN 80 (16 unidades)
- Ruedas planas (\varnothing 250 x 130 mm de llanta) y orientables a 90°, separación entre ejes
- Placa de características

Otro componente a considerar es el fluido de refrigeración; en nuestro caso se trata de aceite nafténico (según norma UNE 21320).

En el presente capítulo se tratará de describir los aspectos más generales de un transformador, de forma que se pueda tener una visión general de este tipo de máquinas eléctricas y con ello se facilite el entendimiento de los capítulos siguientes y del proyecto en general.

El transformador consta de un núcleo ferromagnético, que forma el circuito magnético, y dos arrollamientos, que forman el circuito eléctrico (ver figura 2).

.

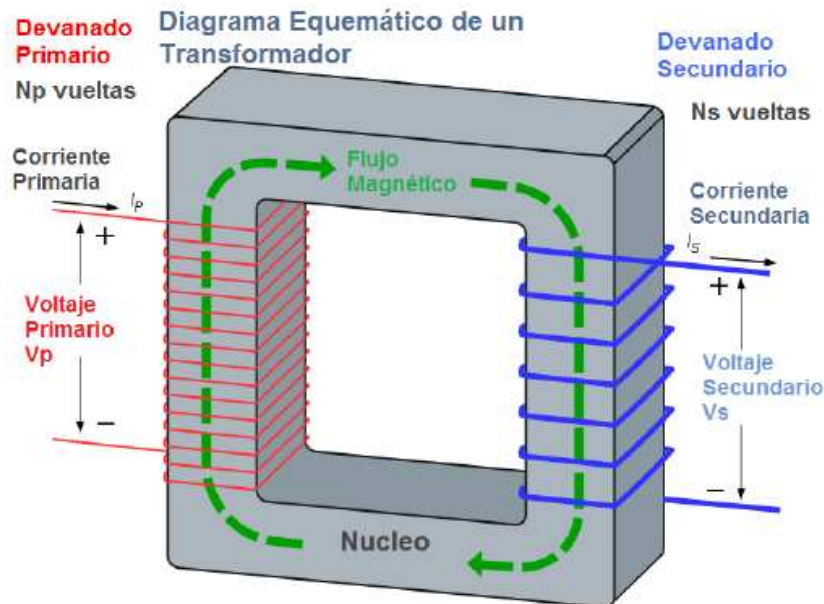


Fig. 2. Circuitos de un transformador.

La corriente alterna entra al transformador por el arrollamiento primario con unos valores determinados de tensión y corriente, V e I , y sale por el arrollamiento secundario con otros valores diferentes, manteniendo la frecuencia. Si el transformador es reductor el arrollamiento primario será el arrollamiento de mayor tensión y el secundario el de menor tensión, y si el transformador es elevador el arrollamiento primario será el de menor tensión y el secundario el de mayor tensión.

La relación entre las tensiones del arrollamiento primario y secundario en vacío, coincide, en el caso de transformadores monofásicos y algunos grupos de conexión trifásicos, con bastante aproximación con la relación existente entre el número de espiras primarias y secundarias. Dicha relación determina la relación de transformación del transformador, punto fundamental de estos equipos.

$$rt = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1)$$

Para exponer de manera más clara cada una de las partes de este transformador objeto de estudio, a continuación se explican cada una de ellas por separado

1.4.1. Circuito magnético

Es el medio conductor del campo magnético principal o de excitación, que como ya se explicó es necesario que circule a través de material de alta permeabilidad.

El núcleo no puede fabricarse en un bloque macizo y homogéneo debido a las corrientes parásitas (efecto Foucault) que se generarían en el mismo. Es necesario subdividir la masa de hierro en chapas lo más finas posible y aisladas entre sí. De esta forma el aislamiento de las chapas corta las corrientes inducidas reduciéndolas a valores pequeños y aceptables.



La inducción del campo magnético que circula por el núcleo no puede pasar de un cierto valor, del orden de 1.9 Teslas (19000 gauss). A partir de este valor se dice que el núcleo está **saturado**, es decir, no admite más flujo magnético.

En el núcleo se originan lo que llamamos **pérdidas en vacío o pérdidas en el hierro** del transformador. Estas pérdidas son los vatios de potencia perdida y transformada en calor al circular el flujo magnético por su interior. Su valor se garantiza al cliente en todos los transformadores, se mide en plataforma y tiene gran importancia. Hoy día se exigen valores de pérdidas en vacío cada vez menores, por lo que se tiende a utilizar chapa magnética de la mayor calidad posible.

Las pérdidas en vacío del transformador se clasifican principalmente en dos grupos:

- Pérdidas de **Foucault**, que son las inducidas por el campo magnético de excitación, como se explicó anteriormente, y que fundamentalmente se reducen utilizando chapa más fina ó con aislamiento de mayor resistencia.
- Pérdidas por **histéresis**, debidas al rozamiento entre las partículas de chapa, ya que al establecerse el campo magnético en su interior, se "orientan" y desorientan al variar el sentido del campo. Se reducen utilizando mejor calidad de chapa, que se traduce en una mayor facilidad de las partículas para orientarse.

Las pérdidas en vacío varían aproximadamente con el cuadrado de la inducción.

Otra característica que se garantiza y se mide en plataforma es la **intensidad de vacío o de magnetización**, que es la intensidad absorbida por el arrollamiento por donde se aplica la tensión, estando el otro abierto o en vacío. Es la pequeña intensidad que sirve para crear el campo magnético de excitación al circular por el arrollamiento. Se expresa en % de la intensidad nominal y suele ser inferior al 1 %.

Vamos a hablar ahora de la chapa magnética:

Al hablar de chapa magnética nos referimos primordialmente a la chapa de grano orientado.

La chapa magnética es un material a base de acero laminado en frío, con un cierto contenido de silicio (del orden del 3 %), que tiene una gran permeabilidad.

Su estructura se compone de pequeños imanes elementales, llamados **dominios**, que se agrupan formando un mosaico. Estos imanes elementales se orientan al someter el material al campo magnético.

El campo circula mejor en una determinada dirección, que es la **dirección delaminación**, que corresponde con el sentido longitudinal de la chapa.

Otro fenómeno que ocurre en el núcleo cuando se excita (se establece el campo magnético de excitación), es la **magnetoestricción**, en virtud del cual la chapa se alarga y se acorta ligeramente al variar la orientación de sus partículas con la variación del campo. Esto da lugar a una vibración y al **ruido** característico del transformador cuando está en tensión.

El ruido se mide en decibelios, y a veces se garantiza un valor, que en ocasiones es muy bajo, teniendo que tomar medidas especiales, siempre costosas, para reducirlo. El uso de chapa magnética de mejor calidad no garantiza un nivel de ruido bajo; los

procedimientos más eficaces para reducir el ruido son: bajar la inducción y utilizar uniones en step-lap

Comentaremos a continuación los aspectos más relevantes del diseño:

1.4.1.1. Uniones:

En las uniones el flujo ha de pasar por un **entrehierro** (hueco entre dos chapas), rompiéndose la uniformidad de la circulación del mismo, por lo que se producen zonas con mayor concentración de líneas de fuerza que suponen mayores pérdidas. Haciendo las uniones a 45° es como más homogeneidad se consigue.

Es conveniente que las uniones de las distintas chapas del paquete no coincidan en la misma línea, en el sentido del apilado, sino que exista un solape. Con ello se mejora el reparto de flujo en los entrehierros y también se obtiene una mayor consistencia mecánica. Se pueden disponer de dos formas: la **convencional**, en que se van alternando con una diferencia de unos 20 a 30 mm, y la de **uniones escalonadas (step-lap)**, en que van formando como una escalera. La **figura 2** muestra estos dos tipos de solape.

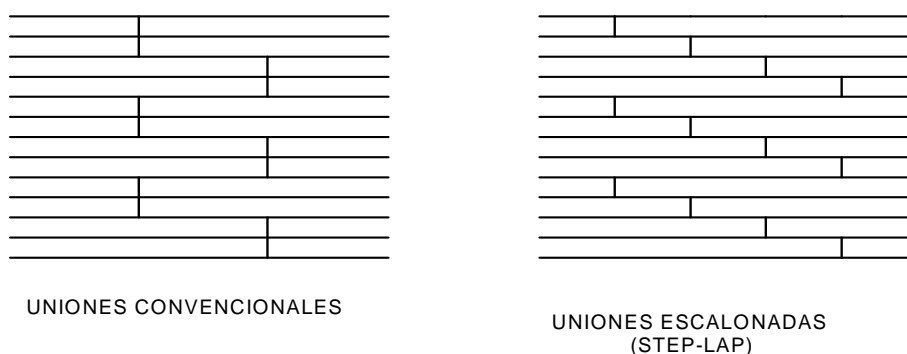


Fig. 2. Uniones de las chapas magnéticas.

Las uniones escalonadas proporcionan una mayor homogeneidad del flujo a su paso por el entrehierro, por lo que se obtienen menores pérdidas y una importante reducción de la corriente de vacío. Para poder utilizarlas, la máquina de corte de la chapa magnética ha de estar preparada expresamente para ello. Hoy día se tiende a su utilización cada vez más.

La unión convencional se hace apilando las chapas con 1, 2 o 3 al mismo tiempo, en cada capa. Cuantas menos se apilen al mismo tiempo, menores pérdidas se obtienen, aunque el coste se incrementa.

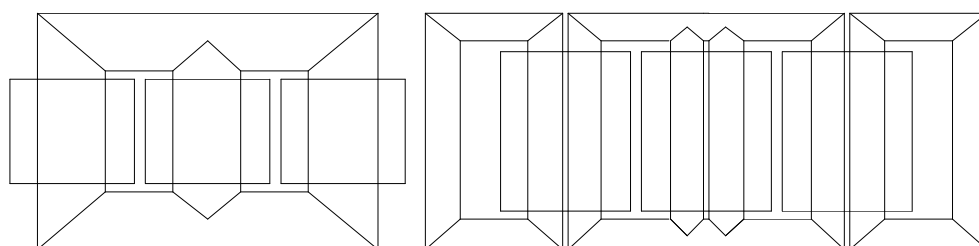
1.4.1.2. Formas de circuitos magnéticos:

En la **figura 3** se representan las formas más utilizadas, que se explican por sí mismas. Las representaciones de los núcleos están hechas en alzado.

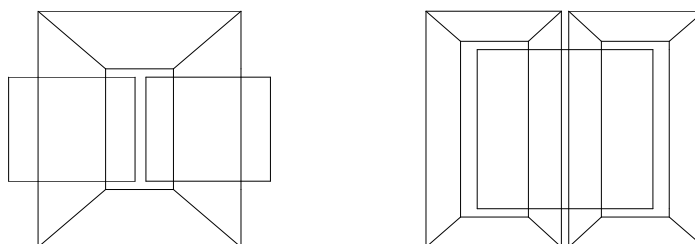
Los núcleos de los transformadores de columnas trifásicos se componen de 3 columnas iguales, sin columnas para el retorno, ya que al tratarse de tres flujos iguales y desfasados 120° la suma es siempre cero.

Si se trata de transformadores de columnas monofásicos se dispone un núcleo de dos columnas iguales en las que se bobina la mitad de la fase en cada una.

En transformadores de mayores potencias se emplean los núcleos trifásicos de 5 columnas y los monofásicos de 3. Las columnas laterales son las de retorno. Su ventaja consiste en que las culatas son de la mitad de sección, con lo que se reduce considerablemente la altura, facilitándose que el transformador encaje en la altura máxima permitida de transporte, que en grandes máquinas es una limitación determinante en el diseño.



COLUMNAS TRIFASICOS



COLUMNAS MONOFASICOS

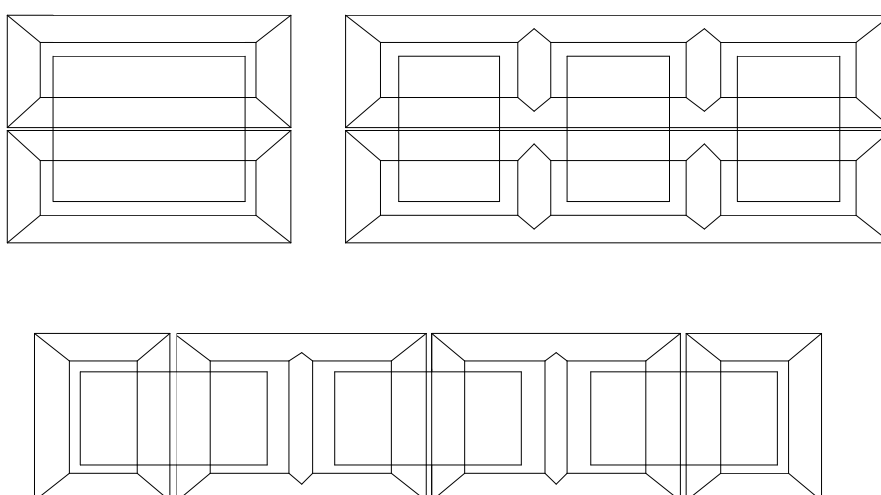


Fig. 3. Formas de los circuitos magnéticos.

1.4.1.3. Sección

Atendiendo a la sección de las columnas y las culatas, podemos definir tres clases de circuitos magnéticos: rectangular, oval y redondo escalonado.

Cada uno de ellos presenta una serie de ventajas e inconvenientes:

- El de sección rectangular es de más fácil construcción, pero sus bobinas deben ser rectangulares y en consecuencia tienen superior perímetro, necesitando por ello más cantidad de cobre. La sección rectangular permite acortar la longitud de las culatas por lo que se reduce el peso de la chapa magnética.
- El de sección redonda presenta las características opuestas al anterior: dificultad de construcción, pequeño perímetro de bobinas, mejor resistencia de las mismas frente a los cortos circuitos y menor cantidad de cobre. Las culatas resultan proporcionalmente más largas que en el anterior.
- El de sección oval es una solución de compromiso entre las otras dos formas constructivas. Es de uso generalizado en la fabricación de transformadores de distribución.

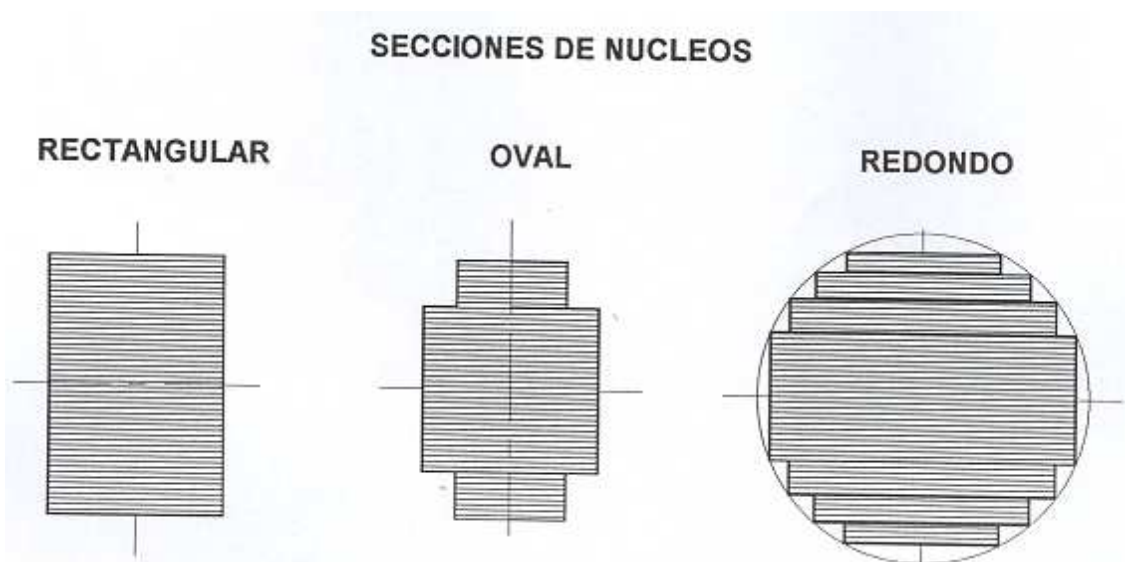


Fig. 4. Secciones de núcleos

Cuando se precisa se disponen canales de refrigeración en medio del apilado.

Para la fabricación del circuito magnético solamente se utiliza chapa de grano orientado.

El núcleo está formado por láminas de chapa de 0,3 mm de espesor, con un bajo contenido de carbono ($< 0,1\%$) que minimiza las pérdidas por histéresis y el envejecimiento. Posee también una cierta proporción de silicio ($< 3\%$) para aumentar la resistencia eléctrica y en consecuencia reducir también las pérdidas por Foucault. Para reducir las pérdidas por Foucault, las láminas de chapa están aisladas por ambas caras con un producto inorgánico, compatible con el aceite del transformador y resistente a la temperatura; el espesor de este recubrimiento es inferior a 4 micras.

Otro factor que afecta de manera muy apreciable a reducir las pérdidas son los procesos a los que se somete la chapa magnética, como es el tratamiento de la misma mediante láser (pero este no es nuestro caso).

El núcleo de este transformador posee las siguientes características:

Tipo de chapa magnética:	M5
Diámetro nominal:	350 mm
Sección bruta:	906 cm ²
Factor utilización:	0,96
Número de escalones	12
Inducción:	1,704 Teslas

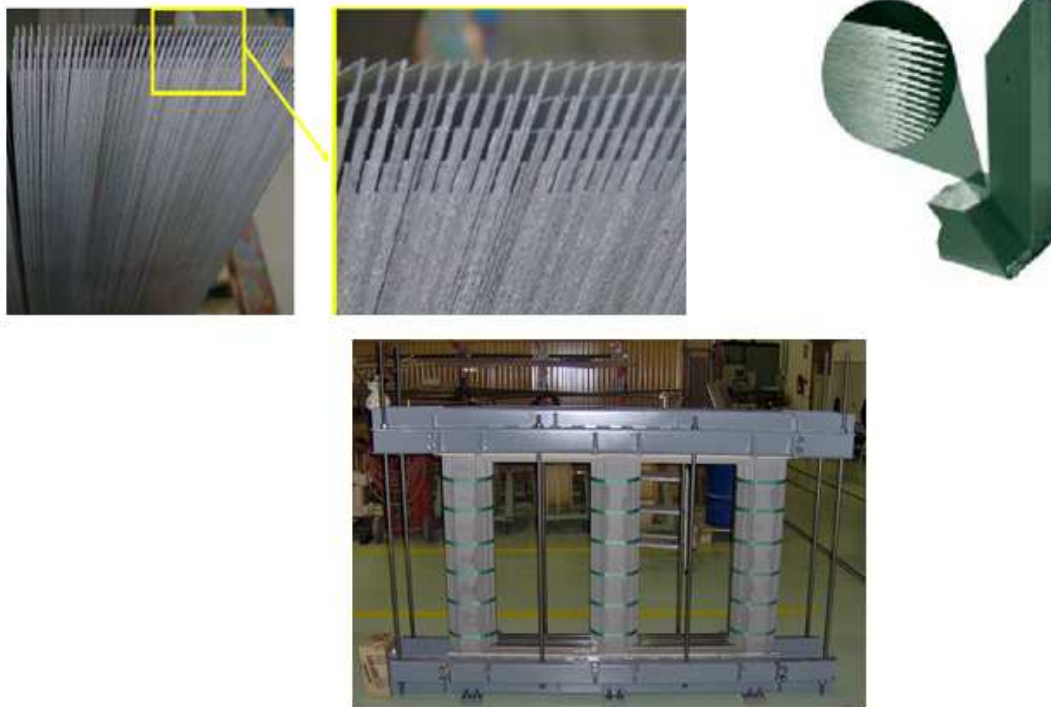


Fig. 5. Núcleo magnético

En el capítulo 2 (“Cálculos del transformador en líquido aislante de 45/20 kV con potencia de 5MVA”) de este documento se explica más detalladamente la construcción de este núcleo.

1.4.2. Arrollamientos

1.4.2.1. General:

En cuanto a la función de los arrollamientos distinguiremos entre primario y secundario: la misión del primario es inducir el campo magnético de excitación en el núcleo, cuando se le aplica la tensión. La del secundario es la de generar la tensión secundaria, gracias a la existencia del campo magnético de excitación. Ambos arrollamientos conducen las intensidades nominales I_1 e I_2 .



El funcionamiento es inverso, es decir, el primario puede ser indistintamente el arrollamiento de AT o el de BT, y lo mismo el secundario.

Cuando el arrollamiento de AT funciona como primario, (el de BT sería el secundario), el transformador se llama **reductor**, por reducir el valor de la tensión. Cuando el primario es la BT el transformador funcionaría como **elevador**.

Además de primario y secundario, o AT y BT, pueden existir otros arrollamientos, como MT (media tensión), terciario, auxiliar, etc.

Los arrollamientos suelen ser **concéntricos** y por su forma pueden ser **circulares, rectangulares y ovales**.

Los materiales normalmente empleados en la fabricación de arrollamientos para transformadores son dos: Aluminio y cobre.

El aluminio, a igualdad de peso, es dos veces y media aproximadamente mejor conductor que el cobre, lo cual, junto a su precio más favorable, hacen que su uso se esté imponiendo poco a poco en la construcción de transformadores. Es preciso fabricar los arrollamientos con secciones netamente superiores, por lo que los transformadores resultan más voluminosos en general.

El cobre es el material más generalmente empleado en la fabricación de transformadores y existe una amplia experiencia en cuanto a su empleo y rendimientos.

Se emplean distintos materiales para el aislamiento de estos materiales, de acuerdo con la forma geométrica de su sección y el uso final al que se aplica.

1.4.2.2. Tipos de aislamientos:

Los aislamientos más comunes son:

Algodón

Hoy no es empleado, pero todavía es posible verlo en antiguos transformadores en servicio.

Papel

Es muy empleado en forma de cintas de pequeño espesor, cubriendo conductores, en general de sección rectangular (Pletinas)

Esmalte

Es empleado principalmente en los hilos de sección redonda. Tiene muy pequeño espesor por lo que se realizan arrollamientos con un factor de forma muy favorable. Presenta muy buenas condiciones térmicas en cuanto a resistencia a las temperaturas y transmisión térmica.

Aislamientos especiales

Empleados para dotar al transformador de características térmicas o mecánicas especiales. Podemos citar el Nomex, el Kapton, Poliéster, Barniz, Aislamientos compuestos etc.

Algunos de estos aislamientos se emplean impregnados en resinas semicuradas, las cuales polimerizan durante el secado del transformador, dotándolo de altas características mecánicas

1.4.2.3. Tipos de conductores:

Según la forma constructiva del conductor se pueden citar los siguientes tipos:

Hilos redondos

Los hilos redondos son de aplicación en arrollamientos de alta tensión en transformadores de distribución.



Fig. 6. Hilo de cobre esmaltado



Fig. 7. Hilo de aluminio esmaltado

Pletinas rectangulares

Las pletinas rectangulares se emplean en transformadores de media y alta potencia, tanto en alta como en baja tensión.



Fig. 8. Pletina de cobre aislada con papel kraft.



Fig. 9. Pletina de cobre aislada con esmalte.

Bandas

Las bandas se emplean en la fabricación de arrollamientos de baja tensión, tanto en distribución como en media potencia.



Fig. 10. Banda de cobre.



Fig. 11. Banda de aluminio.

Conductor transpuesto continuo (CTC).

El conductor transpuesto se emplea en transformadores de potencia que requieren grandes intensidades. Su uso está indicado para lograr la reducción de pérdidas adicionales. Está formado por un mazo de conductores rectangulares, aislados entre sí, y enrollados o trenzados entre ellos, para lograr que la longitud total de cada uno de los conductores sea la misma al final del arrollamiento, así como su posición relativa, con el objeto de igualar la resistencia y reactancia individual de cada conductor.



Fig. 12. Conductor transpuesto continuo (CTC) de cobre.

El orden de montaje de los arrollamientos en el circuito magnético debe ser según la tensión de cada uno, es decir el arrollamiento de BT suele ser interior y el de AT exterior, por resolverse así mejor el problema del aislamiento. No obstante a veces se cambia la orden por necesidades de la tensión de cortocircuito, característica del transformador muy importante, que se garantiza y se mide, que se estudiará más adelante.

1.4.2.4. Selección de la densidad de corriente

Los hilos y las pletinas de los arrollamientos se seleccionan según la corriente que vaya a circular por ellos. Mientras que para calcular el tamaño de un conductor se debe tener en cuenta tanto el material del arrollamiento como la densidad de corriente.

Para comenzar con una selección preliminar de la densidad de corriente son los siguientes valores más recomendables dependiendo del material:

- Para arrollamientos de aluminio: 1,5 A/mm
- Para arrollamientos de cobre: 3 A/mm

En algunas ocasiones la selección de la densidad de corriente viene impuesta por las restricciones del comprador.

1.4.2.5. Arrollamiento de BT

Como ya se ha expuesto en el apartado 1.1 de este documento, el grupo de conexión de este transformador es Dyn11, por lo tanto los tres arrollamientos de BT de este transformador están conectados en estrella.

El material conductor es pletina de cobre, la cual tiene los bordes redondeados. El conductor va provisto de varias capas de papel y cada vuelta de papel queda solapada con la vuelta anterior (ver figura 13). Este recubrimiento de papel se realiza para conseguir el espesor adecuado para soportar el estrés eléctrico y mecánico al que se encuentra sometido el arrollamiento.

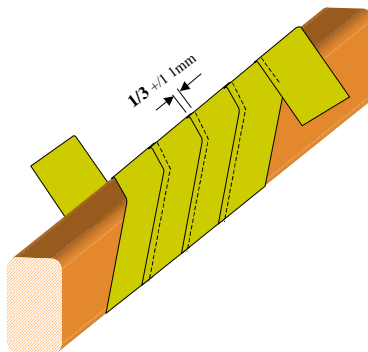


Fig. 13. Pletina de cobre redondeada.

Para incrementar la sección del conductor se utilizan dos o más conductores en paralelo, de esta forma se reducen las pérdidas y se facilita la fabricación del arrollamiento.

En el caso que nos ocupa, el arrollamiento de BT está realizado de la siguiente forma:

- ❖ N° de espiras: 344
- ❖ Conductor: 2 pletinas de Cu de 10,6 x 2,12 mm aisladas con papel de 0,5 mm.
- ❖ Dimensiones constructivas: 22,3 x 2,67 mm

❖ Tipo de arrollamiento: Arrollamiento formador por 10 capas.

