



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Diseño eléctrico de un transformador seco de
500 kVA para laboratorio.

Electrical design of a 500 kVA dry type
transformer for laboratory purposes.

Autor/es

Ángel Martínez Sádaba

Director/es

Pedro Ibáñez Carabantes

Unizar / Escuela de ingeniería y arquitectura

Junio de 2024



ÍNDICE DE DOCUMENTOS

1. Documento 1: Memoria descriptiva.....
2. Documento 2: Anexo 1 Simulaciones.....
3. Documento 3: Anexo 2 Presupuesto.....



Universidad
Zaragoza

Documento 1: Memoria Descriptiva

Autor/es

Ángel Martínez Sádaba

Director/es

Pedro Ibáñez Carabantes

Unizar / Escuela de ingeniería y arquitectura
Junio de 2024



Resumen de Diseño eléctrico de un transformador seco de 500 kVA para laboratorio.

El presente documento TFG plantea el diseño eléctrico de un transformador seco especial para laboratorio de 500 kVA, de acuerdo con las exigencias de la empresa Hitachi Energy y dentro de mi labor durante el proceso de prácticas formativas realizadas en dicha empresa.

La labor realizada en esta estancia incluye:

- Recogida de datos de diseño iniciales.
- Interpretación específica de los datos recogidos.
- Elaboración de un plan de diseño de transformador.
- Planteamiento de varios diseños posibles para seleccionar el diseño óptimo.
- Simulación de todos los diseños planteados.
- Elección del diseño final
- Conclusión del proyecto con vistas a su realización en un futuro próximo.

Por tanto, en este proyecto final de grado se incluirán una memoria descriptiva detallando todos los apartados especificados y los anexos pertinentes.



Índice

1. Introducción	5
2. Particularidades del transformador.....	6
2.1. <i>Descripción técnica</i>	7
2.1.1 <i>Aplicación y características de la instalación.....</i>	7
2.1.2 <i>Datos eléctricos primario</i>	7
2.1.3 <i>Datos eléctricos secundario.....</i>	8
2.1.4 <i>Datos eléctricos transformador</i>	9
2.1.5 <i>Datos mecánicos</i>	9
2.2. <i>Condiciones del Laboratorio.....</i>	10
3. Diseños iniciales.....	11
3.1. <i>Cálculos de corrientes del diseño elegido.....</i>	13
3.2. <i>Diseños realizados</i>	17
3.2.1 <i>Diseño 1 Sin canal de refrigeración.....</i>	21
3.2.2 <i>Diseño 2 con canal de refrigeración</i>	23
3.2.3 <i>Diseño 3 Canal de refrigeración colapsado</i>	24
3.3 <i>Selección del diseño.....</i>	25
4. Análisis del diseño	26
4.2 <i>Conclusión de la simulación.....</i>	30
5. Características y partes del transformador.....	30
6. Finalización del proyecto	34
6.1 <i>Ensayos por realizar.....</i>	35
6.2 <i>Estado actual</i>	35
7. Presupuesto	36
8. Conclusión.....	36
9. Bibliografía	37



1. Introducción.

El objeto de este TFG como se indica en el apartado resumen plantea el diseño de un transformador seco de 500 kVA particular para laboratorio, de acuerdo con las pautas que ha establecido la empresa Hitachi Energy Zaragoza (HEZ).

Tras realizar una consulta con los responsables de ingeniería durante mi estancia de prácticas en HEZ, se plantearon una serie de reuniones con un ingeniero eléctrico senior del departamento de ingeniería de diseño de la empresa. En estas reuniones se presentaron varios tipos de proyectos que eran de especial relevancia para la empresa y que supondrían una formación muy interesante para mí como ingeniero.

Después de presentar a mi tutor de la universidad todos estos tipos de proyectos, se llegó a la conclusión mutua de que un proyecto interesante para ambas partes, sería la elaboración de un proyecto de diseño eléctrico para un transformador seco especial para laboratorio en formato de tesis tipo B.

Para llevar a cabo este diseño, mantuve diversas reuniones técnicas durante mi estancia como becario de ingeniería en HEZ. En estas reuniones, de forma escalonada y organizada, se fueron definiendo los cálculos y la exigencia técnica necesaria para la correcta elaboración posterior del diseño del transformador. Mientras tanto fui instruyéndome con los manuales de la empresa y la normativa necesaria, así como, los programas CDSE, FEMM y DTS, además de otros programas de edición de textos y de diseño gráfico.

El primero de estos programas, CDSE se utiliza para aplicar la normativa IEC60076 (1,2), la normativa EN50708 (3,4,5) y las normativas internas de la empresa (Manuales), de esta forma se asegura que el diseño cumple con todos los estándares necesarios, para esta labor, en las subrutinas de CDSE se encuentra toda la normativa implementada de forma que hace al usuario mucho más sencillo y rápida la elaboración del diseño.

Mientras tanto los programas FEMM y DTS sirven para realizar simulaciones y cálculos de temperatura, pérdidas e impedancias. Estos programas serán utilizados para la comprobación de la viabilidad de los diferentes diseños a realizar, así como, de las características de estos mismos para poder llegar a una conclusión. Estas aplicaciones son imprescindibles para el modelaje y estudio de nuestro transformador, dado que la herramienta utilizada normalmente para estas simulaciones, CDSE, no recoge dentro de su rango de funcionamiento transformadores con diseños tan especiales como el que se va a realizar en este proyecto.

Por otra parte, con las aplicaciones del paquete office como Excel o Word se realizarán cálculos en forma de tablas, además del proceso de recogida de datos y tratamiento de estos. También se elaborará una memoria del proyecto con sus posibles anexos complementarios.

Con la aplicación AutoCAD, se han realizado, de manera manual, varias vistas de los diseños planteados, puesto que es un diseño especial, los programas destinados al diseño eléctrico son incapaces de realizar planos o vistas, que den solución correcta a este transformador particular.



En definitiva, en este proyecto de fin de carrera, con la ayuda de Hitachi Energy, se van a describir pormenorizadamente todos los pasos que se realizan normalmente, cuando en la empresa se plantea un diseño para un transformador especial.

Dentro de este apartado, destacaremos como grueso del proyecto, los diseños de distintos planteamientos de diseño, lo que nos ayudará a estudiar sus particularidades y su viabilidad, para posteriormente elegir el diseño más adecuado con las justificaciones pertinentes, basadas en simulaciones, experiencias previas y criterios de ingeniería.

Este proyecto lleva como objetivo establecer las pautas seguidas y simulaciones necesarias para desarrollar el diseño eléctrico de un transformador seco especial para laboratorio de 500 kVA.

2. Particularidades del transformador.

Para poder plantear el diseño eléctrico, es necesario conocer las particularidades que definen nuestro proyecto, como ya se ha expresado con anterioridad nos enfrentamos ante un transformador seco de 500kVA para laboratorio.

Nuestro transformador se encargará de elevar la tensión de alimentación en el primario (400V o 460V) a las tensiones requeridas por el laboratorio (800V, 1200V, 1800V, 2400V y 3000V), esto supone 10 combinaciones diferentes, aunque en todo momento solo habrá simultáneamente una tensión de entrada y una de salida.

Este transformador tiene varias particularidades que lo difieren del típico diseño de transformador seco, al estar destinado para su uso en el laboratorio de la empresa, se solicitan una serie de condiciones que difieren al diseño normal.

Podemos empezar a definir las particularidades por el bobinado, en nuestro caso, contamos con dos arrollamientos de banda, uno en el primario y otro en el secundario, en cada uno de estos arrollamientos tendremos las pletinas de entrada y salida necesarias, necesitaremos pletinas para obtener dos tensiones de primario y 5 posibles tensiones de secundario. Además, contaremos con pletinas de conexión para formar la conexión requerida de estrella-estrella.

Normalmente no se hacen salidas de pletina para cada tensión, sino que se realiza un Tapping o pernos de conmutación que permiten variar la tensión de salida.

El transformador deberá ser capaz de aguantar las corrientes de todas las posibles combinaciones de tensiones primario-secundario.

Además, en una de las tensiones de alimentación posible tendremos 150 Hz de frecuencia, al ser necesaria para su labor en uno de los ensayos del laboratorio.



2.1. Descripción técnica.

Se ha recogido en un documento la descripción técnica requerida por el cliente, en este caso el laboratorio de la propia empresa, en este documento apreciamos la siguiente información:

2.1.1 Aplicación y características de la instalación.

• Aplicación: Ensayos de transformadores de potencia.
• Normas de referencia: IEC 60076-11:2018.
• Tipo de transformador: Transformador trifásico con aislamiento seco.
• Régimen de funcionamiento: En continuo.
• Sobreexcitación: 10% en continuidad.
• Temperaturas de trabajo: -25 °C hasta 40°C.
• Altitud de la instalación: < 1000m.
• Tipo de instalación: IP00 interior.
• Clases ambientales según IEC60076-11:
- Clase ambiental: E2.
- Clase Climática: C2.
- Clase comportamiento al fuego: F1.
- Clase sísmica: S0.

