

TÍTULO	Simulación electromagnética de un transformador trifásico de potencia de 100kVA, 10kV/600V, 50Hz. Análisis de las pérdidas de potencia.		
AUTOR	Javier Gutiérrez Martínez		
DIRECTOR / PONENTE	Luis Fernando Mantilla Peñalba		
TITULACIÓN	<i>Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales</i>	FECHA	Junio 2024

PALABRAS CLAVE

Transformador trifásico de potencia, pérdidas de potencias, simulación electromagnética

DESCRIPCIÓN RESUMEN DEL TFG

En este trabajo de fin de grado se abordó el diseño y simulación de un transformador trifásico de potencia de 100 kVA, con una relación de transformación de 10 kV/600 V y una frecuencia de 50 Hz, utilizando J-Mag Designer como herramienta principal. El proceso de diseño comenzó con el análisis detallado de los requisitos y especificaciones del transformador, seguido de una serie de cálculos para determinar las dimensiones adecuadas del núcleo y los devanados. Estos cálculos proporcionaron los parámetros necesarios para el diseño del transformador en el software.

Posteriormente, se procedió a realizar el diseño del transformador en J-Mag Designer, utilizando las dimensiones obtenidas en los cálculos previos. Se configuraron los materiales del núcleo y los devanados según las especificaciones requeridas.

Una vez completado el diseño, se llevó a cabo la simulación en el software para evaluar el rendimiento del transformador. Los resultados obtenidos de la simulación mostraron que las pérdidas del transformador se encontraban dentro de los límites aceptables, validando así la eficacia del diseño propuesto.

En resumen, este trabajo demostró la viabilidad de utilizar J-Mag Designer para el diseño y simulación de transformadores trifásicos de potencia, proporcionando resultados satisfactorios en términos de pérdidas y rendimiento.

CONCLUSIONES

Como conclusión, este trabajo ha demostrado la efectividad del enfoque utilizado para el diseño y simulación de un transformador trifásico de potencia mediante el uso de J-Mag Designer. Los resultados obtenidos reflejan la capacidad del software para proporcionar dimensiones precisas y optimizadas del transformador, así como para evaluar su rendimiento de manera rigurosa. La satisfactoria validación de las pérdidas del transformador en la simulación respalda la precisión del diseño propuesto, destacando su relevancia en aplicaciones de ingeniería eléctrica. Además, este estudio subraya la importancia de combinar el conocimiento teórico con herramientas de simulación avanzadas para lograr soluciones eficientes y confiables en el diseño de sistemas eléctricos de potencia.

REFERENCIAS

- V.N. Mittle and Arvind Mittle, *Design of electrical machines*, Fifth Edition. 2009.
- J-Mag, "JMAG, Manual de Usuario." 2017.



TÍTULO	Electromagnetic simulation of a 100kVA, 10kV/600V, 50Hz, three-phase power transformer. Power losses analysis.		
AUTOR	Javier Gutiérrez Martínez		
DIRECTOR / PONENTE	Luis Fernando Mantilla Peñalba		
TITULACIÓN	<i>Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales</i>	FECHA	June 2024

PALABRAS CLAVE

Three-phase power transformer, power losses, electromagnetic simulation

DESCRIPCIÓN RESUMEN DEL TFG

In this final degree project, the design and simulation of a 100 kVA three-phase power transformer, with a transformation ratio of 10 kV/600 V and a frequency of 50 Hz, using J-Mag Designer as the main tool, was addressed. The design process began with a detailed analysis of the transformer's requirements and specifications, followed by a series of calculations to determine the appropriate dimensions of the core and windings. These calculations provided the necessary parameters for the transformer design in the software. Subsequently, the transformer was designed in J-Mag Designer, using the dimensions obtained in the previous calculations. The core and winding materials were configured according to the required specifications. Once the design was completed, the simulation was carried out in the software to evaluate the transformer's performance. The results obtained from the simulation showed that the transformer losses were within acceptable limits, thus validating the effectiveness of the proposed design. In summary, this work demonstrated the feasibility of using J-Mag Designer for the design and simulation of three-phase power transformers, providing satisfactory results in terms of losses and performance.

CONCLUSIONES

In conclusion, this work has demonstrated the effectiveness of the approach used for the design and simulation of a three-phase power transformer using J-Mag Designer. The results obtained reflect the software's ability to provide precise and optimized dimensions of the transformer, as well as to evaluate its performance rigorously. The satisfactory validation of the transformer losses in the simulation supports the accuracy of the proposed design, highlighting its relevance in electrical engineering applications. Additionally, this study underscores the importance of combining theoretical knowledge with advanced simulation tools to achieve efficient and reliable solutions in the design of power electrical systems.

REFERENCIAS

- V.N. Mittle and Arvind Mittle, *Design of electrical machines*, Fifth Edition. 2009.
- J-Mag, "JMAG, Manual de Usuario." 2017.

IDENTIFICACIÓN INICIAL

DATOS DEL PROYECTO	
Simulación electromagnética de un transformador trifásico de potencia de 100kVA, 10kV/600V, 50Hz. Análisis de las pérdidas de potencia.	
Electromagnetic simulation of a 100kVA, 10kV/600V, 50Hz, three-phase power transformer. Power losses analysis.	
CÓDIGO: GITI/2023-2024/JGM	
DATOS DEL DESTINATARIO	
Nombre	Luis Fernando Mantilla Peñalba
Entidad	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación. Universidad de Cantabria
DATOS DEL AUTOR	
Nombre	Javier Gutiérrez Martínez
Titulación	Proyectante Ingeniero en Tec. Industriales
Entidad	Universidad de Cantabria E.T.S. de Ing. Industriales y Telecomunicación
Dirección	Avda. de los Castros, 46. 39005 Santander
Correo electrónico	javier.gutierrezma@alumnos.unican.es
DATOS DEL PROMOTOR	
Nombre	Luis Fernando Mantilla Peñalba
Entidad	Dpto. de Ingeniería Eléctrica y Energética
EMPLAZAMIENTO GEOGRÁFICO	
No procede	
TRABAJOS PREVIOS	
No procede	

PRÓLOGO

Este Trabajo Fin de Grado (TFG) es un documento académico con finalidad y contenidos diferentes de los proyectos técnicos, los proyectos de actividad y los informes periciales regulados por la norma UNE. Sin embargo, como se recoge en el Pliego de Condiciones, la Orden CIN/351/2009, la Memoria de Verificación del título y la Normativa del Proyecto Fin de Grado de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación establecen como competencia específica asignada al TFG que sea “un proyecto en el ámbito de las tecnologías específicas de la Ingeniería Industrial de naturaleza profesional”. Las normas UNE citadas (también incluidas en el Pliego de Condiciones) aportan ese carácter profesional.

Por estos motivos, es instructivo para el estudiante que la estructura y el desarrollo del documento se adapte normativamente a aquellos. Con ese objetivo y dado el objeto técnico de este TFG, se asume que tiene aspectos semejantes a un informe pericial por su finalidad demostrativa ante un tribunal, en este caso académico, y aspectos propios de un proyecto técnico por su contenido tecnológico.

Con estas consideraciones el documento adopta una estructura mixta resultante de las estipulaciones de UNE 197001:2019 (informe pericial) con adiciones de UNE 157001:2014 (proyecto técnico). El Pliego de Condiciones detalla la adaptación formal del documento.

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**Simulación electromagnética de
un transformador trifásico de
potencia de 100kVA, 10kV/600V,
50Hz. Análisis de las pérdidas de
potencia.**

**(Electromagnetic simulation of a
100kVA, 10kV/600V, 50Hz, three-
phase power transformer. Power
losses analysis.)**

Para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

Autor: Javier Gutiérrez Martínez

ÍNDICE GENERAL

MEMORIA.....	1
ANEXOS	50
PLANOS.....	60
PLIEGO DE CONDICIONES	96
PRESUPUESTO	134

MEMORIA

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1. OBJETO	6
2. ALCANCE	7
3. ANTECEDENTES DEL TRANSFORMADOR	9
3.1 Evolución histórica	9
3.2 Componentes	11
3.3 Tipos de transformadores trifásicos:	12
3.4 Materiales de construcción	15
3.5 Principio de funcionamiento	16
3.6 Pérdidas en el transformador	17
4. FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL DISEÑO	20
4.1 Generales	20
4.2 Materiales	20
4.3 Geometría	21
4.4 Conexionado	21
5. DESARROLLO	25
5.1 Diseño del núcleo del transformador	25
5.1.1 Voltios por vuelta	26
5.1.2 Calculo Sección transversal.....	27
5.2 Diseño de la ventana del transformador	27
5.3 Diseño del conductor de alta tension	29
5.4 Diseño del bobinado de alta tension	31
5.5 Diseño del conductor de baja tension	33
5.6 Diseño del bobinado de baja tension	34
5.7 Diseño de la Resistencia de Carga.....	36
5.8 Cálculo de la relación de transformación del transformador	36
6. PROGRAMA DE CÁLCULO	37
6.1 Procedimiento de diseño con JMAG	38
6.2 Condiciones para aplicar al transformador	39
6.3 Selección del material	41
6.4 Generación del mallado.....	42
6.5 Ajustes de computación	43
7. NORMAS Y REFERENCIAS	44
8. SIMULACIÓN Y RESULTADOS	45
8.1 Desarrollo de la simulación	45

8.2	Obtención de resultados	46
9.	CONCLUSIONES	49

1. OBJETO

El objetivo central de este trabajo es profundizar en el conocimiento del diseño de transformadores trifásicos industriales comunes de uso ordinario que están presentes en todas las industrias y ciudades, además de realizar un estudio de sus principales pérdidas mediante técnicas de simulación por computador.

En este estudio, mediante el uso del software de diseño profesional JMAG-Designer, se realizará el modelo aplicando un módulo de análisis magnético en frecuencia. A través de estos módulos se desarrollan nuevas habilidades dentro del campo del electromagnetismo, como es la simulación mediante computador, junto con la aplicación de los conocimientos teóricos, previamente adquiridos.

2. ALCANCE

Este análisis se circunscribe a condiciones específicas, introduciendo algunas simplificaciones con el propósito de mitigar la complejidad y volumen en el cálculo final. La focalización de la investigación recae en el electromagnetismo y sus fenómenos, excluyendo otros elementos con el fin de lograr una simplificación considerable.

Es crucial señalar que no se considerarán todos los aislamientos y dieléctricos, con la consecuente omisión del espacio que ocupan dentro del transformador. Esta omisión obedece a evitar pérdidas y aumentos de temperatura derivados de corrientes parásitas y posibles fugas sin la adecuada separación dieléctrica, así como a la ausencia de contemplación de los espacios requeridos para el paso del refrigerante, conllevando costos adicionales en adquisición y mantenimiento.

Adicionalmente, no se incorporarán todos los elementos estructurales necesarios para el soporte y protección de los componentes del transformador ante condiciones atmosféricas adversas, en el caso de instalaciones en exteriores, o ante posibles impactos y la entrada de fluidos diversos. Entre los elementos estructurales omitidos de mayor relevancia se encuentran el tanque, responsable de contener y resguardar todos los componentes del transformador, las abrazaderas, que aseguran el núcleo en el tanque, y el escudo, destinado a canalizar corrientes y flujos dispersos.

La consideración de aspectos térmicos se excluye por su potencial complicación en los cálculos, ya que las variaciones pueden derivar de diversas situaciones como pérdidas de Joule, deterioro de la calidad del refrigerante, temperatura ambiente y la falta de aislamiento entre partes, así como posibles cortocircuitos. Este parámetro, aunque de suma importancia, se descarta para priorizar la atención en la parte electromagnética.

Aspectos económicos también son omitidos en este tipo de estudios, optando por materiales como el cobre, más costoso que el aluminio, y seleccionando el material ferromagnético

según requisitos de funcionamiento, sin priorizar el costo. En cuanto a la carga del transformador, se simplifica asumiendo una única carga en la salida, modelada con una resistencia en cada fase.

El análisis numérico mediante el método de elementos finitos, aplicado en el software JMAG, se ejecuta mediante la subdivisión del transformador en elementos para representar la geometría. Estos elementos, conectados por nodos, permiten la formulación de ecuaciones diferenciales para su resolución. La precisión del resultado está vinculada al número de elementos, requiriendo un equilibrio entre precisión y tiempo de resolución.

Se presupone un régimen permanente para la simplificación de cálculos y reducción del tiempo computacional, desestimando la parte transitoria del comportamiento del transformador. El estudio se desarrolla a una temperatura constante de 75 grados centígrados en los conductores, influyendo significativamente en el cálculo de la resistencia, dada la variabilidad de la resistividad con la temperatura. En aras de la eficiencia computacional, se modelará únicamente la mitad del transformador, aprovechando su simetría respecto a un plano vertical que pasa por su centro, como se indica en los planos.

3. ANTECEDENTES DEL TRANSFORMADOR

3.1 Evolución histórica

El transformador es el resultado de varios experimentos e inventos en la carrera por el desarrollo de la electricidad. El transformador como concepto tiene su inicio en 1876 donde un ingeniero ruso “Pavel Yablochkov” (1847-1894) que inventó un sistema de iluminación basado en un par de bobinas de inducción, donde una primera bobina se conectaba a una fuente de corriente alterna y la bobina secundaria se conectaba al sistema de iluminación.

El desarrollo de “Pavel” fue posible gracias a las continuas mejoras en las bobinas de inducción inventadas por el irlandés “Nicholas Joseph Callan” (1799-1864) en 1836, y el físico e Ingeniero alemán “Heinrich Daniel Ruhmkorff” (1803-1877) en 1850. Estas bobinas de inducción tienen su fundamento en el fenómeno de la inducción electromagnética descubierto por el físico y químico británico “Michael Faraday” (1791-1867) en 1831, que dedicó su carrera al estudio del electromagnetismo y la electroquímica.



Figura 1. Generador secundario de Gaulard y Gis

En 1882 “Lucien Gaulard” (1850-1888) y “John Dixon Gibbs” (1834-1912) ingenieros francés e inglés respectivamente en una exposición en Londres presentaron un aparato que denominaron el “Generador secundario” el cual tiene fundamentos en las bobinas de inducción de Pavel, sólo que este nuevo dispositivo tenía núcleo abierto de hierro.

Entre 1884 y 1885 los ingenieros húngaros “Károly Zipernowsky” (1853-1942), “Ottó Bláthy” (1860-1939) y “Miksa Déri” (1854-1938), de la compañía Ganz, crearon en Budapest el modelo ZBD de transformador de corriente alterna, basado en un diseño de “Gaulard” y “Gibbs”. En su solicitud de patente aparece por primera vez la palabra “transformador”.



Figura 2. Otto Bláthy, Miksa Déry y Károly Zipernowsky creadores del Transformador "ZBD"



Figura 3. Primer transformador de Otto Bláthy, Miksa Déry y Károly Zipernowsky, Budapest, 1885.

En 1885, el estadounidense "George Westinghouse" (1846-1914), empresario, ingeniero e inventor, titular de la Westinghouse Electric Company, compró las patentes del ZBD y las de Gaulard y Gibbs. También le encomendó al ingeniero estadounidense "William Stanley" (1858-1916), con el apoyo de "Albert Schmid" y "Oliver B. Shallenberger" la construcción de un transformador de tipo ZBD para uso comercial. [1], [2]



Figura 4. William Stanley Jr.



Figura 5. Primer prototipo del transformador de Stanley de 1885, en el Museo de Berkshire, Massachusetts,

3.2 Componentes

Los componentes principales de un transformador trifásico son los siguientes:

- ◇ Núcleo magnético:
 - Formado por láminas de acero al silicio apiladas para minimizar las pérdidas por corrientes parásitas.
 - Su función es concentrar el flujo magnético generado por las bobinas.
 - Puede tener diferentes formas: tipo columna, tipo núcleo y tipo cuña.
- ◇ Devanados:
 - Bobinas de alambre conductor, generalmente de cobre, que se arrollan alrededor del núcleo.
 - Hay dos tipos:
 - Primario: Recibe la energía eléctrica del sistema de alimentación.
 - Secundario: Entrega la energía eléctrica a la carga.
 - El número de espiras en cada devanado determina la relación de transformación del voltaje.
- ◇ Aislamiento:
 - Materiales aislantes como barnices, papel, cartón o aceite mineral que se interponen entre las diferentes partes del transformador para evitar cortocircuitos.
 - Es fundamental para garantizar la seguridad y el buen funcionamiento del equipo.

- ◇ Tanque:
 - Recipiente que protege los componentes internos del transformador.
 - Puede ser de metal (acero o aluminio) o de material aislante (resina epoxi).
- ◇ Sistema de refrigeración:
 - Disipa el calor generado por las pérdidas en el núcleo y los devanados.
 - Puede ser por aire (con aletas de disipación) o por aceite (con un radiador externo).
- ◇ Accesorios:
 - Bornes de conexión para la entrada y salida de la energía eléctrica.
 - Indicadores de nivel de aceite (en caso de transformadores con aceite).
 - Dispositivos de protección contra sobrecorrientes, cortocircuitos y sobretensiones.[3]

3.3 Tipos de transformadores trifásicos

Aunque basados en los mismos principios básicos, se diferencian varios tipos de transformadores que se clasifican en dos grandes grupos: transformadores de potencia y de medida.

Transformadores de potencia

Los transformadores eléctricos de potencia sirven para variar los valores de tensión de un circuito de corriente alterna, manteniendo su potencia. Su funcionamiento se basa en el fenómeno de la inducción electromagnética. [3]

- ◇ **Transformadores eléctricos elevadores.**

Tienen la capacidad de aumentar el voltaje de salida en relación con el voltaje de entrada. En estos transformadores el número de espiras del devanado secundario es mayor a las del devanado primario. [3]



Figura 6. Modelización de un transformador elevador

◇ Transformadores eléctricos reductores.

Los transformadores eléctricos reductores tienen la capacidad de disminuir el voltaje de salida en relación con el voltaje de entrada. En estos transformadores el número de espiras del devanado primario es mayor al secundario.

Cualquier transformador elevador puede actuar como reductor, si lo conectamos al revés, del mismo modo que un transformador reductor puede convertirse en elevador. [3]



Figura 7. Modelización de un transformador reductor

◇ Autotransformadores

Se utilizan cuando es necesario cambiar el valor de un voltaje, pero en cantidades muy pequeñas. La solución consiste en montar las bobinas de manera sumatoria. La tensión, en este caso, no se introduciría en el devanado primario para salir por el secundario, sino que entra por un punto intermedio de la única bobina existente.

Esta tensión de entrada (V_p) únicamente recorre un determinado número de espiras (N_p), mientras que la tensión de salida (V_s) tiene que recorrer la totalidad de las espiras (N_s). [3]

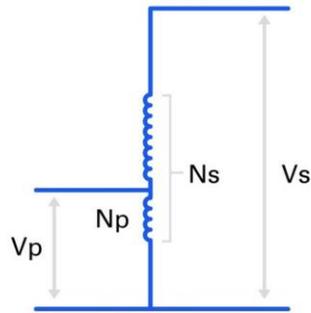


Figura 8. Modelización de un autotransformador

Transformadores eléctricos de medida

Sirven para variar los valores de grandes tensiones o intensidades para poderlas medir sin peligro.

◇ Transformadores eléctricos de intensidad

Toma una muestra de la corriente de la línea a través del devanado primario y lo reduce hasta un nivel seguro para medirlo. Su devanado secundario está enrollado alrededor de un anillo de material ferromagnético y su primario está formado por un único conductor, que pasa por dentro del anillo.

El anillo recoge una pequeña muestra del flujo magnético de la línea primaria, que induce una tensión y hace circular una corriente por la bobina secundaria. [3]

◇ Transformador eléctrico potencial

Se trata de una máquina con un devanado primario de alta tensión y uno secundario de baja tensión. Su única misión es facilitar una muestra del primero que pueda ser medida por los diferentes aparatos.[3]

3.4 Materiales de construcción

Hasta ahora, hemos observado que un transformador consta de un circuito magnético cerrado y al menos dos bobinas, denominadas primaria y secundaria. Además de estas partes fundamentales, el transformador requiere otros elementos esenciales, que incluyen:

- ◇ Materiales aislantes para el núcleo.
- ◇ Materiales aislantes para las bobinas.
- ◇ Un cilindro aislante ubicado entre las bobinas primaria y secundaria.
- ◇ Un marco de acero para sostener el núcleo.
- ◇ Tornillos de sujeción del núcleo para proporcionar rigidez mecánica al conjunto del núcleo.
- ◇ Materiales de conexión.
- ◇ Interruptor de cambio de toma, en caso de que esté presente.
- ◇ Un recipiente de acero (Tanque) para albergar la combinación del núcleo y las bobinas.
- ◇ Terminales aislantes apropiados.
- ◇ Material aislante y refrigerante (Aceite de Transformador).
- ◇ Radiadores para mejorar la superficie de enfriamiento.

[4], [5]

3.5 Principio de funcionamiento

El transformador es un dispositivo electromagnético que incluye dos o más circuitos independientes, conocidos como devanados. Su función principal es cambiar la energía eléctrica de una forma, caracterizada por magnitudes V-I (tensión-intensidad) específicas, a otra forma con valores distintos, sin alterar la potencia, mediante el proceso de inducción electromagnética.

El proceso de operación implica la aplicación de una corriente alterna variable al arrollamiento primario, generando así un campo magnético también variable. Este flujo magnético se conecta al devanado secundario mediante un núcleo construido con material ferromagnético, capaz de retener la mayor parte del flujo magnético en su interior. La variación del campo magnético es la que induce una fuerza electromotriz en el devanado secundario, dando como resultado la generación de una tensión en este último.