En la figura 14 se puede apreciar un ejemplo de la forma que adopta este tipo de arrollamiento.

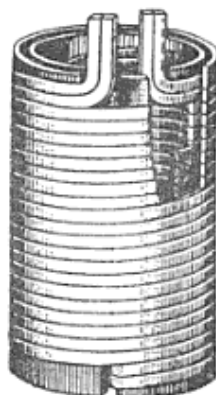


Fig. 14. Arrollamiento de capas.

En un arrollamiento por capas, las bobinas se arrollan en capas verticales: de arriba-abajo, de abajo-arriba, etc. Las espiras normalmente se encuentran en contacto unas con otras, pero las capas están separadas por medio de tiras de refrigeración para que el aceite pueda pasar entre ellas y refrigerar el arrollamiento. Estas bobinas suelen ser continuas sirviendo la espira de abajo o la de arriba como transición entre capas.

Las secciones están separadas verticalmente mediante tiras de refrigeración hechos de cartón prensado para permitir la refrigeración de la bobina mediante el paso del aceite. Los espesores habituales de las tiras de refrigeración son de 3 hasta 9 mm para potencias media tensión. Las bobinas están sujetas por unas arandelas de maderas que están situadas arriba y abajo del arrollamiento (ver figura 15).

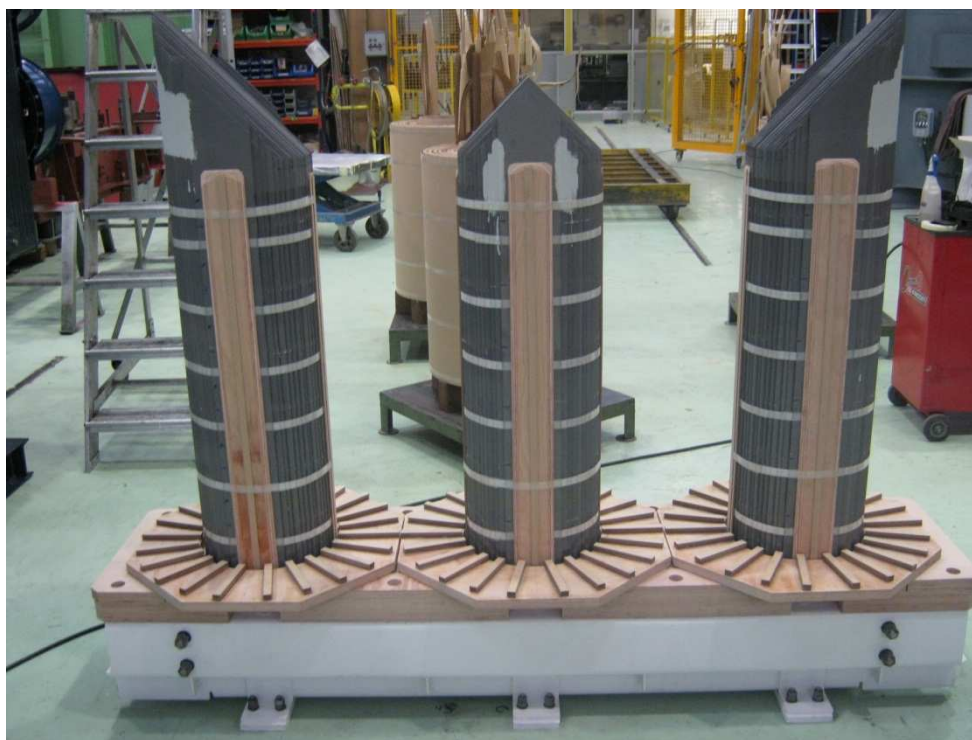


Fig. 15. Arandelas base-sujeción del arrollamiento de cada fase.

En el siguiente capítulo de la memoria en cálculos del transformador en líquido aislante de 45/20 kV con potencia de 5 MVA se explica con más detalle todos los datos eléctricos y mecánicos referentes a este arrollamiento.

1.4.2.6. Arrollamiento de AT

En este caso el arrollamiento de AT está realizado de la siguiente forma:

- ❖ N° de espiras: 1408
- ❖ Conductor: 1 Pletina Cu 7,1 x 1,6 mm aislada con papel de 0,5 mm.
- ❖ Tipo de arrollamiento: 14 capas.
- ❖ Dirección: Punto - plato (izda. DIN)
- ❖ Principio eléctrico al exterior

Este tipo de arrollamiento se usa cuando se tiene un gran número de espiras e intensidades relativamente bajas y también por la facilidad que da a la hora de realizar la regulación en el arrollamiento.

En la figura 16 se puede observar cómo es un arrollamiento de este tipo.



Fig. 16. Arrollamiento de alta.

En el capítulo 2 de este documento se explica con más detalle todos los datos eléctricos y mecánicos referentes a este arrollamiento.

1.4.3. Otras partes activas y accesorios

1.4.3.1. Bornas

Básicamente se puede distinguir entre dos tipos de bornas:

- Tipo aislador.
- Tipo condensador.
- En el caso que nos ocupa hemos elegido para AT tensión una borna AT 52 kV / 1000 A (línea de fuga: 1 430 mm) y para BT una borna de BT 30 kV / 630 A.

1.4.3.1.1. Borna BT DT 30Nf / 650

Las bornas tipo aislador se usan generalmente para tensiones de servicio relativamente bajas (entre 10 y 45 kV) y para unas intensidades de servicio desde 250 hasta 4.500 A.

En este caso, como la baja tensión del transformador es 20.000 V y la intensidad de línea es 145 A, se elige una borna DT 30 Nf / 630 (según norma DIN 42533).

Se trata de un accesorio simple que consta de la porcelana (normalizada según norma DIN), caperuza, junta de estanqueidad y tuerca de aprieto que se encuentran situadas en la parte superior, y que permiten que el conductor quede fijado a la porcelana en esta zona.

En la figura 17 se puede observar las bornas de BT y las de AT.

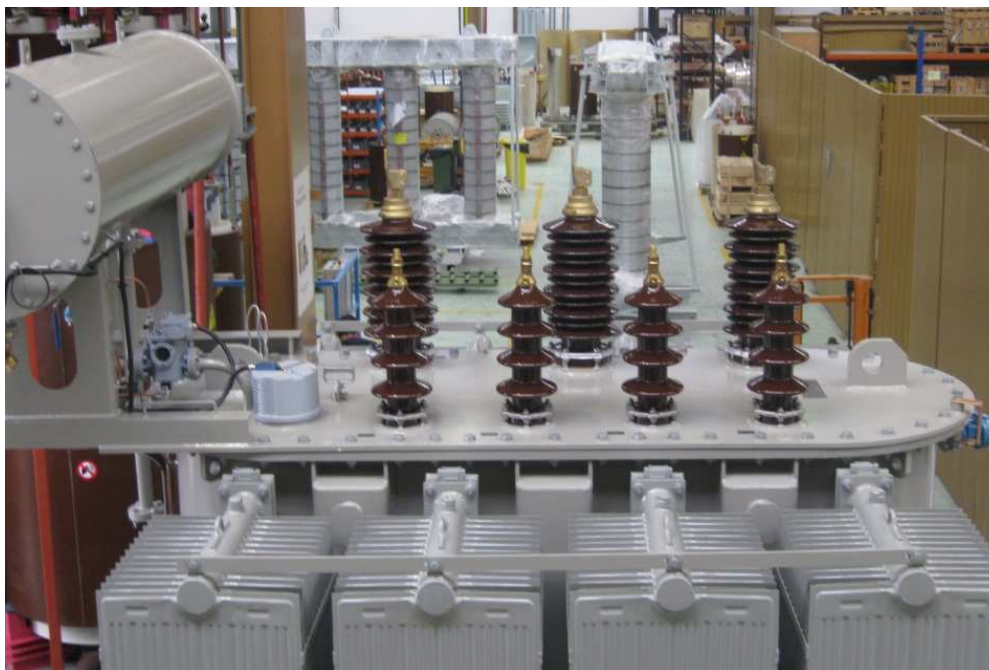


Fig. 17. Vista de las bornas de B.T y de A.T.

En figura 18 y 19 se ve la borna de BT de 30 kV / 630 A.



Fig. 18. Borna de BT

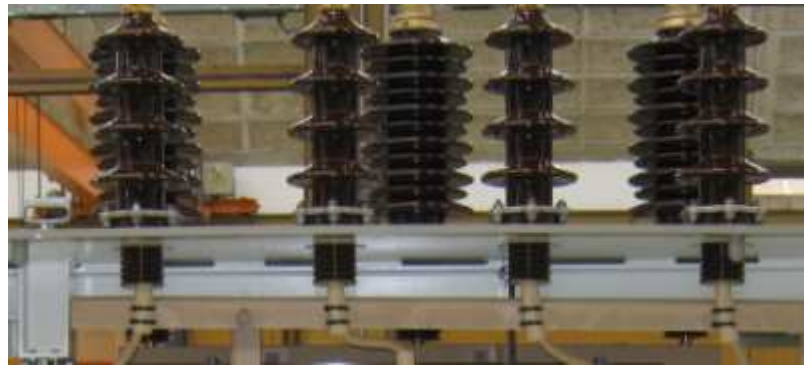


Fig. 19. Borna de BT de 30 kV / 630 A.

1.4.3.1.2. Borna AT 52 kV / 1000 A (línea de fuga: 1.430 mm)

Las bornas 52 kV / 1000 A (línea de fuga: 1.430 mm) son especiales en el asunto de la línea de fuga ya que es mayor sobre una borna estándar de 52 kV / 1000 A ya que el transformador está situado a más de 1000 metros y según la norma requiere una mayor línea de fuga que en este caso es de 1430 mm.

Según las especificaciones del cliente en las bornas de AT se acoplan unas palas de conexión según norma y que soporten una intensidad mínima de 1000 A.

También se trata de un accesorio simple que consta de la porcelana (normalizada según norma DIN) con el incremento de línea de fuga, caperuza, junta de estanqueidad y tuerca de aprieto que se encuentran situadas en la parte superior, y que permiten que el conductor quede fijado a la porcelana en esta zona.

En las figura 20 se puede observar este tipo de borna.

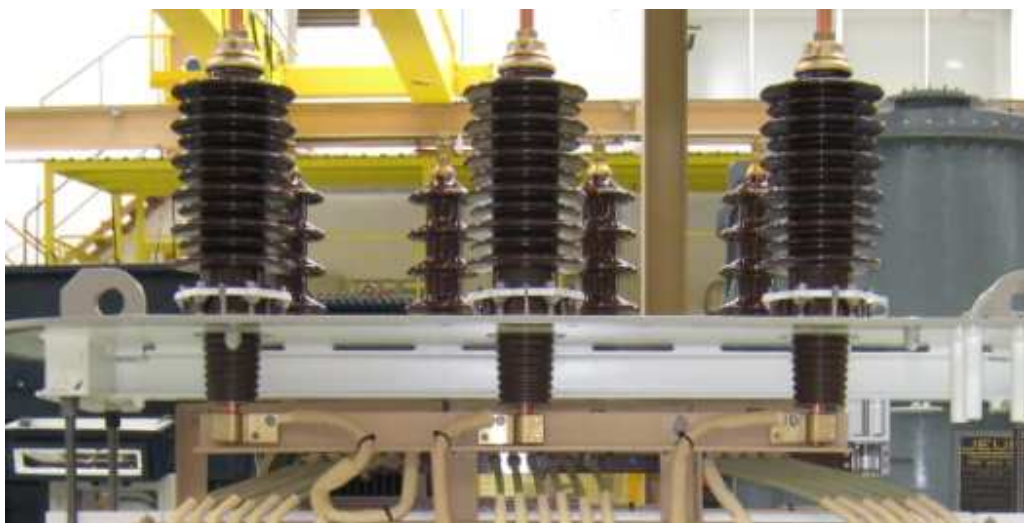


Fig. 20. Borna AT 52 kV / 1000 A (línea de fuga: 1.430 mm).



1.4.3.2. Cuba

La cuba es el recipiente donde queda depositado la parte activa.

En transformadores de potencia la cuba está diseñada para soportar el pleno vacío, facilitando así los procesos de tratamiento de secado de parte activa y de llenado de aceite. La cuba también cumple la misión de estructura soporte para el equipo de refrigeración y de otros accesorios.

1.4.3.3. Equipo de refrigeración

En este transformador el equipo de refrigeración está formado por los radiadores.

El tipo de refrigeración viene definido por la naturaleza del medio refrigerante y por el medio de circulación de los mismos; en el caso que nos ocupa se trata de una refrigeración ONAN (aceite natural-aire natural).

Por las características de este transformador, se ha utilizado para realizar el equipo de refrigeración:

- 8 Grupos de 1500 x 520 x 13 elementos

1.4.3.4. Depósito de expansión

El depósito de expansión se dimensiona para absorber los incrementos o disminuciones de volumen del aceite contenido en la cuba del transformador; considerándose temperaturas extremas, tanto mínimas como máximas. Mediante una tubería está conectado directamente con la cuba del transformador, en la cual se encuentra instalado el relé Buchholz.

El volumen de aceite que existe en cada momento está controlado por un nivel magnético que además de disponer de una esfera con la indicación óptica, también dispone de contactos de señalización para nivel máximo y mínimo.

La humedad ambiental es un enemigo de los materiales dieléctricos, por tanto, es necesario preservar la celulosa de los aislamientos y el aceite de este tipo de contaminación. El método utilizado para llevar a cabo esta función es la instalación en el depósito de un deshumidificador (comúnmente llamado desecador).

El depósito de expansión se conecta directamente con el desecador, el cual contiene gel de sílice. El desecador realiza dos funciones:

- Absorbe la humedad del aire aspirado por el transformador en fase de enfriamiento (construcción).
- Prohíbe la entrada de aire durante las pequeñas variaciones de carga del transformador, de forma que evita el contacto permanente del producto deshidratante con el aire atmosférico.

Periódicamente, se tiene que renovar el gel de sílice contenido en el desecador.

En el caso que nos ocupa se ha utilizado un desecador para el transformador ("Comem" tipo EM5DA).

1.4.3.5. Protecciones

1.4.3.5.1. Relé Buchholz

Cuando en el transformador se produce una anomalía por sobrecalentamiento de una parte o bien por un salto eléctrico entre partes activas o entre éstas y masa, tiene como consecuencia la descomposición del aceite y la del aislamiento sólido, dando lugar a que se generen gases en mayor o menor proporción en función de la gravedad de la anomalía.

Todos los gases que no se disuelven en el aceite tienden a dirigirse hacia la parte superior de la cuba, quedando retenidos por el relé Buchholz. Para que el relé Buchholz funcione correctamente, se necesita que sea ubicado en la cuba del transformador de forma adecuada, exactamente en la tubería de conexión entre depósito de expansión y cuba que además debe tener una pendiente del 3% aproximadamente.

En el funcionamiento del relé Buchholz hay que distinguir dos etapas:

a) Actuación de la alarma.

Ocurre cuando la anomalía que se ha producido en el transformador genera gases de forma lenta. Estos gases quedan retenidos en la parte superior del relé y desplazan al aceite haciendo que el flotador superior descienda y actúe el correspondiente contacto de alarma.

b) Actuación del disparo (desconexión del transformador).

Ocurre cuando la anomalía que se ha producido en el transformador genera de forma súbita una gran cantidad de gases que da lugar a que se produzca un flujo de aceite desde la cuba hacia el depósito de expansión y en consecuencia se desplace el flotador inferior haciendo actuar el contacto de disparo.

En la figura 21 puede observarse un relé Buchholz.

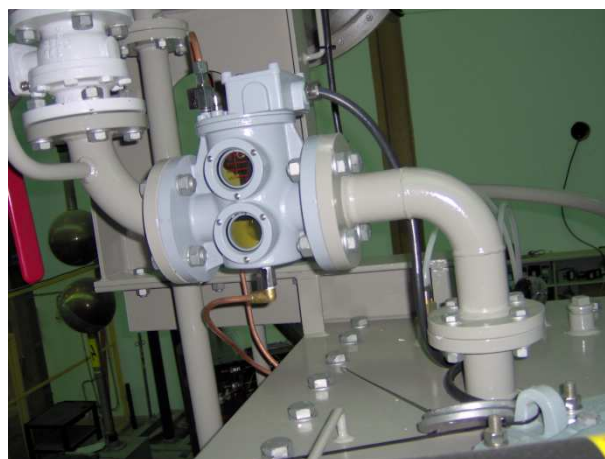


Fig. 21. Relé Buchholz.

El relé Buchholz es un aparato muy fiable, tanto en el caso de alarma como en el de disparo es necesario investigar la causa. En el caso de disparo nunca se debe poner nuevamente en servicio el transformador.

Por las características de este transformador, el relé Buchholz es un “Comem” tipo UNEL C1-HAO.

1.4.3.5.2. Dispositivo de recogida de gases

Este dispositivo se utiliza para facilitar la toma de muestras de los gases acumulados en el relé Buchholz. Mediante una tubería de interconexión transporta los gases hasta un punto accesible. De esta forma resulta mucho más sencillo recoger los gases del relé Buchholz y realizar su correspondiente análisis para estudiar las posibles causas de la anomalía que se ha producido.

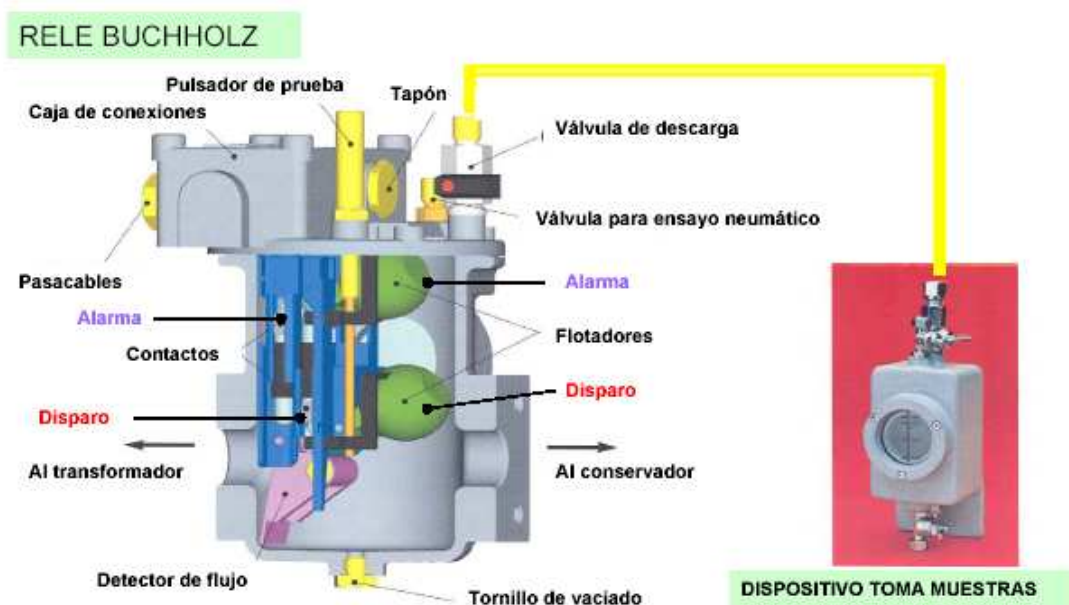


Fig. 22. Dispositivo de recogida de gases.

1.4.3.5.3. Válvula de sobrepresión

La válvula de sobrepresión es un dispositivo que se instala en la tapa del transformador para proteger a la cuba y a la tapa del mismo frente a los efectos de sobrepresiones, evitándose así su deformación o rotura. Estas sobrepresiones, que alcanzan un valor considerable, se generan cuando se produce un cortocircuito interno en el transformador.

La válvula sobrepresión está tarada para una presión de $0,35 \text{ Kg/cm}^2$ y su apertura total se produce cuando esta presión es alcanzada. La presión ejercida sobre el diafragma comprime el sistema de muelles y en este recorrido y de forma simultánea se acciona un resorte que a su vez provoca la actuación de contactos de señalización, dando una orden de disparo del transformador (desconexión).

La válvula retorna a su posición de reposo (sólo el diafragma y el sistema de muelles) cuando la presión en el interior de la cuba retorna a su valor normal.

Una vez que la válvula ha actuado, es necesario rearmar el indicador óptico y también los contactos de señalización.

En la figura 23 se puede observar un esquema de las partes de las que está constituida la válvula sobrepresión.

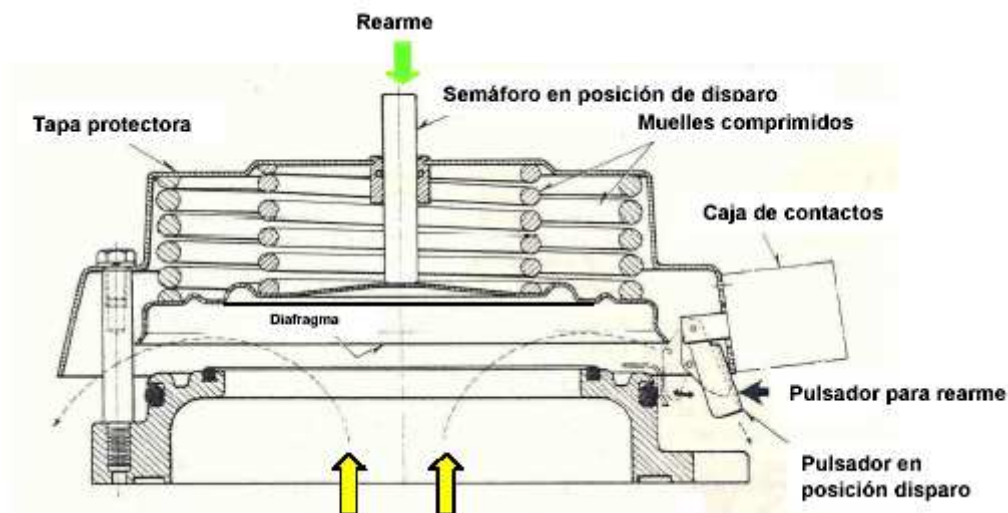


Fig. 23. Esquema Válvula de sobrepresión.

En nuestro caso, la válvula sobrepresión elegida es una “Comem” tipo 80-T.



Fig. 24. Válvula de sobrepresión “Comem” tipo 80-T.

1.4.3.5.4. Termómetro de aceite

Su misión es establecer una vigilancia sobre la temperatura del aceite superior.

El sensor de temperatura (sonda) se instala en la tapa del transformador, el cuál está conectado mediante un tubo capilar con el fuelle de medida que se encuentra en el interior de la caja del aparato, situada en una posición accesible.

Dispone de 2 contactos: alarma por alta temperatura y disparo (desconexión) por temperatura excesiva.

En nuestro caso, el termómetro elegido es un Qualitrol modelo AKM Serie 34.

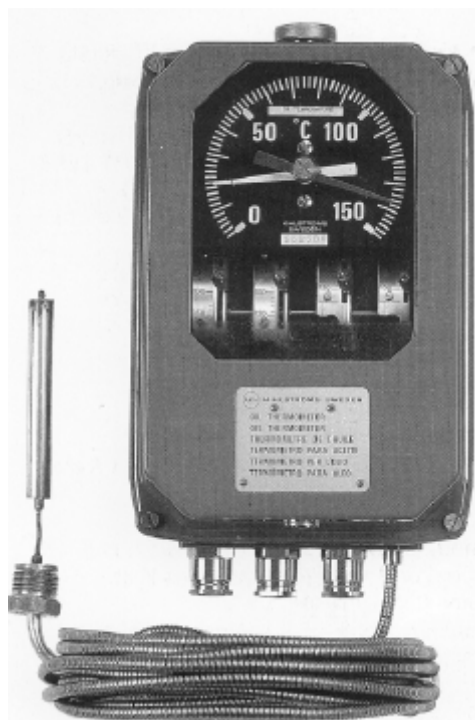


Fig. 25. Termómetro Qualitrol modelo AKM Serie 34.

1.4.3.5.5. Niveles de aceite

Se encuentran instalados en el depósito de expansión. Su accionamiento es del tipo magnético, disponen de indicación óptica y de contactos de señalización para niveles máximo y mínimo del aceite.

En nuestro caso el transformador va provisto de dos niveles idénticos en características; uno para aceite del regulador bajo carga y otro para el aceite del transformador. Los niveles magnéticos elegidos son “Comem” tipo LA14-XSS. En la figura 26 puede observarse este tipo de niveles magnéticos



Fig. 26. Nivel de aceite “Comem” tipo LA14-XSS.

1.4.3.5.6. Conmutador de vacío

Normalmente los transformadores llevan un arrollamiento con tensión variable dentro de un cierto margen y con un número determinado de escalones. Es la regulación de la tensión. Por ejemplo, un arrollamiento de AT con tensión $220 \pm 10 \times 1 \% \text{ kV}$, u otro de $69 \pm 2.5 \% \pm 5 \% \text{ kV}$.

En el primer caso la tensión puede tener 21 valores diferentes, desde $220 - 10 \%$ hasta $220 + 10 \%$, en saltos del 1% ($2,2 \text{ kV}$). En el segundo caso hay 5 valores posibles de la tensión, desde $69 - 5 \%$ hasta $69 + 5 \%$ kV. Los saltos son del $2,5 \%$, que corresponden a $1,725 \text{ kV}$.

Las distintas tensiones se consiguen aumentando o disminuyendo el número de espiras del arrollamiento. Recordar la proporcionalidad de espiras con tensiones.

Las espiras de regulación pueden estar en el mismo arrollamiento regulado, al que se sacan tomas, o bien en un arrollamiento independiente (arrollamiento de regulación).

La regulación puede ser en vacío o en carga.

En el primer caso el cambio de toma se hace desconectando previamente el transformador, por lo que este tipo de regulación se suele pedir cuando no son frecuentes los cambios de tensión o bien en transformadores más pequeños, en que no se justifica la regulación en carga por razones económicas.

La regulación en vacío se hace con un conmutador más simple y más barato. Normalmente las tomas se disponen en el centro del arrollamiento, o en dos zonas, caso de transformadores de columnas. El número de posiciones suele ser de 5. En la figura se representa el esquema de funcionamiento de un conmutador en vacío.