2.1.2 Datos eléctricos primario.

• Potencia nominal: 500 – 630 kVA.
• Tensiones:
- 400v 50-60Hz.
- 460v 150Hz.
• Corrientes:
- 721.7 A (400v).
- 627.6 A (400v).
• Material de los conductores: Preferiblemente Aluminio.



• Posición de los terminales: Parte superior del transformador.
• Tensiones de ensayo:
- Nivel de aislamiento: 1.1kV.
- Nivel de impulso: 0 kV polaridad negativa.
- Nivel de tensión aplicada: 3kV.
• Nivel de THD: <5%.
• Calentamiento medio máximo: 100K (Clase térmica H – 180°C).

2.1.3 Datos eléctricos secundario.

• Potencia nominal: 500 – 630 kVA.
• Tensiones orientativas:
- 800v 50-60-150Hz.
- 1200v 50-60-150Hz.
- 1600v 50-60-150Hz.
- 2400v 50-60-150Hz.
- 3000v 50-60-150Hz.
• Corrientes:
- 360.8 A (800v).
- 240.6 A (1200v).
- 180.4 A (1600v).
- 120.3 A (2400v).
- 96.2 A (3000v).
• Material de los conductores: Preferiblemente Aluminio.
• Posición de los terminales: Parte superior del transformador.
• Tensiones de ensayo:
- Nivel de aislamiento: 3.6kV.
- Nivel de impulso: 20 kV polaridad negativa.
- Nivel de tensión aplicada: 10kV.
• Nivel de THD: <5%.
• Calentamiento medio máximo: 100K (Clase térmica H – 180°C).



2.1.4 Datos eléctricos transformador.

• Grupo de conexión: Yy0.
• Pantalla electrostática: Si.
• Perdidas en vacío: Sin pérdidas máximas (referencia UNE EN 50708 (3,4,5)).
• Perdidas en carga: Sin pérdidas máximas (referencia UNE EN 50708 (3,4,5)).
• Impedancia de referencia: 5%.
• Corriente de vacío o de magnetización: <1%.
• Nivel de potencia acústica: 70 dB.
• Sondas de temperatura en bobinados de BT: PT100 + controlador.

2.1.5 Datos mecánicos.

• Peso: <5000kgr.
• Ruedas: Sin ruedas, entramado de apoyo 1070 x 1070 mm.
• Protección contra la corrosión según ISO12944: C2H.
• tornillería: Estándar Zincada.
• Color de la pintura: RAL 7035.
• Placa de características: Aluminio.



El esquema del transformador diseñado en este proyecto se realizará en una fase futura, cuando el transformador haya sido lanzado a producción, adecuándose así a la realidad del laboratorio del momento.

Las permutaciones de tensión de primario y secundario del transformador están controladas por programas y hardware de la empresa, es decir, todos los terminales de entrada y salida del transformador se conectan a los terminales de permutación del laboratorio, para posteriormente mediante circuitos de potencia, elegir los terminales de entrada y salida con el nivel de tensión deseado.

3. Diseños iniciales.

La siguiente etapa en el proceso de diseño va a ser la del desarrollo de varios diseños posibles para estudiar sus características y elegir el óptimo.

Podemos dividir esta búsqueda del mejor diseño en dos fases, la primera fase o fase uno, será la encargada de realizar versiones con arrollamientos distintos, el objetivo de esta fase es cambiar el número de espiras, dado que este número influye directamente en el ancho de la bobina, además de la precisión de las tensiones.

Como las pletinas se deben colocar siempre en la misma posición y en números enteros de espiras, cuantas más espiras coloquemos, menor salto de tensión habrá entre espira y espira, por tanto, con mayor precisión podremos acercarnos a las tensiones requeridas por el laboratorio.

En las siguientes tablas podemos observar las espiras teóricas y reales, así como la tensión que transformarían en la salida del transformador, nótese que en el primario hay dos entradas correspondientes a las dos formas de alimentación posible, además, en el secundario habrá tantas salidas como ha especificado el cliente.

Para diferenciar ambos diseños llamaremos al diseño con menos espiras como diseño 1.1 y al que tiene más espiras lo llamaremos como diseño 1.2.

El diseño 1.1 se caracteriza porque se ha elegido 18 espiras de primario para 400 V de entrada otorgándonos 600 mm de altura eléctrica.

En el proceso de diseño del arrollamiento de un transformador, se eligen las espiras del secundario o del primario según se desea y se utiliza la relación de transformación para calcular todo lo demás.

$$Rt = \frac{Tensión_{Primario}}{Tensión_{Secundario}} = \frac{Espiras_{Primario}}{Espiras_{Secundario}}$$

A continuación, podemos observar el diseño 1.1, donde se han elegido 18 espiras para el primario a 400 V, con una altura eléctrica de 600 mm y otorgándonos la siguiente tabla de espiras teóricas.

Espiras teóricas			Secundario				
			800 V	1200 V	1600 V	2400 V	3000 V
Prim	400 V	18	36	54	72	108	135
	460 V	20,7	36	54	72	108	135

Tabla espiras teóricas del diseño 1.1

El diseño 1.2 se caracteriza porque hemos elegido 21 espiras de primario para 400 V, utilizando 750 mm de altura eléctrica.

Espiras teóricas			Secundario				
			800 V	1200 V	1600 V	2400 V	3000 V
Prim	400 V	21	42	63	84	126	157,5
	460 V	24,15	42	63	84	126	157.5

Tabla espiras teóricas del diseño 1.2

Una vez calculadas las espiras teóricas hemos de redondear, como se ha indicado anteriormente, la posición de las espiras debe coincidir siempre con un número entero, de esta forma ahora si podremos calcular las tensiones reales. Estas tensiones de salida reales se obtienen aplicando la relación de transformación.

Con esto obtenemos las siguientes dos tablas para cada diseño.

$$R_t = \frac{Tensión_{primario}}{Tensión_{secundario}} = \frac{Espiras_{primario}}{Espiras_{secundario}}$$

$$Tensión_{secundario} = \frac{Tensión_{primario}}{R_t} = \frac{Espiras_{primario}}{Espiras_{secundario}}$$

- Para el diseño 1.1

Hemos obtenido las espiras reales redondeando al entero más cercano en el diseño 1.1, consiguiendo la siguiente tabla:

Espiras reales			Secundario				
			800 V	1200 V	1600 V	2400 V	3000 V
Prim	400 V	18	36	54	72	108	135
	460 V	21	36	54	72	108	135

Tabla espiras reales del diseño 1.1

Utilizando la fórmula descrita anteriormente hemos conseguido la siguiente tabla de resultados de tensiones reales para el diseño 1.1.

Tensiones reales			Secundario				
			800 V	1200 V	1600 V	2400 V	3000 V
Prim	400 V	400 V	800 V	1200 V	1600 V	2400 V	3000 V
	460 V	460V	788,6 V	1182,9 V	1577,1 V	2365,7 V	2957,1 V

Tabla tensiones reales del diseño 1.1

- Para el diseño 1.2

Hemos obtenido las espiras reales redondeando al entero más cercano en el diseño 1.2, consiguiendo la siguiente tabla:

Espiras reales			Secundario				
			800 V	1200 V	1600 V	2400 V	3000
Prim	400 V	21	42	63	84	126	157
	460 V	24	42	63	84	126	157

Tabla espiras reales del diseño 1.2

Utilizando la fórmula descrita anteriormente hemos conseguido la siguiente tabla de resultados de tensiones reales para el diseño 1.2.

Tensiones reales			Secundario				
			800 V	1200 V	1600 V	2400 V	3000 V
Prim	400 V	400 V	800 V	1200 V	1600 V	2400 V	2990,47 V
	460 V	460 V	805,0 V	1207,5 V	1610,0 V	2415,0 V	3009,2 V

Tabla tensiones reales del diseño 1.2

Como se puede observar, las tensiones obtenidas en el secundario para el diseño 1.2 están más equilibradas, por tanto, el diseño 1.2 ha sido el elegido para proseguir en el proceso de diseño.

3.1. Cálculos de corrientes del diseño elegido.

Una vez hemos elegido el diseño según el criterio de número de espiras, hemos de proceder con el siguiente apartado de nuestro proyecto, en este caso se van a dimensionar los conductores.

Para poder proceder a este proceso de dimensionamiento de conductores, es necesario que el siguiente paso sea el de calcular las corrientes, una vez calculadas, podremos elegir un conductor que cumpla con la normativa de densidad de corriente.



Con la fórmula de la potencia activa, habiendo ya calculado la tensión real, nos resulta bastante fácil calcular las corrientes reales que circularán en nuestros conductores, tanto en el primario como en el secundario.