Las otras porciones del flujo, denominadas flujo de fuga ϕ_L y de magnitud considerablemente menor que el flujo principal, no se vinculan magnéticamente con el devanado (2) y se dispersan a través del aire. Siguiendo la ley de la inducción electromagnética, el flujo principal (ϕ), que varía periódicamente y conecta ambos devanados (1) y (2), induce una fuerza electromotriz (f.e.m) en cada uno de los devanados. [6]

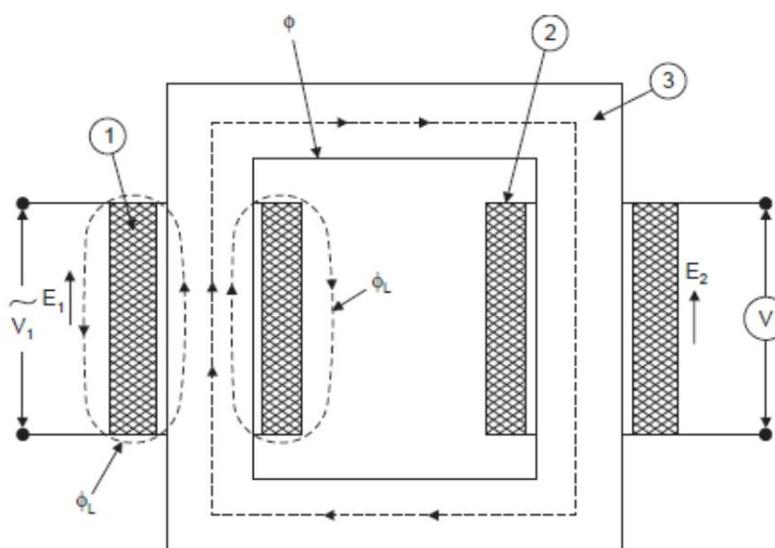


Figura 9. Transformador simple

3.6 Pérdidas en el transformador

El presente apartado se centra en el exhaustivo análisis de las pérdidas en transformadores trifásicos, un aspecto crucial para comprender la eficiencia y el rendimiento de estos dispositivos esenciales en la distribución de energía eléctrica. Las pérdidas en un transformador se clasifican en diversas categorías, y su estudio minucioso es esencial para optimizar el diseño y operación de estos dispositivos.

◇ Pérdidas en el núcleo (hierro):

- Pérdidas por histéresis:
 - Definición: Se generan por la inversión del magnetismo en el núcleo ferromagnético. Cada vez que el campo magnético cambia de dirección, se produce una pérdida de energía.
 - Factores que influyen:
 - Material del núcleo: La calidad del material ferromagnético afecta las pérdidas por histéresis. Los materiales con baja coercitividad, como el acero al silicio, tienen menores pérdidas por histéresis.
 - Frecuencia de la corriente: Las pérdidas por histéresis aumentan con la frecuencia de la corriente.
 - Forma de la onda de la corriente: Las formas de onda con mayor contenido de armónicos generan mayores pérdidas por histéresis.
 - Minimización:
 - Selección de materiales: Se pueden utilizar materiales con baja coercitividad, como el acero al silicio de alta calidad.
 - Diseño del núcleo: Se puede optimizar la forma del núcleo para reducir las pérdidas por histéresis.
- Pérdidas por corrientes de Foucault:
 - Definición: Se generan por la circulación de corrientes parásitas en el núcleo debido al campo magnético variable.

- Factores que influyen:
 - Material del núcleo: Los materiales con alta conductividad eléctrica, como el hierro, generan mayores pérdidas por corrientes de Foucault.
 - Espesor del núcleo: Las pérdidas por corrientes de Foucault aumentan con el espesor del núcleo.
 - Frecuencia de la corriente: Las pérdidas por corrientes de Foucault aumentan con el cuadrado de la frecuencia de la corriente.
- Minimización:
 - Laminación del núcleo: El núcleo se puede construir con láminas de material ferromagnético apiladas y aisladas entre sí. Esto reduce la sección transversal del conductor y, por lo tanto, las corrientes de Foucault.
 - Uso de materiales con baja conductividad: Se pueden utilizar materiales con baja conductividad eléctrica, como el acero al silicio con bajo contenido de silicio.
- ◇ Pérdidas en el cobre:
 - Pérdidas en el devanado primario:
 - Definición: Se producen por la resistencia del conductor al paso de la corriente.
 - Factores que influyen:
 - Material del conductor: El cobre es el material más utilizado por su baja resistividad eléctrica.
 - Sección transversal del conductor: Las pérdidas en el devanado primario aumentan con la resistencia del conductor, que a su vez es inversamente proporcional a la sección transversal del conductor.
 - Corriente que circula por el devanado: Las pérdidas en el devanado primario aumentan con el cuadrado de la corriente que circula por

el conductor.

- Minimización:
 - Aumentar la sección transversal del conductor: Se puede aumentar el diámetro del alambre o utilizar un conductor con más hilos.
 - Utilizar materiales con baja resistividad: Se puede utilizar cobre de alta calidad o, en algunos casos, aluminio.
- Pérdidas en el devanado secundario:
 - Similar a las del devanado primario: Las mismas variables que afectan las pérdidas en el devanado primario también afectan las del secundario.
- ◇ Pérdidas adicionales:
 - Pérdidas por vibraciones: Las vibraciones mecánicas del transformador pueden generar pérdidas de energía.
 - Pérdidas por ruido: El ruido generado por el transformador también puede representar una pérdida de energía.

[4], [5], [6], [7]

4. FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL DISEÑO

4.1 Generales

Se parte de la premisa de un transformador de distribución, seleccionado por su potencia nominal, configurado en un sistema trifásico para una frecuencia de 50 Hz. Este dispositivo opera con una tensión de 600 V en el lado de baja tensión y 10 kV en el lado de alta tensión, exhibiendo una potencia aparente de 100 kVA.

En este análisis, se ha adoptado un enfoque de régimen permanente, empleando el modelo de resistencias constantes. Este modelo implica una simplificación significativa en los cálculos, considerando la estabilidad de las condiciones de operación a lo largo del tiempo.

El estudio se ha llevado a cabo bajo la suposición de una temperatura constante de 75º Celsius, considerándola invariable en todas las fases de la evaluación. Este valor termal constante se mantiene como un parámetro constante a lo largo del análisis, facilitando la evaluación de las propiedades eléctricas y térmicas del transformador en dicha condición.

4.2 Materiales

En la selección del material para el núcleo del transformador, se ha optado por emplear una lámina de acero de la compañía fabricante de acero japonés, JFE Steel, específicamente del tipo 50JN270. La elección de este material ferromagnético se fundamenta en sus propiedades altamente favorables para el comportamiento requerido en el estudio. Cabe destacar que este tipo de lámina está disponible en la biblioteca del software JMAG, utilizado en el estudio, como se evidencia en el plano 3.2 y 3.3 del apartado de planos.

La preferencia por material laminado en lugar de macizo responde a la intención de minimizar las pérdidas. Se reconoce que las pérdidas de histéresis y por corrientes de Foucault están intrínsecamente vinculadas al espesor del material; por ende, la elección de chapas finas contribuye a la reducción de estas pérdidas.

En cuanto al conductor que constituye el bobinado, se ha decidido utilizar cobre debido a sus propiedades inherentes y su idoneidad para la aplicación específica de este estudio. Aunque tanto el cobre como el aluminio son materiales conductores comúnmente utilizados, la elección del cobre se fundamenta en su mayor conductividad. Es decir, para una corriente dada, el cobre presenta una menor caída de tensión, posee una vida útil más prolongada y es menos propenso a la corrosión.

A pesar de estas ventajas del cobre, se reconoce que el aluminio es más liviano y económico, lo cual puede ser una consideración relevante en el ámbito económico.

4.3 Geometría

En la construcción del modelo del núcleo del transformador, se ha adoptado la metodología de área transversal o área de la columna cuadrada. Es pertinente señalar que, a lo largo de todo el núcleo, se mantiene constante el área transversal.

En relación con los bobinados, tanto para la alta tensión como para la baja tensión, se ha optado por la configuración de bobinados concéntricos, prescindiendo de la inclusión de separaciones entre ellos y entre los bobinados y el núcleo. Esta elección responde a consideraciones de simplificación en el modelo, omitiendo cualquier espacio intermedio con el propósito de facilitar los cálculos.

4.4 Conexión

Una de las características distintivas de los transformadores trifásicos es la variedad de configuraciones de conexión disponibles, cada una diseñada para satisfacer requisitos específicos de carga, distribución y transmisión de energía eléctrica. Estas conexiones determinan cómo se interconectan los devanados primarios y secundarios del transformador, influenciando aspectos como la tensión, la corriente, la capacidad de carga y la estabilidad del sistema eléctrico.

En este contexto, es crucial comprender los diferentes tipos de conexionado en transformadores trifásicos, ya que cada uno presenta ventajas particulares en términos de eficiencia, flexibilidad y adaptabilidad a diferentes entornos de aplicación. Desde conexiones triángulo y estrella hasta configuraciones combinadas, exploraremos detalladamente cada tipo de conexión y sus características clave, brindando una visión integral de cómo se utilizan y cómo impactan en la funcionalidad y rendimiento del transformador trifásico.

◇ Conexión Triángulo (Δ);

En esta configuración, los extremos de cada bobina del transformador están conectados en serie formando un circuito cerrado triangular. Por lo tanto, sus características son:

- Es adecuada para aplicaciones donde la carga es predominantemente inductiva.
- Ofrece una mayor capacidad de carga debido a su capacidad para manejar corrientes más altas.
- Proporciona una mayor estabilidad de la tensión ante variaciones en la carga.
- Requiere un menor número de devanados y conexiones, lo que resulta en un diseño más simple y económico. [5]

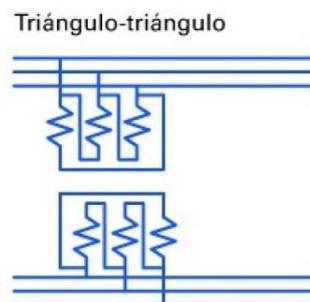


Figura 10. Conexión Δ - Δ

◇ Conexión Estrella (Y):

En esta configuración, los extremos de cada bobina del transformador se conectan a un punto común, mientras que los otros extremos se conectan a las fases de alimentación. Por lo tanto, sus características son:

- Es ideal para aplicaciones donde se requiere un voltaje de línea bajo, pero una corriente de fase alta.
- Proporciona un voltaje de línea más bajo en comparación con la conexión delta para la misma tensión de fase.
- Ofrece una mejor protección contra sobretensiones en comparación con la conexión delta.
- Se utiliza comúnmente en sistemas de distribución de baja y media tensión.

[5]

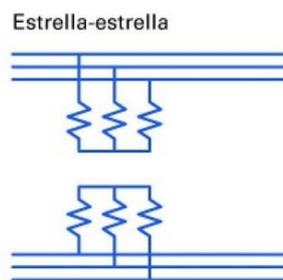


Figura 11. Conexión Y- Y

◇ Conexión Estrella-Triangulo (Y- Δ):

Esta configuración implica que el lado primario del transformador esté conectado en estrella, mientras que el lado secundario esté conectado en triangulo. Por lo tanto, sus características son:

- Se utiliza en aplicaciones donde se requiere adaptar diferentes niveles de tensión entre el lado primario y el secundario del transformador.
- Proporciona una combinación de las características de las conexiones estrella y delta.

- Es útil en aplicaciones industriales donde se necesita un voltaje de línea más bajo en el lado primario y un voltaje de fase más alto en el lado secundario. [5]

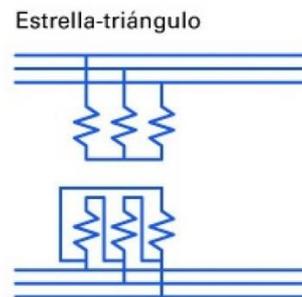


Figura 12. Conexión Y- Δ

◇ Conexión Triángulo-Estrella (Δ -Y):

Esta configuración implica que el lado primario del transformador esté conectado en triángulo, mientras que el lado secundario esté conectado en estrella. Por lo tanto, sus características son:

- Se utiliza en aplicaciones donde se requiere adaptar diferentes niveles de tensión entre el lado primario y el secundario del transformador.
- Proporciona una combinación de las características de las conexiones triángulo y estrella. [5]

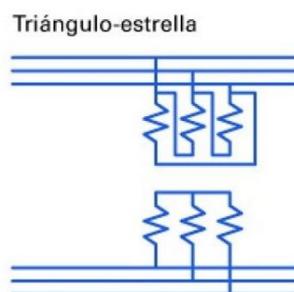


Figura 13. Conexión Δ -Y

Una vez vistas todas las posibles conexiones, optaré por utilizar en nuestro caso, la conexión triángulo-triángulo.

5. DESARROLLO

El objetivo al diseñar el transformador es obtener la siguiente información sobre sus diversos circuitos, utilizando las especificaciones dadas y seleccionando los materiales adecuados para las distintas piezas.

- ◇ Dimensiones principales del circuito magnético, es decir, núcleo, yugo y ventana.
- ◇ Detalles de diseño del circuito eléctrico, es decir, devanados de bajo y alto voltaje
- ◇ Características de funcionamiento, es decir, corriente sin carga, f.d.p (factor de potencia) sin carga, pérdidas de hierro, pérdidas de cobre, eficiencia, eficiencia máxima, carga correspondiente a máx. eficiencia, porcentaje de reactancia, porcentaje de regulación, corriente de cortocircuito y f.d.p. de cortocircuito.
- ◇ Detalles de diseño del tanque, es decir, dimensiones principales del tanque, número de tubos de enfriamiento o radiadores, aumento de temperatura.[5]

5.1 Diseño del núcleo del transformador

El núcleo de los transformadores está formado por chapas de acero al silicio aisladas entre ellas. Están compuestos por dos partes principales: las columnas, que es la parte donde se montan los devanados, y las culatas, que es la parte donde se realiza la unión entre las columnas. El núcleo se utiliza para conducir el flujo magnético, ya que es un gran conductor.

El factor K, que básicamente depende de la relación entre el área de la sección transversal del núcleo y la sección de cobre de los devanados, será diferente para dos tipos de transformadores, es decir, núcleo y carcasa.

Para transformadores idénticos, el tipo de carcasa requerirá más material magnético que el tipo de núcleo.

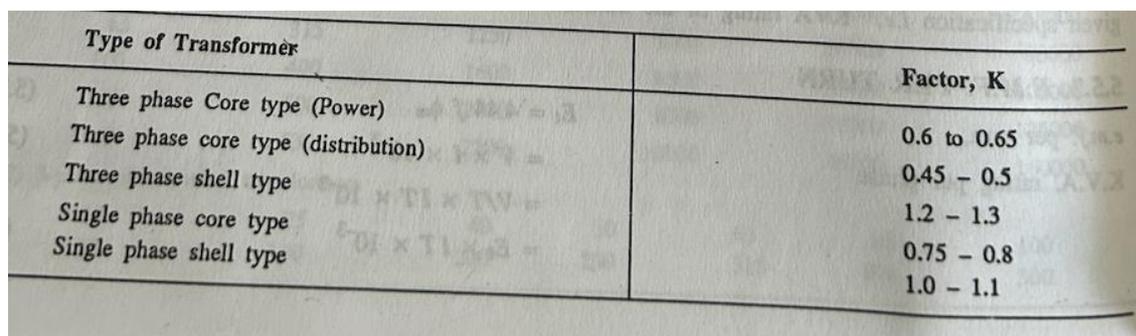
Como resultado, el factor K será mayor para los transformadores de tipo carcasa en comparación con los de tipo núcleo.

De manera similar a lo anterior, un transformador de tipo núcleo monofásico requerirá más material magnético que un tipo de núcleo trifásico por fase. Por lo tanto, el factor K será mayor para los transformadores de tipo núcleo monofásico en comparación con los transformadores de tipo núcleo trifásico.

De manera similar, el factor K será menor para los transformadores de distribución en comparación con los transformadores de potencia.

Hasta cierto punto, el factor K también depende de los costes laborales y de la organización de la fábrica.

Como guía, los valores del factor K para varios tipos de transformadores se dan en figura 14. Ahora se puede tomar un valor adecuado del factor k según el tipo de transformador, consultando esta tabla.[5]



Type of Transformer	Factor, K
Three phase Core type (Power)	0.6 to 0.65
Three phase core type (distribution)	0.45 - 0.5
Three phase shell type	1.2 - 1.3
Single phase core type	0.75 - 0.8
Single phase shell type	1.0 - 1.1

Figura 14. Tabla factor k

5.1.1 Voltios por vuelta

A partir de las especificaciones proporcionadas, se necesita calcular los voltios por vuelta en los bobinados, es decir, la cantidad de voltaje necesaria en cada vuelta para alcanzar el total requerido. Como se detalla en el anexo de cálculos del núcleo en la sección 1.1.1, se obtiene un valor de 4.6V. Esta fórmula se deriva del libro "Design of electrical machines" y es de naturaleza empírica, desarrollada a partir de la experiencia y la correspondencia precisa con los valores reales. [5]

5.1.2 Cálculo Sección transversal

La sección transversal del transformador se refiere al área que es perpendicular al flujo de corriente a lo largo de la columna del transformador, que tiene forma de cuadrado.

Es importante recordar que la sección transversal del núcleo del transformador debe ser constante en todo su recorrido para evitar variaciones en el flujo magnético. Esta sección debe ser cuadrada y de la misma magnitud en todas sus partes.

Para calcularla, primero se debe elegir un valor para la densidad de flujo magnético máxima (B_{max}). En transformadores de distribución, este valor suele estar entre 1.4 y 1.7 Wb/mm². Se elige un valor intermedio, 1.4389389 Wb/mm², para comenzar el proceso de cálculo.

Luego, se utiliza la frecuencia de operación (50 Hz) y los voltios por vuelta (4.6 V) para calcular el área de la sección transversal. El resultado es 14400 mm².

A partir de este valor, se calcula la longitud de cada lado del cuadrado que forma la sección transversal. La raíz cuadrada de 14400mm² es 120 mm.

5.2 Diseño de la ventana del transformador

El espacio de ventana disponible en un transformador está completamente ocupado por los siguientes materiales:

- ◇ Material conductor (cobre) de los devanados.
- ◇ Material aislante, sobre el conductor del devanado.
- ◇ Material aislante, incluido entre el núcleo y el devanado, entre el devanado BT y AT, entre el devanado AT devanados en las dos extremidades.
- ◇ Material aislante (aceite), debido a los conductos de refrigeración dispuestos entre dos partes cualesquiera, como entre el núcleo y el cilindro aislante.

El factor de espacio de la ventana se define como la relación entre el área total ocupada por el material de cobre de los devanados de la ventana y el área de la ventana.

La discusión anterior sobre el factor de espacio de ventana indica claramente que su valor dependerá de lo siguiente:

- ◇ Clasificación de tensión de los devanados, principalmente la tensión más alta.
- ◇ Clasificación KVA del transformador.

Si dos transformadores de la misma clasificación de KVA están diseñados para una tensión 11 KV y 33 KV, entonces el espacio en la ventana necesario para el aislamiento será mayor para el transformador de 33 KV en comparación con el transformador idéntico de 11 KV. Como tal, el espacio disponible en la ventana para el cobre de los devanados será menor en el caso de un transformador de 33 KV. Por lo tanto, el factor de espacio de la ventana disminuye a medida que aumenta el voltaje del devanado hv. [5]

Por otro lado, si se diseñan dos transformadores para la misma tensión de alta tensión. devanado, pero diferente clasificación 100 KVA y 2000 KVA, entonces el espacio necesario para el aislamiento no diferirá mucho en los dos casos, ya que el voltaje es el mismo, pero para un transformador de 2000 KVA, se necesita más espacio. para cobre en comparación con un transformador de 100 KVA. Por lo tanto, se debe tomar un valor mayor del factor de espacio de ventana a medida que aumenta la clasificación del transformador.

Con base en la discusión anterior, los valores del factor de espacio de ventana para varios voltajes y potencias nominales del transformador se brindan en figura 15 como guía para la elección adecuada en el diseño de transformadores.

Por lo tanto, para nuestro caso el factor de espacio de ventana será de valor $k_w = 0.209136$

Table 5.6. Window space factor

Rating KVA	3.3 KV	11 KV	33 KV	110 KV
100	0.27	0.2	0.14	–
1000	0.38	0.28	0.2	0.15
2000	0.4	0.3	0.24	0.16
5000	0.42	0.34	0.26	0.18
10000	0.45	0.37	0.29	0.2

Figura 15. Tabla factor espacio ventana

Por lo tanto, para calcular correctamente la sección de la ventana del transformador, se deben elegir dos parámetros:

- ◇ Densidad de corriente (δ): Se elige un valor de 2.5 A/mm².
- ◇ Factor de espaciado de la ventana (K_w): Se elige un valor de 0.209136 ya que se ajusta a las condiciones preliminares del transformador. Este valor no tiene en cuenta el espacio ocupado por elementos como los aislamientos.

Aplicando la fórmula del anexo 1.1.5 con dichos valores, se obtiene un área de ventana de 61600 mm².

En resumen, las dimensiones de la ventana de mi transformador serán:

La sección de la ventana es rectangular. El alto debe ser un poco más grande del doble del ancho.

Ancho: Se elige un ancho de 140 mm que es cercano al lado de la sección transversal

Alto: Se divide el área de la ventana entre el ancho para obtener la altura, como se puede ver en el anexo 1.1.6, cuyo resultado es de 440 mm.

5.3 Diseño del conductor de alta tension

Comenzamos calculando el número de vueltas del bobinado de baja tensión, que se divide el valor nominal de la baja tensión del transformador entre los voltios por vuelta. Esto nos permite calcular cuántas vueltas son necesarias en el bobinado para alcanzar la tensión nominal del transformador.

Como se indica en los anexos adjuntos del núcleo en la sección 1.2.1, se obtiene un valor de $N_{AT}=2174$ vueltas.

Posteriormente, seguimos con la corriente que fluye por cada fase del bobinado de baja tensión se determina considerando la configuración triangulo de la conexión y las propiedades eléctricas de dicho bobinado. En esta configuración, la tensión de fase es igual a la tensión de línea, pero la corriente de línea es $\sqrt{3}$ veces mayor que la corriente de fase.

Para calcular la corriente por fase, se emplea la fórmula vista en el anexo 1.2.2 de la potencia aparente trifásica, que es tres veces la corriente de fase multiplicada por la tensión de fase.

Conociendo el valor de la potencia aparente (100kVA) y la tensión de fase (10kV), se puede obtener la corriente de fase. Este cálculo resulta en una corriente de fase de 3.333 A.

Para determinar el área del conductor del bobinado de alta tensión, dividimos la corriente por fase calculada previamente entre la densidad de corriente, la cual se obtiene de los cálculos del anexo referentes al conductor en alta tensión en la sección 1.2.3, dando como resultado 1.481 mm².

Dado que los conductores tienen una sección circular, calculamos el diámetro de dicha sección utilizando la fórmula para secciones circulares, como se muestra en los cálculos del anexo referentes al conductor en baja tensión en la sección 1.2.4, obteniendo un valor de 1.37 mm , pero se opta por redondear a 1.5 mm. Debido a este ajuste, recalculamos el área del conductor del bobinado de alta tensión, como se detalla en los cálculos del anexo referentes al conductor en baja tensión en la sección 1.2.5, resultando en un área de 1.7671 mm².

5.4 Diseño del bobinado de alta tensión

Para el diseño del bobinado de alta tensión, tendremos que realizar una serie de cálculos para obtener las dimensiones del bobinado que buscamos.