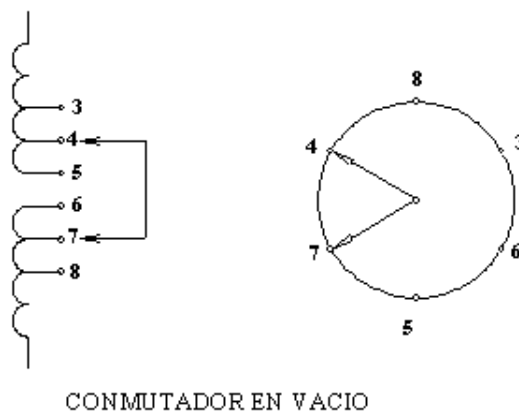


Fig. 27. Esquema de funcionamiento de un conmutador en vacío.

Los transformadores de potencia de cierto tamaño suelen llevar regulación en carga, de modo que el cambio de toma se hace sin desconectar el transformador de la red. El conmutador en carga está diseñado para transferir la corriente de carga de una toma a otra sin interrumpir el servicio. Esta operación se hace automáticamente cuando la tensión de la red varía, o bien manualmente actuando sobre un pulsador que sube o baja la tensión. Para ello el conmutador lleva un mando a motor adosado al mismo.

El conmutador se divide en dos partes principales: el ruptor, que se encuentra en la parte superior, y el selector, donde se conectan las tomas, que va en la parte inferior.

La regulación en carga se dispone normalmente en AT en el lado de neutro, por dar lugar a diseños más simples y más baratos, aunque en ocasiones se pide en BT.

El conmutador de vacío que hemos colocado en nuestro transformador es el ASP Tipo FII Triángulo 52 kV 315 A 5 posiciones.

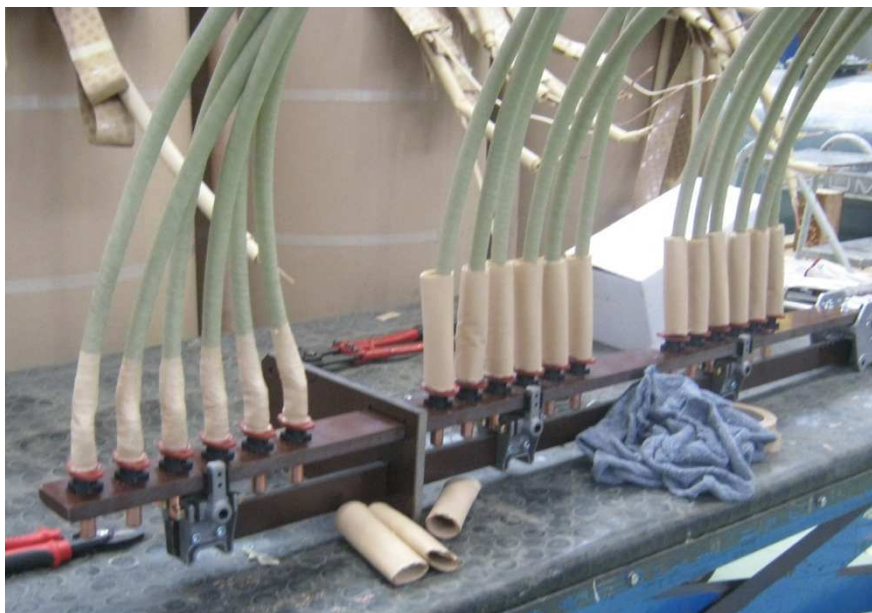


Fig. 28. Conmutador de vacío, conexión en triángulo a 52 kV 315 A y 5 posiciones.

1.5. Introducción del método de los elementos finitos

El **método de los elementos finitos** (MEF en castellano o FEM en inglés) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería y física.

El MEF está pensado para ser usado en computadoras y permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas. El MEF se usa en el diseño y mejora de productos y aplicaciones industriales, así como en la simulación de sistemas físicos y biológicos complejos. La variedad de problemas a los que puede aplicarse ha crecido enormemente, siendo el requisito básico que las ecuaciones constitutivas y ecuaciones de evolución temporal del problema a considerar sean conocidas de antemano.

Los programas de elementos finitos se componen en tres partes de software independiente:

- Preprocesador, que permite realizar el modelo en dos o tres dimensiones o importarlo de uno ya realizado en CAD, mallarlo (definiendo el tipo de elemento en cada subdominio) y establecer las condiciones de contorno.



- Programa de análisis o código de resolución del sistema de ecuaciones, diferentes en función del número de variables espaciales y dependencias temporales.
- Postprocesador, que permite realizar los cálculos posteriores necesarios para el análisis final del problema partiendo de las soluciones originales.



Capítulo2

CÁLCULOS DEL TRANSFORMADOR EN LÍQUIDO AISLANTE DE 45/20kV CON POTENCIA DE 5MVA



Capítulo 2. Cálculos del transformador en líquido aislante de 45/20kV con potencia de 5MVA

2. CÁLCULOS DEL TRANSFORMADOR EN LÍQUIDO AISLANTE DE 45/20kV CON POTENCIA 5 MVA

2.1. Circuito magnético

Selección y cálculos del núcleo magnético.

- La selección del núcleo magnético depende de una serie de parámetros como son:
- Potencia del transformador.
- La impedancia de cortocircuito porcentual.
- La altura de transporte.
- La capacidad para soportar sobreexcitación (tensiones superiores a la tensión asignada en una toma determinada).
- La calidad de la chapa magnética.

Para el diseño del núcleo magnético se debe tener en cuenta que un incremento en el diámetro aumenta el área de la sección transversal del núcleo, con lo que se incrementa la tensión por espira y se reduce el número de vueltas de los arrollamientos. La reactancia de cortocircuito porcentual entre arrollamientos es directamente proporcional al número de vueltas y a los diámetros de los diferentes arrollamientos y es inversamente proporcional a la tensión por espira y a la altura de las bobinas. Por lo tanto si se produce un incremento en el diámetro del núcleo es necesario reducir la altura de los arrollamientos e incrementar las dimensiones en dirección radial, es decir se debe reducir la altura del núcleo e incrementar el diámetro de las bobinas. Reducir la altura del núcleo e incrementar su diámetro se traduce en un aumento de peso del núcleo, más acero, con lo que se incrementan las pérdidas en vacío del transformador. Por otro lado, reducir el número de vueltas en los devanados significa utilizar menos cobre y reducir las pérdidas en carga del transformador. De la misma manera reducir el diámetro del núcleo se traduce en una reducción en la cantidad de acero y por lo tanto menos pérdidas en vacío pero a su vez aumenta la cantidad de cobre y las pérdidas en carga.

En el diseño del núcleo magnético comienza eligiendo:

- El valor de la tensión por espira.
- El valor de la inducción.



2.1.1. Selección de la tensión por espira

Para potencias de hasta unos 100-150 MVA, transformadores de diferentes tipos y tensiones tienen núcleos y arrollamientos semejantes. La sección transversal del núcleo aumenta proporcionalmente con la raíz cuadrada de la potencia aparente, mientras que el número de espiras en los arrollamientos de AT se mantiene constante, aproximadamente. Para mantener constante la inducción (densidad de flujo) la tensión por espira aumenta también proporcionalmente a la raíz cuadrada de la potencia aparente.

$$\frac{U}{N} = 4,44 \cdot f \cdot B \cdot S_{FE} \quad (2)$$

Donde:

- U : Tensión (V)
- N : Número de espiras
- f : Frecuencia (Hz)
- B : Inducción magnética (T)
- S_{FE} : Superficie del hierro (m²)

En el rango de potencias que nos ocupa (5 MVA), para calcular la tensión por espira de un arrollamiento de una manera aproximada, teniendo en cuenta su relación con la potencia aparente, se utiliza la siguiente expresión:

$$E_t = k \sqrt{S_n} \quad (3)$$

Donde:

- E_t : Tensión por espira.
- S_n : Potencia aparente del transformador (kVA).
- k : Constante que tendremos que elegir.

Para arrollamientos de cobre el rango de valores de k estará entre 0,37 y 0,55 mientras que para arrollamientos de aluminio k tomará un valor entre 0,32 y 0,35. Esta forma de cálculo servirá para hacer un primer diseño del resto de los parámetros del transformador, en caso de que los valores obtenidos no cumplan con los requerimientos se deberá revisar el valor de k .



2.1.2. Selección de la inducción

La selección de la inducción del núcleo tiene una gran influencia sobre el tamaño total, el coste de los materiales y el rendimiento de un transformador.

La inducción máxima (B_{mp}) está limitada por las condiciones de sobreexcitación indicadas por la chapa. La pendiente de la curva B-H del material M5 (chapa magnética laminada en frío de grano orientado) empeora significativamente a partir de 1,9 T, con lo que para pequeños incrementos en la inducción la corriente magnetizante aumenta bastante. En condiciones de sobretensión aumenta la densidad de flujo en el núcleo. Para sobreexcitaciones de un porcentaje determinado (α %), una pauta general que se sigue para calcular la inducción máxima es la que se obtiene de la siguiente ecuación:

$$B_{mp} = 1,9 / (1 + \alpha/100) \quad (4)$$

En Sistemas de potencia donde la tensión se mantiene prácticamente constante, es decir, que las fluctuaciones de tensión no sean significativas, se especifica un porcentaje del 10% para realizar el cálculo obteniéndose una inducción máxima aproximada de 1,71 T. Este valor puede utilizarse siempre que la temperatura y los niveles de ruido estén dentro de los límites permitidos.

Cuando un transformador está sometido a una sobreexcitación (frecuentemente debida a una sobretensión), el núcleo contiene suficiente flujo como para saturarlo. Durante una parte del ciclo el flujo se sale del núcleo y puede producir pérdidas elevadas en las chapas magnéticas. Si la sobreexcitación es elevada y de larga duración, puede provocar efectos perjudiciales sobre las láminas de acero del núcleo y elevadas temperaturas, tanto en los arrollamientos como en las partes estructurales del transformador. Estas láminas pueden soportar fácilmente temperaturas en torno a los 800 °C ya que están recocidas a esta temperatura durante su fabricación. El problema se presenta en los aislamientos y en los tornillos que pueden soportar temperaturas menores y pueden resultar seriamente dañados.

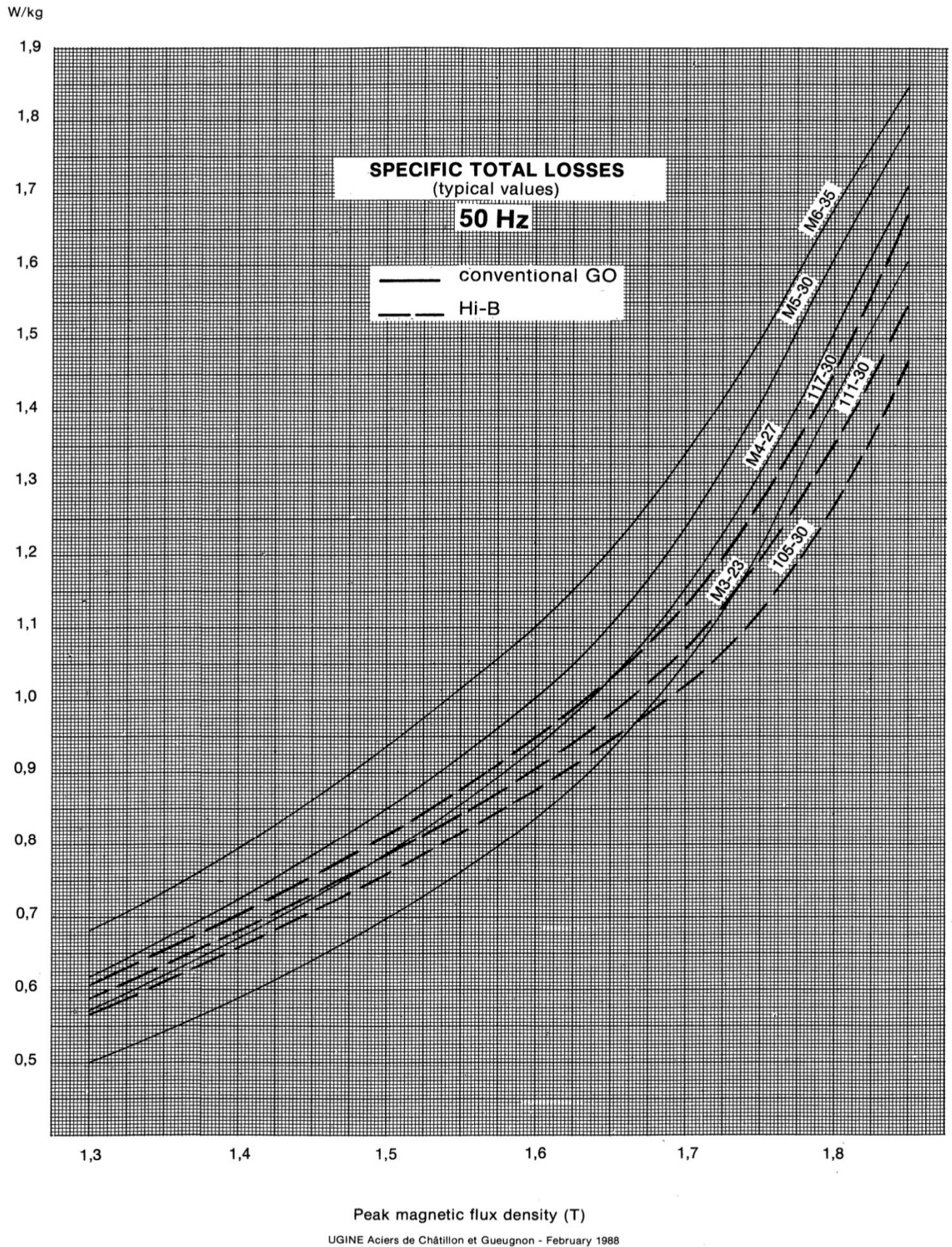


Fig. 29. Curva de las pérdidas específicas totales en las diferentes chapas magnéticas.

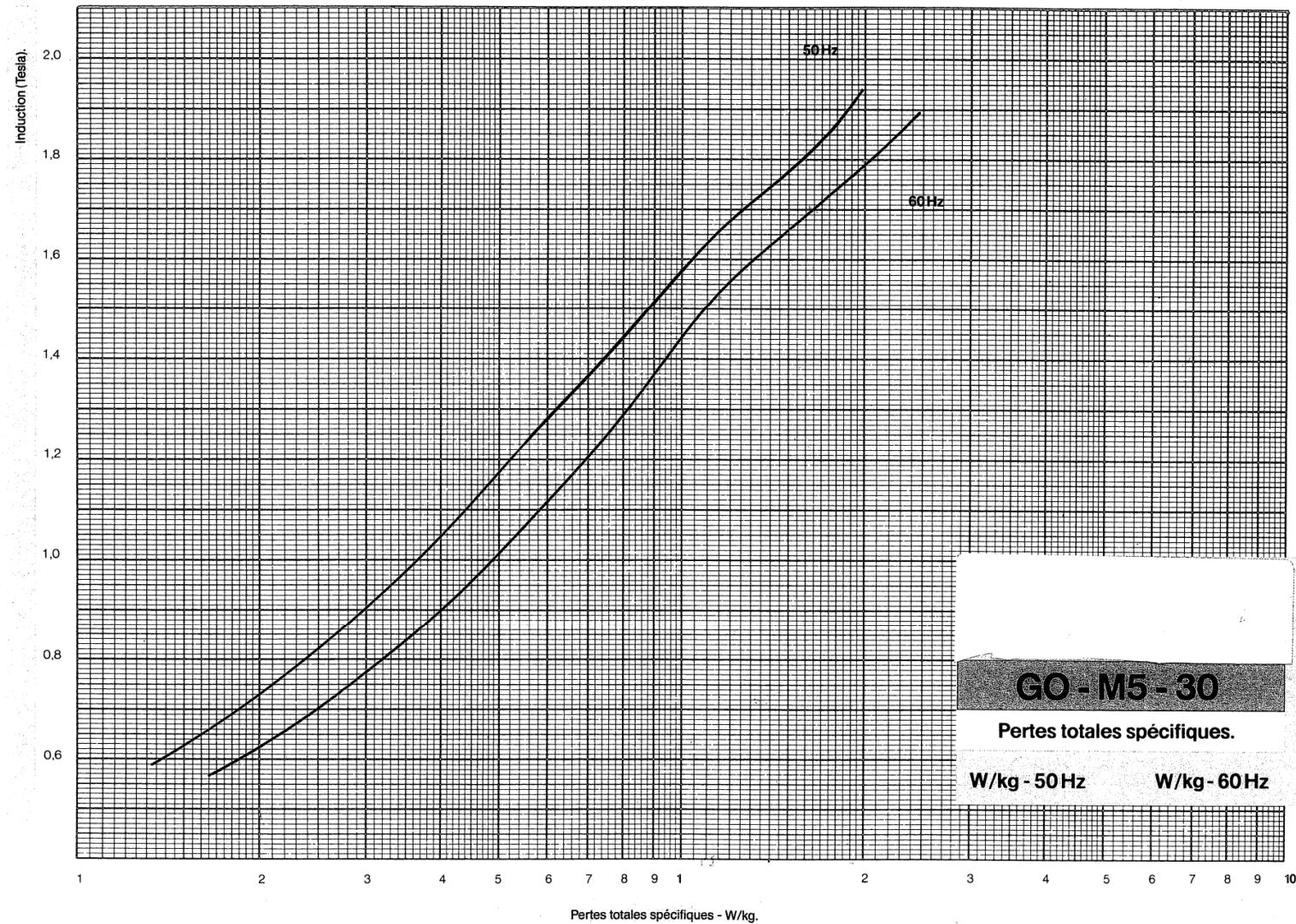


Fig. 30. Curva de las pérdidas específicas totales en W/kg respecto a la inducción de la chapa M5 a 50 Hz y 60 Hz.

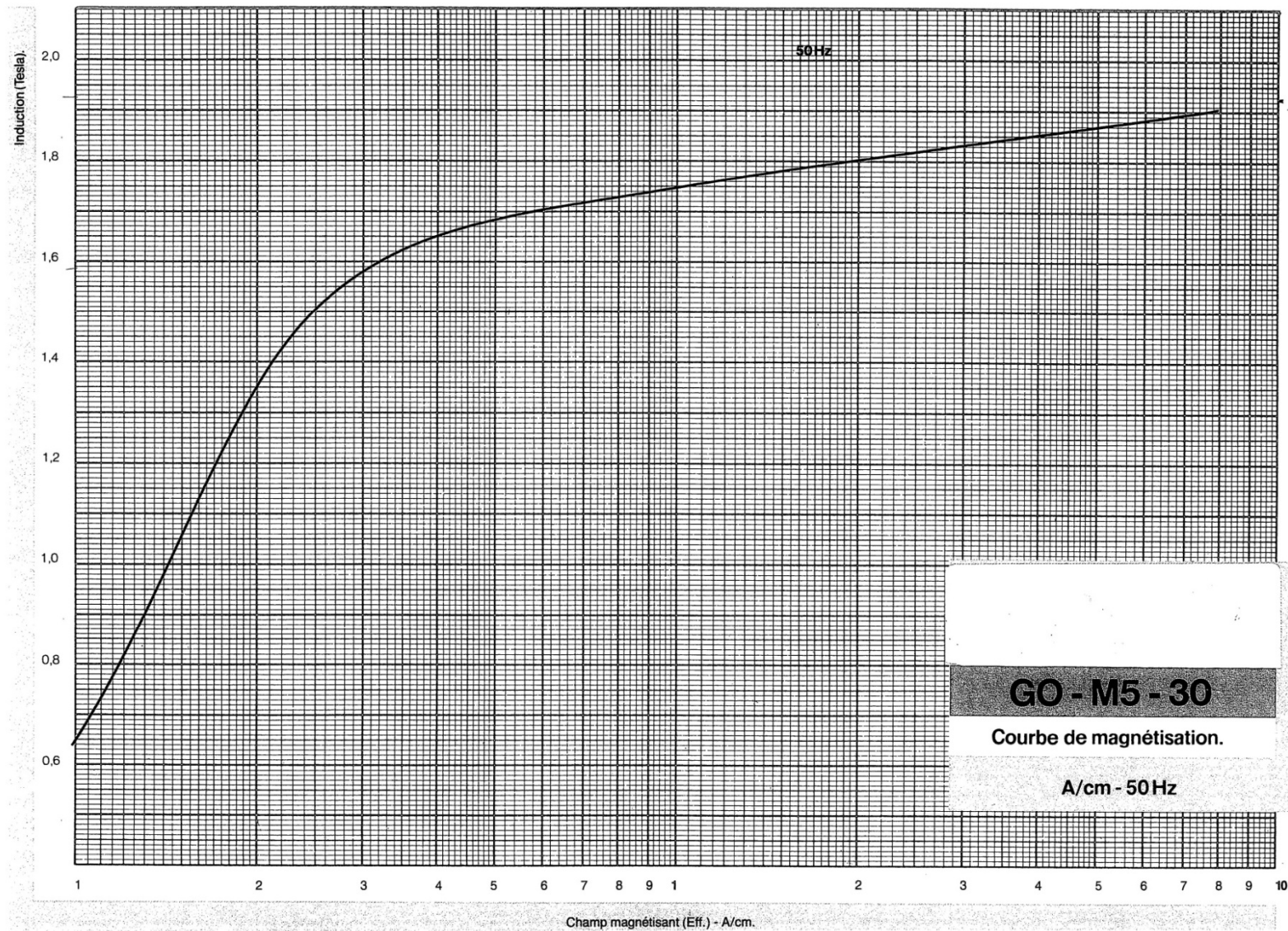


Fig. 31. Curva de magnetización en A/cm respecto a la inducción de la chapa M5 a 50 Hz.

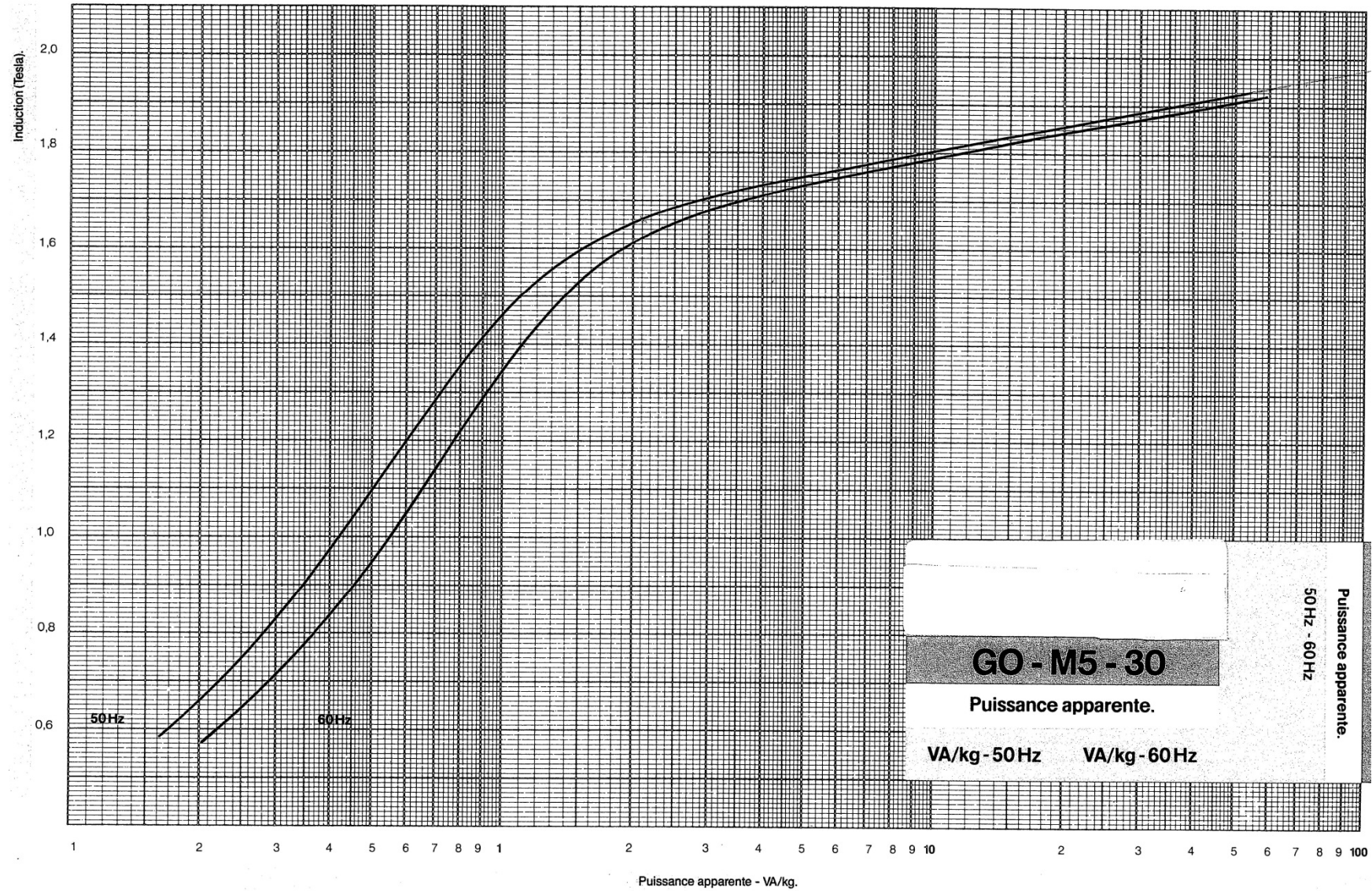


Fig. 32. Curva de las pérdidas específicas totales en VA/kg respecto a la inducción de la chapa M5 a 50 Hz y 60 Hz.



2.1.3. Datos constructivos:

Calidad de chapa:	M5 x 0,3
Diámetro nominal núcleo:	350 mm
Sección bruta:	906 cm ²
Factor utilización:	0,96
Altura ventana (H):	1020 mm
Distancia entre ejes:	700 mm
Peso neto:	4448 kg
Número de escalones:	12

Características generales de la chapa magnética:

	Conventional G.O. steels	Hi-B steels
Saturation induction (T)	2,03	
Coercive field (A/m)	5	
Curie point (° C)	745	
Density (kg/m ³)	7 650	
Specific resistivity (μΩ.cm)	47	
Ultimate tensile strength longitudinally transversally (MPa)*	350 400	
Yield point longitudinally transversally (MPa)*	300 330	
Elongation longitudinally transversally (%)	12 50	
Hardness (HV 10)	165	170
stacking factor (%)		
thickness 0,23 mm	96,0	—
thickness 0,27 mm	96,5	—
thickness 0,30 mm	97,0	97,5
thickness 0,35 mm	97,5	—

* 1 MPa = 1 N/mm²

Tabla 1. Características generales de la chapa M5 y chapa laser.