Dada la fórmula de la potencia activa trifásica:

$$P_{Activa} = \sqrt{3} * U_{Linea} * I_{Linea}$$

De esta fórmula podemos despejar la corriente como:

$$I_{Linea} = \frac{P_{Activa}}{\sqrt{3} * U_{Linea}}$$

Una vez aplicada esta fórmula, con las tensiones reales obtenidas en la tabla del diseño 1.2, hemos obtenido la siguiente tabla de corrientes reales:

Corrientes reales			Secundario				
			800 V	1200 V	1600 V	2400 V	3000 V
Primario	400 V	721,68 A	360,84 A	240,56 A	180,42 A	120,28 A	96,53 A
	460 V	627,55 A	358,60 A	239,06 A	179,30 A	119,53 A	95,93 A

Tabla de corrientes reales del diseño 1.2

Tras un par de iteraciones se ha tomado la decisión conjunta de utilizar varias áreas de conductor, esto sirve para economizar y optimizar el proyecto, para conseguir esto utilizaremos una dimensión de conductor en el primario y dos distintas para el secundario.

Se adopta esta decisión porque la potencia en todo momento permanece constante, es decir, según aumentamos la tensión disminuirá la corriente, esta situación nos permite utilizar conductores con menos espesor según nos acercamos a las salidas de mayor tensión.

Los conductores, tanto en el primario como secundario, son bandas de aluminio que tendrán siempre la altura eléctrica de la bobina, luego para elegir un conductor de menor área disminuiríamos su espesor.

Para la elección de conductores es de vital importancia adecuarse a la realidad de la empresa, es decir, existe una lista otorgada por el departamento de compras de la empresa donde se describen todos los conductores disponibles, entendemos por conductor disponible todo aquel que ya ha sido comprado con anterioridad o que sería fácil adquirir, además también existe la categoría de conductor prioritario, esto son conductores donde debido a la situación de la empresa se les busca salida antes que a otros conductores válidos.



Teniendo en cuenta la tabla de conductores disponibles, y la tabla de corrientes reales, se ha realizado un proceso iterativo donde se calculaban densidades de corrientes para todas las bandas de la altura de nuestro diseño 750 mm, tras este proceso hemos seleccionado los siguientes conductores:

Tramo	Espesor	Altura	Sección
Primario	0,5 mm	750 mm	375 mm ²
Secundario 1	0,8 mm	750 mm	600 mm ²
Secundario 2	0,3 mm	750 mm	225 mm ²

Tabla de elección de bandas conductoras

Como se puede observar, en nuestro arrollamiento secundario, se han realizado dos particiones de conductor, es decir, vamos a utilizar dos tramos de espesor diferente en un mismo arrollamiento.

Nuestro primer tramo de secundario “Secundario 1” se sitúa desde los 0 V de secundario hasta la salida de 1200 V. A partir de esta tensión se soldará la banda correspondiente al segundo tramo “Secundario 2”, hasta el fin de vueltas de las espiras de secundario en la salida de 3000 V.

La tabla de conductores disponibles de la empresa junto al cálculo de la densidad de estos ha definido las dimensiones de conductor.

A continuación, se van a definir los cálculos que se han utilizado para comprobar que el conductor utilizado es el correcto.

Para el cálculo de las densidades de corriente se ha utilizado la siguiente fórmula:

$$J = \frac{I_{Linea}}{Area} = \left[\frac{A}{mm^2} \right]$$

Sustituyendo en la fórmula las corrientes reales y el área del conductor elegido hemos obtenido la siguiente tabla:

Densidad de corriente conductores			Secundario				
			800 V	1200 V	1600 V	2400 V	3000 V
Primario	400 V	1,203	0,962	0,642	0,802	0,535	0,429
	460 V	1,046	0,956	0,638	0,797	0,531	0,426

Tabla de densidad de conductores

Una vez calculadas ha sido necesario comprobar la normativa, en ella se define que para no exceder la temperatura admisible en caso de cortocircuito descrita en la IEC 60076-5 (2), apartado 4.1.4, un cálculo aproximado indica que hay que diseñar sin superar las siguientes densidades de corriente:

V _{cc} (%)	A/mm ² (Al)	A/mm ² (Cu)
4	1.67	4.31
5	2.085	5.39
6	2.50	6.46
8	3.33	8.61
10	4.17	10.77

Tabla de densidades de corriente aceptadas por la norma IEC 60076 para aluminio y cobre

Por lo tanto, nuestra elección de conductores se encuentra dentro de la normativa con un margen aceptable.

El siguiente paso de diseño de nuestros arrollamientos va a ser el del dimensionamiento de las pletinas.

En el funcionamiento normal de nuestro transformador utilizaremos una pletina para cada entrada y salida de tensión del transformador, por lo tanto, para su dimensionamiento se va a comprobar la densidad de corriente de las pletinas con su área.

De nuevo se ha realizado un proceso iterativo utilizando la lista de materiales de la empresa, hemos llegado a la misma conclusión que con los conductores y se ha decidido también utilizar una pletina para el primario y dos pletinas de salida con distinto espesor entre sí.

Después de este proceso hemos seleccionado las siguientes pletinas:

Tramo	Espesor	Anchura	Sección
Primario	8 mm	80 mm	640 mm ²
Secundario 1	5 mm	60 mm	300 mm ²
Secundario 2	5 mm	40 mm	200 mm ²

Tabla de elección de las pletinas

Con estas secciones y las corrientes reales han sido calculada de nuevo las densidades de corriente utilizando la misma fórmula de J obteniendo la siguiente tabla de resultados:

Densidad de corriente pletinas (A/mm ²)		Secundario					
		800 V	1200 V	1600 V	2400 V	3000 V	
Primario	400 V	1,128	1,203	1,203	0,902	0,601	0,483
	460 V	0,981	1,195	1,195	0,897	0,598	0,480

Tabla de densidades de corriente para las pletinas del transformador

Comparándolas con la tabla de densidades de corriente máxima para el aluminio, obtenemos que estamos bien dentro del margen para que sean unas densidades de corriente seguras y de acuerdo con la normativa IEC60076 (1,2).

3.2. Diseños realizados.

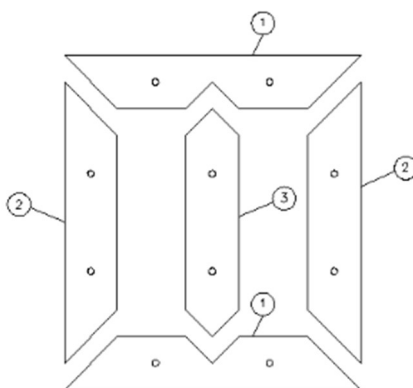
En el apartado anterior se ha terminado el diseño de los elementos conductores de la bobina, ahora en este apartado, utilizando estos elementos se va a completar el diseño del núcleo y bobinado.

En todo proceso de diseño es necesario realizar múltiples diseños con el fin de estudiar cada uno de ellos, y así poder elegir después el óptimo, en este TFG se va a elaborar en tres de los diseños de tecnología de bobinado posibles, indicando cual se eligió posteriormente para su desarrollo final.

Para empezar, se van a describir brevemente los tres diseños realizados, es importante dejar claro en cada uno de ellos, la parte que los distingue es la tecnología utilizada para la construcción de la bobina, mientras que el núcleo y conductores permanecerán común entre todos los diseños.

- **Núcleo**

En la empresa Hitachi Energy, el núcleo se forma con chapas laminadas de diversos materiales magnéticos, además de un material aislante entre chapas, estas chapas se cortan con la forma de la figura representada a continuación y se ensamblan en pasos que dan forma al núcleo de transformador que compondrá el circuito magnético del transformador.



Corte de láminas para núcleos magnéticos

Estas laminas se agrupan en una serie de pasos o escalones, estos componen el núcleo magnético del transformador que suele darse en forma cilíndrica.

En nuestro caso se ha utilizado para el diseño del núcleo el programa desarrollado por Hitachi Energy conocido como CDSE, es un programa equipado con toda la normativa recogida en el IEC 60076 (1,2) y EN 50708 (3,4,5), además, contiene los datos de todas las distancias de diseño y materiales posibles.

Gracias a CDSE se pueden obtener de forma aproximada las pérdidas magnéticas y la inducción de nuestro de núcleo, estas características dependen del modelo de chapa y cantidad de chapa utilizada en nuestro diseño.

En nuestro caso, se ha decidido después de unas iteraciones con distintos tipos de chapas magnéticas disponibles, utilizar la chapa 30R122, la curva de pérdidas de vacío de esta chapa es la indicada en la siguiente figura:



Gráfica de pérdidas de la chapa 30R122.