Altura total del bobinado de alta tensión:

El valor de la altura total del bobinado de alta tensión se obtiene multiplicando el número de vueltas por capa, que es 198, por el diámetro del conductor de alta tensión previamente calculado, que es de 1.5 mm. Según se muestra en los cálculos adjuntos del bobinado de baja tensión en la sección 1.4.2, se llega a un valor de $h_{AT}=297$ mm.

Lado interior del bobinado de alta tensión:

Dado que los bobinados del transformador son de área cuadrada, el lado interior corresponde a la distancia desde el centro de la columna de cada fase hasta el bobinado de alta tensión correspondiente. En este estudio, se omite el espacio entre el bobinado y el núcleo, ya que se centra en las propiedades electromagnéticas únicamente. Como se indica en los cálculos del anexo del bobinado de alta tensión en la sección 1.4.3, resultando un $L_{int}=60$ mm.

Anchura del bobinado de alta tensión:

La anchura del bobinado de alta tensión es la distancia entre su lado interior y exterior. Para calcularla, se multiplica el número de capas por el diámetro del conductor correspondiente, como se muestra en los cálculos del anexo del bobinado de alta tensión en la sección 1.4.4, resultando en 16.5 mm.

Lado exterior del bobinado de alta tensión:

El lado exterior se determina sumando el lado interior (60 mm) con la anchura del bobinado (16.5 mm), como se indica en los cálculos del anexo del bobinado de alta tensión en la sección 1.4.5, lo que nos da un valor de $L_{ext}=76.5$ mm.

Lado medio del bobinado de alta tensión:

El lado medio se calcula como la mitad de la suma entre el lado interior y el exterior, como se muestra en los cálculos del anexo del bobinado de alta tensión en la sección 1.4.6, resultando en 68.25 mm.

Resistencia del bobinado de alta tensión, R_{AT} :

La resistencia total del bobinado de alta tensión se calcula utilizando la fórmula que se muestra en los cálculos del anexo del bobinado de alta tensión en la sección 1.4.7. Se considera una temperatura constante de 75 grados Celsius y se emplea la resistividad del cobre a esa temperatura, $\rho_{75} = 0.02097 \Omega m/mm^2$. Nos queda un valor de $R_{AT}=17.6075 \Omega$.

Reactancia del bobinado de alta tensión, X_{AT} :

La reactancia del bobinado se obtiene multiplicando por cinco el valor de la resistencia del bobinado de alta tensión, como se muestra en los cálculos del anexo del bobinado de alta tensión en la sección 1.4.8, lo que nos da $X_{AT}=88.0375 \Omega$.

Inductancia del bobinado de alta tensión, L_{AT} :

La inductancia del bobinado se calcula dividiendo el valor de la reactancia de alta tensión ($R_{AT}=17.6075 \Omega$) entre la velocidad angular $\omega = 2 \times \pi \times f$. Por lo que, según lo que se muestra en los cálculos del anexo del bobinado de alta tensión en la sección 1.4.9, se obtiene $L_{AT}=280.23 \times 10^{-3} \text{ H}$.

5.5 Diseño del conductor de baja tension

Comenzamos calculando el número de vueltas del bobinado de baja tensión, que se divide el valor nominal de la baja tensión del transformador entre los voltios por vuelta. Esto nos permite calcular cuántas vueltas son necesarias en el bobinado para alcanzar la tensión nominal del transformador.

Como se indica en los anexos adjuntos del núcleo en la sección 1.3.1, se obtiene un valor de $N_{BT}=131$ vueltas.

Posteriormente, la corriente que fluye por cada fase del bobinado de baja tensión se determina considerando la configuración triángulo de la conexión y las propiedades eléctricas de dicho bobinado. En esta configuración, la tensión de fase es igual a la tensión de línea, pero la corriente de línea es $\sqrt{3}$ veces mayor que la corriente de fase.

Para calcular la corriente por fase, se emplea la fórmula vista en el anexo 1.3.2 de la potencia aparente trifásica, que es tres veces la corriente de fase multiplicada por la tensión de fase. Conociendo el valor de la potencia aparente (100KVA) y la tensión de fase (600V), se puede obtener la corriente de fase. Este cálculo resulta en una corriente de fase de 55.555 A.

Para determinar el área del conductor del bobinado de baja tensión, dividimos la corriente por fase calculada previamente entre la densidad de corriente, la cual se obtiene de los cálculos del anexo referentes al conductor en baja tensión en la sección 1.3.3, dando como resultado 24.69 mm².

Dado que los conductores tienen una sección circular, calculamos el diámetro de dicha sección utilizando la fórmula para secciones circulares, como se muestra en los cálculos del anexo referentes al conductor en baja tensión en la sección 1.3.4, obteniendo un valor de 5.6 mm.

5.6 Diseño del bobinado de baja tensión

Altura total del bobinado de baja tensión:

El valor de la altura total del bobinado de baja tensión se obtiene multiplicando el número de vueltas por capa, que es 44, por el diámetro del conductor de baja tensión previamente calculado, que es de 5.6 mm. Según se muestra en los cálculos adjuntos del bobinado de baja tensión en la sección 1.5.2, se llega a un valor de $h_{BT}=246.4$ mm.

Lado interior del bobinado de baja tensión:

Dado que los bobinados del transformador son de área cuadrada, el lado interior corresponde a la distancia desde el centro de la columna de cada fase hasta el bobinado de baja tensión correspondiente. En este estudio, se omite el espacio entre el bobinado y el núcleo, ya que se centra en las propiedades electromagnéticas únicamente. Por tanto, el lado interior coincide con el lado exterior del bobinado de alta tensión, por lo que el $L_{int}=76.5$ mm.

Anchura del bobinado de baja tensión:

La anchura del bobinado de baja tensión es la distancia entre su lado interior y exterior. Para calcularla, se multiplica el número de capas por el diámetro del conductor correspondiente, como se muestra en los cálculos del anexo del bobinado de baja tensión en la sección 1.5.3, resultando en 16.8 mm.

Lado exterior del bobinado de baja tensión:

El lado exterior se determina sumando el lado interior (76.5 mm) con la anchura del bobinado (16.8 mm), como se indica en los cálculos del anexo del bobinado de baja tensión en la sección 1.5.4, lo que nos da un valor de $L_{ext}=92.8$ mm.

Lado medio del bobinado de baja tensión:

El lado medio se calcula como la mitad de la suma entre el lado interior y el exterior, como se muestra en los cálculos del anexo del bobinado de baja tensión en la sección 1.5.6, resultando en 84.65 mm.

Resistencia del bobinado de baja tensión, R_{BT} :

La resistencia total del bobinado de baja tensión se calcula utilizando la fórmula que se muestra en los cálculos del anexo del bobinado de baja tensión en la sección 1.5.7. Se considera una temperatura constante de 75 grados Celsius y se emplea la resistividad del cobre a esa temperatura, $\rho_{75} = 0.02097 \Omega m/mm^2$. Los valores del perímetro medio (677.2 mm), el número de vueltas ($N_{BT}=131$) y el área transversal del conductor ($a_{BT}=24.69 \text{ mm}^2$) permiten obtener la resistencia, que se calcula como $R_{BT}=0.009418 \Omega$.

Reactancia del bobinado de baja tensión, X_{BT} :

La reactancia del bobinado se obtiene multiplicando por cinco el valor de la resistencia del bobinado de baja tensión, como se muestra en los cálculos del anexo del bobinado de baja tensión en la sección 1.5.8, lo que nos da $X_{BT}=0.047091 \Omega$.

Inductancia del bobinado de baja tensión, L_{BT} :

La inductancia del bobinado se calcula dividiendo el valor de la reactancia de baja tensión ($R_{BT}=0.00761 \Omega$) entre la velocidad angular $\omega = 2 \times \pi \times f$. Por lo que, según lo que se muestra en los cálculos del anexo del bobinado de alta tensión en la sección 1.5.9, se obtiene $L_{BT}=149.897 \times 10^{-3} \text{ H}$.

5.7 Diseño de la Resistencia de Carga

La resistencia eléctrica representa la carga conectada al transformador en la carga asignada. Dadas las condiciones preliminares de tensión nominal ($V_{BT}=600V$) y potencia aparente ($S=100kVA$), se puede calcular el valor de la resistencia de carga. Según se muestra en los cálculos adjuntos de la resistencia de carga del anexo 1.6, se obtiene un valor de $R_{carga}=3.6\Omega$.

Si esta elección es correcta, la resistencia eléctrica debe disipar la potencia nominal de 100 kVA, como se establece en las condiciones de operación. Es importante destacar que, al tratarse de una resistencia, solo disipa potencia activa, sin potencia reactiva, lo que significa que la potencia disipada será totalmente activa, compuesta por 100 kW y 0 kVar.

5.8 Cálculo de la relación de transformación del transformador

La relación de transformación es una medida directa de la relación entre la tensión del bobinado de alta tensión y la del bobinado de baja tensión en un transformador. Esta relación está determinada por el número de vueltas en cada bobinado, pero también puede expresarse en función de las corrientes y las resistencias respectivas de cada bobinado.

En el caso de un transformador reductor, como el que se estudia aquí, cuyo propósito es reducir la tensión de entrada a un valor más bajo en la salida, se requiere que el número de vueltas en el bobinado secundario sea menor que en el primario. Sin embargo, para mantener constante la potencia total, si la tensión se reduce, la corriente debe aumentar en la misma proporción. Esta proporción se define como el valor de la relación de transformación. Dicha proporción da un valor de 16.666 (adimensional), como se puede observar en el anexo 1.7.

6. PROGRAMA DE CÁLCULO

JMAG provee varias herramientas de simulación dedicadas al diseño y desarrollo de dispositivos electromagnéticos.

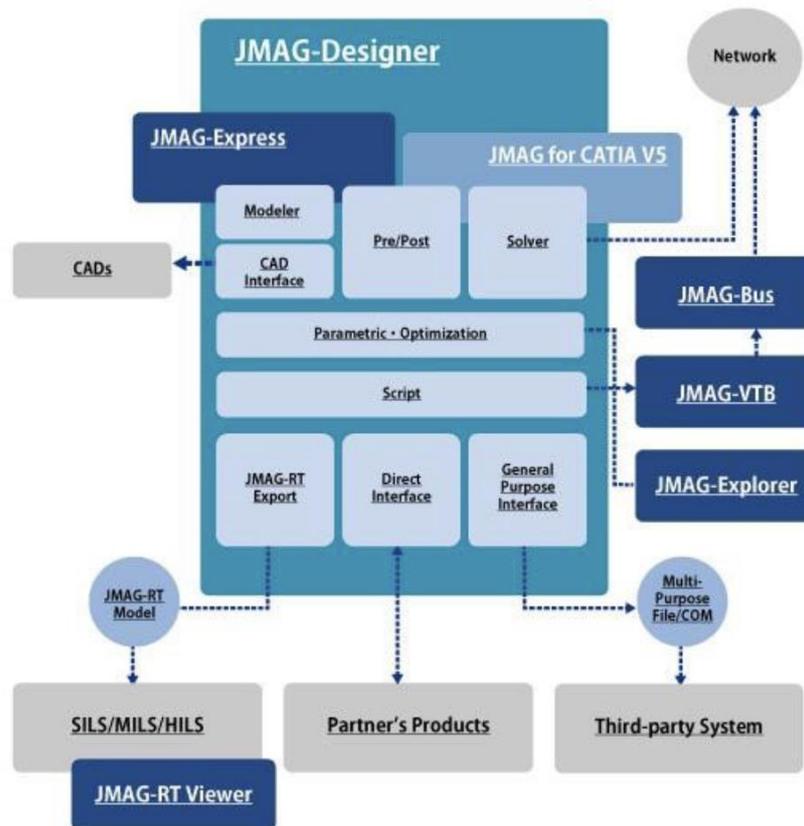


Figura 16. Esquema JMAG

En mi caso, la herramienta que utilizare para poder desarrollar el trabajo será JMag Designer. JMag Designer es un programa de simulación electromagnética utilizado para diseñar y analizar máquinas eléctricas, transformadores, sensores y otros dispositivos electromagnéticos. Este programa fue desarrollado por la empresa japonesa JSOL Corporation y es ampliamente utilizado en la industria para el diseño y análisis de sistemas electromagnéticos complejos.

JMag Designer utiliza métodos de análisis numérico y técnicas basadas en elementos para abordar problemas electromagnéticos tridimensionales. Los usuarios pueden modelar y simular varios tipos de dispositivos electromagnéticos con este software, analizar sus propiedades magnéticas y eléctricas y mejorar su rendimiento. Además, proporciona una

amplia gama de herramientas para la visualización y el análisis de resultados.

JMAG Designer es una herramienta muy útil para la industria eléctrica, ya que permite a los ingenieros diseñar y analizar máquinas y dispositivos con mayor precisión y eficacia. Además, es interoperable con otras herramientas de diseño y análisis electromagnético, lo que facilita la integración de JMag Designer en los procesos de diseño y fabricación utilizados en la industria eléctrica. [8]

6.1 Procedimiento de diseño con JMAG

Para comenzar con el procedimiento de diseño de mi transformador, el primer paso será la creación de un diseño en 2D utilizando la herramienta de diseño disponible en JMAG conocida como "Geometry Editor".

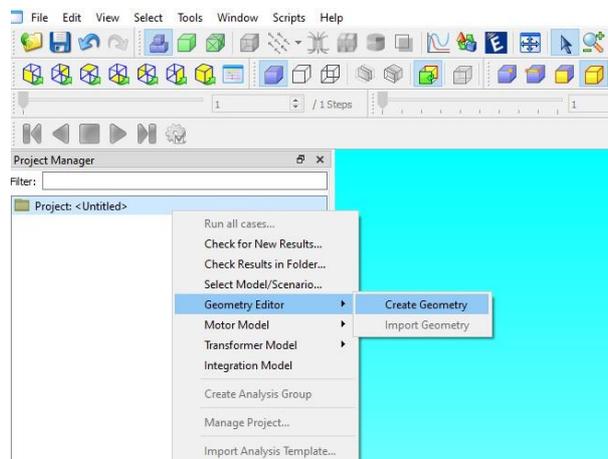


Figura 17. Geometry Editor

Esta herramienta nos permitirá crear la geometría detallada del transformador, incluyendo el diseño del núcleo, los devanados y cualquier otra estructura necesaria. Una vez completado el diseño en 2D, en el mismo "Geometry Editor", se puede realizar una extrusión para obtener el modelo en 3D. Este proceso de extrusión convertirá el diseño bidimensional en un modelo tridimensional, lo que proporcionará una representación más completa y realista del transformador. La capacidad de generar un modelo en 3D dentro del mismo entorno de diseño simplifica el proceso y facilita la visualización del transformador desde diferentes ángulos, lo que es fundamental para un diseño preciso y eficiente.[8]

6.2 Condiciones para aplicar al transformador

Una vez importado el modelo en 3D, el siguiente paso será aplicar una serie de condiciones para ir centrando el transformador. Dichas condiciones se encuentran en la biblioteca de herramientas de JMAG como se detalla en el apartado 2.1 de los planos generales del documento.

De entre todas las condiciones que podemos observar aplicaremos a nuestro transformador, las siguientes 3 condiciones:

Condición de simetría del transformador o “Symmetry Boundary”.

Esto implica trabajar únicamente con la mitad del transformador para reducir los costos computacionales y el tiempo de simulación. Al establecer esta simetría, podemos analizar con precisión el comportamiento del transformador sin comprometer la exactitud de los resultados. [8]

Para añadir esta condición, es necesario editar ciertos parámetros, como se detalla en el apartado 2.2 de los planos del documento.

Condición de “Iron loss calculation”.

Esta condición se emplea para modificar el método de cálculo predeterminado de las pérdidas de hierro en JMAG. Al aplicar esta condición, JMAG utiliza los datos de distribución de densidad de flujo magnético, previamente calculados mediante análisis del campo magnético, para calcular las pérdidas de hierro y su distribución. Este enfoque permite separar las pérdidas de hierro en dos componentes distintas: las pérdidas de Joule y las pérdidas de histéresis. El cálculo se basa en la densidad de flujo magnético de referencia, derivada de la densidad de flujo variable en el tiempo.

Esto asegura una evaluación precisa de las pérdidas de hierro y su comportamiento bajo diversas condiciones de funcionamiento. [8]

Para añadir esta condición, es necesario editar ciertos parámetros, como se detalla en el apartado 2.3 de los planos del documento.

Condición de “FEM Coil”

El uso de la condición FEM Coil está directamente relacionado con la utilización del modelo FEM Coil en el circuito eléctrico previamente mencionado. Este modelo se emplea para representar el bobinado de alta y baja tensión en cada una de las fases, caracterizado por su número de vueltas, resistencia e inductancia propia.

La dirección de la corriente que atraviesa el bobinado se considera positiva cuando fluye del primer terminal al segundo, mientras que se considera negativa si su dirección es inversa.

Es importante destacar que, si se aplica la condición FEM Coil sin tener ningún elemento FEM Coil en el circuito eléctrico, se generará un error, ya que estos elementos están intrínsecamente vinculados y no pueden separarse del modelo eléctrico.

Al emplear esta condición, se presupone que la corriente inducida en el conductor con el modelo FEM se calcula en función de la diferencia de potencial eléctrico entre ambos terminales del bobinado FEM. Además, se asume que la corriente que atraviesa el bobinado con la condición de FEM Coil es uniforme. [8]

Para añadir esta condición, es necesario editar ciertos parámetros, como se detalla en el apartado 2.4 de los planos del documento.

6.3 Selección del material

Una vez que se han establecido las condiciones y especificaciones del transformador trifásico, el siguiente paso crítico en su proceso de diseño y fabricación es la asignación de los materiales adecuados. Esta etapa es fundamental, ya que los materiales elegidos influirán directamente en el rendimiento, la eficiencia y la confiabilidad del transformador a lo largo de su vida útil.

La selección cuidadosa de materiales para cada componente del transformador, desde el núcleo hasta los devanados, es esencial para garantizar un funcionamiento óptimo y una respuesta eficiente a las cargas eléctricas. Cada material utilizado debe cumplir con requisitos específicos en términos de conductividad eléctrica, resistencia mecánica, pérdidas de energía y durabilidad. JMAG nos suministra una amplia gama de material en su biblioteca como se observa en el apartado 3.1 de los planos.

Comienzo por el núcleo, que es el corazón del transformador y está destinado a proporcionar un camino magnético eficiente para el flujo de corriente alterna. El material que se utilizará para el núcleo será un material ferromagnético como es la lámina de acero 50JN270, el cual tendrá aplicado un factor de laminación del 98% que determina la calidad del material utilizado en la construcción del núcleo. En este caso, el material es altamente eficiente en la conducción del flujo magnético, con pérdidas mínimas debido a corrientes parásitas. Dicha configuración se puede ver en el apartado 3.2 de los planos.

Para el devanado tanto de AT, como de BT, el material aplicado será el cobre que es el material más típico en estos casos debido a su excelente conductividad. Además, el cobre ofrece otras ventajas significativas para los devanados del transformador. Su alta resistencia mecánica y su capacidad para soportar condiciones ambientales adversas garantizan la durabilidad y la confiabilidad a largo plazo del sistema. Asimismo, el cobre es altamente maleable y fácil de trabajar, lo que facilita el proceso de fabricación y montaje de los devanados.

6.4 Generación del mallado

A continuación, se realizará el mallado del transformador, tanto para el núcleo como para los devanados existentes. El objetivo del mallado consiste en dividir un elemento o una región en una malla de pequeños elementos finitos. Esto es fundamental en el análisis por elementos finitos, ya que permite discretizar el dominio del problema en segmentos más manejables para realizar cálculos numéricos. Cada elemento de la malla se caracteriza por su geometría y propiedades físicas, lo que facilita la solución de ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento del sistema. El mallado será crucial para garantizar la precisión y la eficiencia del análisis, ya que una malla adecuada permite capturar de manera adecuada los detalles del comportamiento del elemento o sistema bajo estudio, mientras que una malla incorrecta puede llevar a resultados inexactos o ineficientes. Por lo tanto, una vez realizado el mallado como se puede ver en el apartado de los planos, se procede a verificar la calidad del mallado. Una forma de evaluar la calidad de la malla es mediante la relación de aspecto, que se define como la proporción entre la arista más larga y la más corta normalizada desde un vértice hasta la cara opuesta, en comparación con un tetraedro ideal. En total, la malla consta de 195586 elementos, la mayoría de los cuales se asemejan a un tetraedro regular, lo que resulta en una calidad de malla del 64,3%, como se puede observar en la figura del apartado 6.2 de los planos.

Por último, un factor para tener en cuenta es la generación del mallado del medio exterior que rodea al transformador. El mallado del entorno se genera de manera automática al crear el mallado inicial. Aunque es factible ajustarlo según las necesidades de cada estudio, en esta instancia se conservará con los valores predeterminados de configuración.

6.5 Ajustes de computación

Antes de emprender la simulación, ha sido necesario realizar una serie de ajustes y preparativos que aseguren la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos. Estos ajustes previos son como los cimientos de un edificio; proporcionan la base sólida sobre la cual se construirá el análisis y la interpretación subsiguiente.

La importancia de estos ajustes radica en su capacidad para optimizar el entorno de simulación, minimizando posibles errores y maximizando la eficiencia del proceso. Desde la configuración adecuada de parámetros hasta la validación de modelos, cada paso desempeña un papel crucial en el éxito general de la simulación.

Por lo tanto, los ajustes de computación necesarios para la simulación han sido los siguientes:

- Se ha realizado un ajuste de la frecuencia a 50 Hz, como se puede observar en el apartado 5.1 de los planos.

- Dentro de los ajustes del circuito, se ha elegido la conversión serie/paralelo, como se observa en el apartado 5.3 de los planos y que es necesaria activar, ya que si no nos dará unos resultados imprecisos.

Además, con el objetivo de reducir el tiempo de simulación, se ha obligado a que el modo de trabajo del programa sea en paralelo aumentando los núcleos del ordenador a 8, como se observa en el apartado 5.4 de los planos.

Se han fijado las condiciones para las pérdidas en el núcleo, como se observa en el apartado 5.5 de los planos.

7. NORMAS Y REFERENCIAS

Para llevar a cabo este Trabajo de Fin de Grado, se han empleado diversos libros sobre máquinas eléctricas, centrándonos especialmente en los transformadores, además de distintas páginas web para ello. Esto ha sido fundamental para comprender su operación, realizar cálculos y obtener una comprensión básica de las constantes necesarias durante el desarrollo del transformador.