El núcleo magnético queda diseñado de la siguiente forma:

Escalón	Ancho escalón	Grosor escalón
1	340	82.8
2	330	33.6
3	320	25.2
4	310	20.4
5	290	33.6
6	280	14.4
7	260	24
8	240	20.4
9	220	16.8
10	190	21.6
11	170	12
12	140	15.6

Tabla 2. Diseño del núcleo magnético calculado.

2.1.4. Datos eléctricos

Frecuencia:	50 Hz
Inducción:	1,704 Teslas
Voltios por espira:	33,567 V/espira
Pérdidas específicas:	1,461 W/kg (dato de la curva M5)
Pérdidas en el hierro:	7000W (7 kW)

2.2. Arrollamiento de B.T.

Aislamiento entre núcleo y arrollamiento de B.T.

Tolerancia: 3mm

Tubo de cartón T-IV = PSP de $\varnothing_{\text{interior}} = 355 \text{ mm}$, $\varnothing_{\text{exterior}} = 361 \text{ mm}$ y altura (H) 1000 mm. (Ver plano 1 (TUBOS ARROLLAMIENTO) en el anexo).

$$\text{Total de aislamiento} = 3 (\text{tolerancia} [\text{mm}]) + 6 (\text{tubo}) + 6 (\text{tira } 9 \times 6 \times 925 \text{ mm}) = 15 \text{ mm}$$

$\varnothing_{\text{interior arrollamiento BT}} = 380 \text{ mm}$. (Ver plano 1).

Tensión: 20000 V.

Potencia: 5000 kVA (se realizan todos los cálculos referidos a esta potencia en régimen ONAN).



Grupo conexión: Dyn11.

$$\text{Intensidad línea} = \frac{P}{\sqrt{3} V} = \frac{5 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3} \approx 145 \text{ A} \quad (5)$$

Intensidad fase = 145 A.

Conductor: 2 pletinas de cobre de dimensiones 10,6 x 2,12 mm aisladas entre sí con papel "Kraft" de 0,5 mm.

Dimensiones constructivas: 22,3 x 2,67 mm.

Sección: $2 \times 22,11 \text{ mm}^2 = 44,22 \text{ mm}^2$ (destacar que la sección empleada, 22,11 mm², se obtiene de tablas estandarizadas para estas dimensiones de pletina, las cuales tienen en cuenta el "redondeamiento" explicado en el apartado 1.4.2 de este documento).

Densidad de corriente (J): 3,26 A / mm²

Número de espiras: 344

Tipo de arrollamiento: 10 capas distribuidas de la siguiente forma:

3 capas de 34 espiras / capa.

4 capas de 34 espiras / capa.

3 capas de 34 espiras / capa.

Principio eléctrico al exterior.

Dirección: izquierda DIN (punto – plato).

Aislamientos:

Entre capas 3 DDP de 0,25 mm.

Entre capas 3-4 y 7-8, 2 DDP de 0,25 + tira de refrigeración de 9x5x925mm.

Dimensiones:

Altura eléctrica: $35 \times 22,3 = 780 \text{ mm}$.

Altura mecánica: $36 \times 22,3 = 803 \text{ mm}$.

Calce superior e inferior: 75 / 96 mm (ver plano 2 (DETALLE ARROLLAMIENTO) en el anexo).

Altura mecánica con calce: $(75 \times 2) + 780 = 930 \text{ mm}$

$$Grueso_{arrollamiento} = (2,67 \cdot 10) + (5,5 \cdot 2) + (7 \cdot 3 \cdot 0,25 \cdot 1,2) + (2 \cdot 2 \cdot 0,25 \cdot 1,2) = 45 \text{ mm}$$



$\varnothing_{\text{interior arrollamiento BT}} = 380 \text{ mm.}$

$\varnothing_{\text{exterior arrollamiento BT}} = 470 \text{ mm.}$

$$\text{Peso} = 83,88 \times \varnothing_{\text{medio arroll}} \times \Pi \times N^{\circ}_{\text{espiras}} \times \text{Sección} \times 10^{-6} \quad (6)$$

Peso conductor (3 fases): 552 kg.

$$\text{Longitud} = \varnothing_{\text{medio arroll}} \times \Pi \times N^{\circ}_{\text{espiras}} \times n_{\text{conductor / espiral}} = 425 \cdot \Pi \cdot 350 \cdot 2 \cong 940 \text{ mm} \quad (7)$$

Longitud= 940 m; Longitud (3 fases)= 2820 m

2.3. Arrollamiento de AT Principal

Aislamiento BT / AT:

$$\begin{aligned} \text{Total de aislamiento} &= 6 (\text{tira } 9 \times 6 \times 925 \text{ mm}) + 3 (\text{tubo}) + 6 (\text{tira } 9 \times 6 \times 925 \text{ mm}) \\ &+ 3 (\text{tubo}) + 6 (\text{tira } 9 \times 6 \times 925 \text{ mm}) = 25,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

Tira 6 mm (persiana refrigeración 9x6x925 mm); (S/p: 2(DETALLE ARROLLAMIENTO) ver en el anexo).

Tubo 3 mm (483 x 489 x 925 mm); (S/p: 1).

Tira 6 mm (persiana refrigeración 9x6x925 mm); (S/p: 2).

Tira 6 mm (persiana refrigeración 9x6x925 mm); (S/p: 2).

Tira 6 mm (persiana refrigeración 9x6x925 mm); (S/p: 2).

Tubo 3 mm (502 x 508 x 925 mm); (S/p: 2).

Tira 6 mm (persiana refrigeración 9x6x925 mm); (S/p: 2).

$\varnothing_{\text{interior arrollamiento AT}} = 521 \text{ mm; (S/p: 2).}$

Tensiones:

(POS +).....47 250 V

(POS N).....45 000 V

(POS -).....42 750 V

Potencia: 5000 kVA

Grupo conexión: Dyn11

Intensidades línea:

$$\text{Posición (+): } \frac{P}{\sqrt{3} \times V} = \frac{5 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 47,25 \cdot 10^3} \cong 61,10 \text{ A}$$

Posición (N): 64,15 A

Posición (-): 67,53 A

Intensidades fase:

$$\text{Intensidad fase} = \text{Intensidad de línea} / \sqrt{3} \quad (8)$$

Posición (+): 35 A

Posición (N): 37 A

Posición (-): 39 A

En la figura 33 se muestra los valores de las intensidades, las tensiones en cada posición del conmutador de vacío y un esquema de conexión.

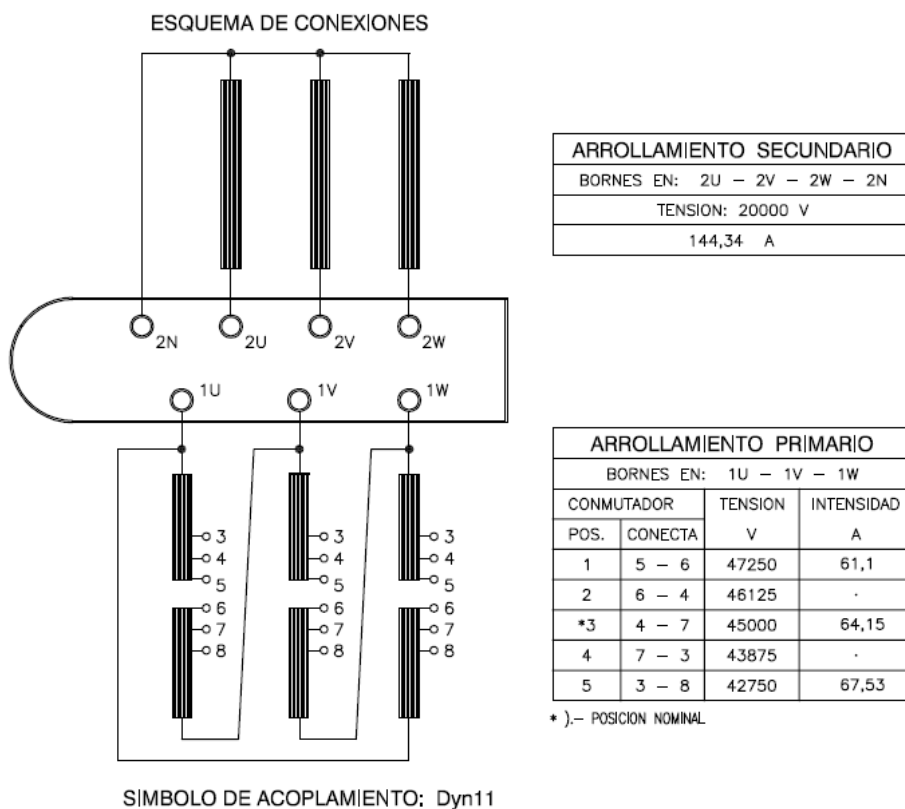


Fig. 33. Esquema de conexión del transformador.

Conductor: 1 pletina de cobre de dimensiones 7,1x1,6 mm. aislada con papel “Kraft” de 0,5 mm.



Dimensiones constructivas: 7,65 x 2,15 mm.

Sección: 11,14 mm² (destacar que la sección empleada 11,14 mm², se obtiene de tablas estandarizadas para estas dimensiones de pletina, las cuales tienen en cuenta el “redondeamiento” explicado en el apartado 1.4.2 de este documento).

Densidad de corriente (J):

Posición (+): 3,161 \approx 3,1418 A / mm²

Posición (N): 3,317 \approx 3,321 A / mm²

Posición (-): 3,49 \approx 3,50 A / mm²

Número de espiras: 1408.

Tipo de arrollamiento: formado por 14 capas distribuidas de la siguiente manera:

1 capa de 99 espiras / capa

5 capas de 101 espiras / capa

2 capas de 100 espiras / capa (capas de conmutación)

5 capas de 101 espiras / capa

1 capa de 99 espiras / capa

-Salidas: (Ver esquema de conexión interna de conmutación)

Salidas en espiras 637, 670

Corte en espira 704

Salidas en espiras 738, 771

Dirección: izquierda DIN (punto – plato).

Principio eléctrico al exterior (ver esquema de conexión interna de conmutación)

Atención: en la capa 8 cambia el sentido de los arrollamientos (ver esquema de conexión interna de conmutación)

Final del arrollamiento: interior parte superior.

Aislamientos:

Entre capas 6 DDP de 0,25 mm.

Entre capas 3-4, 6 DDP de 0,25 mm + tira refrigeración de 9x6x925 mm.

Entre capas 7-8, 6 DDP de 0,25 mm + tira refrigeración de 9x8x925 mm.

Entre capas 10-11, 6 DDP de 0,25 mm+ tira refrigeración de 9x6x925mm.



Dimensiones:

Altura eléctrica: $101 \times 7,65 = 773 \text{ mm}$.

Altura mecánica: $102 \times 7,65 = 780 \text{ mm}$.

Calce superior e inferior: $75 / 83 \text{ mm}$.

Altura mecánica con calce: $(75 \times 2) + 780 = 930 \text{ mm}$.

$$\text{Grueso} = (2,15 \cdot 14) + (6,5 \cdot 2) + 8,5 + (13 \cdot 6 \cdot 0,25 \cdot 1,2) = 75 \text{ mm} \quad (9)$$

- $\varnothing_{\text{interior arrollamiento AT}} = 521 \text{ mm}$.

- $\varnothing_{\text{medio arrollamiento AT}} = 596 \text{ mm}$.

- $\varnothing_{\text{exterior arrollamiento AT}} = 671 \text{ mm}$.

Sobre el arrollamiento: tira de $9 \times 6 \times 925$ + tubo de 2 mm ($684 \times 688 \times 925$)

$$L_{\text{CONDUCTOR}} = n^{\circ} \text{ fases} \times (n^{\circ}_{\text{espiras}} + 3) \times \varnothing_{\text{medio arroll}} \times \Pi = 3 \cdot (1408 + 3) \cdot 596 \cdot \Pi \cong 7980 \text{ mm}$$

(10)

$$\text{Peso}_{\text{CONDUCTOR}} = L_{\text{conductor}} \times \text{Sección} \times \text{densidad Cu}(\delta) \quad (11)$$

$$\text{Peso}_{\text{CONDUCTOR}} = 7,98 \text{ m} \cdot 11,14 \text{ mm}^2 \cdot 8,9 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \cong 792 \text{ kg}$$

También se puede calcular el peso y longitud de esta manera:

$$\text{Peso} = 83,88 \times \varnothing_{\text{medio arroll}} \times \Pi \times N^{\circ}_{\text{espiras}} \times \text{Sección} \times 10^{-6}$$

$$\text{Peso} = 83,88 \cdot 596 \cdot 1420 \cdot 11,14 \cdot 10^{-6} = 784,13 \text{ kg} \cong 792 \text{ kg}$$

$$\text{Longitud} = \varnothing_{\text{medio arroll}} \times \Pi \times N^{\circ}_{\text{espiras}} \times n_{\text{conductor} / \text{espiral}} = 596 \cdot \Pi \cdot 1408 \cdot 1 \cong 2659 \text{ mm}$$

Longitud=2659 m; Longitud (3 fases)=7980 mm.

En la siguiente página he dibujado la conexión de la regulación en vacío que contiene el arrollamiento de AT para facilitar el trabajo al bobinador para cortar y conexionar con el conmutador de vacío.

Esquema de la regulación del arrollamiento de A.T.:

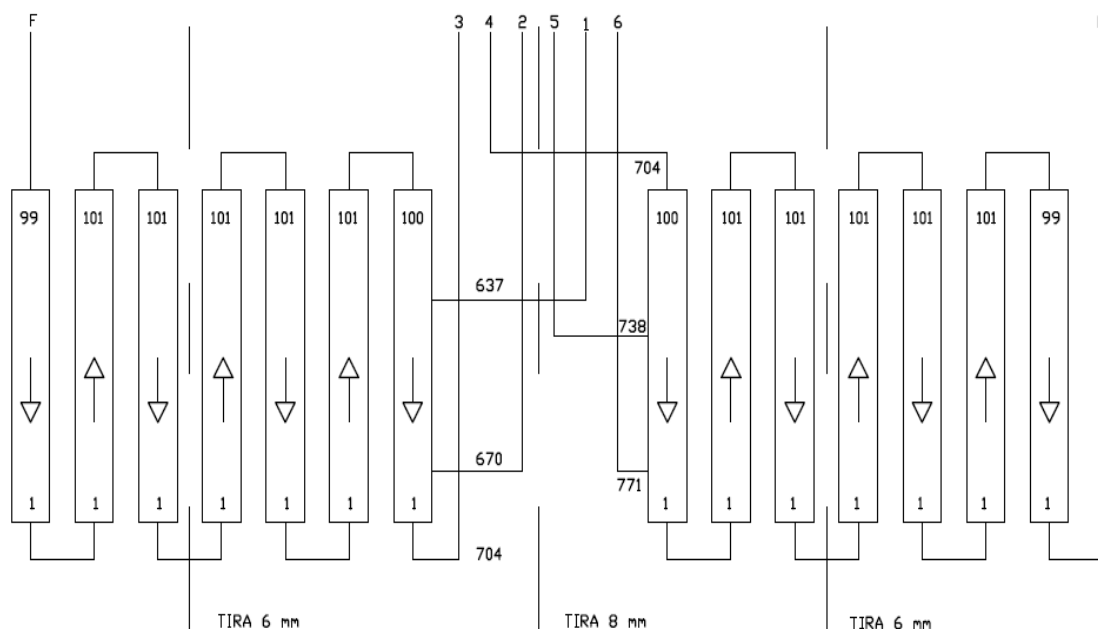


Fig. 34. Esquema de regulación del arrollamiento de A.T.

mm	1,12	1,18	1,25	1,32	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,12	2,24	2,36	2,50	2,65	2,80	3,00	3,15	3,35	3,55	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,30	5,60	6,00	6,30	6,70	7,10	7,50	8,00	8,50	9,00	9,50	10,00	10,60	11,20	
2,50																																										
2,65																																										
2,80																																										
3,00																																										
3,15																																										
3,35																																										
3,55																																										
3,75																																										
4,00	4,26	4,50	4,78	5,06	5,38	5,78	6,18	6,44	6,84	7,24	7,64	8,12	8,60	8,88	9,44	10,04	10,64	11,44	12,04																							
4,25	4,54	4,80	5,09	5,39	5,73	6,16	6,58	6,87	7,29	7,72	8,14	8,65	9,16	9,47	10,07	10,70	11,34	12,19	12,83	13,68																						
4,50	4,82	5,09	5,41	5,72	6,08	6,53	6,98	7,29	7,74	8,19	8,64	9,18	9,72	10,06	10,69	11,37	12,04	12,94	13,62	14,52	15,42																					
4,75	5,10	5,39	5,72	6,05	6,43	6,91	7,38	7,72	8,19	8,67	9,14	9,71	10,28	10,65	11,32	12,03	12,74	13,69	14,40	15,35	16,30	16,95																				
5,00	5,38	5,68	6,03	6,38	6,78	7,28	7,78	8,14	8,64	9,14	9,64	10,24	10,84	11,24	11,94	12,69	13,44	14,44	15,19	16,19	17,19	17,89	19,14																			
5,30	5,72	6,03	6,41	6,78	7,20	7,73	8,26	8,65	9,18	9,71	10,24	10,88	11,51	11,95	12,69	13,49	14,28	15,34	16,14	17,20	18,26	19,02	20,34	21,67																		
5,60	6,05	6,39	6,78	7,17	7,62	8,18	8,74	9,16	9,72	10,28	10,84	11,51	12,18	12,66	13,44	14,28	15,12	16,24	17,08	18,20	19,32	20,14	21,54	22,94	24,34																	
6,00	6,50	6,86	7,28	7,70	8,18	8,78	9,38	9,84	10,44	11,04	11,64	12,36	13,08	13,60	14,44	15,34	16,24	17,44	18,34	19,54	20,74	21,64	23,14	24,64	26,14	27,64																
6,30	6,84	7,21	7,66	8,10	8,60	9,23	9,86	10,35	10,98	11,61	12,24	13,00	13,75	14,31	15,19	16,14	17,08	18,34	19,29	20,55	21,81	22,77	24,34	25,92	27,49	29,07	30,64															
6,70	7,28	7,69	8,16	8,62	9,16	9,83	10,50	11,03	11,70	12,37	13,04	13,84	14,65	15,25	16,19	17,20	18,20	19,54	20,55	21,89	23,23	24,27	25,94	27,62	29,29	30,97	32,64	34,65														
7,10	7,73	8,16	8,66	9,15	9,72	10,43	11,14	11,71	12,42	13,13	13,84	14,69	15,54	16,20	17,19	18,26	19,32	20,74	21,81	23,23	24,65	25,77	27,54	29,32	31,09	32,87	34,64	36,77	38,90													
7,50	8,18	8,63	9,16	9,68	10,28	11,03	11,78	12,39	13,14	13,89	14,64	15,54	16,44	17,14	18,19	19,32	20,44	21,94	23,07	24,57	26,07	27,27	29,14	31,02	32,89	34,77	36,64	38,89	41,14	44,14												
8,00	8,74	9,22	9,78	10,34	10,98	11,78	12,58	13,24	14,04	14,84	15,64	16,60	17,56	18,32	19,44	20,64	21,84	23,44	24,64	26,24	27,84	29,14	31,14	33,14	35,14	37,14	39,14	41,54	43,94	47,14	49,54											
8,50	9,30	9,81	10,41	11,00	11,68	12,53	13,38	14,09	14,94	15,79	16,64	17,66	18,68	19,50	20,69	21,97	23,24	24,94	26,22	27,92	29,62	31,02	33,14	35,27	37,39	39,52	41,64	44,19	46,74	50,14	52,69											
9,00	9,86	10,40	11,03	11,66	12,38	13,28	14,18	14,94	15,84	16,74	17,64	18,72	19,80	20,68	21,94	23,29	24,64	26,44	27,79	29,59	31,39	32,89	35,14	37,39	39,64	41,89	44,14	46,84	49,54	53,14	55,84	59,44	63,04	66,64	71,14	75,64	80,14					
9,50	10,42	10,99	11,66	12,32	13,08	14,03	14,98	15,79	16,74	17,69	18,64	19,78	20,92	21,86	23,19	24,62	26,04	27,94	29,37	31,27	33,17	34,77	37,14	39,52	41,89	44,27	46,64	49,49	52,34	56,14	58,99	62,79	66,59	70,39	75,14	79,89	84,64	89,39				
10,00	10,98	11,58	12,28	12,98	13,78	14,78	15,78	16,64	17,64	18,64	19,64	20,84	22,04	23,04	24,44	25,94	27,44	29,44	30,94	32,94	34,94	36,64	39,14	41,64	44,14	46,64	49,14	52,14	55,14	59,14	62,14	66,14	70,14	74,14	79,14	84,14	89,14	94,14	99,14			
10,60	11,65	12,29	13,03	13,77	14,62	15,68	16,74	17,66	18,72	19,78	20,84	22,11	23,38	24,46	25,94	27,53	29,12	31,24	32,83	34,95	37,07	38,89	41,54	44,19	46,84	49,49	52,14	55,32	58,50	62,74	65,92	70,16	74,40	78,64	83,94	89,24	94,54	99,84	105,14	111,50		
11,20	12,32	13,00	13,78	14,56	15,46	16,58	17,70	18,68	19,80	20,92	22,04	23,38	24,73	25,87	27,44	29,12	30,80	33,04	34,72	36,96	39,07	41,14	43,94	46,74	49,54	52,34	55,14	58,50	61,86	66,34	69,70	74,18	78,66	83,14	88,74	94,34	99,94	105,54	111,14	117,86	124,58	
11,80	13,00	13,70	14,53	15,36	16,30	17,48	18,66	19,70	20,88	22,06	23,24	24,66	26,07	27,29	28,94	30,71	32,48	34,84	36,61	38,97	41,33	43,39	46,34	49,29	52,24	55,19	58,14	61,68	65,22	69,94	73,48	78,20	82,92	87,64	93,54	99,44	105,34	111,24	117,14	124,22	131,30	
12,50					17,28	18,53	19,78	20,89	22,14	23,39	24,64	26,14	27,64	28,94	30,69	32,57	34,44	36,94	38,82	41,42	43,82	46,02	49,14	52,27	55,39	58,52	61,64	65,39	69,14	74,14	77,89	82,89	87,89	92,89	99,14	105,39	111,64	117,89	124,14	131,64	139,14	
13,20						19,58	20,90	22,08	23,40	24,72	26,04	27,62	29,21	30,59	32,44	34,42	36,40	39,04	41,02	43,66	46,30	48,64	51,94	55,24	58,54	61,84	65,14	69,10	73,06	78,34	82,30	87,58	92,86	98,14	104,74	111,34	117,94	124,54	131,14	139,06		
13,60						20,18	21,54	22,76	24,12	25,48	26,84	28,47	30,10	31,54	33,44	35,48	37,52	40,24	42,28	45,00	47,72	50,14	53,54	56,94	60,34	63,74	67,14	71,22	75,30	80,74	84,82	90,26	95,70	101,14	107,94	114,74	121,54	128,34	135,14			
14,00							21,18	23,44	24,84	26,24	27,64	29,32	31,00	32,48	34,44	36,54	38,64	41,44	43,54	46,34	49,14	51,64	55,14	58,64	62,14	65,64	69,14	73,34	77,54	83,14	87,34	92,94	98,54	104,14	111,14	118,14	125,14	132,14	139,14			
14,50							22,98	24,29	25,74	27,19	28,64	30,38	32,12	33,66	35,69	37,87	40,04	42,94	45,12	48,02	50,92	53,52	57,14	60,77	64,39	68,02	71,64	75,99	80,34	86,14	90,49	96,29	102,09	107,89	115,14	122,39	129,64	136,89				
15,00								25,14	26,64	28,14	29,64	31,44	33,24	34,84	36,94	39,19	41,44	44,44	46,69	49,69	52,69	55,39	59,14	62,89	66,64	70,39	74,14	78,64	83,14	89,14	93,64	99,64	105,64	111,64	119,14	126,64						
15,50								25,99	27,54	29,09	30,64	32,50	34,36	36,02	38,19	40,52	42,84	45,94	48,27	51,37	54,47	57,27	61,14	65,02	68,89	72,77	76,64	81,29	85,94	92,14	96,79	102,99	109,19	115,39	123,14							
16,00									28,44	30,04	31,64	33,56	35,48	37,20	39,44	41,84	44,24	47,44	49,84	53,04	56,24	59,14	63,14	67,14	71,14	75,14	79,14	83,94	88,74	95,14	99,94	106,34	112,74	119,14								
16,50									29,34	30,99	32,64	34,62	36,60	38,38	40,69	43,17	45,64	48,94	51,42	54,72	58,04	61,02	65,14	69,27	73,39	77,52	81,64	86,59	91,54	98,14	103,09	109,69	116,29									
17,00										31,94	33,64	35,68	37,72	39,56	41,94	44,49	47,04	50,44	52,99	56,39	59,79	62,89	67,14	71,39	75,64	79,89	84,14	89,24	94,34	101,14	106,24	113,04	119,84									
17,50										32,89	34,64	36,74	38,84	40,74	43,19	45,82																										

Tabla 3. Tabla de estandarización de pletinas de cobre



2.4. Pérdidas en los arrollamientos en carga

La resistencia de un conductor de longitud l_c y de sección transversal A_c , fabricado de un material cuya resistividad es ρ , es:

$$R = \frac{\rho \times l_c}{A_c} \quad [\Omega] \quad (12)$$

La corriente que fluye por ese conductor, con una densidad de corriente J , es:

$$I = J \times A_c \quad [A] \quad (13)$$

El valor de las pérdidas de potencia activa sin tener en cuenta las pérdidas adicionales o suplementarias derivadas de la circulación de corriente alterna tiene la siguiente expresión:

$$P_{dc} = \rho \times \frac{l_c}{A_c} \times J^2 \times A_c^2 \quad [W] \quad (14)$$

Considerando que la masa W_c de un arrollamiento hecho de un material conductor cuya densidad es d es igual a, $d = W_c / A_c \cdot l_c$ entonces la ecuación anterior de pérdidas puede escribirse como:

$$P_{dc} = \frac{\rho}{d} \times J^2 \times W_c \quad [W] \quad (15)$$

De acuerdo con las especificaciones estándar internacionales, las pérdidas en transformadores sumergidos en aceite deberían determinarse para una temperatura en sus arrollamientos de 75 °C. A esta temperatura la resistividad del cobre es $\rho_{Cu\ 75^\circ C} = 0,017\ \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ y para el aluminio $\rho_{Al\ 75^\circ C} = 0,036\ \Omega\text{mm}^2/\text{m}$. La densidad del cobre es $\delta_{Cu\ 75^\circ C} = 8,9\text{kg}/\text{dm}^3$ y la del aluminio $\delta_{Al\ 75^\circ C} = 2,7\text{kg}/\text{dm}^3$.