En nuestro caso los transformadores para laboratorio quedan exentos del estándar máximo de pérdidas en vacío de acuerdo con la UNE EN 50708 (3,4,5).

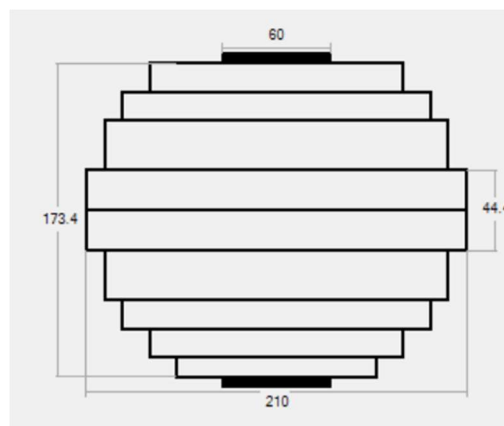
Se ha decidido realizar un diseño de un núcleo redondo asimétrico, dado que de esta forma obtenemos un mejor margen de distancias entre componentes, este ahorro de distancia es muy importante dado que la multitud de pletinas de salida hace que el espacio de las bobinas sea muy limitado, además tener el núcleo asimétrico permite reducir el coste en material magnético.

Para lograr que el núcleo sea asimétrico, uno de los pasos del núcleo se ha anulado dejando un número de pasos impar, y obteniendo así un núcleo con las siguientes dimensiones de escalones:

Paso (Nº)	Anchura (mm)	Altura (mm)
1	140	15.9
2	170	15.6
3	190	27.6
4	210	22.2
5	210	22.2
6	190	27.6
7	170	15.6
8	140	15.9
9	110	10.8

Tabla de pasos del núcleo

Visto de forma gráfica, después de nuestro diseño obtendremos el siguiente núcleo:



Corte del núcleo con medidas.

• Bobinas

Esta es la segunda fase del proyecto donde se realizan múltiples diseños para su estudio y elección.

En el proceso de elección de tecnología de la bobina, se ha realizado un primer diseño básico donde se cumple toda la normativa IEC 60076 (1,2) de distancias mínimas y máximas entre componentes del transformador además del manual de diseño de la empresa.

En el diseño básico no tenemos ningún tipo de tecnología de refrigeración, para el segundo diseño se han añadido canales de refrigeración, y para el tercero se han colapsado los canales de refrigeración que se sitúan en las salidas de las pletinas de nuestra bobina,

este método de colapsado sirve para ahorrar espacio dado que la bobina se achata menos sin sacrificar demasiada refrigeración.

De esta forma vamos a estudiar 3 diseños de distintas tecnologías de refrigeración, para poder seleccionar, de entre ellos, el que se adecue mejor al diseño que requiere la empresa.

Antes de la realización de estos diseños es necesario dimensionar los componentes de la bobina que no dependen de dichos canales, como, por ejemplo, las distancias mínimas especificadas por normativa que servirán de base para los tres diseños a estudiar.

Mediante la herramienta de cálculo de CDSE se han definido entonces en nuestra bobina las siguientes distancias:

	Columna Núcleo / BT	BT/AT	Fase/Fase	Núcleo superior / BT	Núcleo inferior/BT	Soporte superior de la bobina	Soporte inferior de la bobina
Distancia (mm)	16	27	25	145	65	155	50
Espacio Calculado (mm)	15,52	20,26	24	25,76	130	50	NO necesario
Espacio Mínimo (Mm)	6	6	15	20	25	25	NO necesario

Tabla con distancias de diseño de la bobina

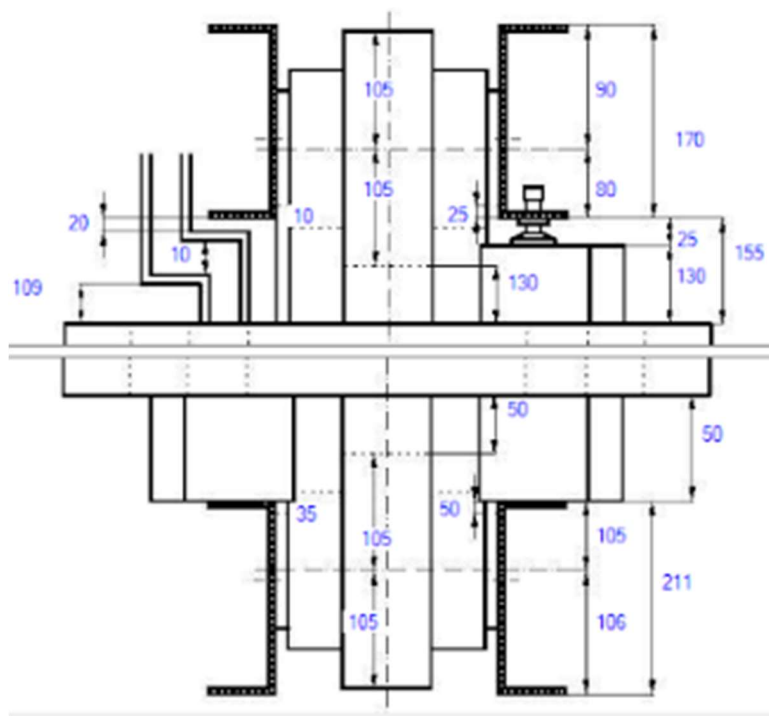
Como se puede comprobar la tabla está compuesta por tres valores, el primero es el que introduce el usuario (Distancia), el segundo se calcula teniendo en cuenta todos los elementos definidos del transformador (Espacio Calculado) y el último corresponde con el valor para esa distancia recogido por la normativa y normas de la empresa.

Se puede observar que tenemos valores de espacio calculados muy superiores al mínimo establecido por la normativa, esto es así porque las particularidades del transformador especial de laboratorio no son contempladas en el programa y por ello se ha tomado un acercamiento conservador.

Estas distancias han sido aplicadas bajo el criterio del ingeniero senior de la empresa responsable del TFG que ha establecido los márgenes necesarios para que una vez se construya el transformador sean suficientes.

Con estas distancias y el cálculo de los conductores queda definida la bobina que se utilizará de base en los otros 3 diseños con tecnologías distintas de refrigeración.

En la siguiente figura podemos ver cómo queda definida en el programa de diseño nuestra bobina con respecto a los elementos varios del transformador, aunque esta imagen es una aproximación ya que cuando se realice el diseño mecánico puede variar.



Vista de la bobina con respecto al transformador.

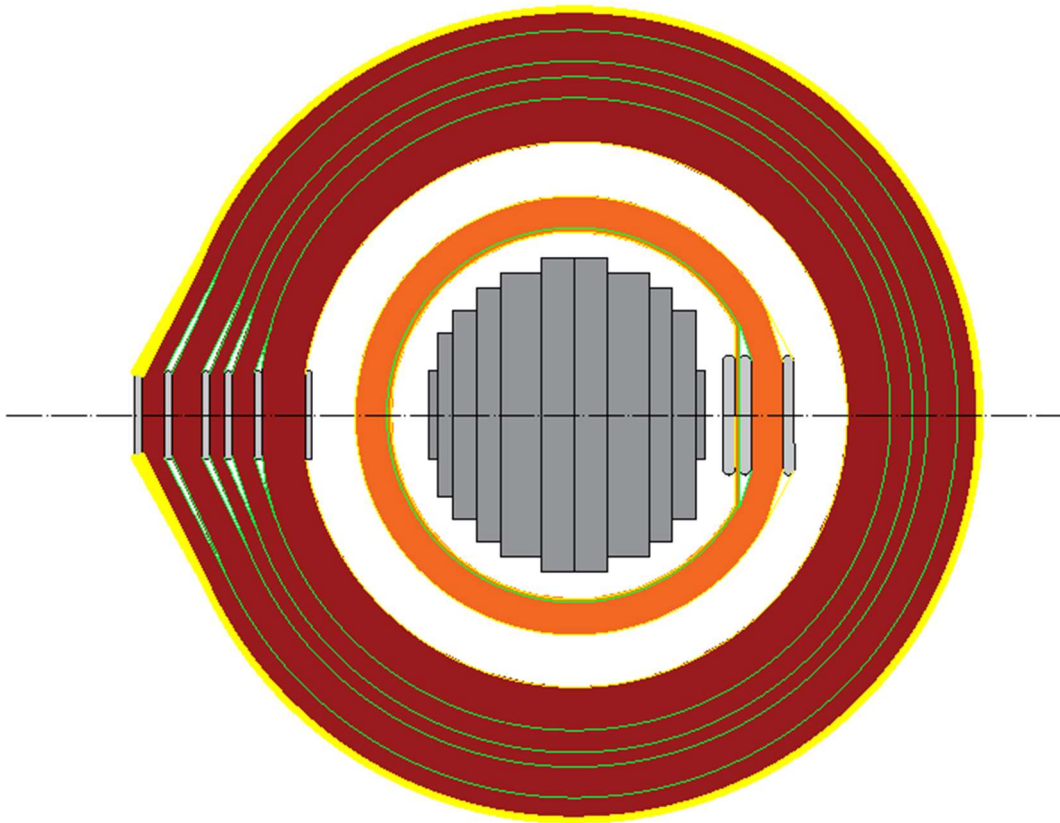
El tipo de tecnología de aislamiento utilizado en nuestras bobinas es el de Open Wound o herida abierta en español, esto significa que el aislamiento entre conductores y bobinas se realizará mediante cintas de aislamiento, estas se colocan a la vez que se realiza el bobinado mediante un sistema de doble rollo. El aislante consistirá en cintas impregnadas de un espesor de 0,17 mm entre cada banda de conductor.