- [1] M. Whelan and Steve Rockwell, "History of Transformers." Accessed: Mar. 20, 2024. [Online]. Available: <https://edisontechcenter.org/Transformers.html>
- [2] Ricardo Berizzo, "La historia del transformador eléctrico | Editores," Revista Ingeniería Eléctrica. Accessed: Mar. 20, 2024. [Online]. Available: https://www.editores.com.ar/autor/ricardo_berizzo/20201006_la_historia_del_transformador_electrico
- [3] Endesa, "El transformador eléctrico." Accessed: Mar. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/corrientes-alternas-con-un-transformador-electrico>
- [4] M. DESHPANDE, *Design and testing of electrical machines*. 2010.
- [5] V.N. Mittle and Arvind Mittle, *Desig of electrical machines*, Fifth Edition. 2009.
- [6] R. AGARWAL, *Principles of electrical machine design*, Fifth Edition. 2014.
- [7] A. SHANMUGASUNDARAM, G. GANGADHARAN, and R. PALANI, *Electrical machine design data book*, Second Edition. 1989.
- [8] J-Mag, "JMAG, Manual de Usuario." 2017.

8. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

8.1 Desarrollo de la simulación

Con el diseño completo y los ajustes necesarios aplicados al transformador trifásico, es hora de dar paso a una etapa crucial en su desarrollo: la simulación. La simulación es un proceso fundamental que permite analizar y evaluar el comportamiento del transformador en diversas condiciones operativas, sin la necesidad de construir un prototipo físico. Esta fase no solo es esencial para validar el diseño y verificar su funcionamiento, sino que también proporciona una visión detallada de cómo el transformador responderá ante diferentes cargas y escenarios.

Durante la simulación, se utilizan herramientas y software especializados para modelar el comportamiento electromagnético, térmico y eléctrico del transformador. Estos modelos computacionales permiten realizar análisis detallados de factores como la distribución de flujo magnético, las pérdidas de energía, la temperatura de funcionamiento y la eficiencia global del sistema.

La simulación proporciona una plataforma virtual donde se pueden probar diferentes configuraciones y ajustes, identificar posibles áreas de mejora y optimizar el diseño del transformador antes de su fabricación y despliegue en el mundo real. Además, ofrece la flexibilidad de realizar modificaciones rápidas y realizar análisis comparativos para tomar decisiones informadas sobre el diseño final.

En este sentido, la simulación no solo acelera el proceso de desarrollo del transformador, sino que también reduce los costos asociados con la fabricación de prototipos físicos y pruebas experimentales. Al mismo tiempo, brinda una mayor comprensión del comportamiento del transformador bajo condiciones de operación variadas, lo que contribuye a su rendimiento óptimo y su fiabilidad a largo plazo.

8.2 Obtención de resultados

Una vez completada la simulación del transformador, el siguiente paso crucial es la obtención de los resultados de las pérdidas. Este apartado fundamental no solo ofrece una visión integral del desempeño del transformador, sino que también son cruciales para garantizar su eficiencia y fiabilidad a lo largo del tiempo.

Los resultados de las pérdidas se encuentran detalladamente en el apartado 8 correspondiente de los planos. Estos documentos proporcionan una representación clara y concisa de las pérdidas energéticas, permitiendo una evaluación minuciosa de la eficiencia del transformador en diversas condiciones de operación. Se presentan en forma de gráficos, incluyendo tipos de visualización como "contour plot" y "flux line", que facilitan su interpretación y análisis.

Los resultados de tipo "contour plot" consisten en un mapa de colores donde cada uno está asignado a un valor mostrado en la leyenda. Es importante mencionar algunos, como el sistema de referencia, el número de colores para una mayor precisión, los elementos geométricos donde se desea el resultado y el parámetro electromagnético a estudiar, como se puede ver en el panel de control, ubicado en el apartado 8.1 de los planos.

Mientras que los gráficos de tipo "flux line" están basados en mostrar el recorrido de los parámetros electromagnéticos que se representan en formas de líneas.

A continuación, voy a comentar los resultados del tipo "Contour plot". En el apartado 8.2 se muestra la magnetización del núcleo, con un valor máximo de $1.2363e+06$ A/m. A continuación, el apartado 8.3 de los planos muestra la densidad de flujo magnético, que también muestra la uniformidad entre las tres fases y un valor asumible con un máximo de 1.2810 T. De la misma manera, se pueden examinar la uniformidad de los puntos con menor

densidad de flujo magnético y la coherencia de su ubicación porque se encuentran en las esquinas, que son los puntos más alejados de las bobinas.

Los planos 8.4 y 8.5 muestran la densidad de las pérdidas de Joule y de histéresis, respectivamente. Se puede observar una distribución homogénea y uniforme entre las tres fases, como es de esperar debido a la ausencia de desequilibrios espaciales o temporales de fases, con valores máximos correspondientes 8344.1752 W/m^3 y de 20993.21 W/m^3 . Además, se puede observar que las pérdidas de Joule son menores que las pérdidas de histéresis.

La densidad de las pérdidas de hierro se puede ver en el plano 8.6. Su comportamiento es similar al de las otras pérdidas y se puede ver en valores numéricos como la suma de las pérdidas de histéresis y de Joule, cuyo valor máximo corresponde a 29243.3580 W/m^3 . Y para finalizar los resultados de tipo "contour plot", tenemos la distribución de las pérdidas de Joule en los devanados, como se puede observar en el apartado 8.7 de los planos, en los cuales tendremos tanto un valor máximo de 74367.9371 W/m^3 y de valor mínimo 8201.8094 W/m^3 .

Por lo tanto, es al examinar estos resultados gráficos que podemos afirmar con confianza que todos los parámetros del transformador se sitúan dentro del rango establecido como resultados válidos. Esta validación es esencial para garantizar que el transformador cumpla con los estándares de rendimiento requeridos, proporcionando una base sólida para su implementación y uso continuo en sistemas eléctricos críticos.

Por último, se han obtenido los resultados numéricos en forma de tablas que muestran varios parámetros en función del elemento geométrico y de la naturaleza del resultado. Los parámetros incluyen valores de pico, valor instantáneo y valor medio. Para comprender correctamente estos resultados, es importante recordar que las fases son U, V y W, y que el lado de alta tensión, o primario, se representa con un 1, mientras que el lado de baja tensión, o secundario, se representa con un 2. Estos resultados se encuentran en el apartado 8 de los planos del 8.10 al 8.13. El apartado 8.10 se corresponde con los valores numéricos de las pérdidas de Joule en cada elemento.

En el plano 8.12 cabe señalar que las resistencias no cuentan con potencia reactiva, solo con parte activa ya que son elementos con reactancia nula, además es importante destacar que

los valores negativos de las potencias tienen que ver con el sentido de la corriente que ha sido estipulado por la condición de FEM Coil que define un sentido como el positivo.

Mientras que los apartados 8.11 y 8.13 representan respectivamente los valores de las corrientes en cada elemento y los flujos en las bobinas.

9. CONCLUSIONES

En conclusión, el presente trabajo de investigación ha abordado de manera exhaustiva el diseño, desarrollo y análisis de un transformador trifásico utilizando el software de simulación JMAG Designer. A lo largo del proceso, se ha realizado un estudio detallado de los parámetros y especificaciones necesarios para el diseño óptimo del transformador, considerando aspectos como la potencia, la tensión y la frecuencia.

Los resultados obtenidos han demostrado ser satisfactorios, al cumplir con éxito los criterios establecidos dentro del margen predeterminado. Esta congruencia entre los cálculos teóricos y los resultados prácticos confirma la precisión del proceso de diseño llevado a cabo, validando su eficacia y fiabilidad en la práctica.

Es importante señalar que, a pesar de la precisión alcanzada, el estudio reconoce la existencia de factores adicionales que podrían haberse tenido en cuenta para mejorar la realismo y la exactitud del diseño del transformador. Estos factores omitidos, como consideraciones térmicas, dieléctricas o mecánicas más detalladas, podrían haber proporcionado una visión más completa y refinada del comportamiento del transformador en condiciones reales de operación. Sin embargo, su inclusión habría implicado un costo computacional adicional y una mayor complejidad en el análisis.

En definitiva, este trabajo no solo ha contribuido al desarrollo de un transformador trifásico eficiente y confiable, sino que también ha identificado áreas de mejora y posibles líneas de investigación futuras. La combinación de precisión en los resultados y la identificación de oportunidades para una mayor precisión y realismo establece una base sólida para futuros avances en el campo del diseño de transformadores mediante simulación computacional.

ANEXOS

ÍNDICE DE LOS ANEXOS

1.1	Cálculo del núcleo	55
1.1.1	Voltios por vuelta en el núcleo	55
1.1.3	Cálculo de la sección del núcleo.....	55
1.1.4	Cálculo del lado del núcleo	55
1.1.5	Calculo Área de la ventana	55
1.1.6	Cálculo de la altura ventana	55
1.2	Cálculos para el conductor de alta tension.....	55
1.2.1	Calculo para el numero de vueltas del bobinado de alta tension	55
1.2.2	Corriente por fase del bobinado de alta tension.....	55
1.2.3	Área del conductor de alta tension.....	55
1.2.4	Cálculo diámetro conductor de alta tension	56
1.2.5	Corrección del área del conductor de alta tension.....	56
1.3	Cálculos para el conductor de baja tension	56
1.3.1	Calculo para el numero de vueltas del bobinado de baja tension.....	56
1.3.2	Corriente por fase del bobinado de baja tension.....	56
1.3.3	Área del conductor de baja tension	56
1.3.4	Cálculo diámetro conductor baja tension	56
1.4	Cálculos para el bobinado de alta tension	57
1.4.1	Cálculo de las vueltas por capa	57
1.4.2	Cálculo de la altura de la bobina de alta tension	57
1.4.3	Cálculo del lado interior del bobinado de alta tensión	57
1.4.4	Cálculo de la anchura del bobinado de alta tensión.....	57
1.4.5	Cálculo del lado exterior del bobinado de alta tensión.....	57
1.4.6	Cálculo del lado medio del bobinado de alta tensión	57
1.4.7	Cálculo de la resistencia del bobinado de alta tensión	57
1.4.8	Cálculo de la reactancia del bobinado de alta tensión	57
1.4.9	Cálculo de la inductancia del bobinado de alta tensión	57
1.5	Cálculos para el bobinado de baja tension	58
1.5.1	Cálculo de las vueltas por capa	58
1.5.2	Cálculo de la altura de la bobina de baja tension.....	58
1.5.3	Cálculo del lado interior del bobinado de baja tensión.....	58
1.5.4	Cálculo de la anchura del bobinado de baja tensión.....	58
1.5.5	Cálculo del lado exterior del bobinado de baja tensión	58
1.5.6	Cálculo del lado medio del bobinado de baja tensión.....	58

1.5.7	Cálculo de la resistencia del bobinado de baja tensión.....	58
1.5.8	Cálculo de la reactancia del bobinado de baja tensión	58
1.5.9	Cálculo de la inductancia del bobinado de baja tensión	58
1.6	Cálculo de la resistencia de carga	58
1.7	Cálculo de la relación de transformación del transformador	59

1. Cálculos

1.1 Cálculo del núcleo

1.1.1 Voltios por vuelta en el núcleo

$$E_t = \sqrt{S/n^{\circ} \text{ fases}} = 4.6$$

1.1.3 Cálculo de la sección del núcleo

$$E_t = 4.44 \times B_m \times f \times A_i$$

$$E_t = \frac{4.6}{4.44 \times 50 \times 1.4389389} = 14400 \text{ mm}^2$$

1.1.4 Cálculo del lado del núcleo

$$A_i = k \times l^2 \rightarrow l = 120 \text{ mm}$$

1.1.5 Cálculo Área de la ventana

$$\begin{aligned} Q &= 3.33 \times f \times B_m \times \delta \times K_w \times A_i \times A_w \rightarrow A_w \\ &= \frac{100 \times 10^3}{3.33 \times 50 \times 1.4389389 \times 0.209136 \times 2.25 \times 14400 \times 10^{-6}} \\ &= 61600 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

1.1.6 Cálculo de la altura ventana

$$h_w = \frac{A_w}{\text{ancho ventana}} = \frac{61600}{140} = 440 \text{ mm}$$

1.2 Cálculos para el conductor de alta tensión

1.2.1 Cálculo para el número de vueltas del bobinado de alta tensión

$$N^{\circ} \text{vueltas AT} = \frac{V(AT)}{E_t} = \frac{10000}{4.6} = 2173.92 \approx 2174 \text{ vueltas}$$

1.2.2 Corriente por fase del bobinado de alta tensión

$$S = 3 \times V_F \times I_F \rightarrow I_F = \frac{100 \times 10^3}{3 \times 10000} = 3.333 \text{ A}$$

1.2.3 Área del conductor de alta tensión

$$A_{AT} = \frac{I_F}{\delta} = \frac{3.3333 \text{ A}}{2.25 \text{ A/m}^2} = 1.481 \text{ mm}^2$$

1.2.4 Cálculo diámetro conductor de alta tension

$$A_{AT} = \frac{\pi \times d^2}{4} \rightarrow d = 1.37 \text{ mm} \approx 1.5 \text{ mm}$$

1.2.5 Corrección del área del conductor de alta tension

$$A_{AT} = \frac{\pi \times d^2}{4} = 1.7671 \text{ mm}^2$$

1.3 Cálculos para el conductor de baja tension**1.3.1 Calculo para el numero de vueltas del bobinado de baja tension**

$$N^{\circ}vueltas \text{ BT} = \frac{V (BT)}{E_t} = \frac{6000}{4.6} = 130.43 \approx 131 \text{ vueltas}$$

1.3.2 Corriente por fase del bobinado de baja tension

$$S = 3 \times V_F \times I_F \rightarrow I_F = \frac{100 \times 10^3}{3 \times 600} = 55.5555 \text{ A}$$

1.3.3 Área del conductor de baja tension

$$A_{BT} = \frac{I_F}{\delta} = \frac{55.5555 \text{ A}}{2.25 \text{ A/m}^2} = 24.69 \text{ mm}^2$$

1.3.4 Cálculo diámetro conductor baja tension

$$A_{BT} = \frac{\pi \times d^2}{4} \rightarrow d = 5.6 \text{ mm}$$

1.4 Cálculos para el bobinado de alta tensión

1.4.1 Cálculo de las vueltas por capa

$$\text{Vueltas por capa} = \frac{n^{\circ} \text{ vueltas AT}}{3} = 198 \text{ vueltas}$$

1.4.2 Cálculo de la altura de la bobina de alta tensión

$$h_{AT} = \text{vueltas por capa} \times d_{AT} = 198 \times 1.5 = 297 \text{ mm}$$

1.4.3 Cálculo del lado interior del bobinado de alta tensión

$$l_{int} = 0.5 \times l = 60 \text{ mm}$$

1.4.4 Cálculo de la anchura del bobinado de alta tensión

$$\text{anchura} = d_{AT} \times \text{capas} = 1.5 \times 11 = 16.5 \text{ mm}$$

1.4.5 Cálculo del lado exterior del bobinado de alta tensión

$$l_{ext} = l_{int} + \text{anchura} = 76.5 \text{ mm}$$

1.4.6 Cálculo del lado medio del bobinado de alta tensión

$$l_{medio} = \frac{l_{int} + l_{ext}}{2} = 68.25 \text{ mm}$$

1.4.7 Cálculo de la resistencia del bobinado de alta tensión

$$R_{AT} = \frac{\rho \times l_{medio} \times N_{AT}}{a_{AT}} = \frac{0.02097 \times 68.25 \times 2174}{1.7671 \times 10^{-3}} = 17.6075 \Omega$$

1.4.8 Cálculo de la reactancia del bobinado de alta tensión

$$X_{AT} = 5 \times R = 88.0375 \Omega$$

1.4.9 Cálculo de la inductancia del bobinado de alta tensión

$$L_{AT} = \frac{X_{AT}}{\omega} = 280.23 \times 10^{-3} \text{ H}$$

1.5 Cálculos para el bobinado de baja tension

1.5.1 Cálculo de las vueltas por capa

$$Vueltas\ por\ capa = \frac{n^{\circ}\ vueltas\ BT}{3} = 44\ vueltas$$

1.5.2 Cálculo de la altura de la bobina de baja tension

$$h_{BT} = vueltas\ por\ capa \times d_{BT} = 44 \times 5.6 = 246.4\ mm$$

1.5.3 Cálculo del lado interior del bobinado de baja tensión

$$l_{int} = 0.5 \times l = 76.5\ mm$$

1.5.4 Cálculo de la anchura del bobinado de baja tensión

$$anchura = d_{BT} \times capas = 5.6 \times 3 = 16.8\ mm$$

1.5.5 Cálculo del lado exterior del bobinado de baja tensión

$$l_{ext} = l_{int} + anchura = 92.8\ mm$$

1.5.6 Cálculo del lado medio del bobinado de baja tensión

$$l_{medio} = \frac{l_{int} + l_{ext}}{2} = 84.65\ mm$$

1.5.7 Cálculo de la resistencia del bobinado de baja tensión

$$R_{BT} = \frac{\rho \times l_{medio} \times N_{BT}}{a_{BT}} = \frac{0.02097 \times 84.65 \times 131}{24.69 \times 10^{-3}} = 0.009418\ \Omega$$

1.5.8 Cálculo de la reactancia del bobinado de baja tensión

$$X_{BT} = 5 \times R = 0.047091\ \Omega$$

1.5.9 Cálculo de la inductancia del bobinado de baja tensión

$$L_{BT} = \frac{X_{BT}}{\omega} = 149.89 \times 10^{-6}\ H$$

1.6 Cálculo de la resistencia de carga

$$R_{carga} = \frac{V_{BT}^2}{S} = \frac{600^2}{100 \times 10^3} = 3.6\ \Omega$$

1.7 Cálculo de la relación de transformación del transformador

$$m = \frac{V_{AT}}{V_{BT}} = \frac{N_{AT}}{N_{BT}} = \frac{I_{BT}}{I_{AT}} = 16.6666$$

PLANOS

ÍNDICE DE LOS PLANOS

1. Diseño Geométrico	65
1.1 Alzado Núcleo 2D	65
1.2 Perfil Núcleo 2D.....	65
1.3 Ventanas 2D	66
1.4 Bobinado AT	67
1.4.1 Alzado bobinado AT.....	67
1.4.2 Planta bobinado AT.....	67
1.5 Bobinado BT	68
1.5.1 Alzado bobinado BT	68
1.5.2 Planta bobinado BT.....	68
1.6 Vista en Isométrica del transformador	69
1.7 Vista en Alzado del transformador	69
1.8 Vista en Planta del transformador.....	69
2 Condiciones del transformador	70
2.1 Biblioteca Condiciones	70
2.2 Symmetry Boundary.....	71
2.3 Iron loss Calculation	71
2.4 FEM Coil.....	72
3. Materiales Transformador	73
3.1 Biblioteca de materiales	73
3.2 Acero 50JN270.....	73
3.3 Perdidas acero 50JN270 a 50 Hz	74
3.4 Cobre.....	75
4 Diseño Circuito Eléctrico	76
4.1 Vista general del Circuito Eléctrico	76
4.2 Vista general del Circuito Eléctrico con valores en un instante dado.....	76
4.4 FEM Coil AT	77
4.5 FEM Coil BT.....	78
5. Ajustes de Computacion	79
5.1 Frequency Control	79
5.2 Full model Conversion	79
5.3 Circuit settings.....	80
5.4 Parallel computing setting.....	80
5.5 Iron loss Conditions	81
5.6 Linear Solver.....	81

5.7	Nonlinear Calculation	82
6.	Mallado del transformador	83
6.1	Vista en Isométrica del mallado	83
6.2	Calidad del mallado	83
7.	Simulación.....	84
8.	Resultados.....	85
8.1	Panel de control de “Contour Plot”	85
8.2	Gráfico tipo “contour plot” de la magnetización del núcleo	86
8.3	Gráfico tipo “contour plot” de la densidad del flujo magnetico	87
8.4	Gráfico tipo “contour plot” de las pérdidas de Joule	88
8.5	Gráfico tipo “contour plot” de las pérdidas de histéresis	89
8.6	Gráfico tipo “contour plot” de las pérdidas en el núcleo	90
8.7	Gráfico “Contour Plot” de las pérdidas de Joule en las bobinas	91
8.8	Gráfico “Flux line” de la distribución de flujo magnético	92
8.9	Gráfico “Flux line” de la magnetización del núcleo.....	92
8.10	Resultados de las pérdidas de Joule en cada elemento	93
8.11	Resultados de la corriente en cada elemento	93
8.12	Potencia eléctrica en cada elemento	94
8.13	Resultado de los flujos en las bobinas	95