Para el cálculo de la masa de los arrollamientos se tiene la siguiente relación:

$$W_c = m_f \times N \times D_m \times \Pi \times A_c \times d \times 10^{-6} \quad [\text{kg}] \quad (16)$$

Donde

- m_f : Número de fases
- N : Número de espiras
- D_m : Diámetro medio del arrollamiento (mm)
- A_c : Sección transversal del conductor (mm²)
- d : Densidad del material del conductor (kg/dm³)



Las pérdidas de potencia activa varían con la temperatura dentro del rango de temperaturas esperadas en un transformador (próximas a la temperatura nominal del transformador). La relación existente entre las pérdidas para la menor temperatura esperada P_{dcc} y las pérdidas para la mayor temperatura esperada P_{dcw} en los arrollamientos es:

$$P_{dcw} = P_{dcc} \times \frac{235 + T_w}{235 + T_c} \quad [W] \quad (17)$$

Donde T_w y T_c son las temperaturas mayor y menor esperadas en los arrollamientos.

Las pérdidas totales en los arrollamientos de un transformador y su entorno, son mayores, debido a las pérdidas adicionales, que las pérdidas dc. Esta diferencia es debida a las pérdidas por las corrientes parásitas que el flujo de dispersión origina en los arrollamientos y en las partes metálicas que los rodean. Estas pérdidas se denominan pérdidas suplementarias en cortocircuito y se miden cuando, como indica su nombre, el transformador se encuentra en condiciones de cortocircuito

Pérdidas en los arrollamientos (cálculo práctico).

Cálculo de la resistencia óhmica en función del peso del cobre:

$$R_F = \frac{P_{C3} \times \rho \times 10^3}{3 \times S^2 \times \delta} \quad (18)$$

Siendo:

R_F : Resistencia por fase (Ω)

P_{C3} : Peso del cobre de los tres arrollamientos (kg)

ρ : Resistividad del cobre ($17,5 \times 10^{-3} \Omega m / mm^2$)

S : Sección del conductor (mm^2)

δ : Peso específico del cobre ($8,9 \text{ kg} / cm^3$)

Reduciendo las constantes ($\rho=17,5 \times 10^{-3} \Omega m / mm^2$, $\delta=8,9 \text{ kg} / cm^3$) y refiriéndolas a una temperatura de $75^\circ C$, se obtiene:

$$R_F = 0,7967 \times (P_{C3} / S^2) \quad (19)$$

(Si la temperatura fuera otra, la constante 0,7967 variaría también).

Cálculo de las pérdidas óhmicas en función del peso del cobre:

$$P_{\Omega (75^\circ C)} = 2,39 \times P_{C3} \times \sigma^2 \quad (20)$$



Donde:

$P_{\Omega (75^{\circ}\text{C})}$: Pérdidas óhmicas en los 3 arrollamientos a 75°C (W)

P_{C3} : Peso del cobre de los 3 arrollamientos (kg)

J : Densidad de corriente (A/mm²)

Otramanera de calcular las pérdidas óhmicas en los 3 arrollamientos a 75 °C

$$P_{\Omega (75^{\circ}\text{C})} = 3 \times R_F \times I_F^2 \quad (21)$$

Donde:

$P_{\Omega (75^{\circ}\text{C})}$: Pérdidas óhmicas en los 3 arrollamientos a 75°C (W)

R_F : Resistencia por fase (Ω)

I_F : Intensidad de fase (A)

2.4.1. Pérdidas en el arrollamiento de B.T.

- Peso del cobre en los 3 arrollamientos BT: 552 kg
- Densidad de corriente: 3,26 A / mm²

$$P_{\Omega (75^{\circ}\text{C})} = 3 \times R_F \times I_F^2 = 0,22 \cdot 3 \cdot 144,3^2 = 13742,8 \text{ W}$$

$$\text{Factor de pérdidas adicionales} = 0,111 \times ((n^{\circ}_{\text{capas}} \times n^{\circ}_{\text{pletinas en radial}} + 1)^2 - 0,2) \times 0,21 = 0,03 \text{ W}$$

$$P_{\text{Adicionales}} = P_{\Omega (75^{\circ}\text{C})} \times 0,03 (\text{Factor de aproximación}) = 13742,8 \cdot 0,03 = 412,3 \text{ W}$$

$$P_{\text{TOTALES}} = P_{\Omega (75^{\circ}\text{C})} + P_{\text{Adicionales}} = 13742,8 + 412,3 = 14155 \text{ W}$$

2.4.2. Pérdidas en el arrollamiento de A.T.

Peso del cobre en los 3 arrollamientos AT Principal: 792 kg

POSICIÓN (+):

- Densidad de corriente: 3,15 A / mm²
- Intensidad de fase: 35,27 A
- Resistencia por fase (Ω): 4,95 Ω



$$P_{\Omega (75^{\circ}\text{C})} = 3 \times R_F \times I_F^2 = 3 \cdot 4,95 \cdot 35,27^2 = 18472,8 \text{ W}$$

$$\text{Factor de pérdidas adicionales} = 0,111 \times ((n^{\circ}_{\text{capas}} \times n^{\circ}_{\text{pletinas en radial}} + 1)^2 - 0,2) \times 0,16 = 0,02 \text{ W}$$

$$P_{\text{Adicionales}} = P_{\Omega (75^{\circ}\text{C})} \times 0,02 (\text{Factor de aproximación}) = 18472,8 \cdot 0,02 = 369,456 \text{ W}$$

$$P_{\text{TOTALES}} = P_{\Omega (75^{\circ}\text{C})} + P_{\text{Adicionales}} = 18472,8 + 369,5 = 18842,3 \text{ W}$$

POSICIÓN (N):

- Densidad de corriente: 3,32 A / mm²
- Intensidad de fase: 37,04 A
- Resistencia por fase (Ω): 4,72 Ω

$$P_{\Omega (75^{\circ}\text{C})} = 3 \times R_F \times I_F^2 = 3 \cdot 4,72 \cdot 37,04^2 = 19426,9 \text{ W}$$

$$\text{Factor de pérdidas adicionales} = 0,111 \times ((n^{\circ}_{\text{capas}} \times n^{\circ}_{\text{pletinas en radial}} + 1)^2 - 0,2) \times 0,16 = 0,02 \text{ W}$$

$$P_{\text{Adicionales}} = P_{\Omega (75^{\circ}\text{C})} \times 0,02 (\text{Factor de aproximación}) = 19426,9 \cdot 0,02 = 388,538 \text{ W}$$

$$P_{\text{TOTALES}} = P_{\Omega (75^{\circ}\text{C})} + P_{\text{Adicionales}} = 19426,9 + 388,5 = 19815,4 \text{ W}$$

POSICIÓN (-):

- Densidad de corriente: 3,5 A / mm²
- Intensidad de fase: 38,98 A
- Resistencia por fase (Ω): 4,48 Ω

$$P_{\Omega (75^{\circ}\text{C})} = 3 \times R_F \times I_F^2 = 3 \cdot 4,48 \cdot 38,98^2 = 20421,3 \text{ W}$$

$$\text{Factor de pérdidas adicionales} = 0,111 \times ((n^{\circ}_{\text{capas}} \times n^{\circ}_{\text{pletinas en radial}} + 1)^2 - 0,2) \times 0,16 = 0,02 \text{ W}$$

$$P_{\text{Adicionales}} = P_{\Omega (75^{\circ}\text{C})} \times 0,02 (\text{Factor de aproximación}) = 20421,3 \cdot 0,02 = 408,426 \text{ W}$$

$$P_{\text{TOTALES}} = P_{\Omega (75^{\circ}\text{C})} + P_{\text{Adicionales}} = 20421,3 + 408,4 = 20829,7 \text{ W}$$



2.5. Errores de relación

Datos del transformador:

DATOS	
TENSION BT	20000
TENSION AT (POS +)	47250
TENSION AT (POS N)	45000
TENSION AT (POS -)	42750
ESPIRAS BT	344
ESPIRAS AT (POS +)	1408
ESPIRAS AT (POS N)	1341
ESPIRAS AT (POS -)	1274
CONEXION BT (D o Y)	Y
CONEXION AT (D o Y)	D

Tabla 4. Datos del transformador.

Relación entre espiras = $Espiras\ AT\ (Pos\ +) / Espiras\ BT = 4,093$

Relación entre espiras = $Espiras\ AT\ (Pos\ N) / Espiras\ BT = 3,898$

Relación entre espiras = $Espiras\ AT\ (Pos\ -) / Espiras\ BT = 3,702$

Conexión Y: $Tensión\ de\ fase = Tensión\ de\ línea / \sqrt{3}$

Conexión D: $Tensión\ de\ fase = Tensión\ de\ línea$

Conexión AT: D

Conexión BT: Y

Relación de tensión = $Tensión\ AT\ (Pos\ +) / Tensión\ BT = 4,092$

Relación de tensión = $Tensión\ AT\ (Pos\ N) / Tensión\ BT = 3,897$

Relación de tensión = $Tensión\ AT\ (Pos\ -) / Tensión\ BT = 3,702$

REL ESP	4,093	3,898	3,703
REL TEN	4,092	3,897	3,702

Tabla 5. Relación espiras y tensión.



Error de relación:

$$\text{Error de relación} = \left(\frac{\text{Relación}_{\text{espiras}} - \text{Relación}_{\text{tensión}}}{\text{Relación}_{\text{espiras}}} \right) \times 1000 \quad (22)$$

$$\text{Error de relación (Pos +)} = \left(\frac{4,093 - 4,092}{4,093} \right) \cdot 1000 = 0,26$$

$$\text{Error de relación (Pos N)} = \left(\frac{3,898 - 3,897}{3,898} \right) \cdot 1000 = 0,29$$

$$\text{Error de relación (Pos -)} = \left(\frac{3,703 - 3,702}{3,703} \right) \cdot 1000 = 0,33$$

ERRORES DE RELACION		
POS +	(0/00)	0,26
POS N	(0/00)	0,29
POS -	(0/00)	0,33

Tabla 6. Errores de relación en el transformador



Capítulo 3

ANÁLISIS MEDIANTE FEMM



Capítulo 3. Análisis mediante FEMM.

3. ÁNALISIS MEDIANTE FEMM

3.1. Introducción

3.1.1. Propósito

El objetivo de este estudio es desarrollar métodos para el cálculo de tensión de cortocircuito. También obtener los valores de las pérdidas adicionales y pérdidas óhmicas sobre la base de simulaciones electromagnéticas mediante FEMM y comparar los datos obtenidos con el ensayo eléctrico realizado al transformador.

3.1.2. Script

Un *script* también puede ser llamado como archivo de órdenes o archivo de procesamiento por lotes es un programa usualmente simple, que por lo regular se almacena en un archivo de texto plano. Los *script* son casi siempre interpretados, pero no todo programa interpretado es considerado un *script*. El uso habitual de los *scripts* es realizar diversas tareas como combinar componentes, interactuar con el sistema operativo o con el usuario.

He utilizado un *script* para cada estado del regulador de tensión en vacío (Pos +, Pos N, Pos -) para simular las pérdidas totales. También he tenido que utilizar más *script* para las pérdidas óhmicas, frecuencia a 133 Hz y un último *script* con sección doble de las pletinas para ver con más precisión un fenómeno que ocurre a causa del flujo radial.

El esquema general de cada *script* comparte grandes similitudes que en el siguiente apartado explicare las principales partes que lo contiene.

3.1.3. Estructura del script

Vamos a explicar las partes más importantes de nuestro *script* de la posición N que simula las pérdidas totales en la columna derecha del transformador.

En la siguiente imagen que aparece en la página siguiente es la visualización genérica de la columna externa del transformador con los materiales asignados a las diferentes partes que compone el transformador.

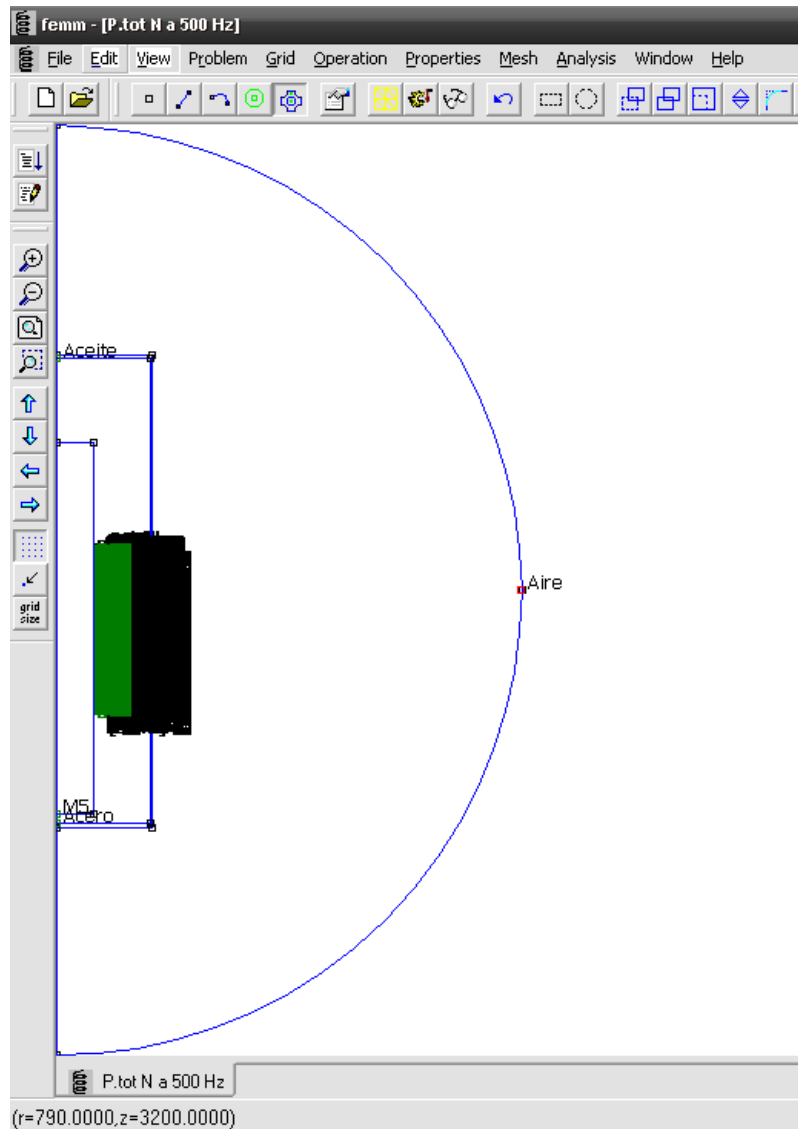


Fig. 35. Dibujo general con los materiales asignados a cada parte en FEMM.

En primer lugar del script he definido las magnitudes utilizadas para realizar los cálculos a postiori.

El comando utilizado en FEMM es *mi_probdef (frequency, units, type, precision)*.

En mi caso es el siguiente:

```
mi_probdef( 50, "millimeters", "axi", "1E-8")
```

Después definimos la corriente de fase y el número de pletinas utilizado en cada arrollamiento del transformador.

```
Iat=37.04
Ibt=144.33
NpletAt=1
NpletBt=2
```



Ahora hay que crear cada arrollamiento con sus características eléctricas.
El comando por FEMM es el siguiente:

mi_addcircprop ("circuitname", i, circuittype) adds a new circuit property with name "circuitname" with a prescribed current, i. The circuittype parameter is 0 for a parallel-connected circuit and 1 for a series-connected circuit.

En el caso real:

```
mi_addcircprop ("BT", Ibt/NpletBt*1.41421356, 1)
mi_addcircprop ("AT", -Iat/NpletAt*1.41421356, 1)
```

Multiplicamos por raíz de dos para obtener los valores de pico de corriente.

El siguiente comando será definir las características de material utilizado.

El comando utilizado por FEMM es el siguiente:

mi_addmaterial("materialname", mu x, mu y, H c, J, Cduct, Lam d, Phi hmax, lam fill, LamType, Phi hx, Phi hy), NStrands, WireD adds a new material with called "materialname" with the material properties:

- *mu x* Relative permeability in the x- or r-direction.
- *mu y* Relative permeability in the y- or z-direction.
- *H c* Permanent magnet coercivity in Amps/Meter.
- *J* Real Applied source current density in Amps/mm².
- *Cduct* Electrical conductivity of the material in MS/m.
- *Lam d* Lamination thickness in millimeters.
- *Phi hmax* Hysteresis lag angle in degrees, used for nonlinear BH curves.
- *Lam fill* Fraction of the volume occupied per lamination that is actually filled with iron (Note that this parameter defaults to 1 the femme preprocessor dialog box because, by default, iron completely fills the volume)
- *Lamtype* Set to
 - _ 0 – Not laminated or laminated in plane
 - _ 1 – laminated x or r
 - _ 2 – laminated y or z
 - _ 3 – Magnet wire
 - _ 4 – Plain stranded wire
 - _ 5 – Litz wire
 - _ 6 – Square wire
- *Phi hx* Hysteresis lag in degrees in the x-direction for linear problems.
- *Phi hy* Hysteresis lag in degrees in the y-direction for linear problems.
- *NStrands* Number of strands in the wire build. Should be 1 for Magnet or Square wire.
- *WireD* Diameter of each wire constituent strand in millimeters.

Note that not all properties need be defined—properties that aren't defined are assigned default values.

En nuestro caso los materiales utilizados son los siguientes:

```
mi_addmaterial("M5", 9450,9450, 0, 0,6.25, 0.3, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0)
mi_addmaterial("Aceite", 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0)
mi_addmaterial("Cobre", 1, 1, 0, 0,47.7, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0)
```




```
mi_addmaterial("Acero", 400, 400, 0, 0, 6, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0)
mi_addmaterial("Aire", 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0)
```

Las siguientes estructuras tienen el objetivo de crear las diferentes partes del transformador (cuba, núcleo, arrollamiento de B.T. y arrollamiento de A.T.).

Comenzamos por la cuba:

Añadimos valores de nuestra dimensión de la cuba y después añadimos los puntos para definir la cuba:

```
Ancho=860
Alto=2130
GrTapa=15
GrFondo=20
GrPared=6

Ax=0
Ay=0
Bx=Ancho/2
By=0
Cx=Ancho/2
Cy=Alto
Dx=0
Dy=Alto
Ex=0
Ey=Alto+GrTapa
Fx=Ancho/2+GrPared
Fy=Alto+GrTapa
Gx=Ancho/2+GrPared
Gy=-GrFondo
Hx=0
Hy=-GrFondo
```

Ahora hay que utilizar el comando del FEMM *mi_addnode(x,y) Add a new node at x,y*

Nuestros puntos asignados son los siguientes

```
mi_addnode( Ax, Ay)  -- A
mi_addnode(Bx, By)  -- B
mi_addnode(Cx, Cy)  -- C
mi_addnode(Dx, Dy)  -- D
mi_addnode( Ex, Ey)  -- E
mi_addnode(Fx, Fy)  -- F
mi_addnode(Gx, Gy)  -- G
mi_addnode(Hx, Hy)  -- H
```

Ahora hay que unir los puntos para definir la cuba.

El comando utilizado por FEMM es el siguiente:

mi_addsegment(x1, y1, x2, y2) Add a new line segment from node closest to (x1, y1) to node closest to (x2, y2).



En nuestro caso son las siguientes uniones de puntos para definir nuestra cuba.

```
mi_addsegment( Ax, Ay, Bx, By)    -- AB
mi_addsegment(Bx, By, Cx, Cy)    -- BC
mi_addsegment(Cx, Cy, Dx, Dy)    -- CD
mi_addsegment(Dx, Dy, Ex, Ey)    -- DE
mi_addsegment( Ex, Ey, Fx, Fy)    -- EF
mi_addsegment(Fx, Fy, Gx, Gy)    -- FG
mi_addsegment(Gx, Gy, Hx, Hy)    -- GH
mi_addsegment(Hx, Hy, Ax, Ay)    -- HA
mi_addsegment( Ax, Ay, Dx, Dy)    -- AD
```

Asignamos el material “Acero” a la cuba de la siguiente manera:

```
mi_addblocklabel( Ax+1, Ay-1)
mi_selectlabel( Ax+1, Ay-1)
mi_setblockprop("Acero", 1, 0, 0, 0, 0, 0)
mi_clearselected()
```

mi_addblocklabel(x,y) Add a new block label at (x, y).

mi_selectlabel(x,y) Select the label closet to (x, y). Returns the coordinates of the selected label.

mi_setblockprop("blockname", automesh, meshsize, "incircuit", magdirection, group, turns).

mi_clearselected() Clear all selected nodes, blocks, segments and arc segments.

Ahora asignamos el “Aceite” a su área.

```
mi_addblocklabel( Dx+1, Dy-1)
mi_selectlabel( Dx+1, Dy-1)
mi_setblockprop("Aceite", 1, 0, 0, 0, 0, 0)
mi_clearselected()
```

Núcleo:

Añadimos los datos de dimensión y puntos para definir el núcleo:

```
Diametro=350
Hvent=1020
CotaA=340
DistFondo=40

Ax=0
Ay=DistFondo
Bx=Diametro/2
By=DistFondo
Cx=Diametro/2
Cy=DistFondo+Hvent+2*CotaA
Dx=0
Dy=DistFondo+Hvent+2*CotaA
```



```
mi_addnode( Ax, Ay)  -- A
mi_addnode(Bx, By)  -- B
mi_addnode(Cx, Cy)  -- C
mi_addnode(Dx, Dy)  -- D
```

Unimos puntos para definir el núcleo

```
mi_addsegment( Ax, Ay, Bx, By)  -- AB
mi_addsegment(Bx, By, Cx, Cy)  -- BC
mi_addsegment(Cx, Cy, Dx, Dy)  -- CD
```

Asignando el material "M5" al núcleo

```
mi_addblocklabel( Ax+1, Ay+1)
mi_selectlabel( Ax+1, Ay+1)
mi_setblockprop("M5", 1, 0, 0, 0, 0, 0)
mi_clearselected()
```

Arrollamiento de B.T.

Asignamos los valores a las variables determinadas para crear la bobina de BT

```
RadPlet=2.12
AxiPlet=10.60
RadPapel=2.62
AxiPapel=11.1
Nplet=2
Ncapas=10
DiamInt=380

EspCapa={34,34,34,35,35,35,35,34,34,34}
AisCapa={ 0,0.75,0.75,5.5,0.75,0.75,0.75,5.5,0.75,0.75}

R=DiamInt/2-RadPapel
H=0
for N=1,Ncapas,1
do
    R=R+AisCapa[N]+RadPapel
    H=EspCapa[N]*AxiPapel*Nplet
H=DistFondo+CotaA+(Hvent-H)/2

Ax=R
    Ay=H
Bx=R+RadPlet
    By=H
Cx=R+RadPlet
Cy=H+AxiPlet
Dx=R
Dy=H+AxiPlet

mi_addnode( Ax, Ay)  -- A
mi_addnode(Bx, By)  -- B
mi_addnode(Cx, Cy)  -- C
```



mi_addnode(Dx, Dy) -- D

Unimos los puntos para definir la pletina de BT

```
mi_addsegment( Ax, Ay, Bx, By)    -- AB
mi_addsegment(Bx, By, Cx, Cy)    -- BC
mi_addsegment(Cx, Cy, Dx, Dy)    -- CD
mi_addsegment(Dx, Dy, Ax, Ay)    -- CD
```

Asignando material "Cobre" a la pletina

```
mi_clearselected()
mi_addblocklabel( Ax+1, Ay+1)
mi_selectlabel( Ax+1, Ay+1)
mi_setblockprop("Cobre", 1, 0,"BT", 0, 0, 0)
```

Selecciono la pletina

```
mi_selectsegment( Ax+1, Ay)
mi_selectsegment(Ax, Ay+1)
mi_selectsegment( Cx-1, Cy)
mi_selectsegment(Cx, Cy-1)
mi_setgroup(10)
```

Creo la capa de pletina

```
mi_selectgroup(10)
mi_copytranslate( 0, AxiPapel, Nplet*EspCapa[N]-1, 4)
mi_clearselected()
mi_selectgroup(10)
mi_setgroup(1)
mi_clearselected()
end
```

Los nuevos comandos de FEMM introducidos en la creación del arrollamiento de B.T.
son los siguientes:

mi_setgroup(n) Set the group associated of the selected items to n

mi_copytranslate (dx, dy, copies, (editaction))

- *dx,dy* – distance by which the selected objects are incrementally shifted.
- *copies* – number of copies to be produced from the selected objects.
- *editaction* 0 –nodes, 1 – lines (segments), 2 –block labels, 3 – arc segments, 4- group.

Arrollamiento de A.T.

Consiste en los mismos procedimientos explicados anteriormente en el arrollamiento de B.T. exceptuando las dimensiones de la pletina, número de capas, diámetro interior, espiras por capas y aislamiento entre capas.

Creando la bobina de AT



```
RadPlet=1.6  
AxiPlet=7.1  
RadPapel=2.1  
AxiPapel=7.6  
Nplet=1  
Ncapas=14  
DiamInt=521
```

```
EspCapa={99,101,101,101,101,101,66,66,101,101,101,101,101,99}  
AisCapa={ 0,1.5,1.5,7.5,1.5,1.5,1.5,9.5,1.5,1.5,7.5,1.5,1.5,1.5}
```

Para terminar el script he realizado los límites del programa para simular, el material que consta y el estado final después de realizar la simulación mediante los siguientes módulos:

mi_addarc(x1,y1,x2,y2,angle,maxseg) Add a new arc segment from the nearest node to (x1,y1) to the nearest node to (x2,y2) with angle 'angle' divided into 'maxseg' segments.

messagebox("message") displays the "message" string to the screen in a pop-up message box.