3.2.1 Diseño 1 Sin canal de refrigeración.

Este es el diseño original que nos sirve de control, se ha resuelto tomando en cuenta todos los pasos realizados con anterioridad en los apartados de diseño de núcleo y bobina, es a partir de esta base que realizaremos los otros dos diseños cambiando su tecnología de refrigeración.

Realizando simulaciones comprobaremos si es realmente necesario incluir una tecnología extra para disminuir la temperatura en el transformador, por tanto, también comprobaremos que este diseño básico es viable y cumple con todos los requisitos solicitados por el cliente y requeridos por la normativa IEC 60076 (1,2).

A continuación, tenemos una imagen de cómo se vería el corte de la bobina con este diseño.



Planta de corte de la bobina y núcleo del diseño 1 sin canales de refrigeración.

En esta vista se han tenido en cuenta todos elementos reales del transformador, es decir, si se realizara el diseño 1, el corte de la bobina debería tener las distancias proporcionales a las apreciadas en la figura anterior.

Este corte de la bobina ha surgido de la interpretación de las distancias de espacio seleccionadas y el diseño de conductores, se ha realizado a mano en AutoCAD, puesto que, como se ha descrito con anterioridad la particularidad del transformador requiere un tratamiento especial.

En este diseño no hay ningún canal de refrigeración, en caso de haberlo debería estar en el bobinado de baja tensión.

Cuando tenemos una corriente mayor circulando por un material conductor, se traduce en una mayor temperatura, es decir, nuestro punto crítico de temperatura será el bobinado de baja tensión, por tanto, es allí donde es más probable que necesitemos un canal de refrigeración.

De la fórmula de la potencia activa despejamos la corriente de la siguiente manera:

$$I_{Linea} = \frac{P_{Activa}}{\sqrt{3} * U_{Linea}} = \frac{Cte}{Cte * \downarrow U_{Linea}} = \uparrow I_{Linea}$$

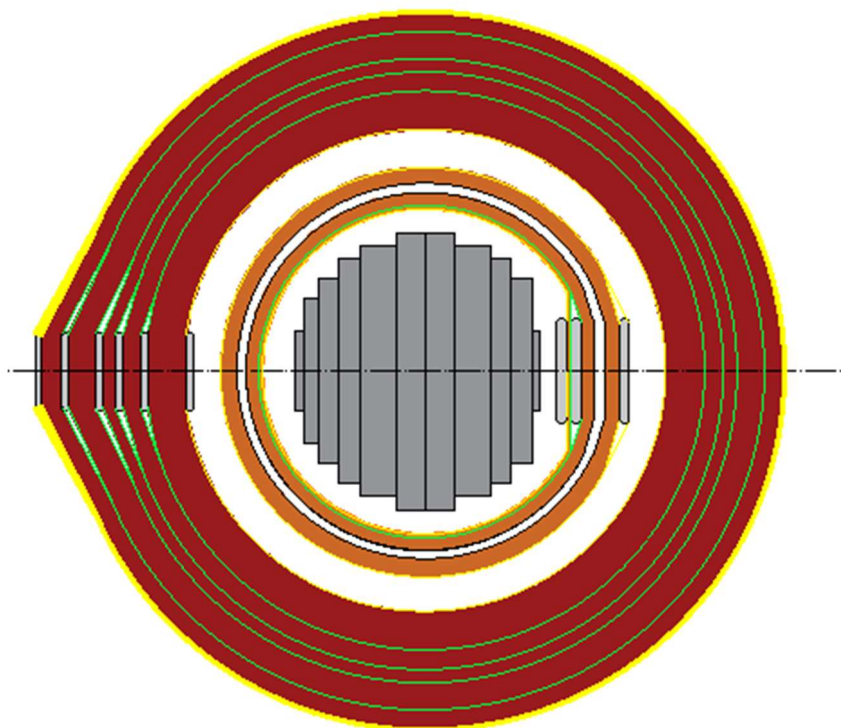
Utilizando la fórmula del calor en un conductor (Q), podemos deducir que, en un conductor, el calor producido es directamente proporcional al cuadrado de la corriente que circula por él (I_{Linea}), multiplicado por la resistencia eléctrica en ohmios (R) y por el tiempo en segundos (t).

$$\uparrow \uparrow Q = \uparrow I_{Linea}^2 * R * t \uparrow$$

3.2.2 Diseño 2 con canal de refrigeración.

Esta variante ha modificado el diseño básico, implementando tecnología de refrigeración en forma de canales en el arrollamiento de baja tensión, es la que nos servirá para simular y calcular la influencia de la tecnología más simple utilizada para disminuir la temperatura del transformador.

En la siguiente figura tenemos el corte de la bobina con la tecnología del diseño 2, en ella podemos apreciar como en el lado de baja tensión o primario (representado de color naranja), se ha colocado en la mitad del arrollamiento de baja tensión o primario un canal de refrigeración.



Planta de corte de la bobina y núcleo del diseño 2 con canal de refrigeración.



En esta representación faltarían por representar los Dogbones, este es el nombre por el cual se conoce a las estructuras que se colocan en los canales de refrigeración, están ubicados a lo largo de la bobina en eje vertical y otorgan más estabilidad mecánica al canal.

El canal añadido permite que el punto con más corriente de nuestro transformador tenga un hueco extra a través del cual pueda circular el aire de forma natural, también influye en la temperatura ya que en un espacio con aire actúa como un aislante térmico natural ubicado entre conductores.

Esta tecnología también tiene contraprestaciones, por ejemplo, al haber añadido un espacio en el arrollamiento de baja tensión, hemos aumentado su diámetro, y con este el diámetro de la bobina en total.

Este aumento de diámetro es contraproducente, afecta a uno de los puntos cardinales del diseño de un transformador, intentar realizar el diseño más compacto posible, además de aumentar el diámetro de las bobinas aumenta el tamaño del transformador, por lo tanto de manera normal, esta tecnología solo se utiliza en caso de que sea estrictamente necesario por los resultados de las simulaciones de calentamiento, o en caso de que en la descripción del transformador se indique un posible peligro de aumento de la temperatura.

En este caso no va a ser necesario colocar en el secundario un canal de ventilación, porque a diferencia de la práctica habitual, donde se coloca un arrollamiento de disco en el lado de alta tensión, nosotros hemos colocado un arrollamiento en banda, este arrollamiento permite tener una sección de conductor mucho mayor, este aumento de la sección permite que, ante la circulación de corrientes más grandes, la densidad de corriente no se eleve en exceso, y por tanto la temperatura tampoco.

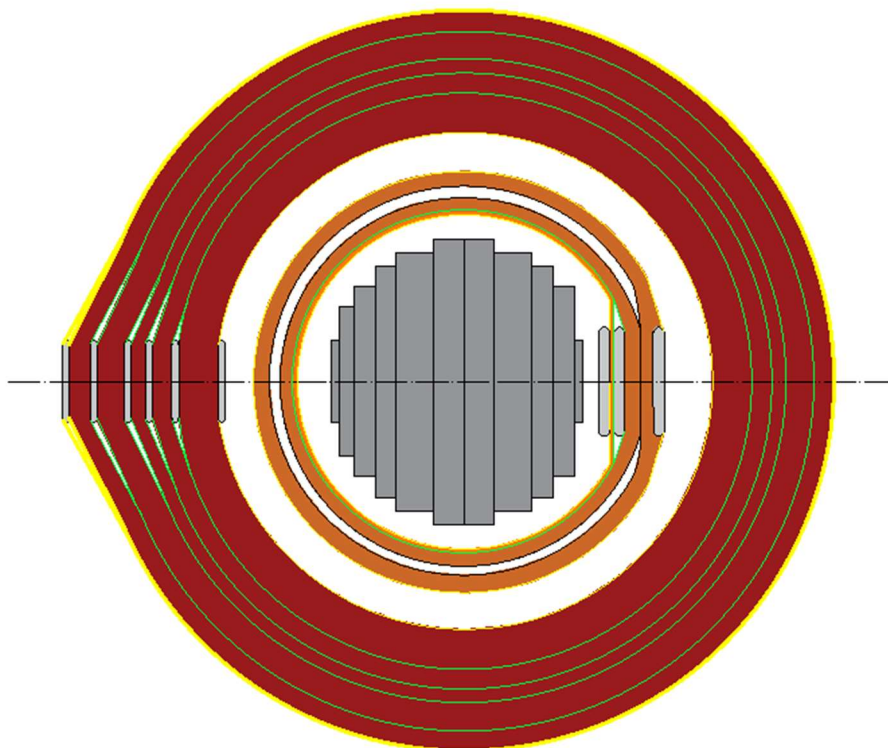
3.2.3 Diseño 3 Canal de refrigeración colapsado

Como último diseño se ha modificado la tecnología de refrigeración del diseño anterior colapsando uno de sus tramos, es decir, se ha eliminado el espacio que deja el canal de refrigeración en la parte de la bobina donde situamos las salidas de las pletinas.