1. Diseño Geométrico

1.1 Alzado Núcleo 2D

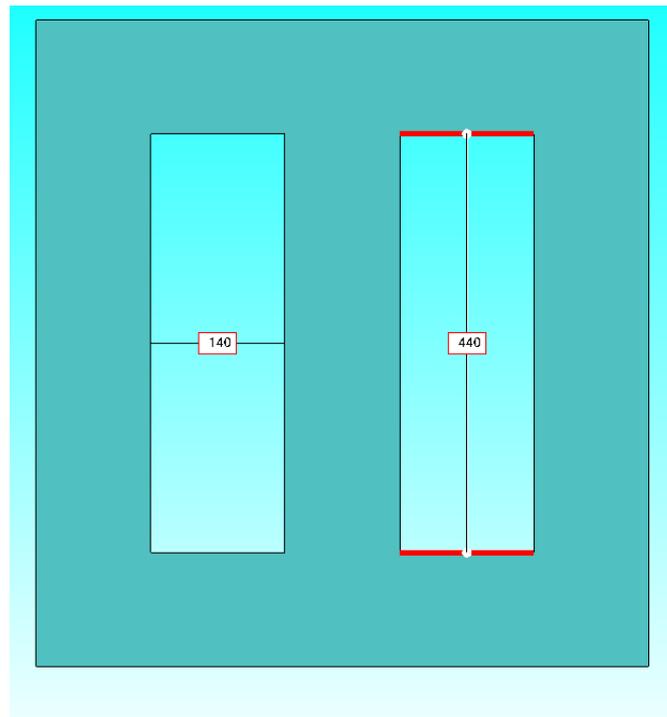


Figura 18. Alzado núcleo 2D

1.2 Perfil Núcleo 2D

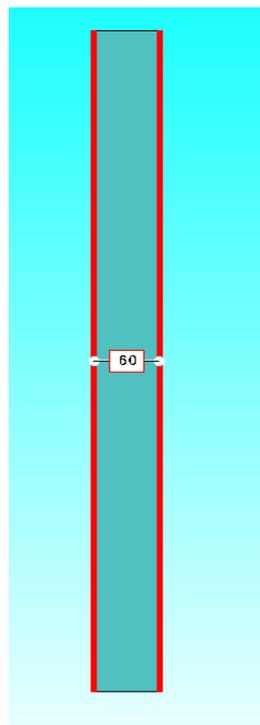


Figura 19. Perfil núcleo 2D

1.3 Ventanas 2D

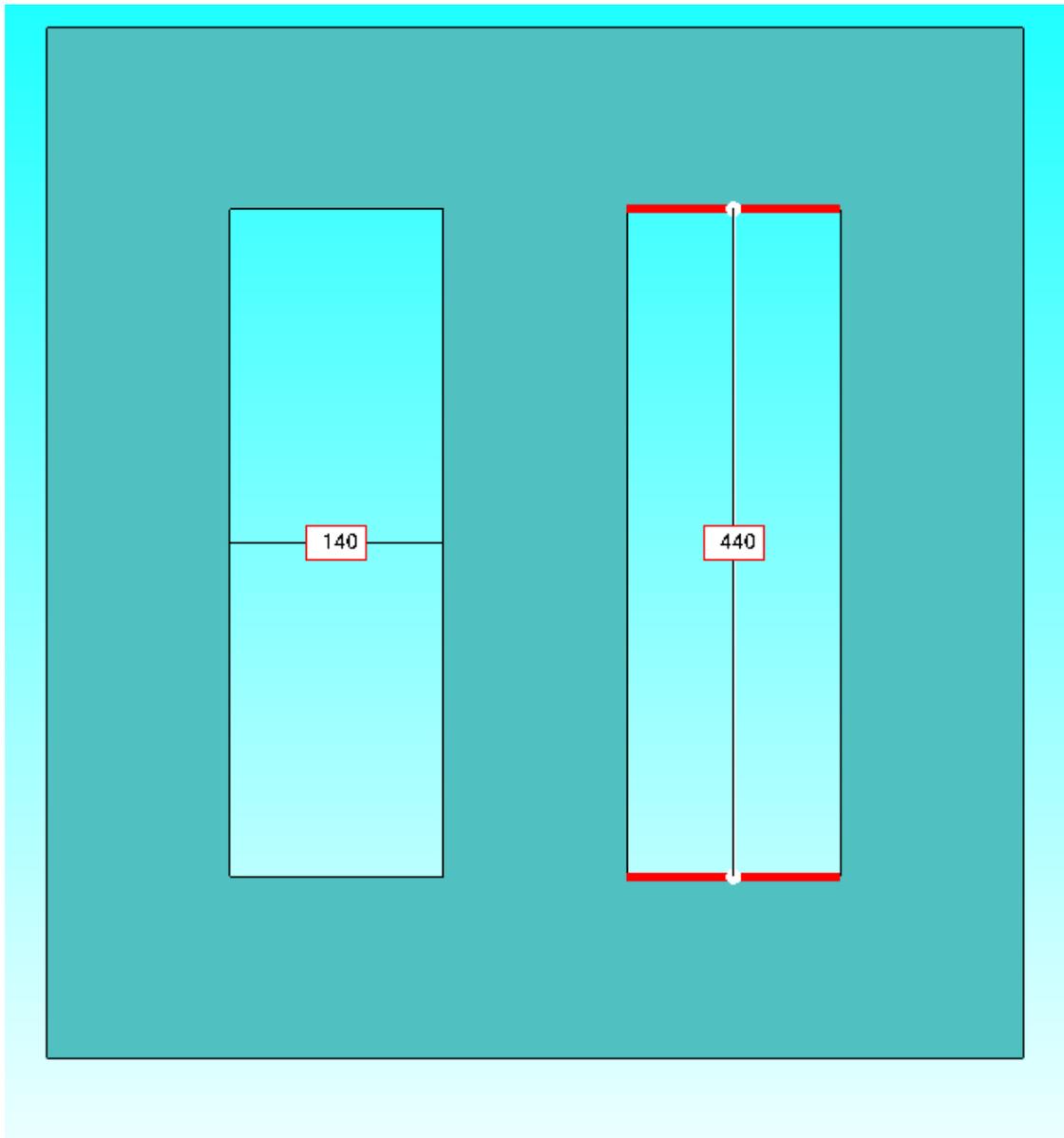


Figura 20. Ventanas 2D

1.4 Bobinado AT

1.4.1 Alzado bobinado AT

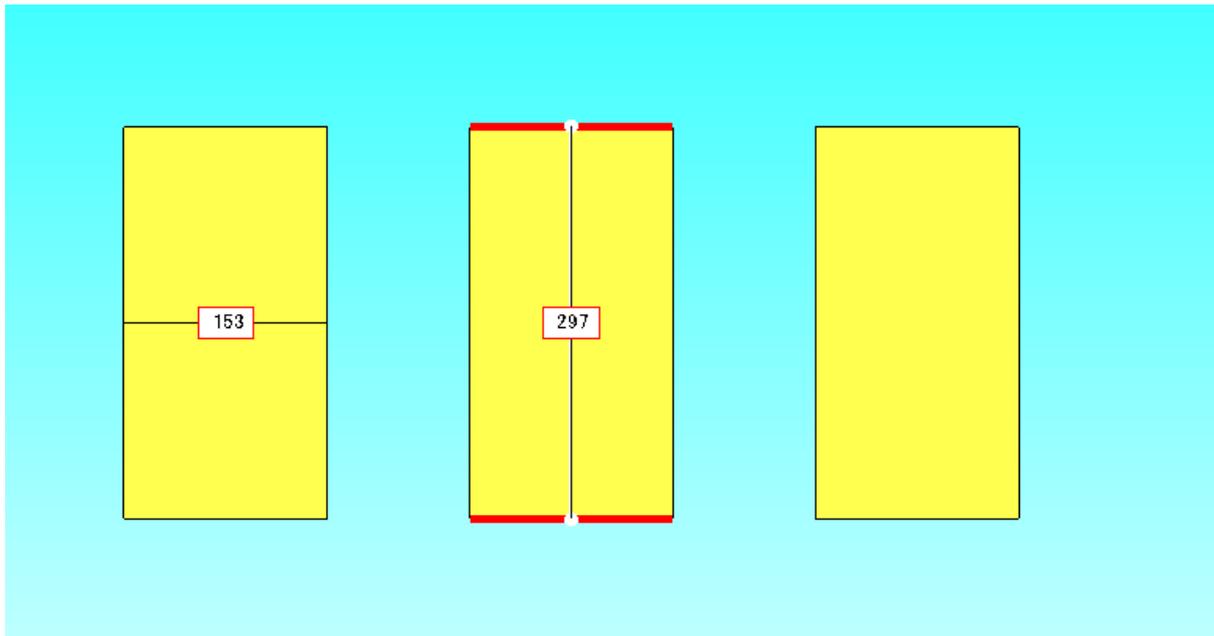


Figura 21. Alzado bobinado AT

1.4.2 Planta bobinado AT

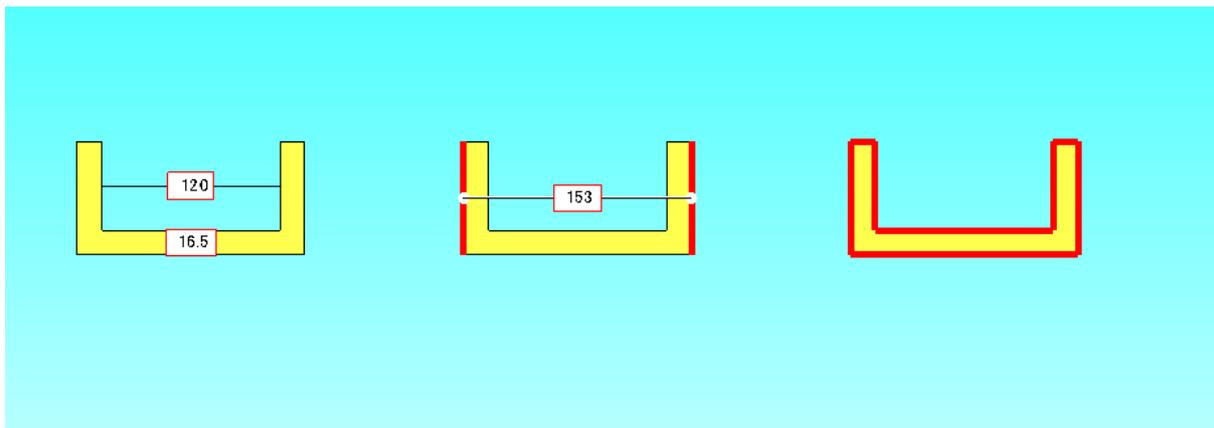


Figura 22. Planta bobinado AT

1.5 Bobinado BT

1.5.1 Alzado bobinado BT

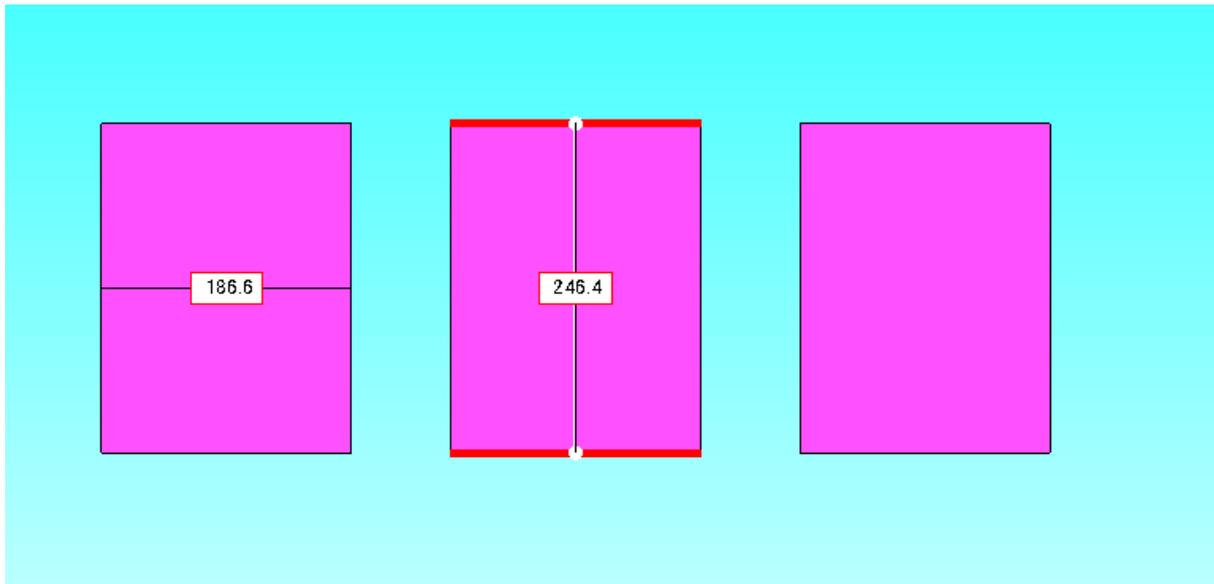


Figura 23. Alzado bobinado BT

1.5.2 Planta bobinado BT

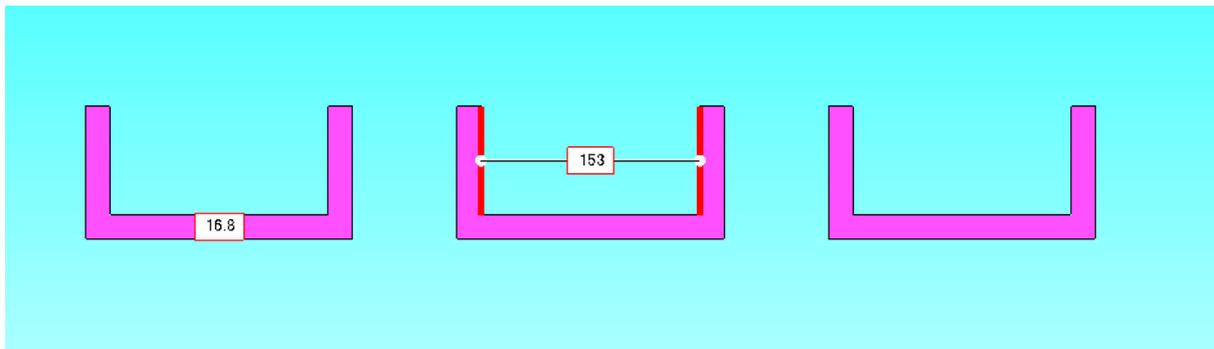


Figura 24. Planta bobinado BT

1.6 Vista en Isométrica del transformador

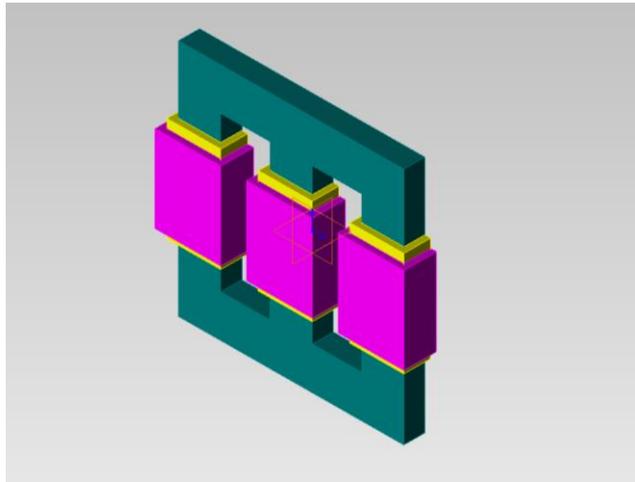


Figura 25. Vista Isométrica del transformador

1.7 Vista en Alzado del transformador

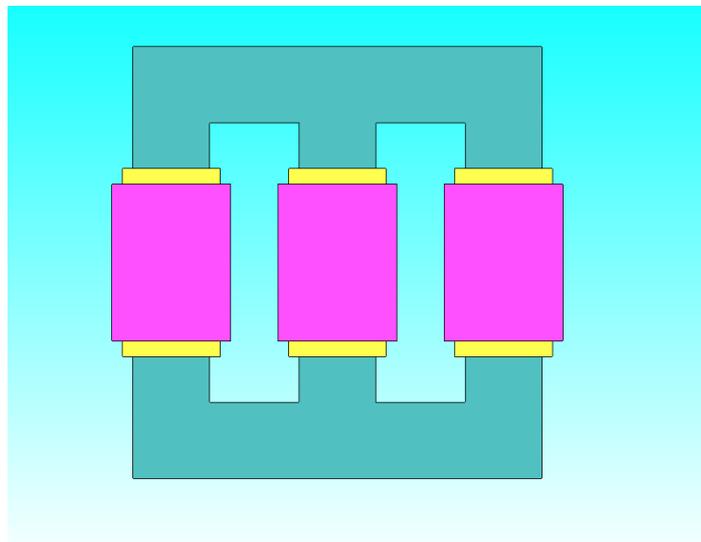


Figura 26. Vista en alzado del transformador

1.8 Vista en Planta del transformador

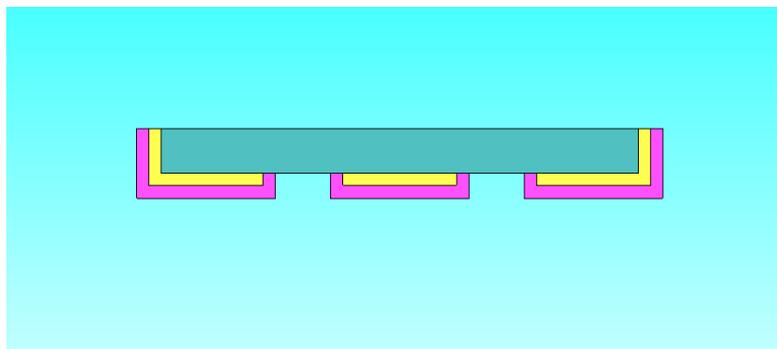


Figura 27. Vista en planta del transformador

2 Condiciones del transformador

2.1 Biblioteca Condiciones

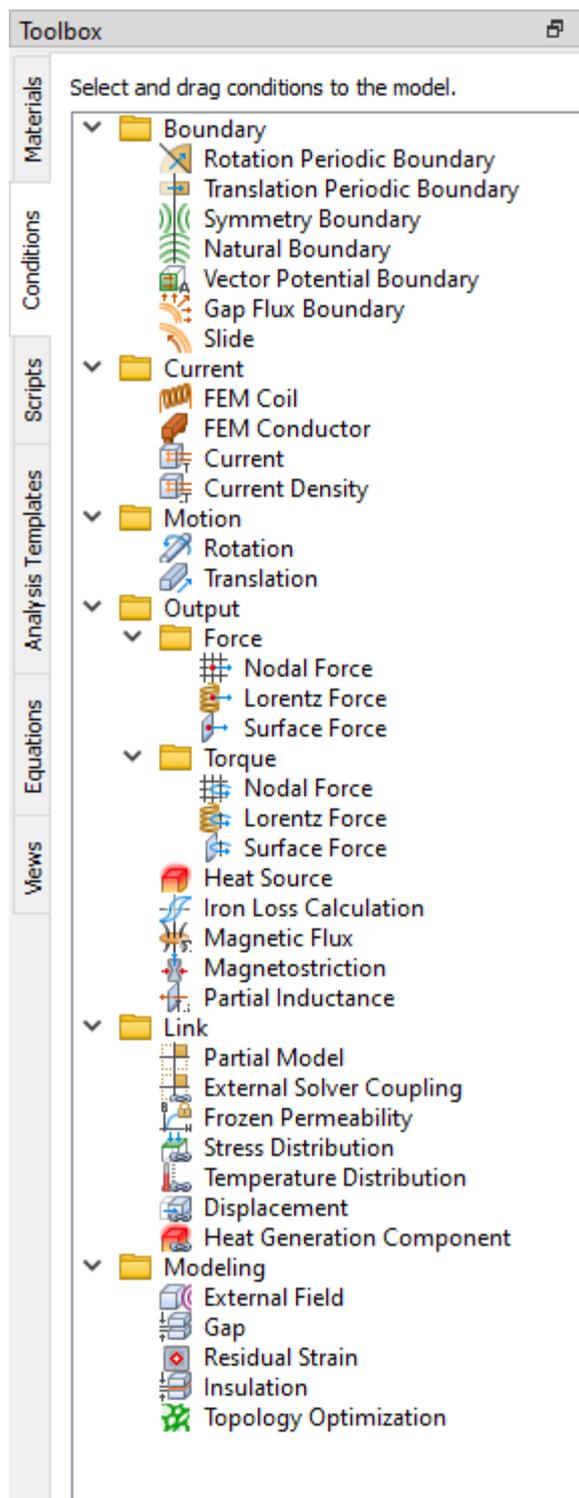


Figura 28. Biblioteca Condiciones

2.2 Symmetry Boundary

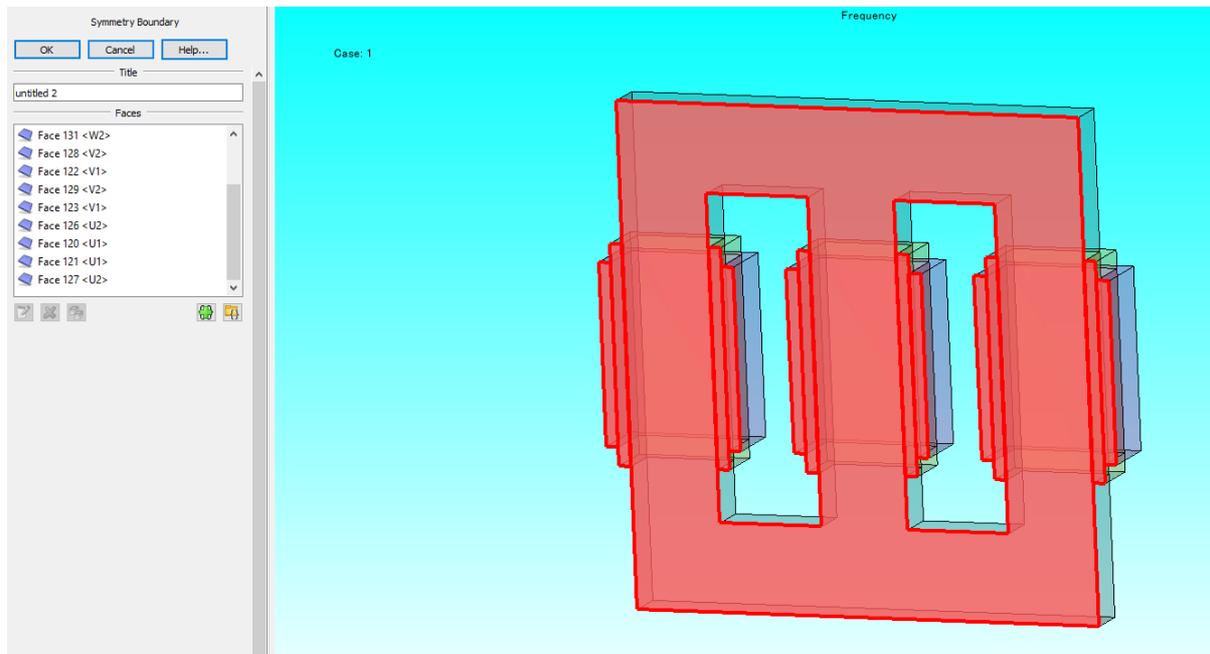


Figura 29. Symmetry Boundary

2.3 Iron loss Calculation

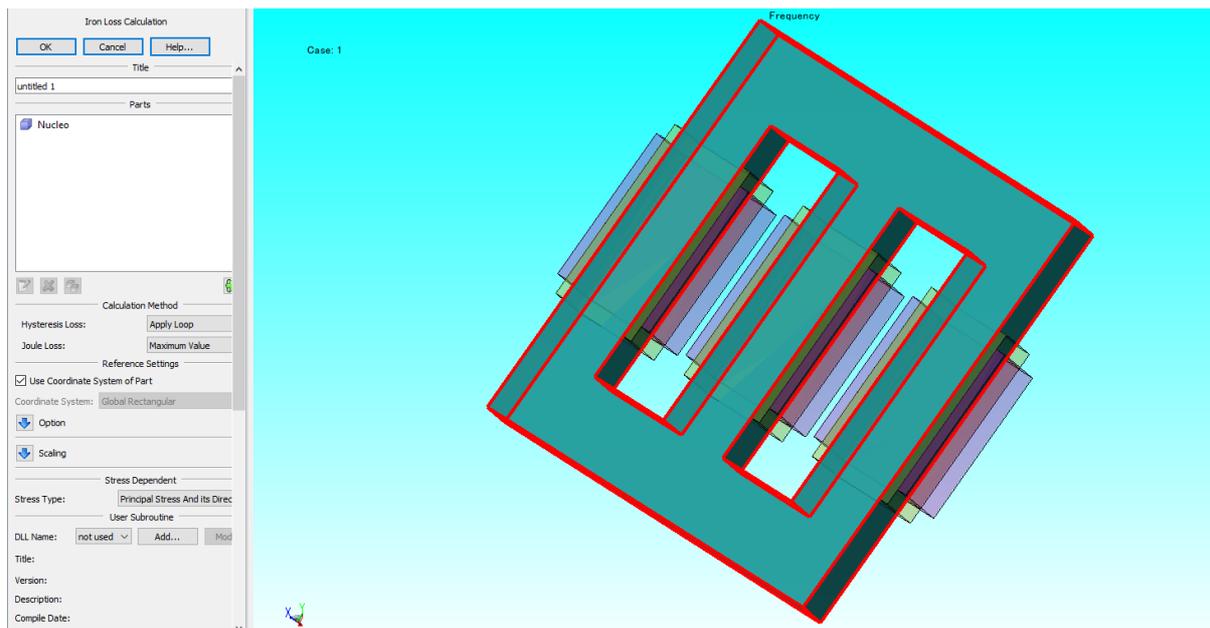


Figura 30. Iron los Calculation

2.4 FEM Coil

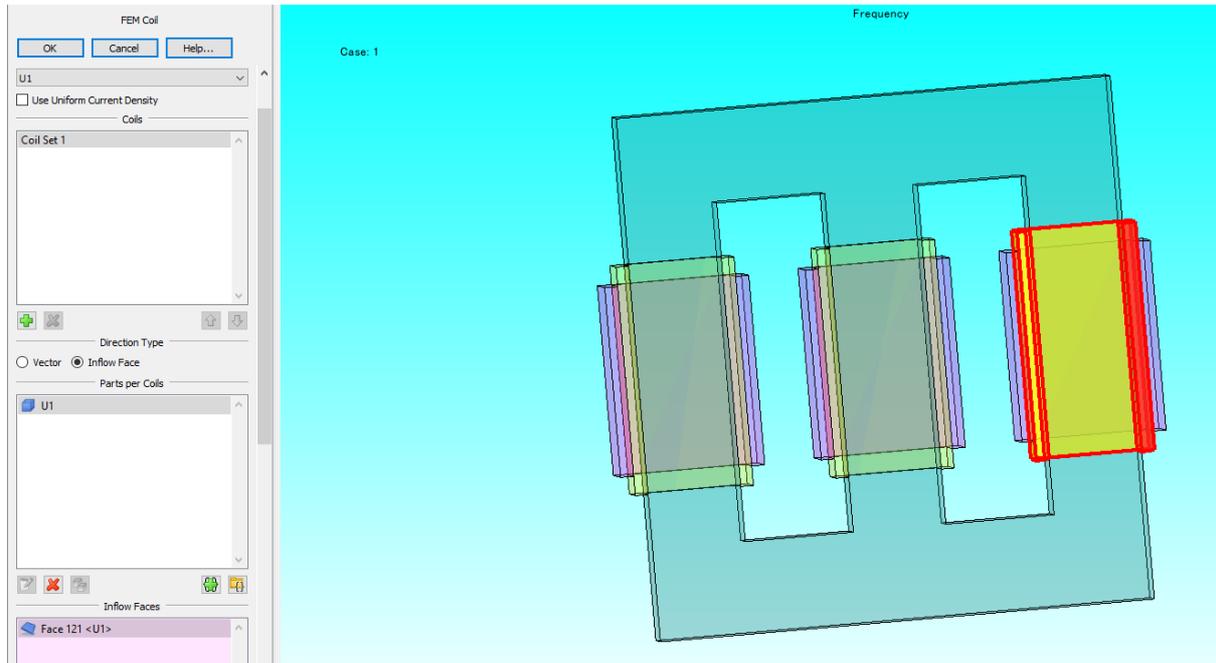


Figura 31. FEM Coil

3. Materiales Transformador

3.1 Biblioteca de materiales

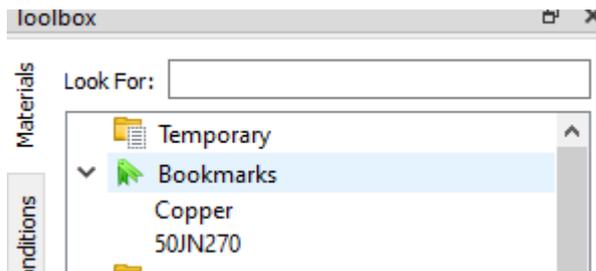


Figura 32. Biblioteca materiales