Asignando los límites del problema

```
Ax=0  
Ay=-Alto/2  
Bx=Alto  
By=Alto/2  
Cx=0  
Cy=Alto*3/2  
mi_addnode( Ax, Ay)-- A  
mi_addnode(Bx, By)-- B  
mi_addarc(Ax, Ay,Bx, By,90,5)  
mi_addarc(Bx, By,Cx, Cy,90,5)  
mi_addsegment(Ax, Ay, 0,-GrFondo)  
mi_addsegment(Cx,Cy, 0,Alto+GrTapa)
```

Asignando material "Aire" al exterior

```
mi_clearselected()  
mi_addblocklabel( Bx-1, By)  
mi_selectlabel( Bx-1,By)  
mi_setblockprop("Aire", 1, 0, 0, 0, 0, 0)
```

Geometria, incluyendo límites está terminado

```
mi_zoomnatural()  
messagebox("Geometria terminada.")
```

3.2. Tensión de cortocircuito

La tensión de cortocircuito determina la variación de la tensión de un transformador en condiciones de carga y la magnitud de la corriente durante un cortocircuito, también tiene una gran importancia en el funcionamiento en paralelo de un transformador.

La tensión de cortocircuito de un transformador se mide cortocircuitando los terminales de uno de los lados e incrementando la tensión en el otro lado hasta que la corriente alcance su valor nominal. Bajo estas condiciones, la corriente nominal recorre ambos arrollamientos. La tensión a la cual las corrientes nominales recorren el transformador se denomina tensión de cortocircuito. La componente activa de la potencia aparente de cortocircuito a la que se encuentra un transformador durante el ensayo de cortocircuito, son las pérdidas debidas a la carga, y son idénticas a las pérdidas que se transforman en calor en los arrollamientos de un transformador bajo condiciones nominales de servicio.

Este valor debe ser bien calculado a la hora de la producción de un transformador, porque tiene que adaptarse a las especificaciones del cliente y no puede exceder de las tolerancias respecto al valor de la especificación del cliente sino podría conllevar al rechazo del transformador.

3.2.1. ¿Cómo se calcula hasta ahora?

Algunos software utilizados en el diseño de transformadores se basan en el método de Corrales y las Técnicas estándar de cada empresa que diseña transformadores. En este método, la dispersión de densidad de flujo B_{disse} considera de la siguiente manera expuesta en este apartado:

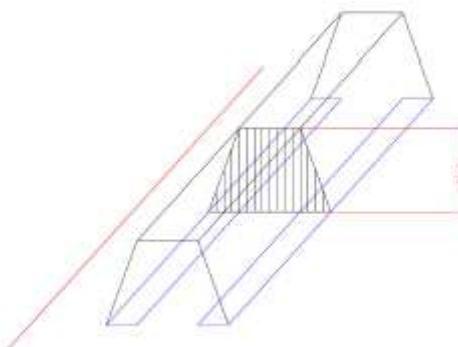


Fig. 36. Distribución del flujo en cada fase de un transformador.

Aplicando sucesivas veces la integral $\oint \vec{H} \times d\vec{l} = \sum N \times I$ a las líneas se obtiene el diagrama de campo magnético en la ventana del transformador. Así, en la siguiente figura se muestra el diagrama de campo magnético para el caso de un transformador de dos arrollamientos. El diagrama de campo magnético crece linealmente desde un valor nulo en el interior del devanado interno hasta un valor máximo. Luego, H permanece constante entre arrollamientos. Al abarcar el segundo de los devanados H va disminuyendo porque los amperios vuelta del arrollamiento de AT son de signo opuesto a los del arrollamiento de BT.

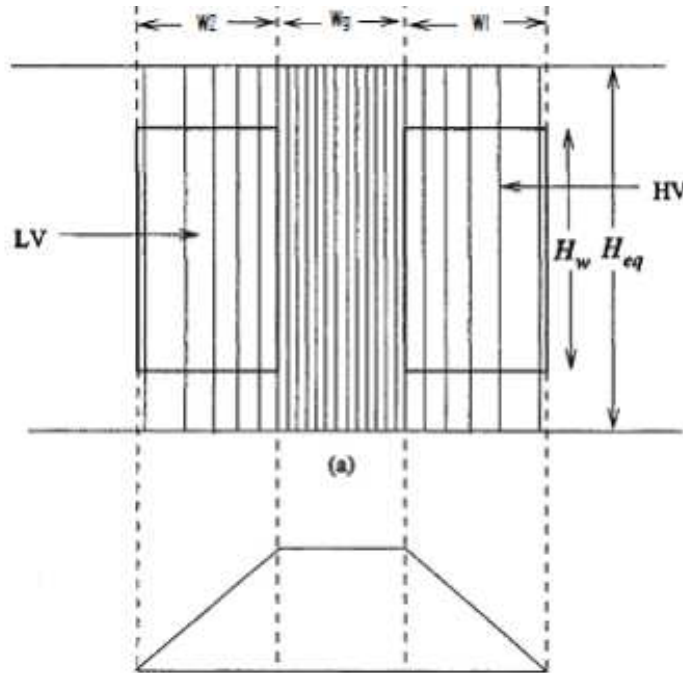


Fig. 37. Diagrama de campo magnético para un transformador de dos arrollamientos.

Donde:

$$B_{dis\ MAX} = \frac{4 \times \pi \times N \times I}{10 \times h} \quad [T] \quad (23)$$

Las pérdidas de flujo se calculan mediante la integración de B_{dis} en el arrollamiento de B.T. (LV), arrollamiento de AT (HV) y la separación entre arrollamientos.

$$\Phi_{dis} = \int_{BT + esp + AT} B \times dS \quad [Wb] \quad (24)$$

La tensión inducida por este flujo de dispersión ε_g , se calcula de la siguiente manera:

$$\varepsilon_{g\ MAX} = \frac{2 \times \pi \times N \times f}{10^8} \times \Phi_{dis} \quad [V] \quad (25)$$

La parte inductiva de la tensión de cortocircuito U_{xcc} se puede obtener como:

$$U_{xcc} = \frac{\varepsilon_{dis}}{U_r} \times 100 \quad [\%] \quad (26)$$

Para tener en cuenta el efecto de los bordes de los arrollamientos es necesario aplicar el factor de Rogosky. Por otra parte, la inductancia de las estructuras/barras se tendría que sumar al valor calculado.

$$\alpha = 1 - \frac{1 - e^{-\left(\frac{2 \times \pi \times h}{\lambda}\right)}}{\frac{2 \times \pi \times h}{\lambda}} \quad (27)$$

La parte resistiva de cortocircuito de tensión U_{rcc} viene dada por:

$$U_{rcc} = \frac{W_C}{S_N} \times 100 \quad [\%] \quad (28)$$

Finalmente el voltaje de cortocircuito es el resultado de la suma de los vectores de U_{rcc} y U_{xcc} .

Este modo de conseguir el voltaje de cortocircuito calcula resultados realmente buenos en diseños "estándar", pero en transformadores con especificaciones muy severas en pérdidas, en arrollamientos de pletina de gran sección o en arrollamiento de banda, también en caso de transformadores con un número grande de vueltas anuladas (regulación), este método no es tan exacto (en transformadores con arrollamiento de pletina de gran sección y en banda pueden llegar a un error superior al 5 % y en transformadores con muchas vueltas anuladas el error se incrementa a un 22.5 %).

3.2.2. Cálculo de la tensión de cortocircuito por medio de simulaciones magnética

Mediante el empleo de software de elementos finitos (específicamente FEMM) es posible calcular con precisión el valor de la tensión de cortocircuito. La simulación en el FEMM pertenece a la columna exterior derecha del transformador de potencia.

3.2.2.1. Simulaciones simples

En los transformadores normales, es suficiente para simular el transformador como bloques hundidos que una distribución de corriente uniforme que se supone.

Este tipo de simulación tiene las siguientes características:

- Se necesita poco tiempo para crear y calcular los diseños.
- No es válido en transformadores especiales.

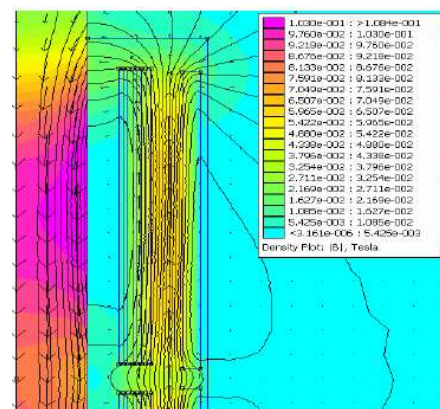


Fig. 38. Ejemplo de una simulación simple.

3.2.2.2. Simulaciones complejas

Si hace falta un cálculo preciso se requiere realizar una simulación de cada una de las espiras que contiene y no en bloques como la simulación simple. Así, la corriente se distribuye a lo largo de la sección transversal del conductor, como en la realidad.

Este tipo de simulación tiene las siguientes ventajas y desventajas:

- Tiene una buena precisión para cada transformador.
- Se necesita mucho tiempo para crear y calcular el modelo.

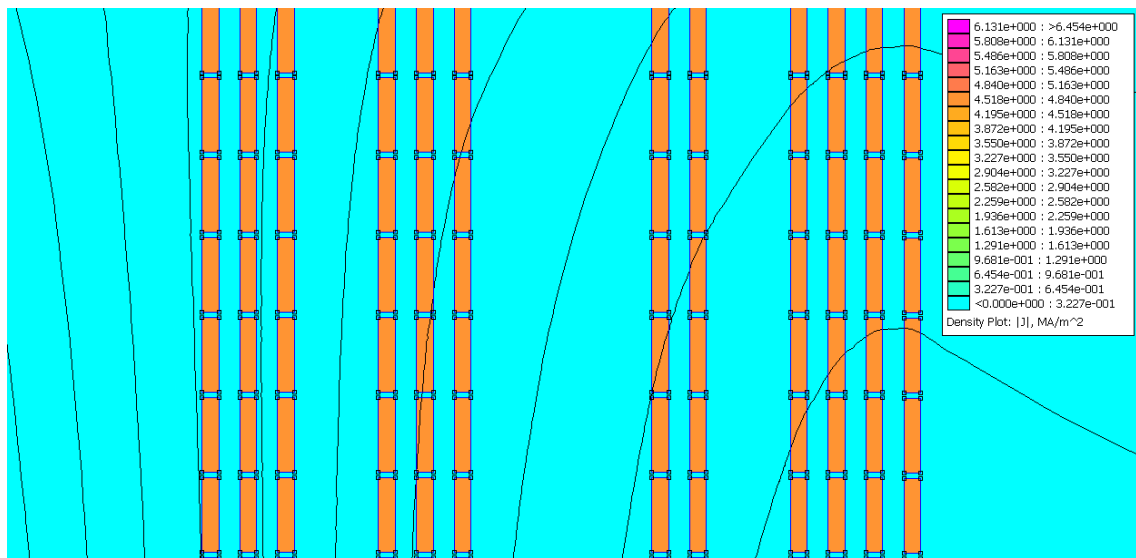


Fig. 39. Ejemplo de una simulación compleja

3.2.3. Método del cálculo

La inductancia de una bobina se define de la siguiente manera:

$$L = \frac{\Phi}{I} \quad [H] \quad (29)$$

De la fórmula anterior se puede deducir lo siguiente:

$$L = \frac{\Phi}{I} = \frac{\oint_{\text{Conductor}} B \times dS}{I} = \frac{\iint \nabla \times A \times dS}{I} \Rightarrow \frac{\oint A \times dl}{I}$$

El programa FEMM es capaz de calcular el valor de $A \times J$, J integrada a lo largo de una sección transversal del conductor $\oint A \times dl \times \int J \times dS$ este valor dividido por I^2 , es el valor de la inductancia en el arrollamiento.



La impedancia de cada bobina se calcula a partir del valor de la inductancia de la siguiente manera:

$$X_{cc1} = 2 \times \pi \times f \times L_1 \quad (30)$$

$$X_{cc2}' = 2 \times \pi \times f \times L_2 \times \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (31)$$

El siguiente paso es calcular la parte inductiva de la tensión cortocircuito.

$$U_{xcc} = \frac{N^0 \text{ fases} \times (X_{cc1} + X_{cc2}') \times I_1^2}{S_N} \times 100 \quad (32)$$

A continuación, la inductancia de las estructuras/barras se suma al valor calculado y, finalmente, la tensión de cortocircuito es el resultado de la suma vectorial de U_{rcc} y U_{xcc} .

$$U_{cc} = \sqrt{U_{xcc}^2 + U_{rcc}^2} \quad [\%] \quad (33)$$

3.3. Pérdidas Adicionales

Las pérdidas totales en los arrollamientos de un transformador y su entorno, son mayores, debido a las pérdidas adicionales, que las pérdidas dc (óhmicas). Esta diferencia es debida a las pérdidas por las corrientes parásitas que el flujo de dispersión origina en los arrollamientos y en las partes metálicas que los rodean. Estas pérdidas se denominan pérdidas adicionales o suplementarias en cortocircuito y se miden cuando, como indica su nombre, el transformador se encuentra en condiciones de cortocircuito.

Las líneas del flujo de dispersión inducen corrientes parásitas en el plano perpendicular a su dirección. Para el cálculo de las pérdidas adicionales se precisa conocer el flujo de dispersión. El modelo de cálculo de las pérdidas suplementarias es válido tanto para arrollamientos por capas como por otros.

En la figura 40a se muestra la f.m.m. que da origen a dicho flujo disperso (parte superior de la figura 40a), así como las líneas de flujo de dispersión en la ventana del transformador en el supuesto de que los arrollamientos del transformador fueran infinitamente largos y estuvieran sumergidos por todas las direcciones dentro de un medio homogéneo. En realidad, estas suposiciones no son ciertas, ya que los arrollamientos tienen una altura dada y el arrollamiento está alojado en la ventana del transformador, con lo que la permeabilidad del hierro es diferente de la del aire. Esto hace que las líneas de flujo de dispersión se comben como se muestra en la figura 40b. En los arrollamientos utilizados en la práctica la componente axial de la densidad de flujo de dispersión en el centro de los arrollamientos es casi dos veces mayor que en los extremos. La causa de esta discrepancia es que algunas líneas de inducción abandonan el canal de dispersión cuando atraviesan las espiras de los arrollamientos (ver figura 40b) y por tanto las componentes del flujo perpendiculares a la dirección de los conductos de dispersión (esto es, en dirección radial) no pueden depreciarse. Sin

embargo, el cálculo de la componente de las líneas de inducción en la dirección radial (perpendicular a la altura del arrollamiento) es bastante complejo.

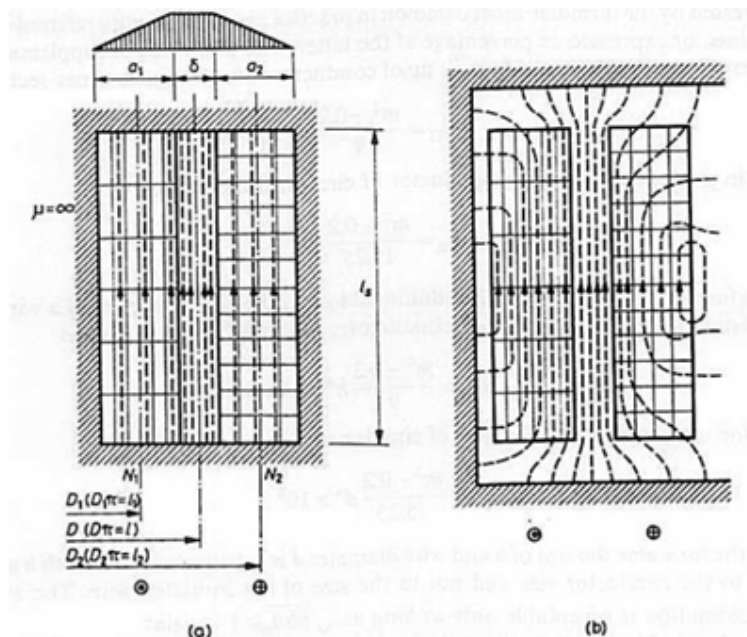


Fig. 40. Campo magnético de dispersión de un arrollamiento en condiciones de cortocircuito

a) Idealizado;

b) Condiciones reales.

En la actualidad muchos de los cálculos mencionados se suelen hacer mediante ordenador. Así, el cálculo de la distribución de las corrientes de Foucault o adicionales en los conductores (y de las pérdidas de potencia activa debidas a éstas) se puede hacer mediante programas de Elementos Finitos. Existen también expresiones analíticas que permiten el cálculo de pérdidas de potencia activa debido a las corrientes de Foucault, pero precisan que se conozca la inducción radial en la ventana del transformador, que no se puede calcular de forma manual y precisa ser obtenida mediante métodos numéricos.

Es importante tener en cuenta las pérdidas adicionales en las bobinas porque provoca un aumento de la temperatura del devanado. Este aumento de la temperatura del devanado es muy perjudicial para el transformador, ya que provoca el envejecimiento prematuro de los aislamientos y el consiguiente fallo eléctrico del transformador.

La descomposición del campo magnético de dispersión hay que descomponerlo en el eje x e y (Fig. 41).

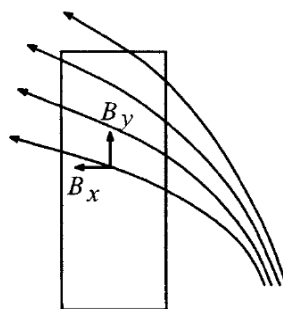


Fig. 41. Descomposición del campo magnético de dispersión.

3.3.1. División de las pérdidas adicionales

Las pérdidas adicionales se pueden dividir en las pérdidas en las estructuras/barras y las pérdidas en los bobinados. Por otra parte, las pérdidas en los bobinados también se pueden dividir en las pérdidas por flujo axial, flujo radial y una compensación imperfecta de las ampere-vueltas.

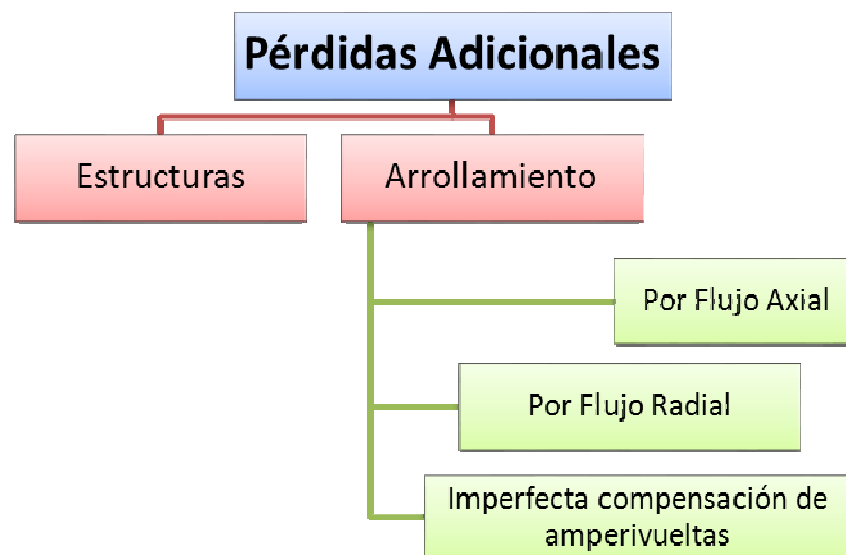


Fig. 42. División de las pérdidas adicionales

El cálculo de las pérdidas adicionales en las estructuras /barras exige el uso de programas de elementos finitos en 3D y queda fuera de los trabajos asociados a este proyecto.

3.3.1.1. Adicionales debido a las pérdidas de flujo axial

Estas pérdidas, como su nombre lo indica, son causadas por flujo de dispersión axialmente, es decir, a lo largo de la bobina (tanto alta y baja tensión) con excepción de los extremos en los que se reducirá debido a que el flujo de la salida en este lugar tiene componente axial no es grande.

En la figura 43 indica claramente a la parte que influye del arrollamiento.

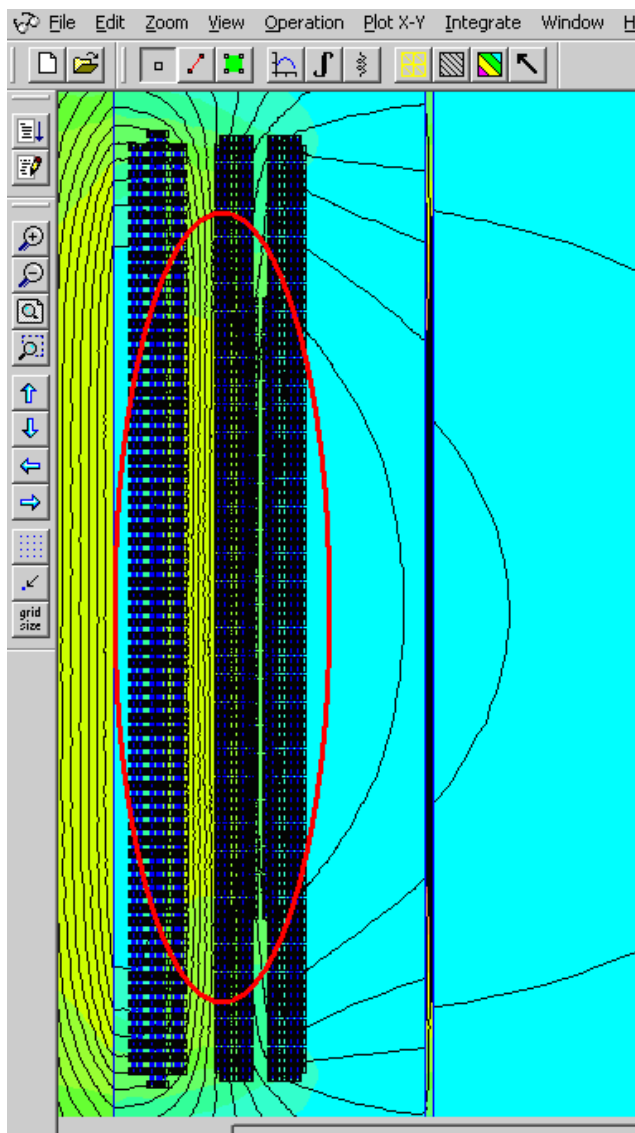


Fig. 43. Pérdidas debido al flujo axial.

El flujo axial genera una distribución corriente a lo largo de la dirección radial. Esta distribución corriente es la causa de las pérdidas axiales, y es de la siguiente manera:

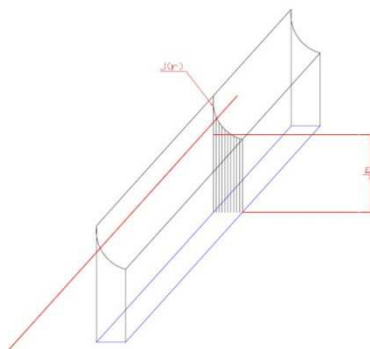


Fig. 44. Distribución de la densidad de corriente a lo largo de la dirección radial

Debido a que el grosor de los conductores utiliza es relativamente pequeño, estas pérdidas no son muy altas (las pérdidas de cerca de 5-20% adicional).

Los parámetros más importantes que afectan a estas pérdidas son:

- ↑ Grosor del conductor \Rightarrow ↑ las pérdidas axial
- ↑ Frecuencia \Rightarrow ↑ las pérdidas axial
- ↑ Resistencia de materiales \Rightarrow ↓ las pérdidas axial
- ↑ La densidad de corriente \Rightarrow ↑ las pérdidas axial

De todos modos, se distribuyen de manera uniforme a lo largo de la bobina, por lo que no son muy perjudiciales.

3.3.1.2. Adicionales debido a las pérdidas de flujo radial

Pérdidas adicionales radiales son creadas por el mismo efecto que causa las pérdidas adicionales axiales (por un flujo magnético cambiante a lo largo del conductor), pero en este caso esta variación es a lo largo de la dirección axial, lo que provoca una distribución de corriente a lo largo de la dirección axial.