Una de las mayores desventajas de incluir un canal de refrigeración, es que hace que el diámetro de nuestra bobina aumente, además de que en la zona donde tenemos las pletinas

pronuncia el efecto de abombamiento, con la variante del canal de refrigeración colapsado, reducimos la deformación de la bobina y su diámetro final.

En nuestro caso en particular, esta reducción de espacio es muy interesante, al tener muchas pletinas, se procura en el diseño, fomentar el máximo ahorro de espacio irrelevante posible, esta tecnología servirá para que las salidas se puedan implementar de forma más cómoda en el diseño mecánico.



Planta de corte de la bobina y núcleo del diseño 3 con canal de refrigeración colapsados.

Este diseño es la variante más usada cuando se utilizan los canales de refrigeración, reduce las desventajas de añadir un canal sin sacrificar la reducción de temperatura demasiado, sin embargo, a veces no se puede utilizar cuando el margen de la temperatura máxima debida a la clase térmica está cerca de la temperatura calculada de operación.

3.3 Selección del diseño.

Después de implementar los tres diseños en CDSE, se han realizado una serie de estudios con la herramienta FEMM para observar sus diferencias y se ha llegado a la conclusión de que los 3 diseños cumplen toda la normativa y podrían ser válidos.

La decisión ha sido tomada en base al criterio técnico, respaldada por el ingeniero senior que ha supervisado el proyecto, tras observar las distribuciones de temperatura simuladas



con los modelos de los tres diseños, se ha decidido que a pesar de no ser necesario se va a elegir el modelo con canal de refrigeración.

Se puede apreciar que cuando colocamos el canal de ventilación, las distribuciones de calor son más homogéneas en los dos arrollamientos, por tanto, las sondas de temperatura colocadas tendrán más precisión.

A pesar de ser más cara de implementar, esta tecnología, al dar mejores resultados y estar destinada para el laboratorio de la propia empresa, se va a elegir el diseño con canal de refrigeración.

También se ha decidido colapsar el canal de refrigeración para realizar un modelo más compacto, puesto que en las simulaciones la temperatura del punto más caliente o Hot spot, se ha demostrado muy por debajo de la temperatura máxima, posibilitando así el colapso el canal de refrigeración en las pletinas de salida.

En conclusión, se va a proceder de ahora en adelante en nuestro proyecto con un transformador con canal de refrigeración en el primario colapsado en la salida de las pletinas.

4 Análisis del diseño.

Una vez seleccionada la tecnología de refrigeración, ahora es el momento de estudiar el conjunto de nuestro transformador en profundidad con las herramientas con las que cuenta la empresa.

Se han realizado estimaciones de diseño con CDSE, pero, al no ser una herramienta cuyo rango de funcionamiento incluya transformadores especiales, necesitaremos algún programa de simulación para poder cerciorarnos de que el diseño es correcto y cumple con especificaciones y normativa.

Las herramientas que vamos a utilizar son las aplicaciones FEMM y DTS, la primera es una aplicación de software libre que nos servirá para realizar una simulación por elementos finitos de nuestro transformador, la segunda es una herramienta propia de la empresa que tiene ya una interfaz más orientada hacia transformadores por lo que será más eficaz en según qué parámetros de simulación.

Para las simulaciones hay que tener en cuenta las particularidades de nuestro transformador, es decir, tenemos un transformador trifásico con dos posibles entradas de primario por el lado de baja tensión y 5 posibles salidas de tensión por el secundario en el lado de alta tensión, por lo tanto, en total tenemos 10 posibles combinaciones de operación para el transformador.

Para la simulación de la temperatura como se ha mencionado anteriormente, las combinaciones con tensiones más bajas serán las que sean más críticas, aunque se van a simular todas las combinaciones de entradas y salidas posibles.

- **Simulación con FEMM**

Para poder realizar la simulación con FEMM de un transformador, la empresa cuenta con una hoja de Excel programada que se comunica con el software del programa FEMM, en ella se han introducido todos los datos y componentes importantes para la simulación de nuestro transformador.

Gracias a esta herramienta hemos podido estimar a través de varias simulaciones, las pérdidas de corriente alterna, las pérdidas de corriente continua y las pérdidas de Eddy de nuestro transformador, así como realizar la estimación de las impedancias de cortocircuito que tendremos para las distintas combinaciones de salidas.

En este caso, las experiencias con diseños anteriores, nos ha transmitido el criterio suficiente para decir que, en este programa, el cálculo más parecido al dato medido de forma práctica es la impedancia, cabe decir que de acuerdo con la normativa IEC 60076 (1,2), nuestro transformador al ser destinado para uso de laboratorio está exento de pérdidas máximas, por lo que la estimación de las pérdidas es meramente intelectual.

Después de realizar las simulaciones necesarias para todas las combinaciones posibles se han recopilado todos los resultados de las simulaciones en dos tablas, una para cuando se alimenta el primario a 400V y la otra cuando se alimenta a 460 V.

Primario	Secundario				
400	800	1200	1600	2400	3000
AC (W)	4117,22	3503,95	3414,15	3219,06	3123,01
DC (W)	3980,75	3338,04	3219,65	2969,83	2835,26
Eddy (W)	136,46	165,91	194,50	249,23	287,75
U_{xcc} (%)	3,01	3,35	3,71	4,38	4,85
U_{rcc} (%)	0,82	0,70	0,68	0,64	0,62
U_{cc, total} (%)	3,12	3,43	3,77	4,43	4,89

Tabla de resultados simulación FEMM a 400V de primario.



Primario	Secundario				
460	800	1200	1600	2400	3000
AC (W)	3819,05	3213,38	3124,68	2931,98	2837,05
DC (W)	3680,63	3045,87	2928,94	2682,22	2549,28
Eddy (W)	138,43	167,51	195,74	249,76	287,77
U_{xcc} (%)	3,02	3,36	3,71	4,38	4,84
U_{rcc} (%)	0,76	0,64	0,62	0,59	0,57
U_{cc} total (%)	3,12	3,42	3,77	4,41	4,87

Tabla de resultados simulación FEMM a 400V de primario.

La U_{cc} o impedancia de cortocircuito calculada, era el valor más importante obtenido de esta simulación de FEMM. Como se puede apreciar, cuando la salida del secundario aumenta de voltaje, esta impedancia también aumenta al tener más espiras de cobre en funcionamiento, para la salida con voltaje más alto (3000 V), hemos obtenido 4,87% de U_{cc}, lo que está dentro del margen para el valor solicitado por el cliente del 5%.

- **Simulación con DTS**

En la utilización de la herramienta DTS se han introducido todos los elementos que forma nuestro circuito electromagnético, es decir, los bobinados, el núcleo, la pantalla electrostática, las pletinas y otros elementos que el programa de simulación DTS tiene en cuenta una vez se introducen los datos.

A partir de eso se han computado todas las combinaciones posibles hasta obtener todos los datos de pérdidas y temperatura máxima para diversos puntos del transformador, una vez se han obtenido estos datos se han rellenado las siguientes tablas:



	Primario	Secundario				
	400 V	800 V	1200 V	1600 V	2400 V	3000 V
Pérdidas (W)	AC	4682,92	4026,32	3912,97	3668,97	3531,43
	DC	4337,86	3657,81	3522,25	3238,21	3070,59
	Eddy	345,06	368,51	390,72	430,76	460,84
	Ucc, total	3,34	3.699	4,07	4,75	5,20
Temperatura (Celsius)	AT_W (LV/HV)	100.9 / 98.44	91.2 / 73.19	89.79 / 66.15	87.37 / 54.55	86.48 / 48.95
	AT_L (LV/HV)	26.92 / 26.89	26.89 / 13.03	26.89 / 11.8	26.89 / 1.97	26.89 / 2.58
	AT_WL (LV/HV)	96.02 / 95.65	87.38 / 75.27	88.74 / 64.32	83.69 / 52.77	82.85 / 47.38
	HS (LV/HV)	106.05 / 101.53	97.38 / 74.35	96.42 / 67.77	94.63 / 55.41	94.1 / 49.83

Tabla de resultados DTS primario a 400V.