3.2 Acero 50JN270

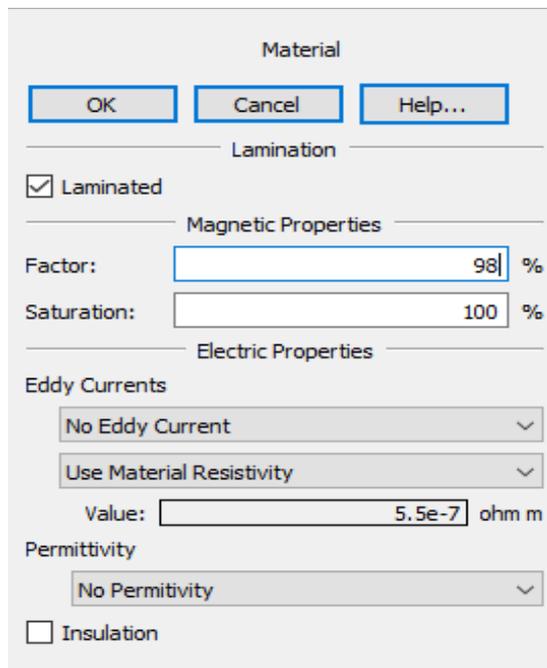


Figura 33. Características acero

3.3 Perdidas acero 50JN270 a 50 Hz

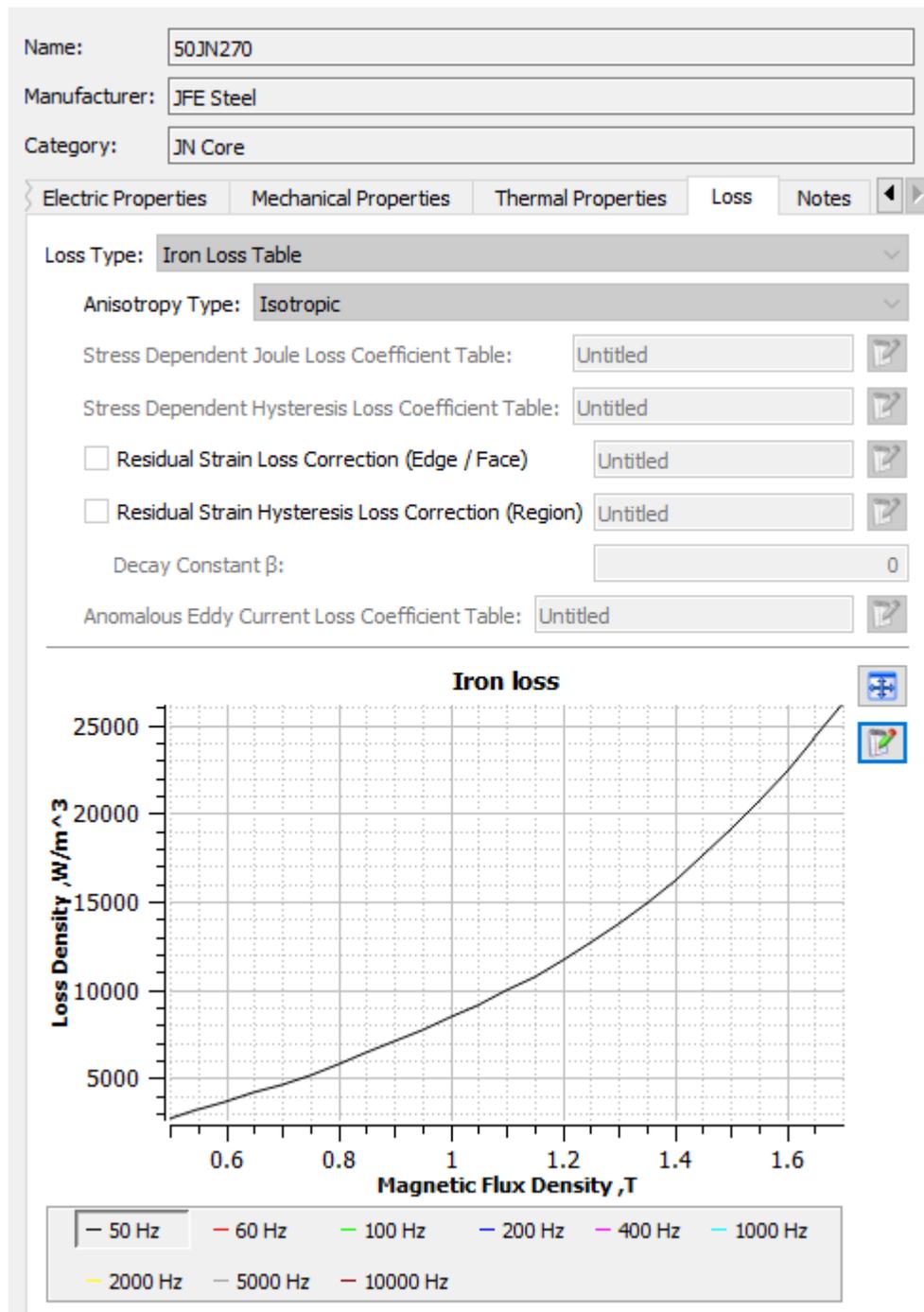


Figura 34. Perdidas acero a 50 Hz.

3.4 Cobre

The image shows a 'Material' dialog box with the following settings:

- Lamination:** Laminated
- Electric Properties:**
 - Eddy Currents:**
 - Dropdown: No Eddy Current
 - Dropdown: Use Material Resistivity
 - Value: ohm m
 - Permittivity:** Dropdown: No Permittivity
- Insulation:** Insulation

Figura 35. Características Cobre

4 Diseño Circuito Eléctrico

4.1 Vista general del Circuito Eléctrico

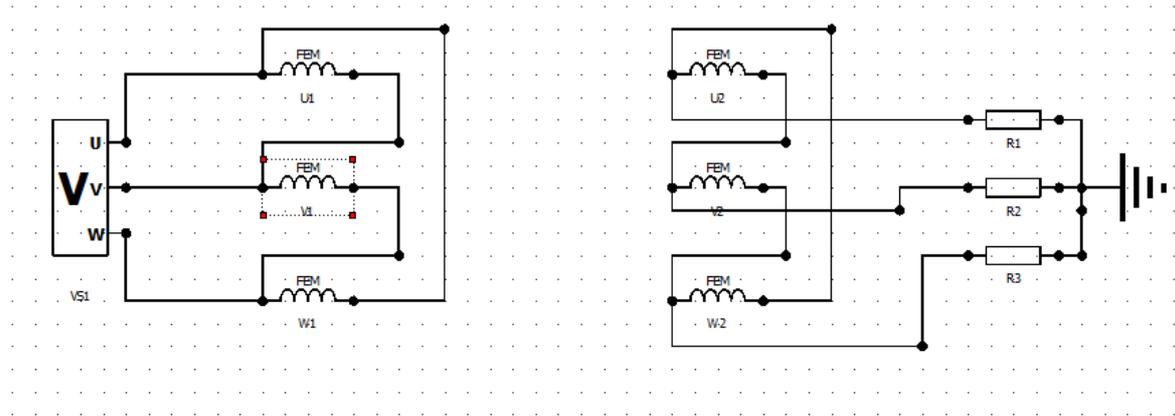


Figura 36. Circuito Eléctrico

4.2 Vista general del Circuito Eléctrico con valores en un instante dado

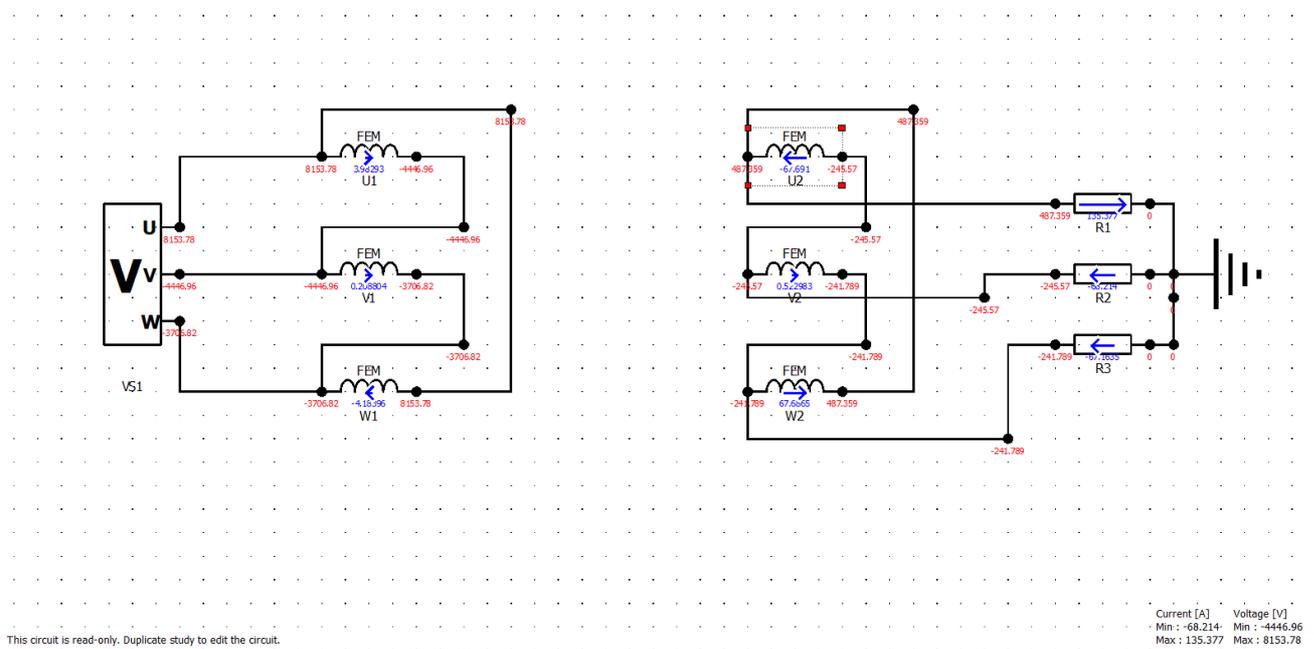


Figura 37. Circuito Eléctrico para instante dado

4.3 Fuente de tension

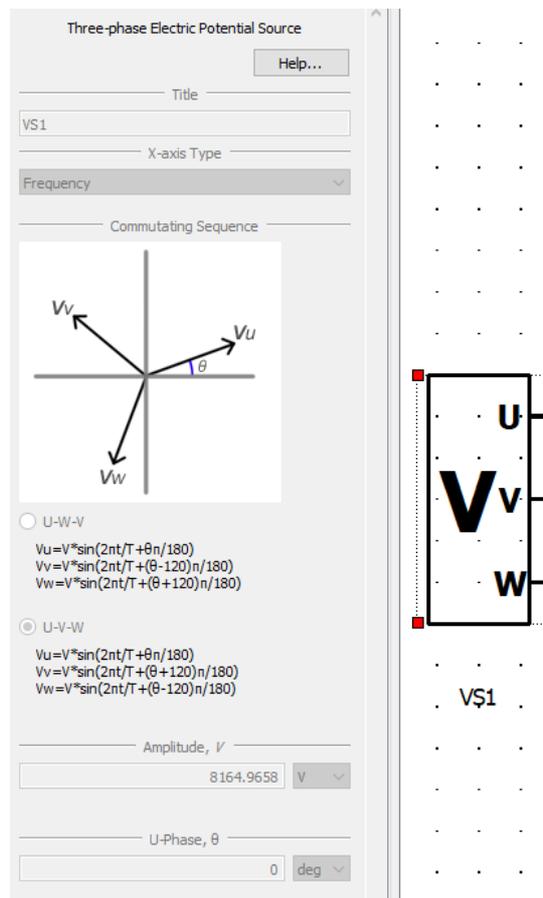


Figura 38. Fuente de tension

4.4 FEM Coil AT

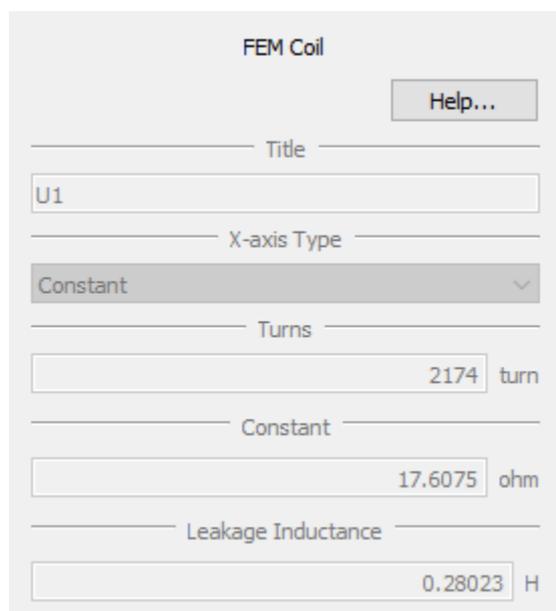
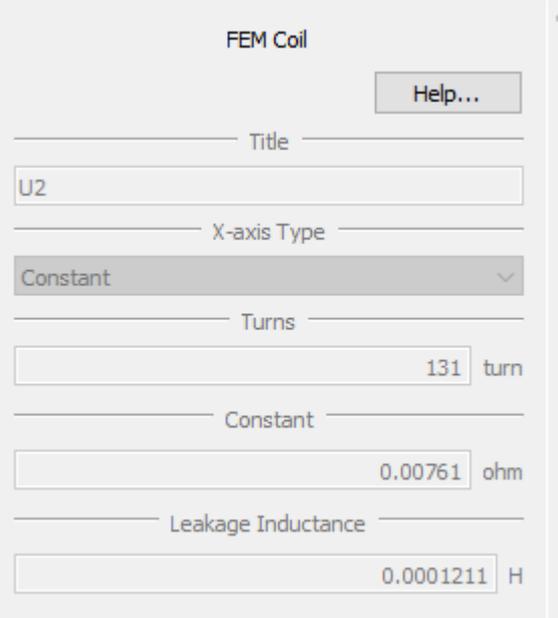


Figura 39. FEM coil AT.

4.5 FEM Coil BT



The image shows a software dialog box titled "FEM Coil". It contains several input fields and a dropdown menu. The fields are: "Title" with the value "U2", "X-axis Type" with a dropdown menu set to "Constant", "Turns" with the value "131" and the unit "turn", "Constant" with the value "0.00761" and the unit "ohm", and "Leakage Inductance" with the value "0.0001211" and the unit "H". There is a "Help..." button in the top right corner.

Parameter	Value	Unit
Title	U2	
X-axis Type	Constant	
Turns	131	turn
Constant	0.00761	ohm
Leakage Inductance	0.0001211	H