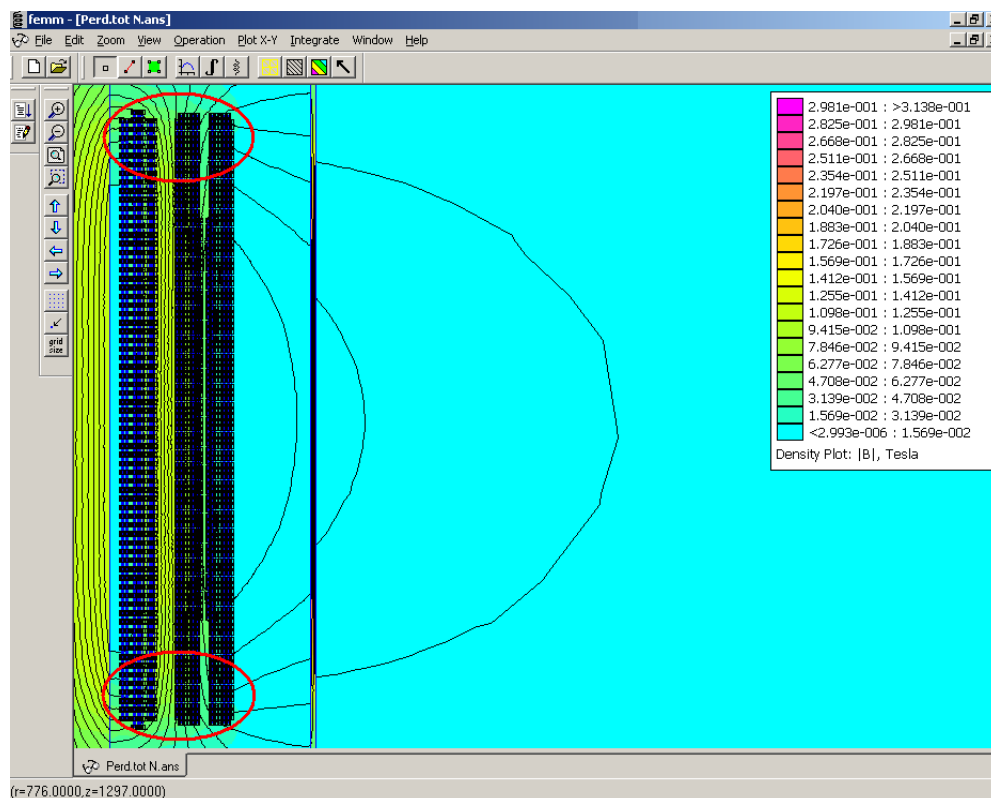


Fig. 45. El flujo radial se concentra en el extremo de las bobina

Detalle de los extremos del arrollamiento:

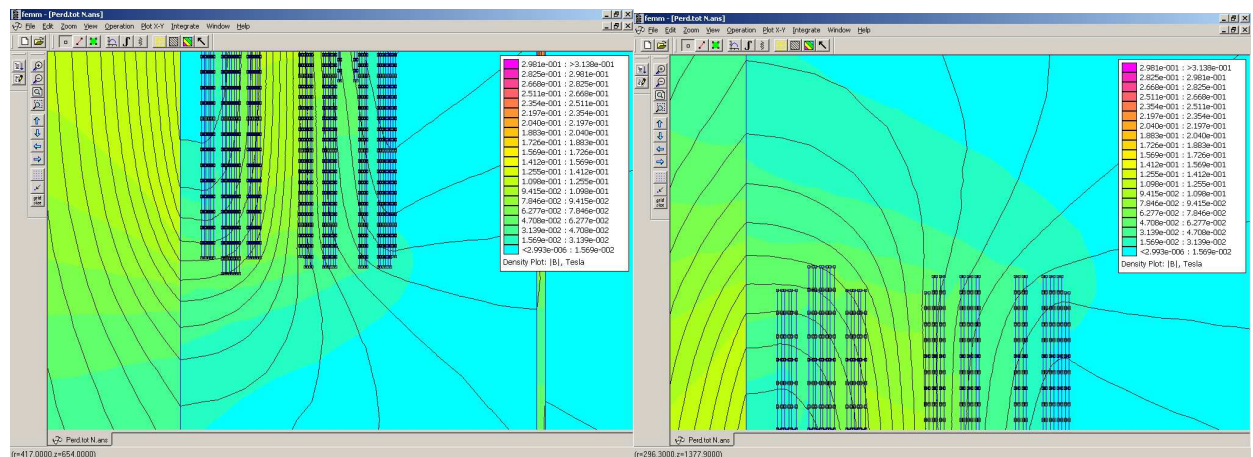


Fig. 46. Detalle de los extremos del arrollamiento

Cuando se utilizan conductores rectangulares, y debido a la componente radial del campo, la densidad de pérdidas adicionales crece en los extremos de los bobinados. Dadas las dimensiones de los conductores del bobinado exterior del transformador ensayado, este efecto no es muy notorio.

En las siguientes simulaciones se aprecia la variación del valor de la densidad de corriente en el arrollamiento de B.T. y A.T.

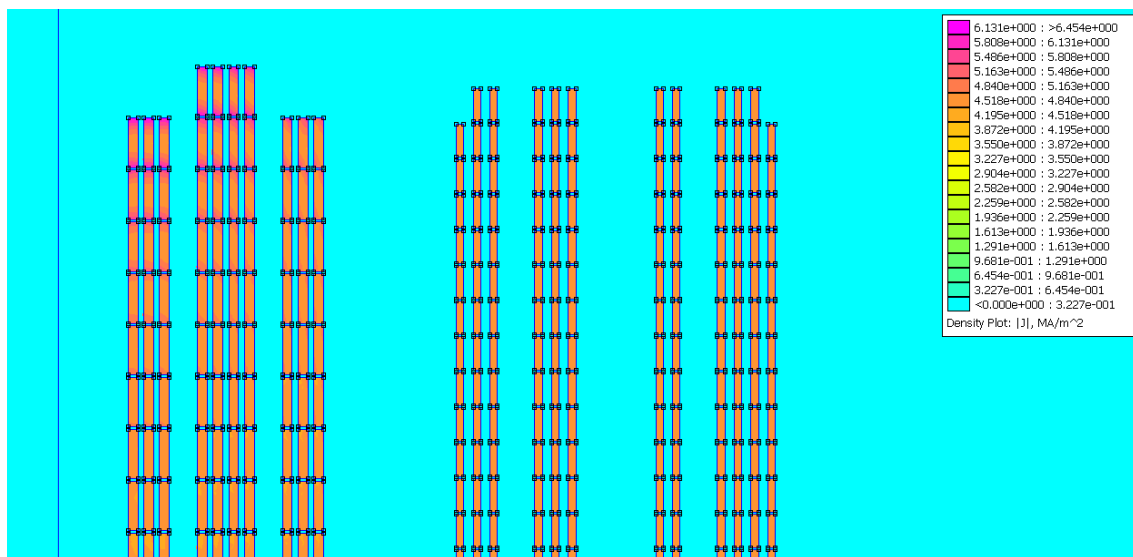


Fig. 47. Distribución de la densidad de corriente en el arrollamiento de B.T. y A.T.

En el arrollamiento de B.T. que pertenece a zona izquierda de la simulación contiene más densidad que en el A.T. por lo tanto la sección de las pletinas es mayor para ir reduciendo la densidad de corriente.

En las siguientes simulaciones nos indicara la diferencia de densidad en el extremo del arrollamiento a una pletina en el interior del arrollamiento.

Como se aprecia en las simulaciones hay más densidad de corriente en los extremos debido al flujo de dispersión radial.

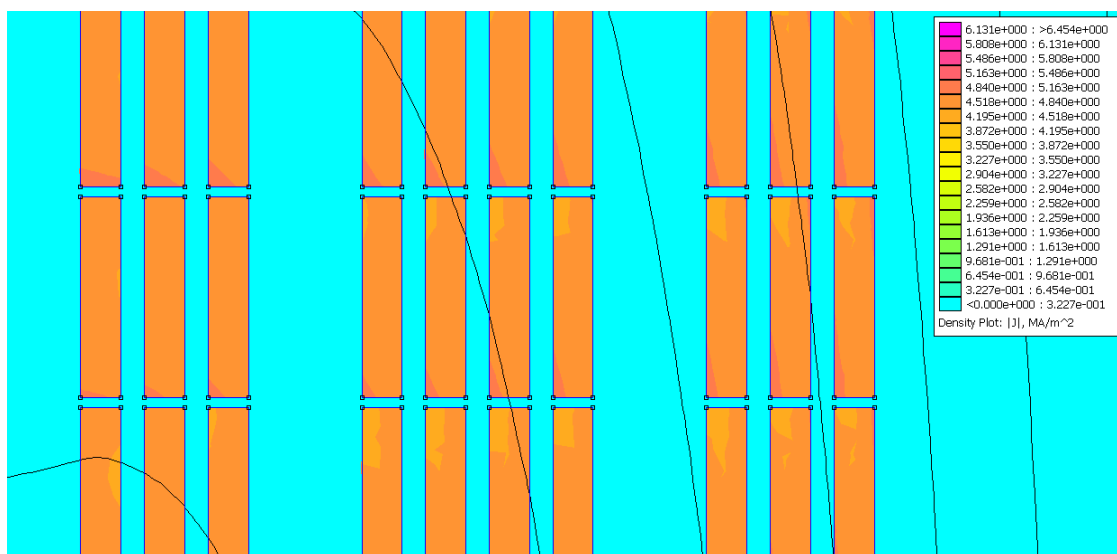


Fig. 48. Densidad de corriente en zona media del arrollamiento de B.T.

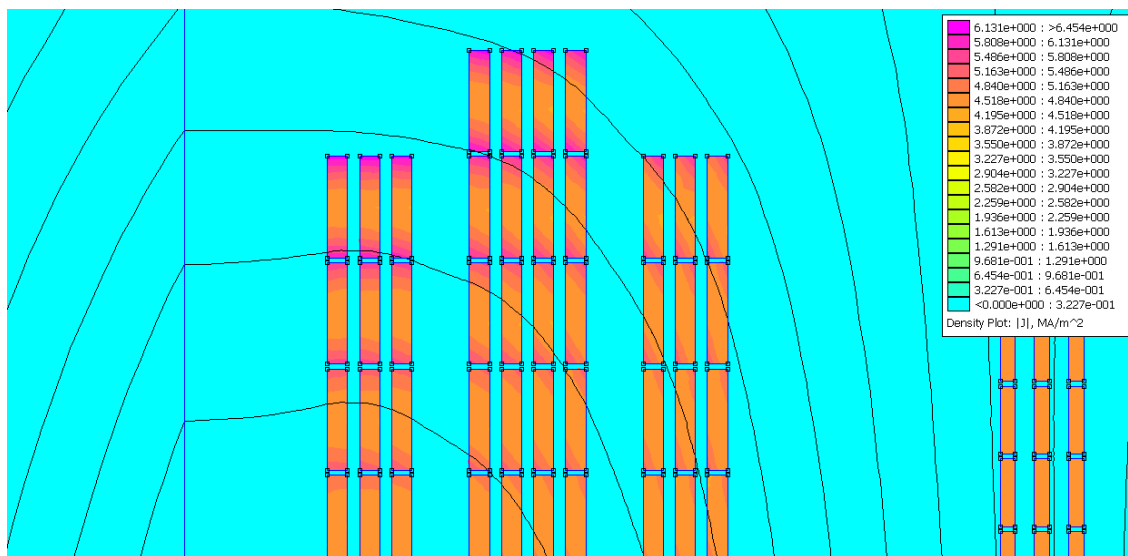


Fig. 49. Densidad de corriente en la zona externa del arrollamiento de B.T.

Cuando se utilizan conductores rectangulares, y debido a la componente radial del campo, la densidad de pérdidas adicionales crece en los extremos de los bobinados. Dadas las dimensiones de los conductores del bobinado exterior del transformador ensayado, este efecto no es muy notorio.

La distribución de la densidad de corriente en dos pletinas en el exterior y en la zona media del arrollamiento de B.T. sería la siguiente:

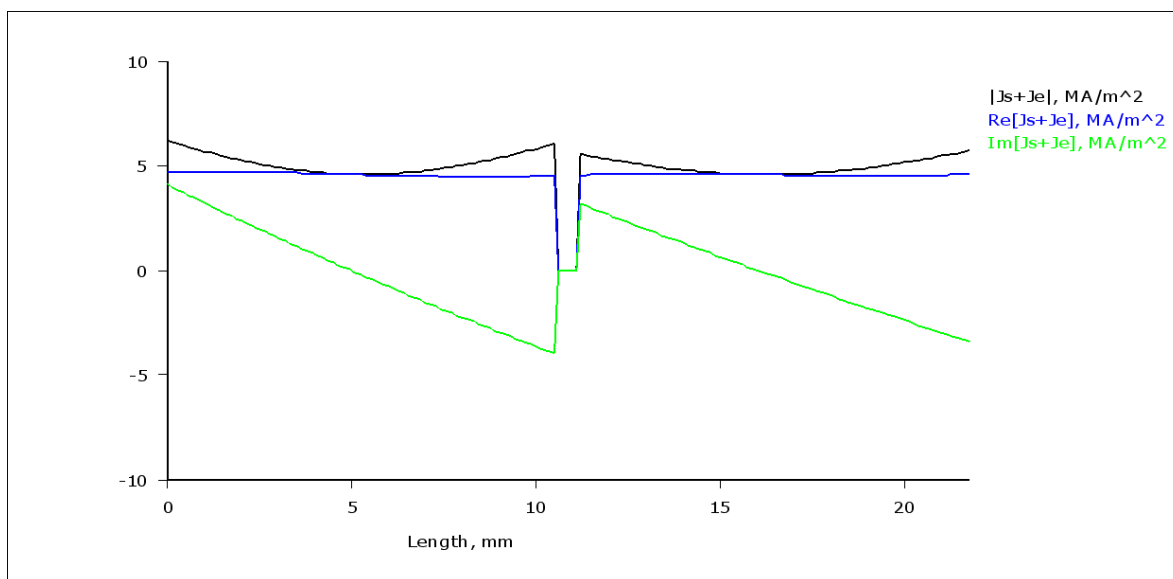


Fig. 50. Distribución de la densidad de corriente en dos pletinas en el extremo del arrollamiento de B.T.

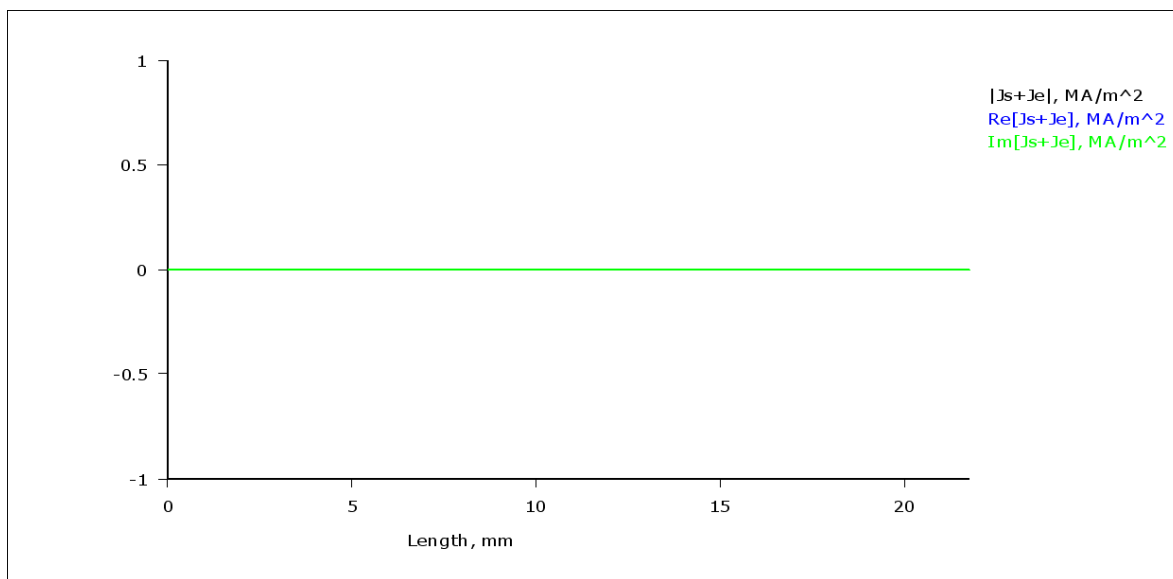


Fig. 51. Distribución de la densidad de corriente en dos pletinas en la zona media del arrollamiento de B.T.

Las gráficas anteriores son opuestas debido al flujo disperso radial que se encuentra en los extremos del arrollamiento y no en la zona media del arrollamiento.

A efectos de mostrar este fenómeno, se volvieron a efectuar los cálculos considerando un conductor de diferentes dimensiones, obteniéndose la distribución actual a lo largo de la dirección axial que causa pérdidas radial parece de esta forma:

En la Fig. 52 se aprecia el fenómeno del efecto pelicular ya que es una sección mayor a la sección real calculada para el transformador.

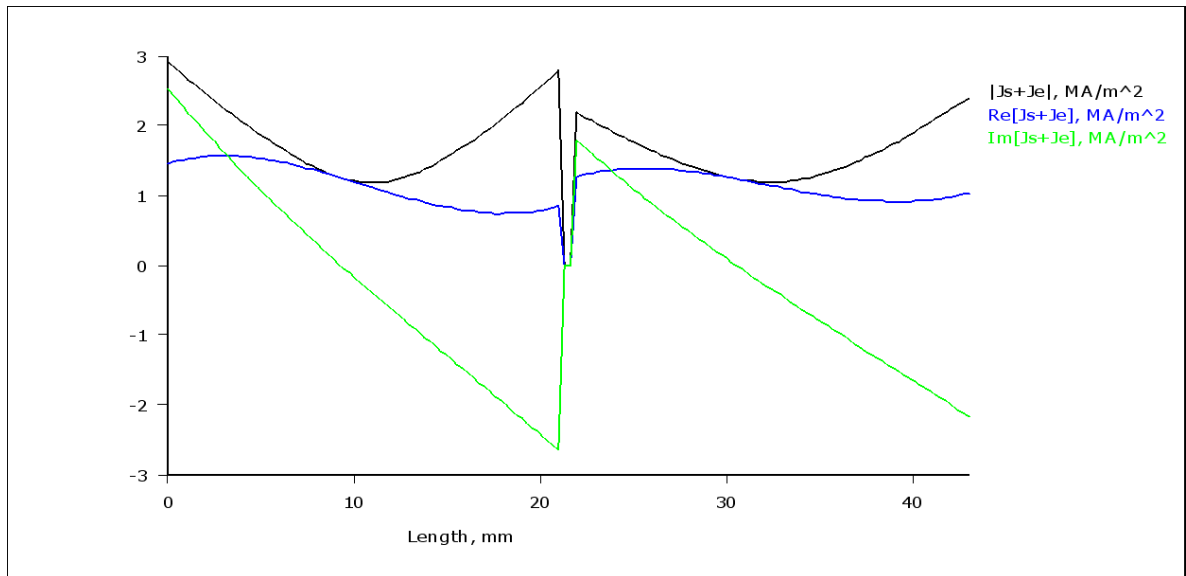


Fig. 52. Densidad de corriente distribuida en dos pletinas de la zona exterior del arrollamiento de B.T.

A lo largo del arrollamiento es de la siguiente manera:

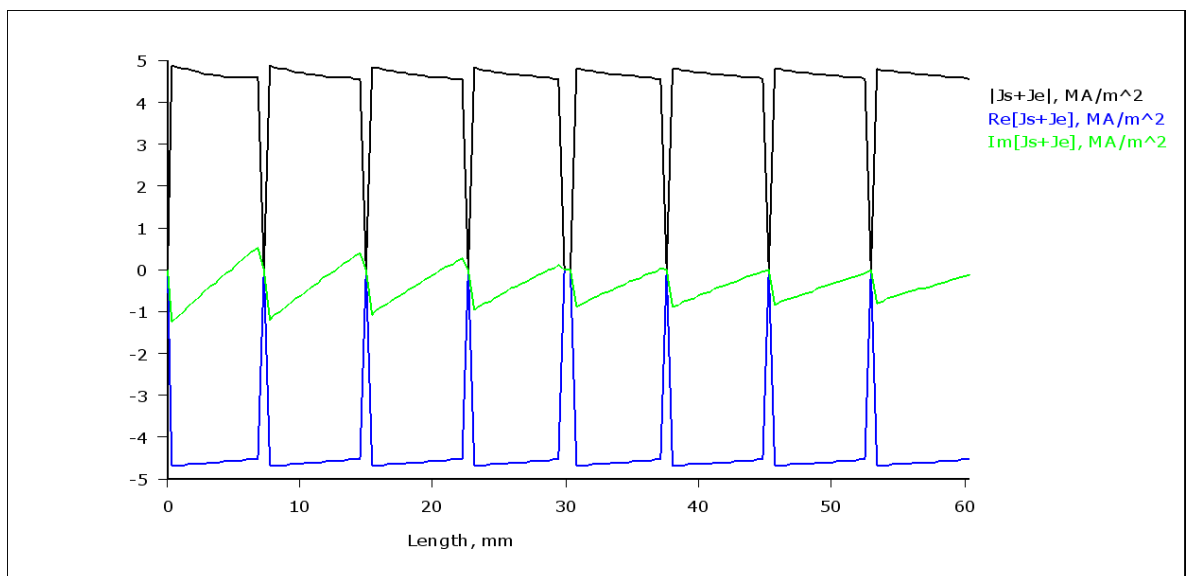


Fig. 53. Densidad de corriente distribuida a lo largo del arrollamiento de A.T.

Para un arrollamiento bobinado con hilo, dado que el conductor es redondo, y que los valores de campo radial son bastante menores al axial, la densidad de pérdidas resulta aproximadamente constante.

Los factores más importantes que afectan a las pérdidas adicionales radiales son:

- ↑ Esbeltez de las bobinas \Rightarrow ↑ pérdidas radiales
- ↑ Los espacios de los canales de refrigeración \Rightarrow ↓ pérdidas radiales
- La geometría de la bobina

Estas pérdidas son muy perjudiciales para los transformadores, porque suponen la mayor parte de las pérdidas adicionales y, sobre todo porque se centran en los extremos de las bobinas, por lo tanto son la causa de los puntos calientes de las bobinas.

3.3.1.3. Pérdidas adicionales debido a compensación imperfecta de las amperivueltas

La densidad de corriente en el conductor de B.T. se centra básicamente en el lugar donde se enfrenta el conductor de baja tensión con la corriente de alta tensión. Esto significa que si hay una parte del conductor de B.T. frente a una bobina de alta tensión con un montón de vueltas cancelado (es decir, un transformador con una amplia gama de cambiador de tomas...) una distribución no uniforme de la densidad de corriente se induce, por tanto, en algunas partes de la bobina del B.T. generará mayores pérdidas que en otros.

Como se aprecia en la siguiente imagen hay una perfecta compensación de las amperivueltas.

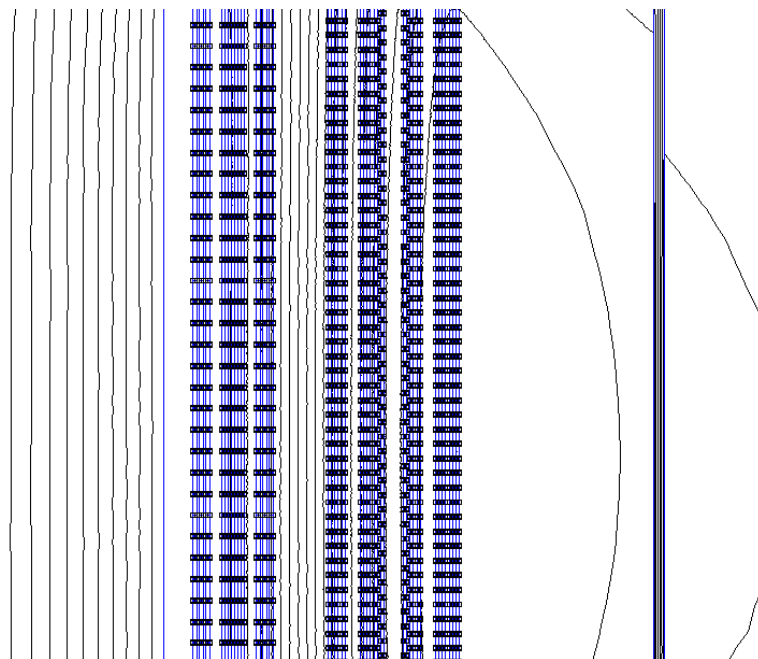


Fig. 54. Compensación perfecta de amperivueltas.

En la siguiente figura hemos modificado el número de espiras por capa en el arrollamiento de A.T. y se aprecia cómo no tiene un campo uniforme y por lo tanto tiene una compensación imperfecta de amperivueltas.

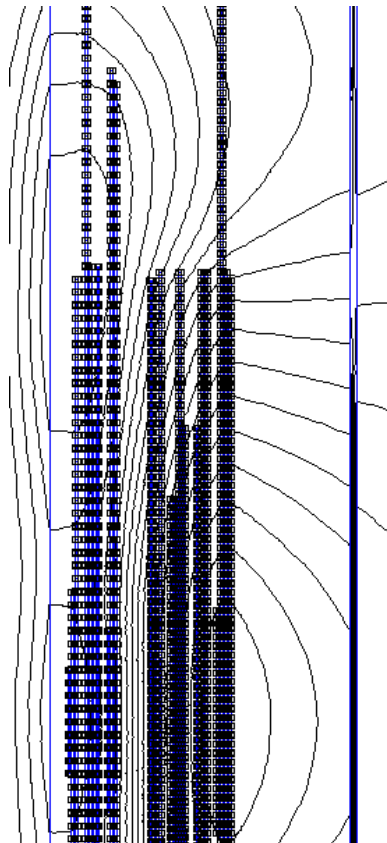


Fig. 55. Compensación imperfecta de amperivueltas.

3.3.2. ¿Cómo se calculan hasta ahora?

Hoy en día la forma de calcular las pérdidas adicionales en algunas fábricas es utilizando un factor proporcional que multiplica a las pérdidas óhmicas del transformador. Este factor proporcional que depende de diferentes parámetros como el tipo de conductor utilizado en el arrollamiento, número de capas, la potencia del transformador...

3.3.3. Cálculo de las pérdidas adicionales mediante simulaciones magnéticas

El cálculo de las pérdidas adicionales en las estructuras y barras de distribución, debido a su geometría tan compleja, son simulados por software 3D. En este proyecto no han sido calculadas.

Para el cálculo de las pérdidas inducidas en las bobinas se ha utilizado el software FEMM. Para este tipo de cálculos, es necesario realizar simulaciones complejas porque de esta manera la distribución de la densidad de corriente a lo largo de la sección transversal del conductor no es uniforme, simulando las corrientes que producen las pérdidas adicionales.

El procedimiento es sencillo, en primer lugar, simular una prueba de carga y medir las pérdidas totales en todos los conductores que se desea medir las pérdidas adicionales. A continuación, realizar la misma simulación, pero a 0 Hz para calcular las pérdidas óhmicas, y la diferencia entre las dos pérdidas son las pérdidas adicionales en el arrollamiento.

3.3.4. Validación del método de cálculo

Al medir las pérdidas adicionales de un transformador real en el laboratorio no se puede distinguir entre las pérdidas de las estructuras / barras de distribución y de las pérdidas en las bobinas por eso no tenemos un valor exacto sino que tenemos una aproximación muy adecuada.

3.3.5. Variación de las pérdidas adicionales mediante la frecuencia

Algunas normas de los transformadores (IEC61378-1) consideran que las pérdidas en las estructuras, barras de distribución y las pérdidas radiales varía con la frecuencia elevada a un exponente de 0,8 (este exponente nos da una indicación, quizás demasiado conservadora), y las pérdidas axiales de las bobinas con un exponente de 2.

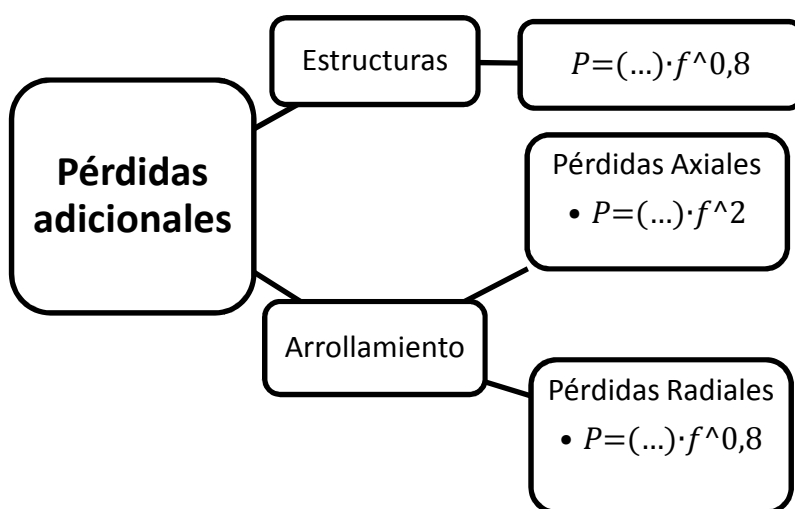


Fig. 56. Esquema de la variación de las pérdidas en función de la frecuencia.