	Primario	Secundario				
	460	800	1200	1600	2400	3000
Pérdidas (W)	AC	4796,17	4144,56	4030,20	3785,85	3670,91
	DC	4371,26	3696,46	3560,15	3276,22	3129,22
	Eddy	424,91	448,10	470,05	509,63	541,69
	Ucc, total	3,37	3,72	4,09	4,77	5,24
Temperatura (Celsius)	AT_W (LV/HV)	98.9 / 97.07	90.66 / 72.34	88.82 / 65.32	86.44 / 54.02	85.57 / 48.38
	AT_L (LV/HV)	21.2 / 27.04	21.2 / 13.15	21.2 / 11.8	21.2 / 3.75	21.2 / 2.7
	AT_WL (LV/HV)	95.24 / 94.71	87.38 / 74.58	85.02 / 58.64	83.35 / 52.21	82.52 / 47.22
	HS (LV/HV)	104.79 / 100.75	96.95 / 74.07	95.39 / 66.9	93.64 / 54.75	93.11 / 49.25

Tabla de resultados DTS primario a 460V.

En las tablas podemos apreciar las pérdidas de AC (Corriente alterna), DC (Corriente continua) y Eddy (Corrientes parásitas), además de los datos de temperatura donde se muestran: AT_W o temperatura del bobinado, AT_WL o temperatura media, AT_L o temperatura de las pletinas y HS o Hot Spot correspondiente al punto más caliente de nuestra simulación.



Analizando los resultados observamos que tenemos un diseño bien dentro de los márgenes de seguridad, podemos observar como las temperaturas medias de los bobinados y zonas de aislamiento son inferiores a los 100 grados, nosotros tenemos un transformador con piezas y acabado de clase térmica hasta los 120 grados para temperaturas medias y hasta 150 grados para puntos calientes, por lo tanto, hay un margen más que considerable y podríamos decir que nuestro transformador cumple con el criterio térmico.

4.2 Conclusión de la simulación.

Ya finalizado el proceso de simulación, podemos continuar con las fases siguientes de producción del transformador, la experiencia de la empresa transmite que una vez ha sido comprobado el diseño mediante los dos programas de simulación, es bastante factible decir que cumplirá con todos los requisitos que se han pedido por el cliente, que en este caso es el laboratorio de la propia empresa, queda como conclusión entonces que el diseño eléctrico realizado en este proyecto del transformador trifásico seco de 500kVA especial para laboratorio es correcto.

5 Características y partes del transformador.

En este apartado se van a describir brevemente las partes más importantes del transformador diseñadas en este proyecto, se van a desarrollar en concreto las partes que forman parte del diseño eléctrico.

- **Bobinado y núcleo**

Después del diseño de nuestros arrollamientos en el apartado 3 de este TFG, se han obtenido 3 bobinas, que, con sus respectivas pletinas de entrada, salida, conexión de neutro y conexión eléctrica entre las bobinas, formarán parte de uno de los elementos más importantes del transformador.

La tecnología utilizada para las bobinas es la de herida abierta u Open Wound en inglés, por lo tanto, se utilizará cinta aislante al final de cada bobina, además de como en todas las tecnologías, cinta aislante entre los giros de las espiras de conductor.

En la siguiente imagen se muestra una vista de los arrollamientos de baja tensión y alta tensión producida por el programa CDSE, en ella apreciamos a la izquierda las espiras de baja tensión divididas por nuestro canal de refrigeración, y las espiras de alta tensión en la parte derecha.



Corte vertical de la bobina final

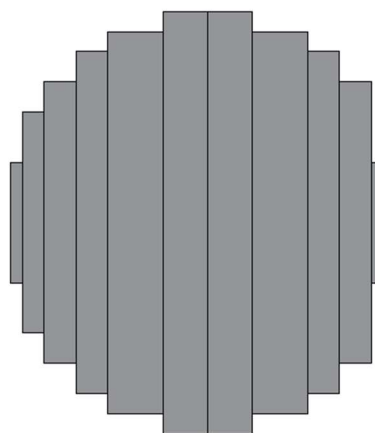
Tras el proceso de desarrollo del bobinado, obtendremos 3 bobinas que compondrán el sistema trifásico de nuestro transformador seco de 500Kva, estas bobinas van a tener las siguientes medidas y características:

Diámetro bobinado AT	Inicio 365 mm final 543 mm
Diámetro bobinado BT	Inicio 247 mm final 311 mm
Altura eléctrica del bobinado	750 mm
ALTURA BOBINA	780 mm
PLETINAS	Salidas por arriba y conexión de neutro por abajo

Tabla de medidas y características del bobinado

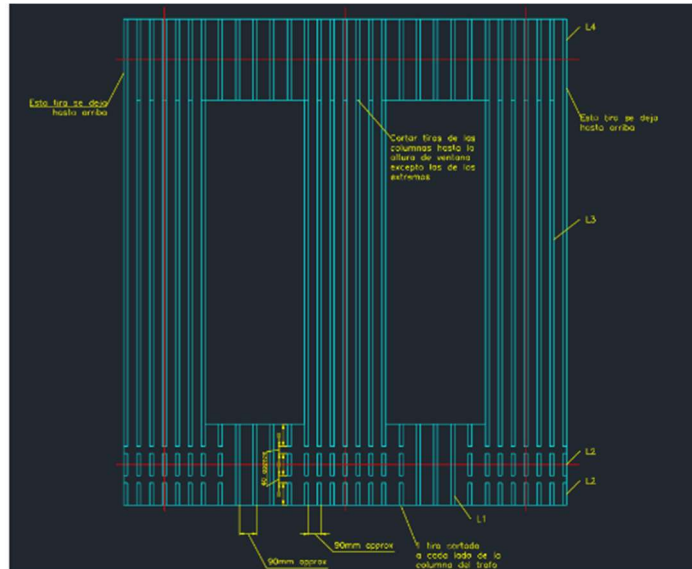
El núcleo, como ya se ha descrito en este TFG, lo forman 9 escalones o pasos de chapa 30R122, esta chapa viene impregnada entre capas por una resina aislante para evitar las pérdidas por corrientes parásitas.

El corte de nuestro núcleo magnético tendrá la siguiente forma asimétrica:



Corte del núcleo magnético

El núcleo utilizado en nuestro transformador estará compuesto por 3 columnas, una para cada bobina, formando el siguiente sistema:

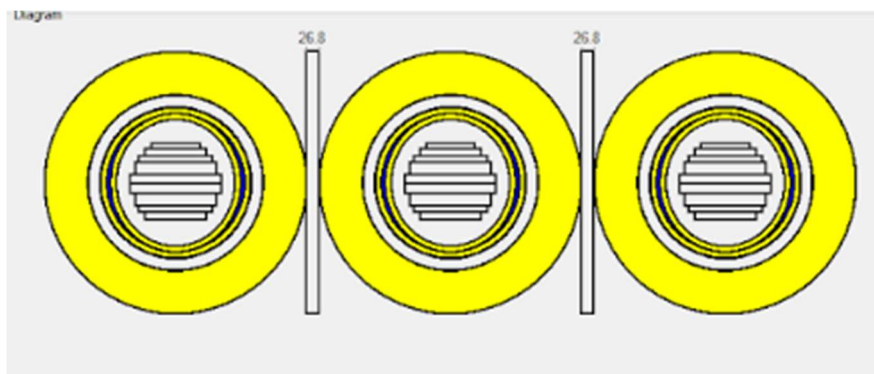


Sistema del circuito magnético trifásico formado por el núcleo del transformador.

Las medidas de diseño de nuestro circuito magnético son:

Díámetro del núcleo	215 mm
Altura ventana	960 mm
Distancia entre centros de las columnas	570 mm

El combinado de nuestro bobinado con el núcleo forma el siguiente esquema en nuestro transformador:



Esquema del bobinado y núcleo del diseño final

- **Pantalla electrostática**

Tal como está recogido en la tabla de datos requeridos por el cliente, hemos de colocar una pantalla electrostática entre los arrollamientos de baja y alta tensión, la pantalla electrostática es un elemento utilizado en los transformadores para aislar de campos magnéticos y mejorar la eficiencia del transformador.