Figura 40. FEM coil BT

5. Ajustes de Computacion

5.1 Frequency Control

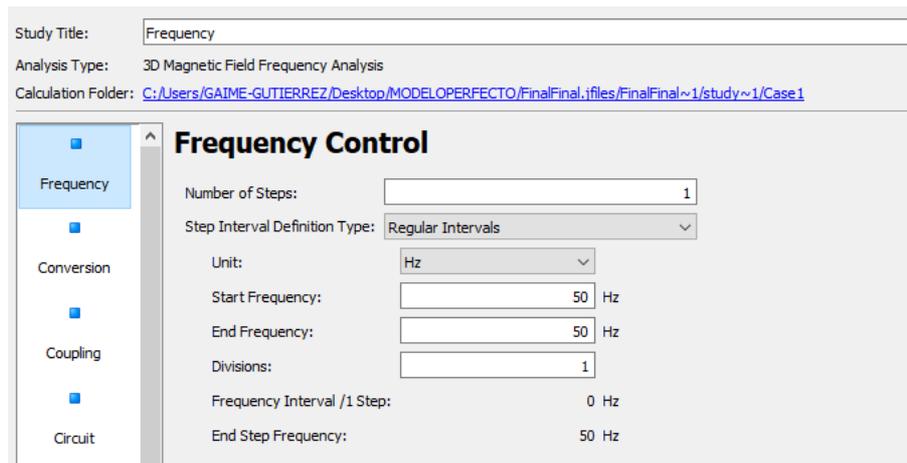


Figura 41. Frequency Control

5.2 Full model Conversion

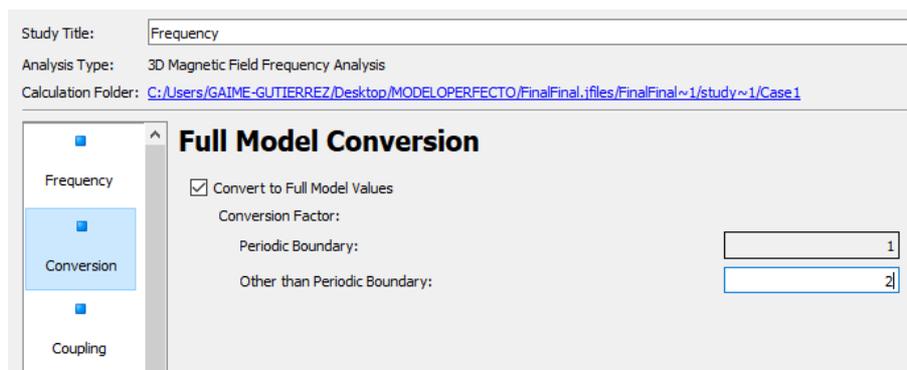


Figura 42. Full Model Conversion

5.3 Circuit settings

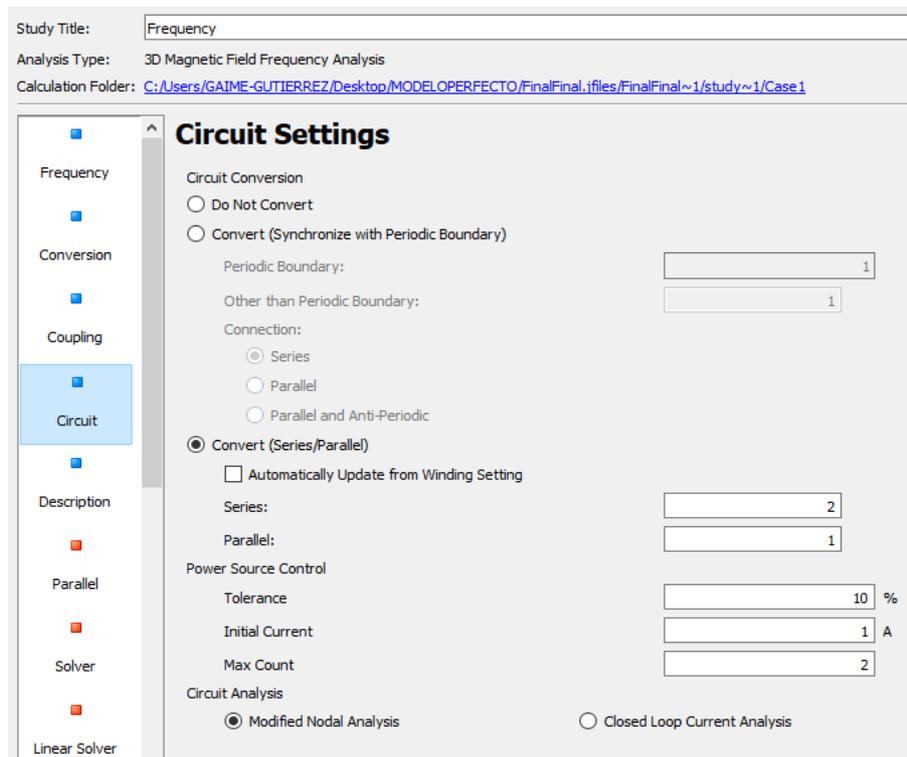


Figura 43. Circuit Settings

5.4 Parallel computing setting

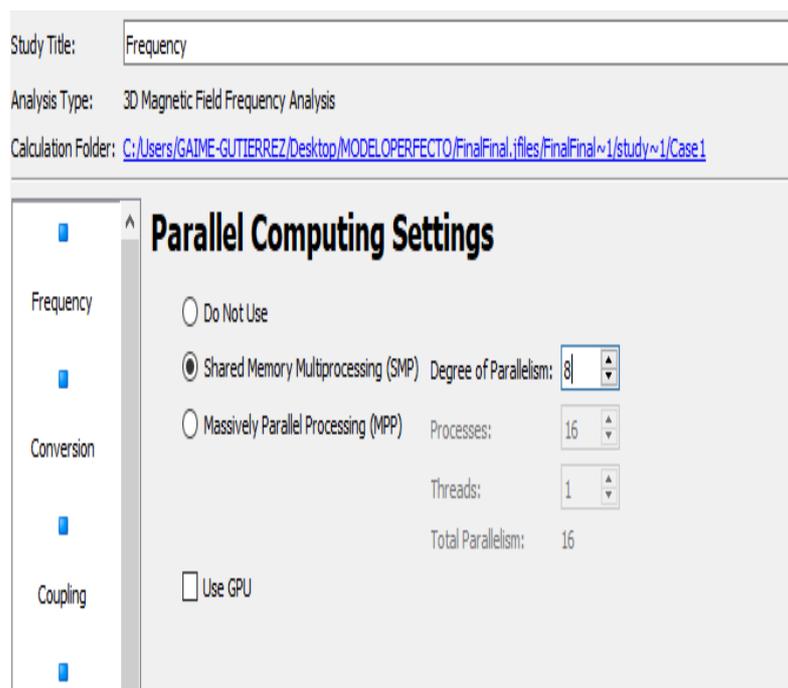


Figura 44. Parallel Computing Settings

5.5 Iron loss Conditions

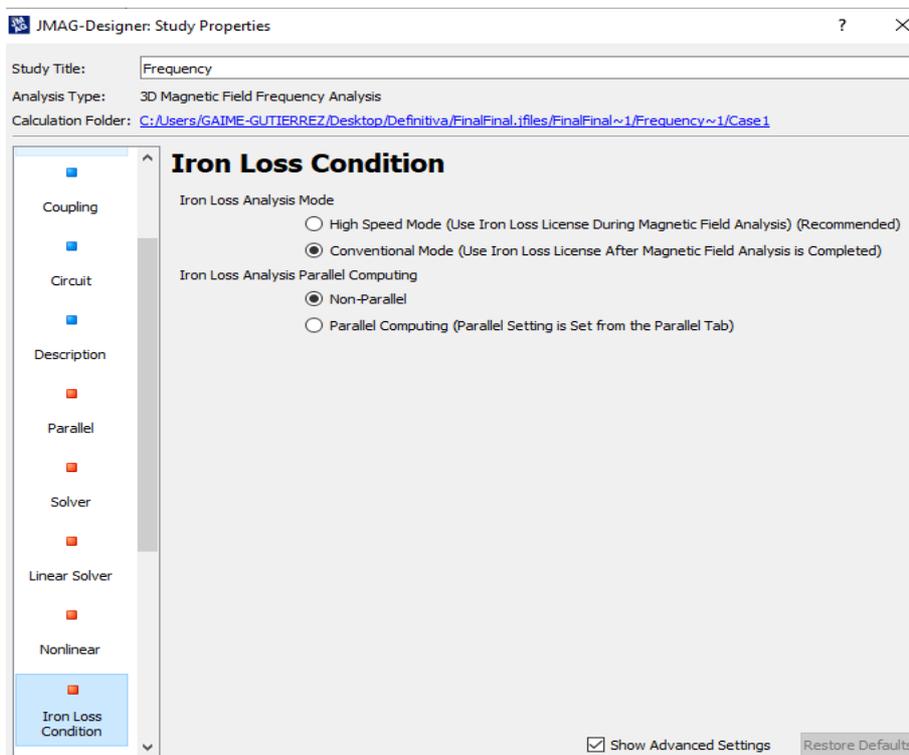


Figura 45. Iron Loss Condition

5.6 Linear Solver

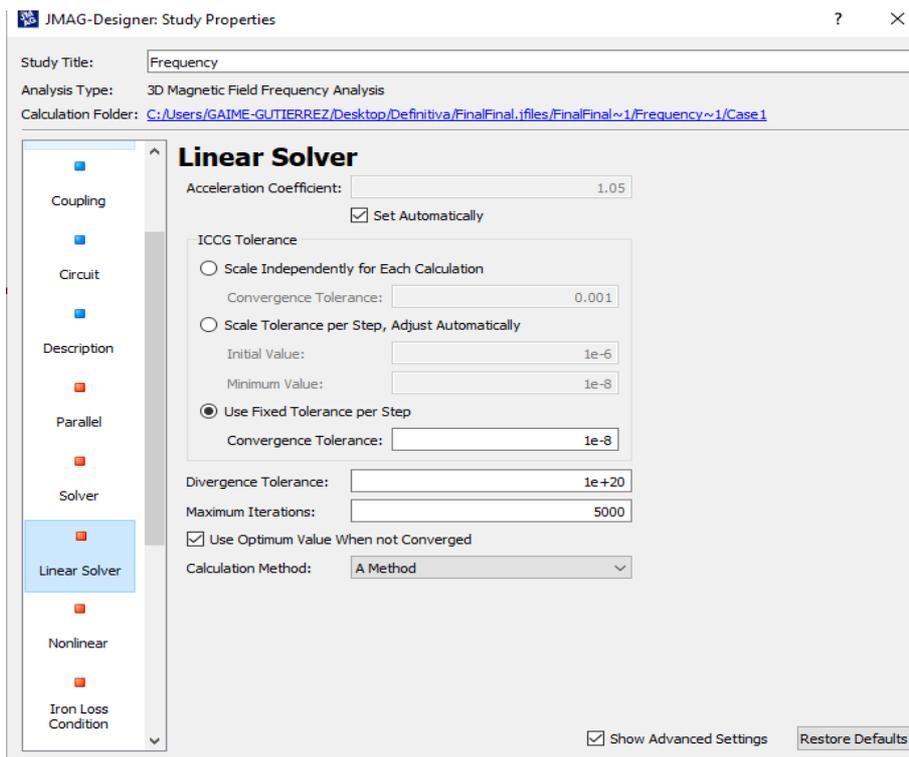


Figura 46. Linear Calculation

5.7 Nonlinear Calculation

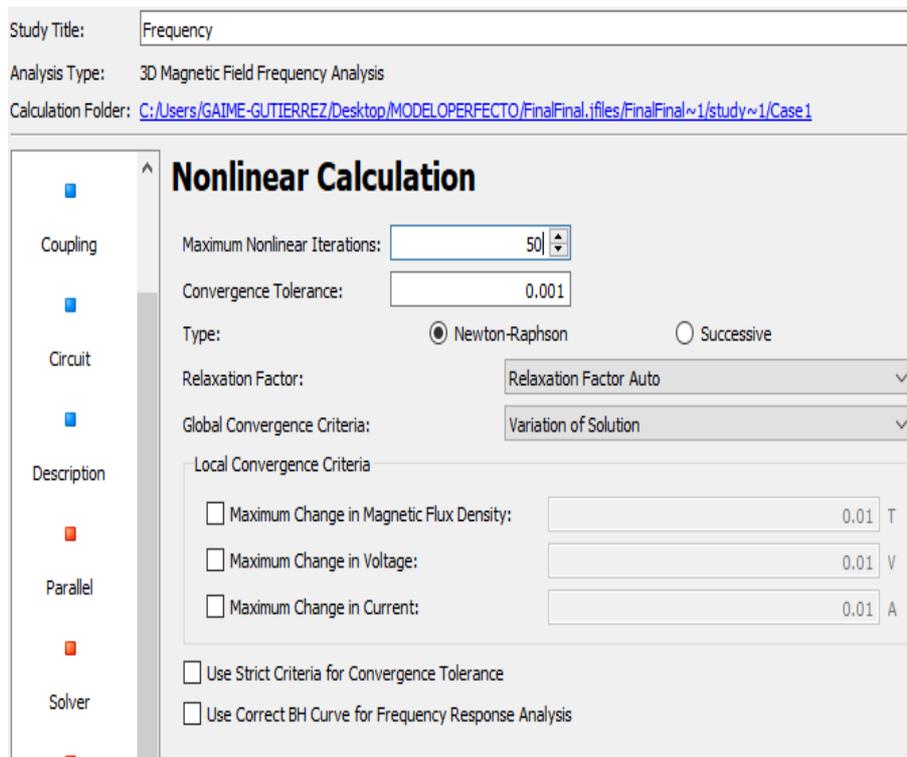


Figura 47. Nonlinear Calculation

6. Mallado del transformador

6.1 Vista en Isométrica del mallado

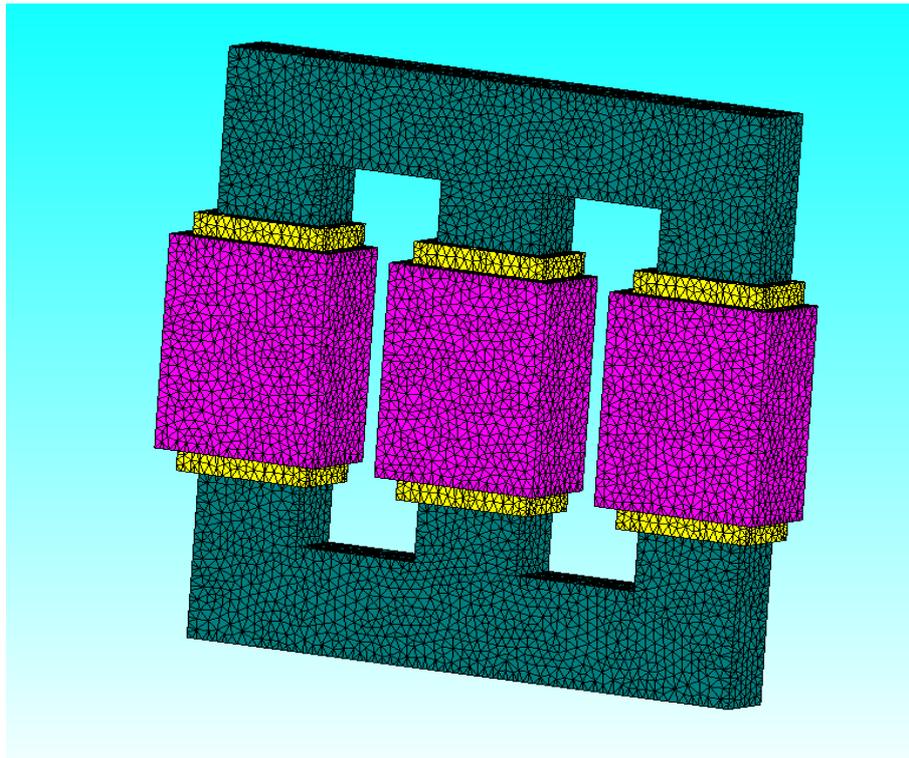


Figura 48. Vista Isométrica

6.2 Calidad del mallado

JMAG-Designer: Mesh Quality

This dialog box shows the element quality for the mesh.

	Quality	Element Count	Display	
Flat ↑ ↓ Regular	0.0 - 0.1:	0	<input type="checkbox"/>	Elements: 195586
	0.1 - 0.2:	43	<input type="checkbox"/>	Nodes: 36086
	0.2 - 0.3:	2409	<input type="checkbox"/>	Minimum: 0.151646
	0.3 - 0.4:	7565	<input type="checkbox"/>	Maximum: 0.987415
	0.4 - 0.5:	19861	<input type="checkbox"/>	Average: 0.642796
	0.5 - 0.6:	40222	<input type="checkbox"/>	Joint: 0.607357
	0.6 - 0.7:	53795	<input type="checkbox"/>	
	0.7 - 0.8:	47129	<input type="checkbox"/>	
	0.8 - 0.9:	22612	<input type="checkbox"/>	
	0.9 - 1.0:	1950	<input type="checkbox"/>	

Element highlight style:

- Marker at element center
- Element outline

Figura 49. Calidad mallado

7. Simulación

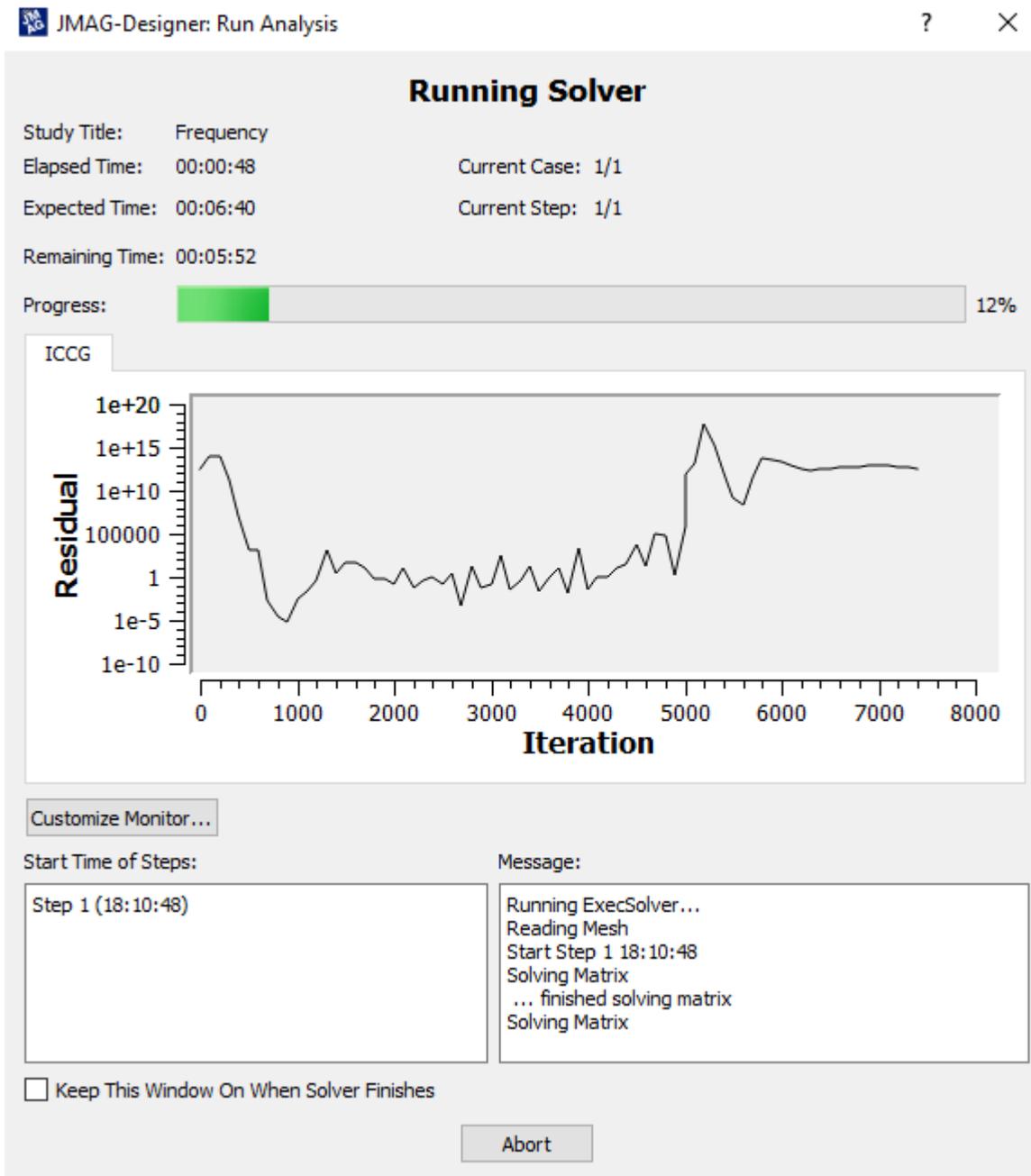


Figura 50. Pantalla Simulación

8. Resultados

8.1 Panel de control de “Contour Plot”

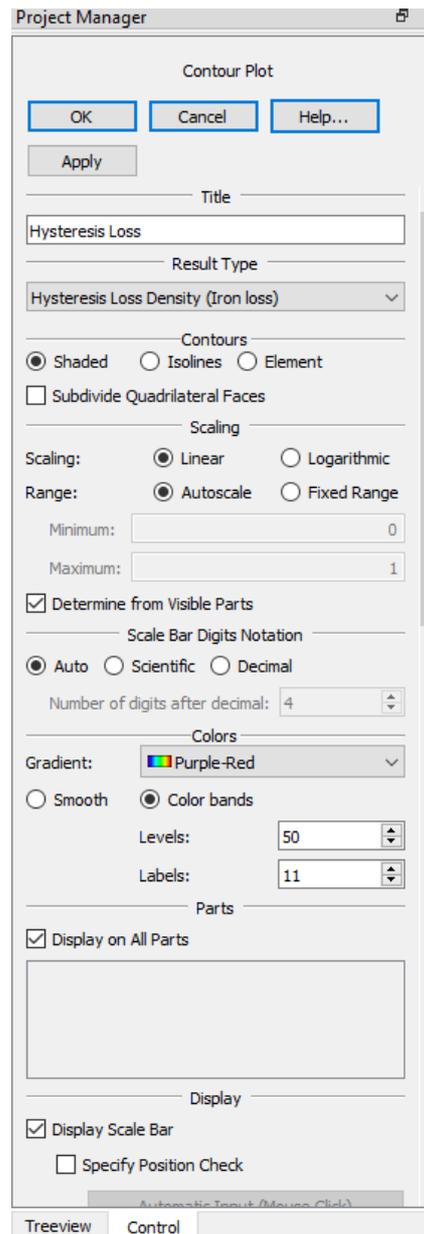


Figura 51. Panel Control “Contour Plot”