El procedimiento consiste en medir las pérdidas adicionales a dos frecuencias (50 Hz Padic, 50Hz; 133 Hz Padic, 133Hz) y luego se aplica el siguiente sistema de ecuaciones:

$$P_{ADICIONALES \text{ A } 50 \text{ Hz}} = X + Y$$

$$P_{ADICIONALES \text{ A } 133 \text{ Hz}} = A \times X + B \times Y$$

x, pérdidas adicionales en el arrollamiento a 50 Hz

y, pérdidas adicionales en las estructuras a 50 Hz

$$A = (f_2 / f_1)^2$$

$$B = (f_2 / f_1)^{0.8}$$

Con este sistema de ecuaciones puede separar las pérdidas que varían con la frecuencia en el exponente 0.8 y aquellos que hacen en 2.

He realizado el cálculo de pérdidas variando la frecuencia mediante el programa FEMM y se obtiene la siguiente variación de las pérdidas adicionales. Los valores no salen muy exactos ya que dicho programa no es capaz de calcular las pérdidas en las estructuras.

Arrollamiento	0 Hz	50 Hz		133 Hz	
	P.Óhmicas (W)	P.Carga (W)	P.Adicionales (W)	P.Carga (W)	P.Adicionales (W)
B.T.	13292,62	13739,07	446,45	16565,1	3272,48
A.T.	18875,4	19018,71	143,31	19847,55	972,15

Tabla 7. Tabla de las pérdidas variando la frecuencia a 133 Hz.

En la siguiente tabla se plasma las pérdidas por capa en diferentes frecuencias en el arrollamiento de B.T.

B.T	0 Hz	50 Hz		133 Hz	
	P.Óhmicas (W)	P.Carga (W)	P.Adicionales (W)	P.Carga (W)	P.Adicionales (W)
Capa 1	396,596	407,146	10,55	476,041	79,445
Capa 2	403,591	414,171	10,58	483,013	79,422
Capa 3	410,587	421,377	10,79	491,38	80,793
Capa 4	440,014	453,885	13,871	542,851	102,837
Capa 5	447,215	461,892	14,677	555,398	108,183
Capa 6	454,416	470,283	15,867	570,759	116,343
Capa 7	461,617	479,022	17,405	588,676	127,059
Capa 8	465,284	480,684	15,4	577,005	111,721
Capa 9	472,279	490,569	18,29	604,089	131,81
Capa 10	479,275	500,662	21,387	632,684	153,409
Total	4430,874	4579,691	148,817	5521,896	1091,022

Tabla 8. Tabla de pérdidas en el arrollamiento de B.T. variando la frecuencia.



En la siguiente tabla aparecen las perdidas en función de la frecuencia en el arrollamiento de A.T.

A.T	0 Hz	50 Hz		133 Hz	
	P.Óhmicas (W)	P.Carga (W)	P.Adicionales (W)	P.Carga (W)	P.Adicionales (W)
Capa 1	411,527	419,147	7,62	465,08	53,553
Capa 2	425,625	432,528	6,903	473,948	48,323
Capa 3	431,409	437,746	6,337	475,592	44,183
Capa 4	446,834	452,402	5,568	485,269	38,435
Capa 5	452,619	457,215	4,596	484,098	31,479
Capa 6	458,403	461,891	3,488	481,998	23,595
Capa 7	303,33	305,335	2,005	317,074	13,744
Capa 8	315,51	317,061	1,551	326,03	10,52
Capa 9	488,61	490,944	2,334	503,734	15,124
Capa 10	494,394	496,452	2,058	507,525	13,131
Capa 11	509,819	511,526	1,707	520,424	10,605
Capa 12	515,603	517,043	1,44	524,328	8,725
Capa 13	521,387	522,626	1,239	528,734	7,347
Capa 14	516,733	517,652	0,919	522,015	5,282
Total	6291,803	6339,568	47,765	6615,849	324,046

Tabla 9. Tabla de pérdidas en el arrollamiento de A.T. variando la frecuencia.

He realizado los cálculos de pérdidas a 500 Hz debido al informe realizado por *Hans-Peter Neeque* utiliza un transformador de media frecuencia (500 Hz) en la aplicación de un aerogenerador de 3 MW en un campo eólico marino.

Arrollamiento	0 Hz	50 Hz		500 Hz	
	P.Óhmicas (W)	P.Carga (W)	P.Adicionales (W)	P.Carga (W)	P.Adicionales (W)
B.T.	13292,62	13739,07	446,45	55658,12	42365,49
A.T.	18875,4	19018,71	143,31	31846,60	12971,20

Tabla 10. Tabla de las pérdidas variando la frecuencia a 500 Hz.

Como se ha apreciado en las distintas tablas de variación de frecuencia las pérdidas aumentan en función de la frecuencia.



3.3.6. Distribución de las pérdidas

En este apartado mediante tablas y graficas voy a plasmar los valores que salen en cada método utilizado.

La primera parte de comparativa de resultados se va a basar en las pérdidas totales, adicionales y óhmicas que contiene el transformador en los 3 casos más representativos de la posición del regulador agrupando el arrollamiento de B.T y A.T.

En la siguiente tabla nos indica las pérdidas en la posición + de la regulación del transformador, es decir, donde el regulador del transformador contiene la posición 1 que conecta la conexión interna 5-6 y además tiene las siguientes características:

- Contiene el mayor número de espiras en A.T. que es 1408 y en B.T. 344.
- Alimentación: 47250 / 2000 V.
- Arrollamiento de B.T.:
 - Densidad de corriente: 3,26 A / mm²
 - Intensidad de fase: 144,34 A
- Arrollamiento de A.T.:
 - Densidad de corriente: 3,15 A / mm²
 - Intensidad de fase: 35,27 A

Las perdidas han sido analizadas por diferentes métodos que son los siguientes:

FEMM: Software de análisis de elementos finitos.

Ensayo: Operación por la cual se calcula mediante instrumentación de medida unos valores determinados.

Teórico: Cálculo realizado en el apartado anterior de cálculos del transformador.

CDS: Software que se utiliza para obtener cálculos eléctricos, refrigeración, mecánicos en un transformador.

(POS +)	FEMM	ENSAYO	TEÓRICO	CDS
P.TOTALES (W)	31926,9	32524,76	32997,3	35041
P.ÓHMICAS (W)	31274,4	31326,62	32215,6	32395
P.ADICIONALES (W)	652,5	1198,14	781,7	2646

Tabla 11. Pérdidas en el transformador en la posición + de la regulación.

En la tabla 12 nos indica las pérdidas en la posición N de la regulación del transformador, es decir, donde el regulador del transformador contiene la posición 3 que conecta la conexión interna 4-7 y además tiene las siguientes características:



- El número de espiras en A.T. es de 1341 y B.T. es de 344 espiras.
- Alimentación: 45000 / 2000 V.
- Arrollamiento de B.T.:
 - Densidad de corriente: 3,26 A / mm²
 - Intensidad de fase: 144,34 A
- Arrollamiento de A.T.:
 - Densidad de corriente: 3,32 A / mm²
 - Intensidad de fase: 37,04 A

(POS N)	FEMM	ENSAYO	TEÓRICO	CDS
P.TOTALES (W)	32765,1	33418,52	33970,4	35951
P.ÓHMICAS (W)	32168,1	32231,59	33169,7	33317
P.ADICIONALES (W)	597	1186,93	800,7	2634

Tabla 12. Pérdidas en el transformador en la posición N de la regulación.

En la siguiente tabla nos indica las pérdidas en la posición + de la regulación del transformador, es decir, donde el regulador del transformador contiene la posición 1 que conecta la conexión interna 5-6 y además tiene las siguientes características:

- Contiene el mayor número de espiras en A.T. que es 1274 y en B.T. 344.
- Alimentación: 42750 / 2000 V.
- Arrollamiento de B.T.:
 - Densidad de corriente: 3,26 A / mm²
 - Intensidad de fase: 144,34 A
- Arrollamiento de A.T.:
 - Densidad de corriente: 3,5 A / mm²
 - Intensidad de fase: 38,98 A

(POS -)	FEMM	ENSAYO	TEÓRICO	CDS
P.TOTALES (W)	33783,6	34402,55	34984,7	36958
P.ÓHMICAS (W)	33168,9	33248,96	34164,1	34336
P.ADICIONALES (W)	614,7	1153,59	820,6	2622

Tabla 13. Pérdidas en el transformador en la posición - de la regulación.



A continuación vamos a analizar por separado los arrollamientos que contiene el transformador.

En primer lugar vamos a analizar el arrollamiento de B.T.

B.T.	FEMM	TEÓRICO
P.TOTALES (W)	13762,694	14155
P.ÓHMICAS (W)	13292,621	13742,8
P.ADICIONALES (W)	470,073	412,2

Tabla 14. Pérdidas en el transformador en el arrollamiento de B.T.

Ahora vamos a analizar las perdidas en el arrollamiento de A.T.

En las siguientes tres tablas nos indican los valores de las tres partes más importantes de la posición del conmutador.

A.T. (Pos +)	FEMM	TEÓRICO
P.TOTALES (W)	18130,713	18842,3
P.ÓHMICAS (W)	17981,713	18472,8
P.ADICIONALES (W)	149,000	369,5

A.T. (Pos N)	FEMM	TEÓRICO
P.TOTALES (W)	19018,710	19815,4
P.ÓHMICAS (W)	18875,409	19426,9
P.ADICIONALES (W)	143,301	388,5

A.T. (Pos -)	FEMM	TEÓRICO
P.TOTALES (W)	20015,310	20829,7
P.ÓHMICAS (W)	19876,374	20421,3
P.ADICIONALES (W)	138,936	408,4

Tabla 15. Pérdidas en el transformador en el arrollamiento de A.T.

Distribución de las pérdidas totales (A.T. y B.T.) en cada posición del regulador:

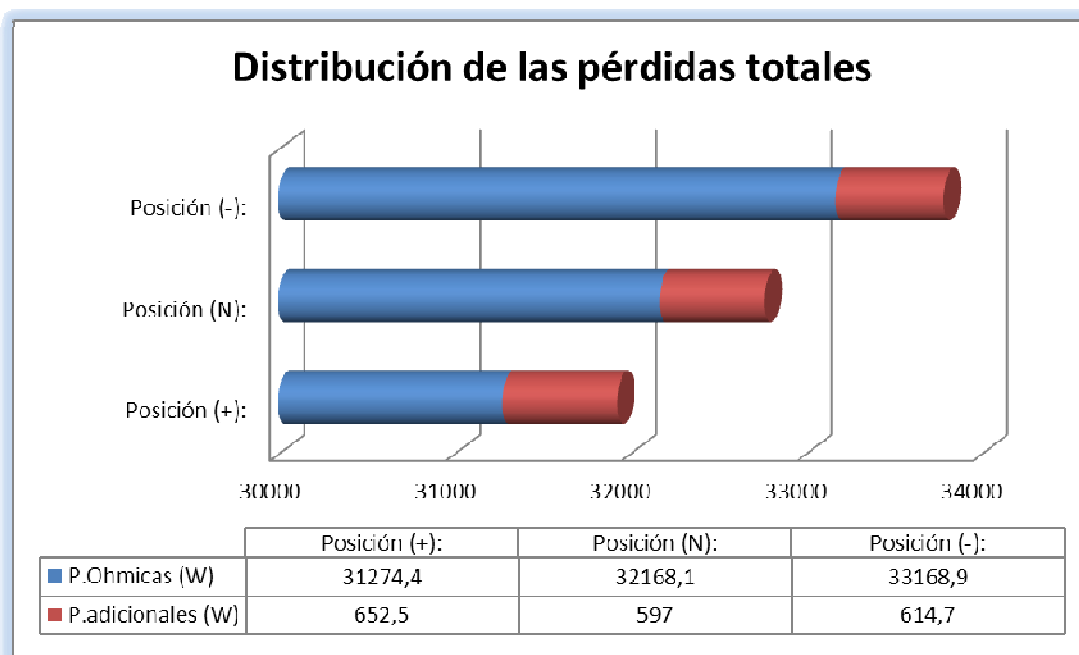


Fig. 57. Distribución de las pérdidas totales (B.T. y A.T.)

Como se aprecia en el diagrama la mayor parte de las pérdidas totales son por culpa de las pérdidas óhmicas pero hay que tener en cuenta también las pérdidas adicionales por flujo radial ya que son perjudiciales en el aspecto de punto térmico máximo del arrollamiento ya que se encuentra en los extremos del arrollamiento y dichas pérdidas adicionales se encuentran en esa parte del arrollamiento.

En las próximas tablas se plasma la distribución de las pérdidas en los dos arrollamientos por capas.

B.T	0 Hz	50 Hz	
	P.Óhmicas (W)	P.Carga (W)	P.Adicionales (W)
Capa 1	396,596	407,146	10,55
Capa 2	403,591	414,171	10,58
Capa 3	410,587	421,377	10,79
Capa 4	440,014	453,885	13,871
Capa 5	447,215	461,892	14,677
Capa 6	454,416	470,283	15,867
Capa 7	461,617	479,022	17,405
Capa 8	465,284	480,684	15,4
Capa 9	472,279	490,569	18,29
Capa 10	479,275	500,662	21,387
Total	4430,874	4579,691	148,817

Tabla 16. Distribución de las pérdidas en el arrollamiento de B.T. por capas.



En la siguiente tabla aparece la distribución de las pérdidas por capas en el arrollamiento de A.T.

A.T	0 Hz	50 Hz	
	P.Óhmicas (W)	P.Carga (W)	P.Adicionales (W)
Capa 1	411,527	419,147	7,62
Capa 2	425,625	432,528	6,903
Capa 3	431,409	437,746	6,337
Capa 4	446,834	452,402	5,568
Capa 5	452,619	457,215	4,596
Capa 6	458,403	461,891	3,488
Capa 7	303,33	305,335	2,005
Capa 8	315,51	317,061	1,551
Capa 9	488,61	490,944	2,334
Capa 10	494,394	496,452	2,058
Capa 11	509,819	511,526	1,707
Capa 12	515,603	517,043	1,44
Capa 13	521,387	522,626	1,239
Capa 14	516,733	517,652	0,919
Total	6291,803	6339,568	47,765

Tabla 17. Distribución de las pérdidas en el arrollamiento de A.T. por capas.

3.4. Validación de los cálculos de la tensión de cortocircuito mediante FEMM

Mediante el FEMM vamos a obtener unos valores sobre la tensión de cortocircuito y serán comparados con los valores teóricos (aproximación) y con los valores reales obtenidos en el ensayo eléctrico del transformador.

Para obtener dichos valores con el software de elementos finitos necesitamos señalar las áreas que nos interesan que en nuestro caso será el arrollamiento de B.T., el arrollamiento de A.T., el área que está entre los dos arrollamiento que contiene aceite y el núcleo.

En la siguiente figura aparecen las áreas marcadas para realizar la simulación de la energía magnetizada.

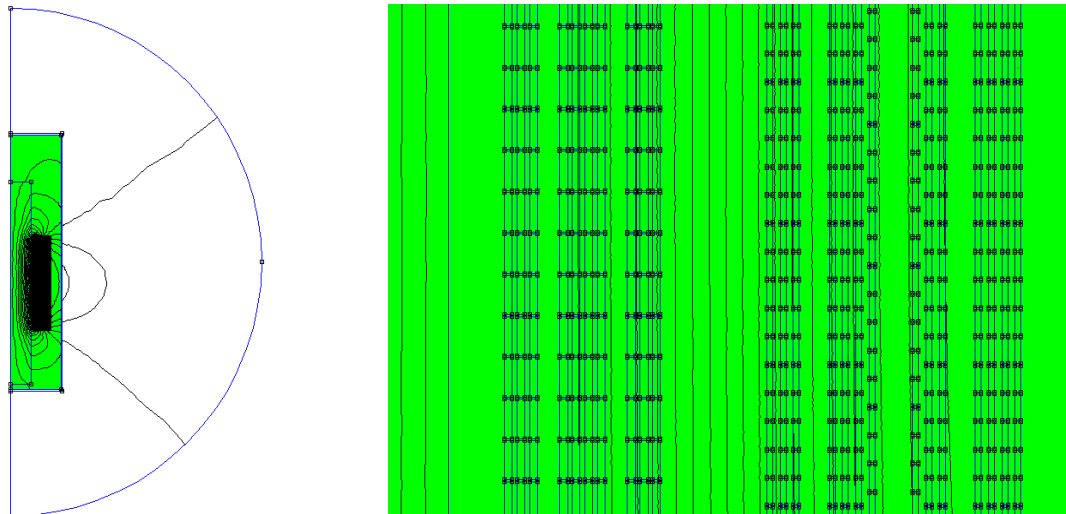


Fig. 58. Dibujo de femm indicando las áreas señaladas para obtener la energía magnética almacenada.

Después de indicar las áreas vamos a indicar la simulación del parámetro energía magnética almacenada.

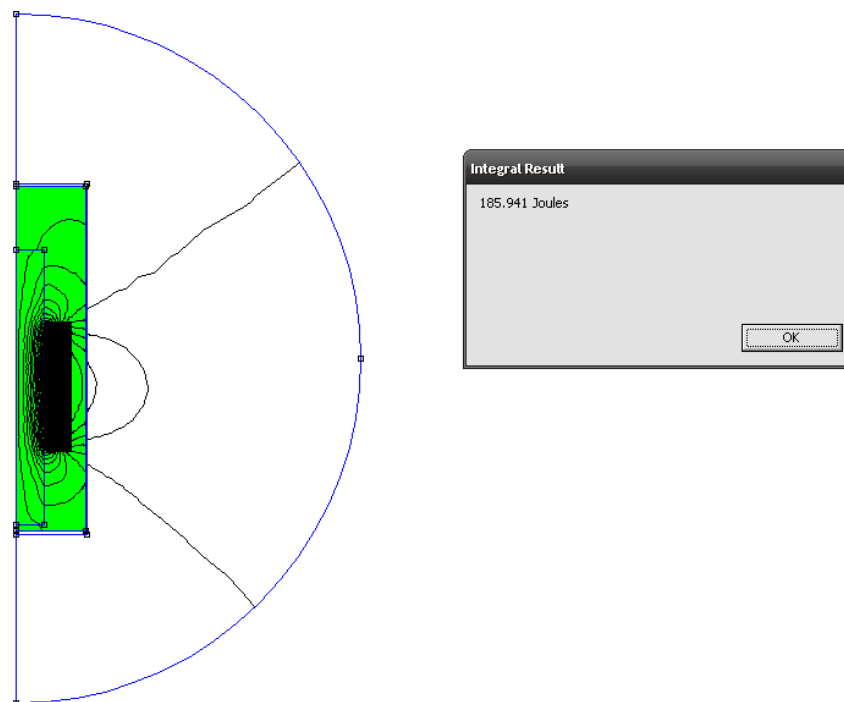


Fig. 59. Dibujo del femm que aparece el valor de energía magnética almacenada.

Con las diferentes magnitudes eléctricas como energía magnetizada, inductancia, tensión, intensidad, potencia..., se calcula la tensión de cortocircuito.



CALCULO DE LA U _{cc} (%)		
Potencia del transformador	5	MVA
Tensión de bobinado referencia	45	kV
Corriente de bobinado referencia	64,1500299	A
Frecuencia	50	Hz
Energía Magnética almacenada	186,357	Julios
Inductancia H	0,0905695	Henrios
Inductancia Ω	28,4532482	Ohmnios
Inductancia % (U _{cc} %)	7,025	
Perdidas en carga	32765,1	Vatios
U _{cc}	0,655302	
Inductancia total %	7,056	

Tabla 18. Cálculo de la U_{cc} (%).

Ahora vamos a comparar los valores obtenidos en la posición nominal del transformador.

En la siguiente tabla contiene tres valores de la tensión de cortocircuito mediante el cálculo teórico (aproximación de los cálculos realizados en el apartado de cálculos del transformador), mediante el FEMM y los valores reales del transformador obtenido en su ensayo.

(POS N)	FEMM	ENSAYO	TEÓRICO
U _{cc} (%)	7,056	7,197	7,57

Tabla 19. Tensión de cortocircuito en la Pos N.

Como se aprecia en la tabla el valor que nos ha simulado el software de elementos finitos es muy cercano al valor real extraído en el ensayo del transformador. No nos simula un valor exacto al real ya que hemos comentado que no hemos calculado las pérdidas adicionales en las estructura del transformador ya que FEMM no puede calcular dichas pérdidas ya que es necesario un programa que simule en 3D.

En la siguiente tabla indica los valores en las diferentes posiciones del regulador y el error producido.

U _{cc} (%)	FEMM	ENSAYO	ERROR (%)
POS +	7,06	7,228	2,324
POS N	7,056	7,197	1,959
POS -	7,027	7,187	2,226

Tabla 20. Tensión de cortocircuito y el error



3.5. Posibles soluciones para reducir las pérdidas adicionales

- No usar materiales ferromagnéticos para las estructuras del transformador, así se reducen las pérdidas en las estructuras. Posible solución utilizar materiales compuesto como (fibra de vidrio).
- Utilizar conductores paralelos así reducimos las pérdidas pero producimos otras desventajas como el aumento del grosor del arrollamiento y peor factor de relleno.
- Modificar el flujo de salida con materiales ferromagnéticos en las paredes de la cuba conocidos como shunt magnéticos.



Conclusión

El proyecto realizado abarca varios aspectos constructivos del transformador y se han extraído las siguientes conclusiones que se exponen a continuación.

En el capítulo 1 se desarrollan los conceptos generales de un transformador. Se explica, que cada transformador contiene unas características técnicas específicas que exige el cliente al diseñador, por lo que cada transformador es único aunque puedan servir algunos cálculos y diseños de otros transformadores de características similares para tener una orientación.

Se aplicarán diferentes técnicas para garantizar valores determinados que contiene la especificación del cliente para cumplirla aunque conlleve un aumento del coste material del transformador.

En el capítulo 2 se explica los cálculos necesarios para garantizar los valores expuestos en la especificación del transformador. Se utilizan constantes de aproximación para reducir la complejidad de los cálculos. Los valores obtenidos son aptos para decidir el diseño del transformador.

En el capítulo 3 se aplica el programa de cálculo por elementos finitos en dos dimensiones de libre distribución FEMM para perfeccionar los cálculos de las pérdidas realizados analíticamente en el capítulo 2.

Los resultados de este trabajo permiten mejorar el conocimiento que hasta ahora teníamos de:

- Pérdidas de potencia en un transformador.
- Variación de las pérdidas en función de la frecuencia.
- Distribución de la densidad de corriente.
- Tensión de cortocircuito de un transformador.

Las simulaciones con el software FEMM son muy precisas y es un programa que conviene emplear para obtener valores más ajustados en el diseño de un transformador con características especiales.

Los valores obtenidos de pérdidas adicionales en un transformador de aceite exigen utilizar un programa que pueda simular en 3D las pérdidas en las estructuras y cuba, por lo que su cálculo no han sido tan preciso. Se ha desarrollado un método para calcular las pérdidas en los arrollamientos. Este se ha comparado con los valores reales de un transformador. Es muy importante hallar las pérdidas adicionales porque también influyen para determinar el punto caliente del transformador.

También se describe un método para obtener la tensión de cortocircuito de cualquier transformador y fue comparado con su valor real con un error entorno al 2%.

Respecto al futuro de este proyecto de investigación, expongo a continuación una serie de temas que pueden hacer progresar esta línea del trabajo.



Análisis de las pérdidas adicionales en estructuras mediante un software de elementos finitos que pueda simular en 3D.

Influencia de las pérdidas adicionales en el calentamiento del transformador.

Análisis de las pérdidas y tensión de cortocircuito mediante femm en los transformadores secos.

Análisis de las pérdidas de potencia de un transformador mediante la aplicación de resistencias magnéticas shunt en la pared de la cuba.

Diseño de un transformador aplicando nuevos materiales compuestos en vez de materiales metálicos en las estructuras.

Análisis de las distancias mínimas de seguridad aplicando otros materiales con diferente rigidez dieléctrica.

.



Bibliografía

Para la realización de este proyecto se ha consultado y tomado datos de las siguientes fuentes:

BLUME, L.F.; BOYAJIAN, A.; CAMILLI, G.; LENNOX, T.C.; MINNECI, S.; MONTSINGER, V.M.

"Transformer engineering. A treatise on the theory, operation and application of transformers".

Editorial John Wiley&Sons. 1967 (2ª edición)

CORRALES MARTIN, J.

"Cálculo industrial de máquinas eléctricas. Tomo II".

Editorial Marcombo. Barcelona 1982.

CORRALES MARTIN, J.

"Teoría, cálculo y construcción de transformadores. Tomo VII".

Editorial Labor. Barcelona 1969.

Norma IEC 60076-1 (edición 2.1): *"Power transformers. Part 1: General"*.

Norma IEC 60076-2 (edición 2.0): *"Power transformers. Part 2: Temperature rise"*.

Norma IEC 60076-3 (edición 2.0): *"Power transformers. Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air"*.

Norma IEC 60076-8 (edición 1.0): *"Power transformers. Part 8: Application guide"*.

Norma IEC 60214 (edición 3.0): *"On load tap changers"*.

Norma IEC 60354 (edición 1.0): *"Loading guide for oil immersed power transformers"*.

Norma UNE – EN 60296. *"Fluídos para aplicaciones electrotécnicas"*.

Norma UNE – EN 50216. *"Accesorios para transformadores de potencia y reactancias"*.

Norma UNE – EN 20175. *"Sistema de pintado para transformadores de potencia. Acabado integral de pintura epoxi-poliuretano"*.

Norma ISO 2768V: *"Tolerancias generales"*

Manual del programa FEMM.

Tutorial magnético y electromagnético sobre FEMM.



Anexos