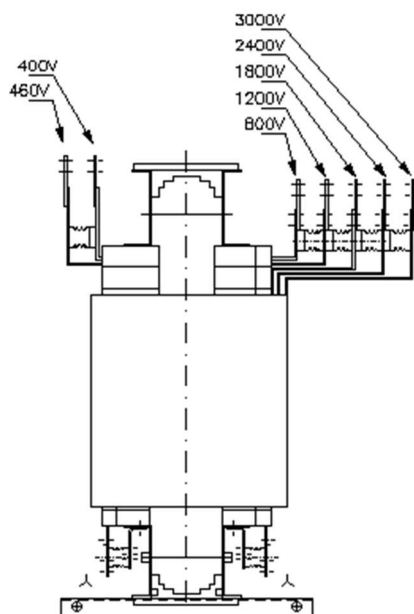
Las pantallas electrostáticas están compuestas por una espira que no está cerrada del todo, de esta forma no se crean corrientes por ella, y un cable que conecta esta espira al embarrado de tierra.

- **Vistas generales**

Para la obtención de planos con las herramientas proporcionadas por la empresa, es necesario realizar el diseño mecánico, donde se genera un modelo en 3D y automáticamente se obtienen todos los planos del transformador. Para poder dar una idea general antes de desarrollar el diseño mecánico, se han creado unos croquis con herramientas de diseño gráfico para poder visualizar el proyecto.

A continuación, hay una vista de perfil del transformador, donde se pueden apreciar algunas de las partes principales descritas en este punto, por ejemplo, las pletinas de salida del secundario en la parte superior derecha, las pletinas de entrada del primario en la parte superior izquierda y las pletinas de conexión de estrella en la parte de debajo de la bobina.

Además, se puede ver cómo quedará montada la bobina sobre el núcleo una vez se incluyan todos los accesorios de acoplamiento.

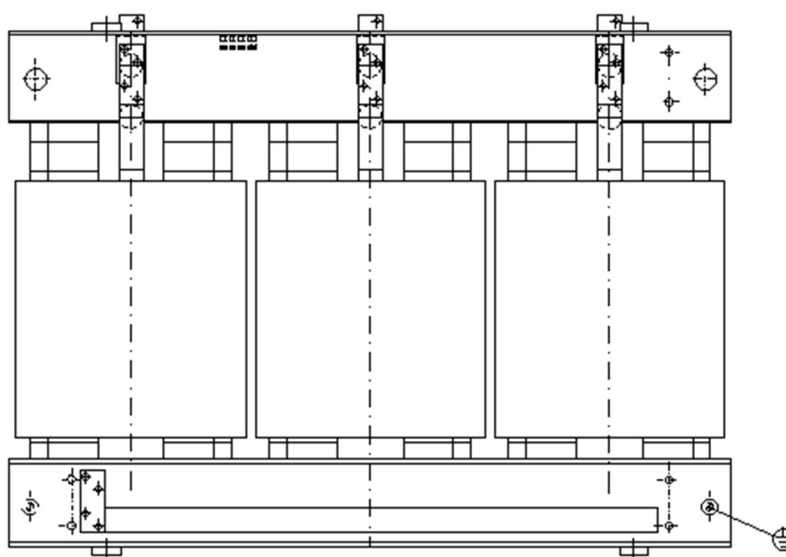


Vista de perfil del transformador final.

También se ha realizado una vista de frente o alzado de nuestro transformador, aquí se puede ver de forma aproximada como quedarán los embarrados, las pletinas de entrada y salida de cada bobina y las bridas que sujetan el núcleo, las cuales son responsables que el transformador tenga integridad física.

También se pueden apreciar cómo se realizan las conexiones a tierra mediante pernos colocados en la parte inferior del transformador.

La conexión eléctrica de las bobinas es una estrella que se conecta con un embarrado en la parte inferior.



Vista de alzado del transformador final.

6 Finalización del proyecto.

Una vez se ha realizado el diseño eléctrico, falta elaborar el diseño mecánico para pasar a producción el transformador, es decir, se deben importar los datos del modelo realizado, con el inconveniente de que los programas de diseño eléctrico que se han utilizado no tienen en su rango de operación las características de este transformador tan particular.

Por lo tanto, es necesario realizar un proceso manual de diseño mecánico donde se introduzcan todos los modelos en tres dimensiones de las pletinas de entrada y salida, además de otros elementos del transformador, que debida a la particularidad de este se han generado de forma incorrecta.

Este diseño mecánico ha quedado en un parón temporal, el proceso de diseño no continuará hasta que un ingeniero de diseño eléctrico con suficientes conocimientos de diseño mecánico termine el diseño o un ingeniero de diseño mecánico quede disponible para realizar las partes de modelaje en 3D restantes.



Se prevé que a lo largo del año haya algún hueco disponible para poder realizarse este diseño mecánico y pasar a la siguiente fase de desarrollo, aunque también es posible que se descarte finalmente o se postponga por un periodo de tiempo más largo, dado que este proyecto no era de prioridad máxima sino más bien un ejercicio profesional y de investigación para la empresa.

6.1 Ensayos por realizar.

Una vez se realice el diseño mecánico, se pasará a producción el transformador, para después elaborar y ensamblar todas las partes del transformador.

El último paso antes de entregar el transformador al cliente serán una serie de ensayos, estos ensayos se realizarán en el laboratorio de la propia empresa, para poder demostrar que nuestro diseño ha cumplido con todo lo requerido, para esto serán necesarios hacer los ensayos de rutina que se realizan a todos los transformadores que acaban siendo diseñados y producidos en Hitachi Energy Zaragoza.

- Medida de relación de transformación y grupo de conexión
- Medida de la Resistencia de los arrollamientos
- Medida de las pérdidas y de la corriente de vacío
- Medida de impedancia de cortocircuito y de pérdidas debido a la carga
- Test de voltaje aplicado.
- Test de voltaje inducido.
- Medida de descargas parciales.
- Ensayo de los cambiadores de tomas en carga.

Además de estos ensayos rutinarios es posible que, de acuerdo con el criterio de los ingenieros responsables en el laboratorio, o al del ingeniero de diseño senior responsable, se realice algún otro ensayo.

Estos ensayos extras se hacen con dos motivos:

Para cerciorarse de que en caso de que haya habido algún contratiempo durante el proceso de producción, todo cumpla normativa y requisitos.

y como es un transformador de diseño especial para laboratorio, se pueden hacer ensayos más particulares para realizar un proceso de aprendizaje sobre un diseño que no es común en la producción diaria de la empresa.

6.2 Estado actual.

A día de 1 de mayo de 2024, los procesos finales para la realización del proyecto entre los que se encuentran el diseño mecánico del transformador y el proceso de producción se encuentran en un parón, es posible que a lo largo de los meses se avance algo sobre el proyecto, pero de momento se encuentra en una lista de proyectos no inminentes.

7 Presupuesto.

Tal y como se ha desarrollado en el Anexo 2, se ha calculado de forma aproximada un presupuesto para el transformador, este presupuesto está sujeto a muchas variables que pueden hacer que incremente.

El presupuesto total estimado para la realización del proyecto son 18.787,87 euros.

Es una cifra que no se sale de lo normal con respecto a costes de transformadores similares, lo que la hace asequible y aceptable para la empresa.

8 Conclusión

Tras la realización del proyecto durante mi estancia de prácticas en la empresa Hitachi Energy, se ha podido llegar a muchas conclusiones.

En lo personal ha sido un proyecto que ha significado mis primeros contactos con la vida laboral, además me ha enseñado a llevar, de forma supervisada, un proyecto profesional importante con múltiples fases de desarrollo.

La realización de transformadores como proyectos individuales, es algo que está en el día a día de la empresa, así que haber podido realizar este proyecto, ha supuesto una formación de valor incalculable.

De forma pormenorizada se ha tratado de desarrollar un procedimiento similar al que se suele llevar en estos proyectos, donde se va diseñando y comprobando el diseño de forma iterativa hasta que se llega a un resultado correcto, la conclusión más importante es que suele haber más de un resultado correcto, y es ahí donde la invaluable voz de la experiencia sirve para tomar las decisiones más correctas.

Finalmente, el diseño eléctrico de un transformador especial para laboratorio ha supuesto un pequeño obstáculo con respecto a un transformador normal, pero de manera gradual y ordenada se ha resuelto haciendo uso de las herramientas proporcionadas por Hitachi Energy Zaragoza y el criterio de sus ingenieros experimentados en diseño eléctrico.

Firmado:

Ángel Martínez Sádaba

Zaragoza, 6 de Junio del 2024



9 Bibliografía

- **Normativa**

- IEC 60076-1 Edición 3.0 2011-04 (1).
- IEC 60076-11 Edición 2.0 2018-08 (2).
- EN 50708-3-1 2020-05 (3).
- EN 50708-1-1 2020-05 (4).
- EN 50708-2-1 2020-05 (5).

- **Manuales**

- Criterios de diseño en los que se debe realizar un cálculo alternativo mediante FEMM 2017-02.
- Manual de diseño de núcleos magnéticos 2022-02.
- Reglas de cálculo generales CDSE según IEC 2023-06.
- Estudio sobre el aislamiento de los núcleos 2017.06.