8.2 Gráfico tipo “contour plot” de la magnetización del núcleo

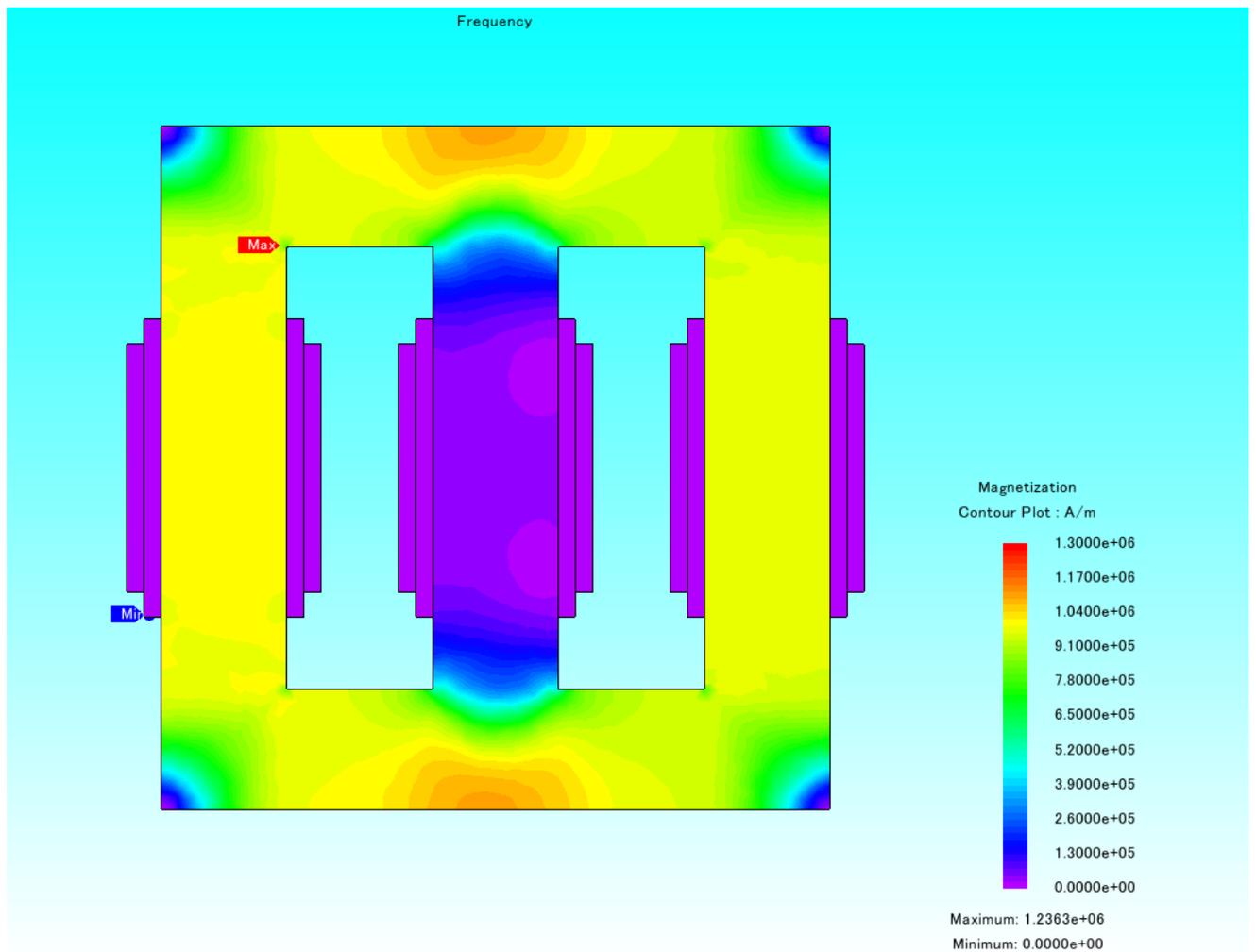


Figura 52. Gráfico “Contour Plot” magnetización núcleo

8.3 Gráfico tipo “contour plot” de la densidad del flujo magnético

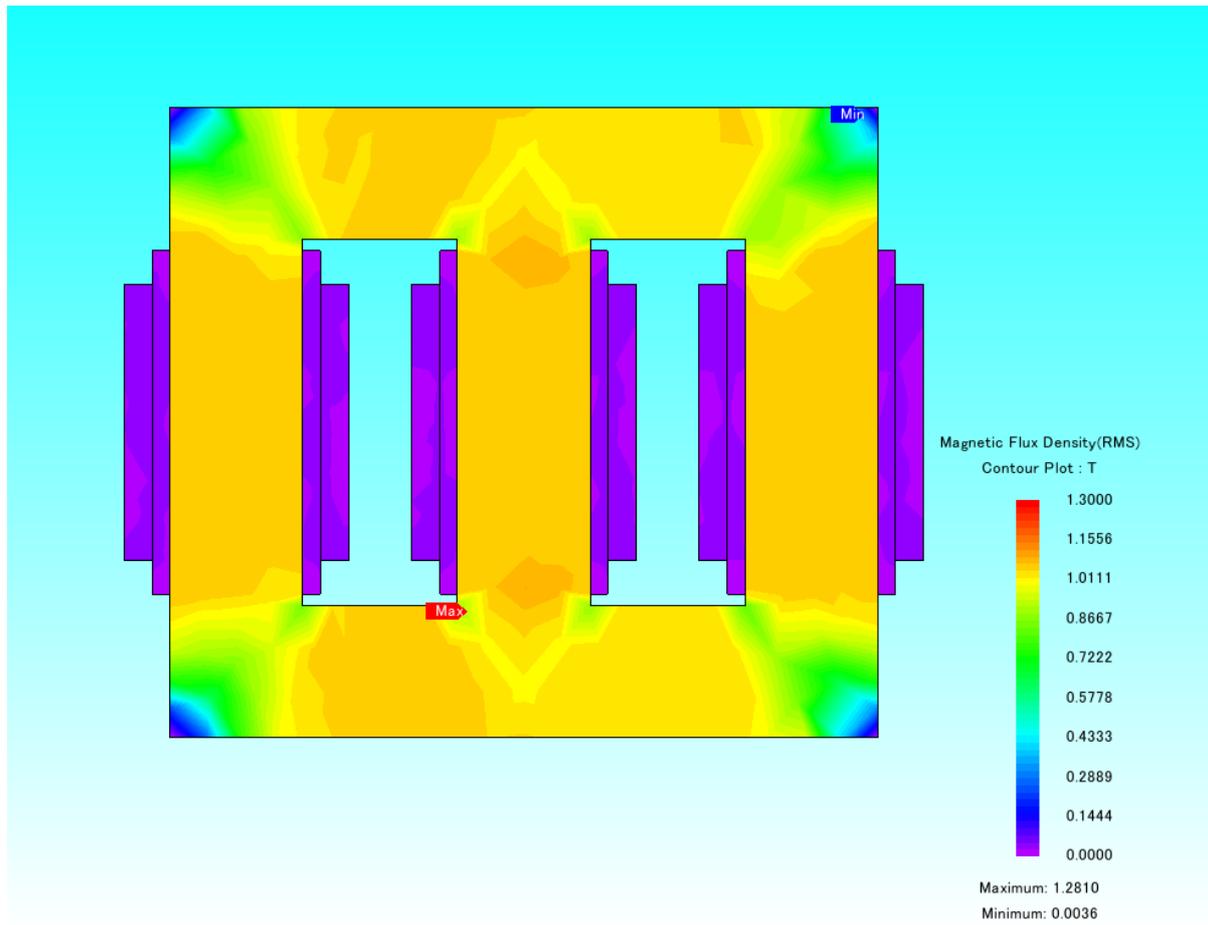


Figura 53. Gráfico “Contour Plot” de la densidad de flujo magnético

8.4 Gráfico tipo “contour plot” de las pérdidas de Joule

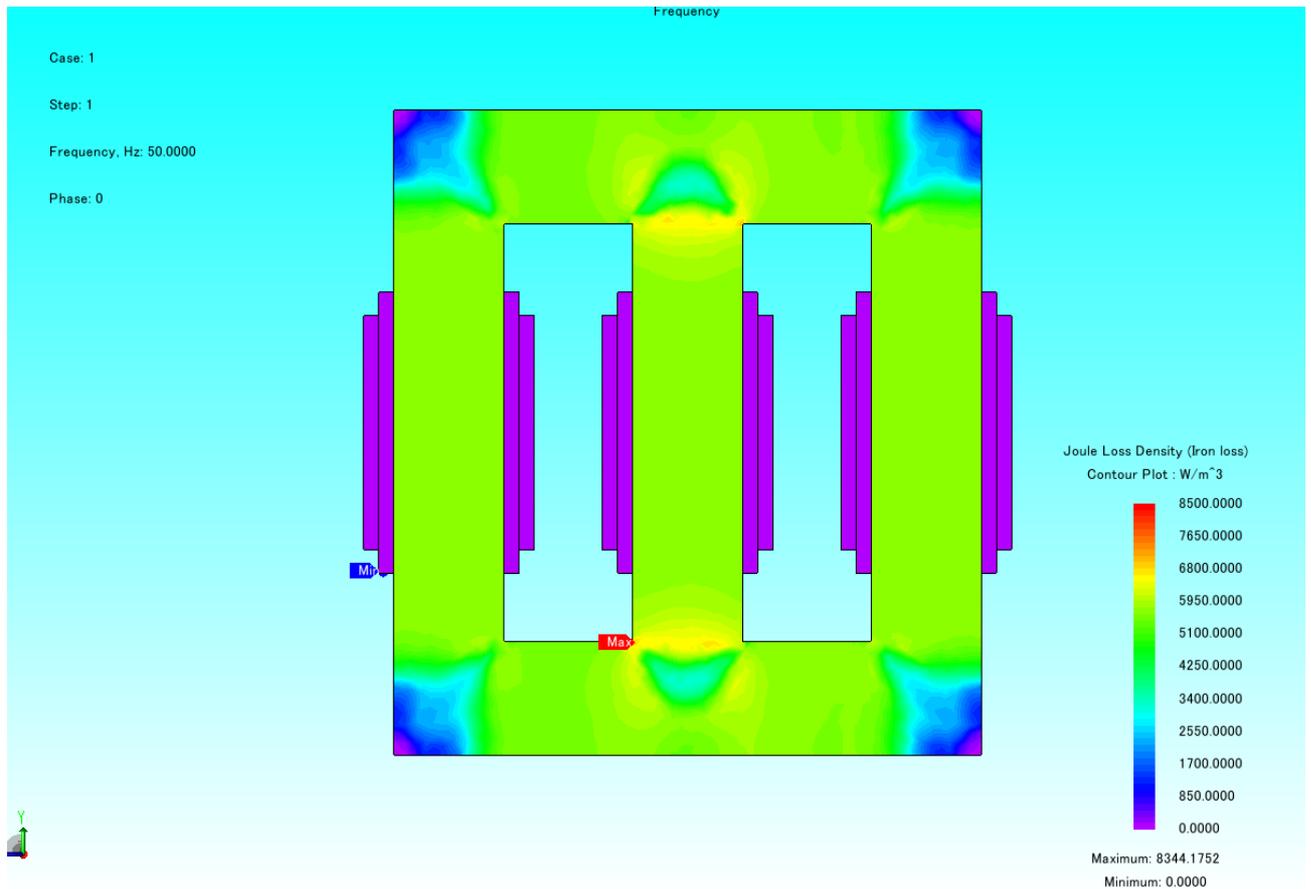


Figura 54. Gráfico “Contour Plot” pérdidas Joule

8.5 Gráfico tipo “contour plot” de las pérdidas de histéresis

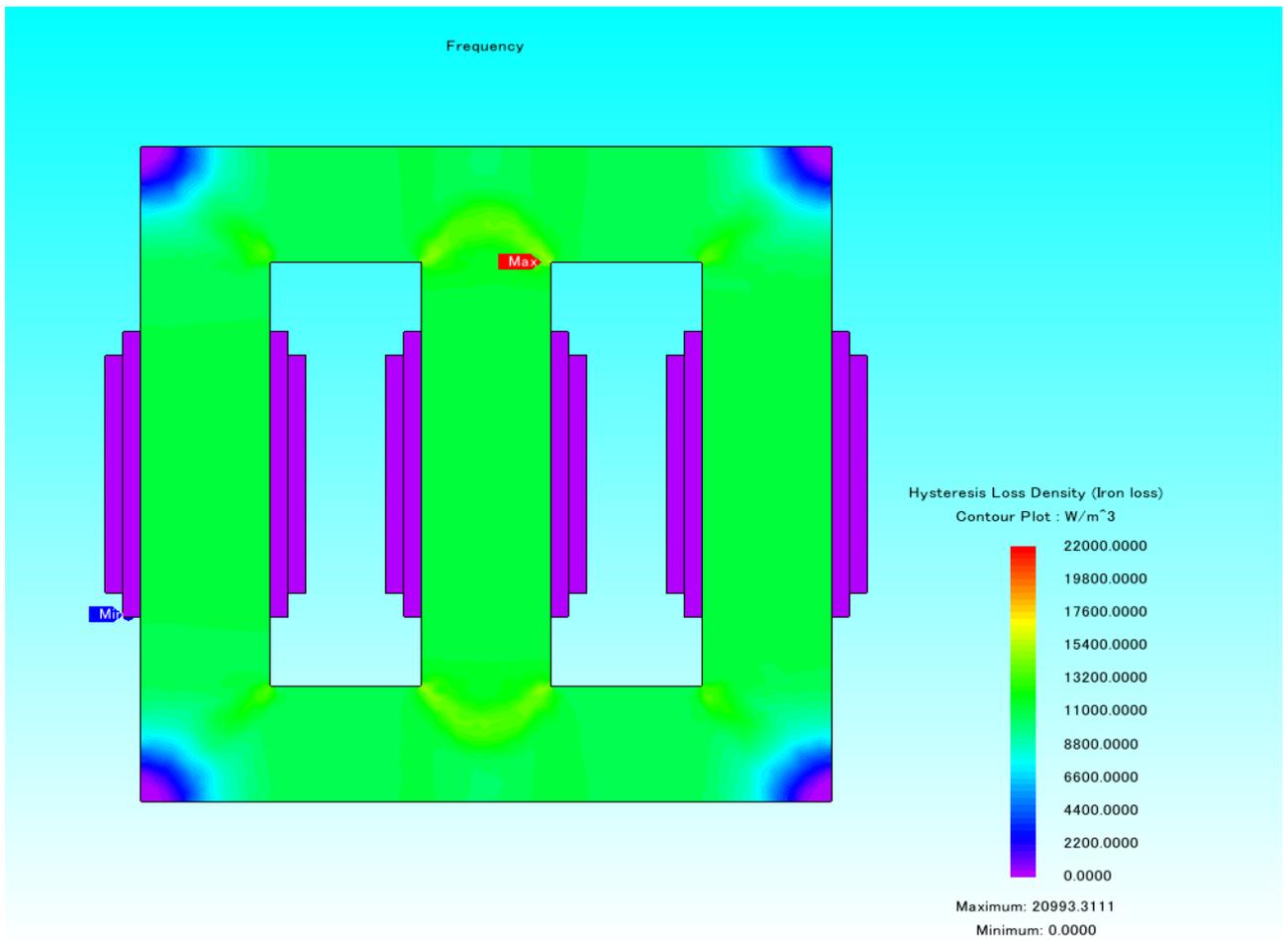


Figura 55. Gráfico “Contour Plot” de pérdidas histéresis

8.6 Gráfico tipo “contour plot” de las pérdidas en el núcleo

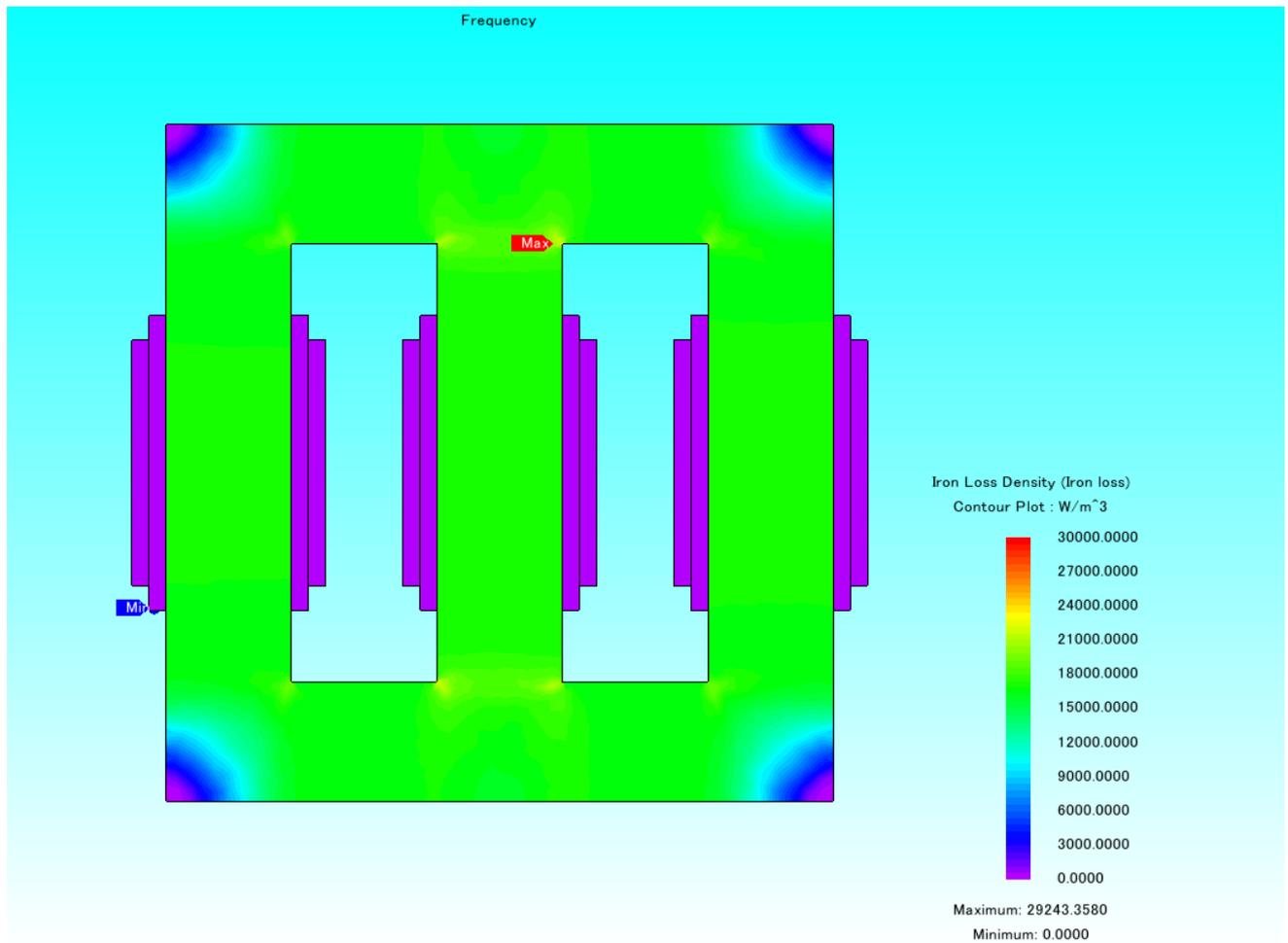


Figura 56. Gráfico “Contour Plot” pérdidas cobre

8.7 Gráfico “Contour Plot” de las pérdidas de Joule en las bobinas

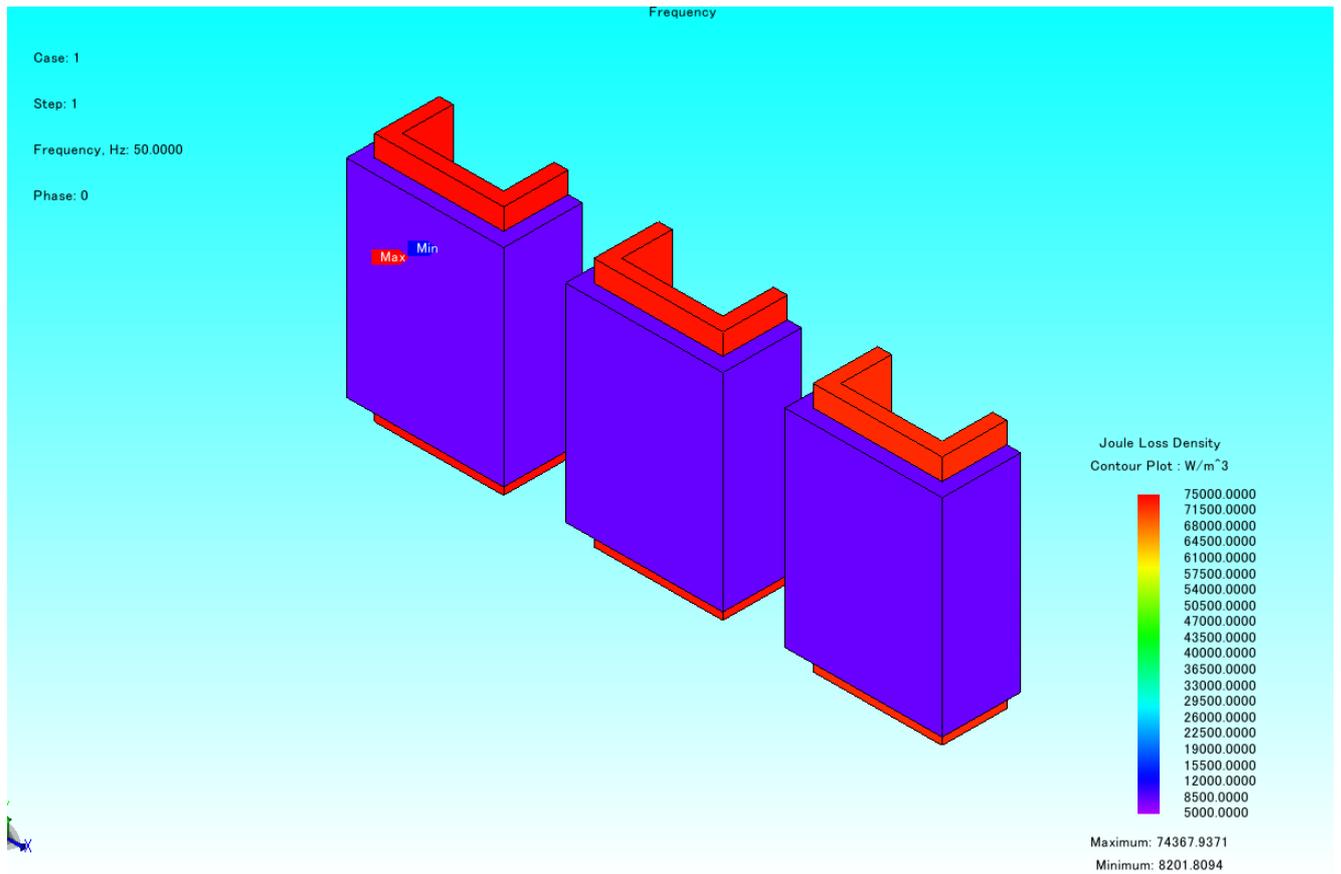


Figura 57. Gráfico “Contour Plot” perdidas Joule bobinas

8.8 Gráfico “Flux line” de la distribución de flujo magnético

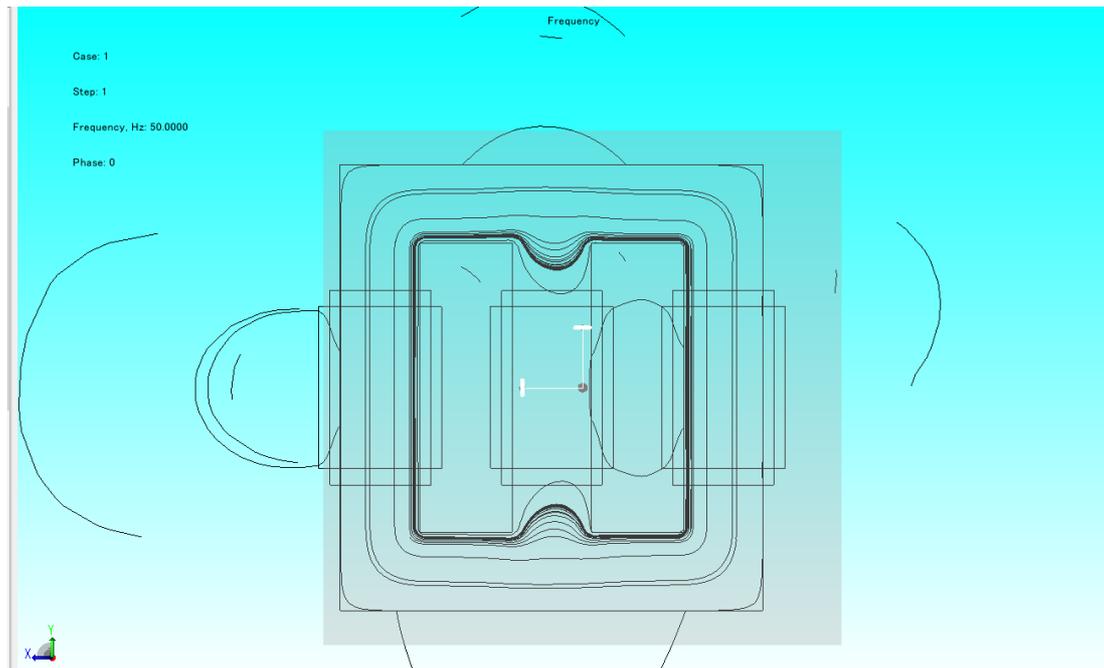


Figura 58. Gráfico “Flux line” del flujo magnético

8.9 Gráfico “Flux line” de la magnetización del núcleo

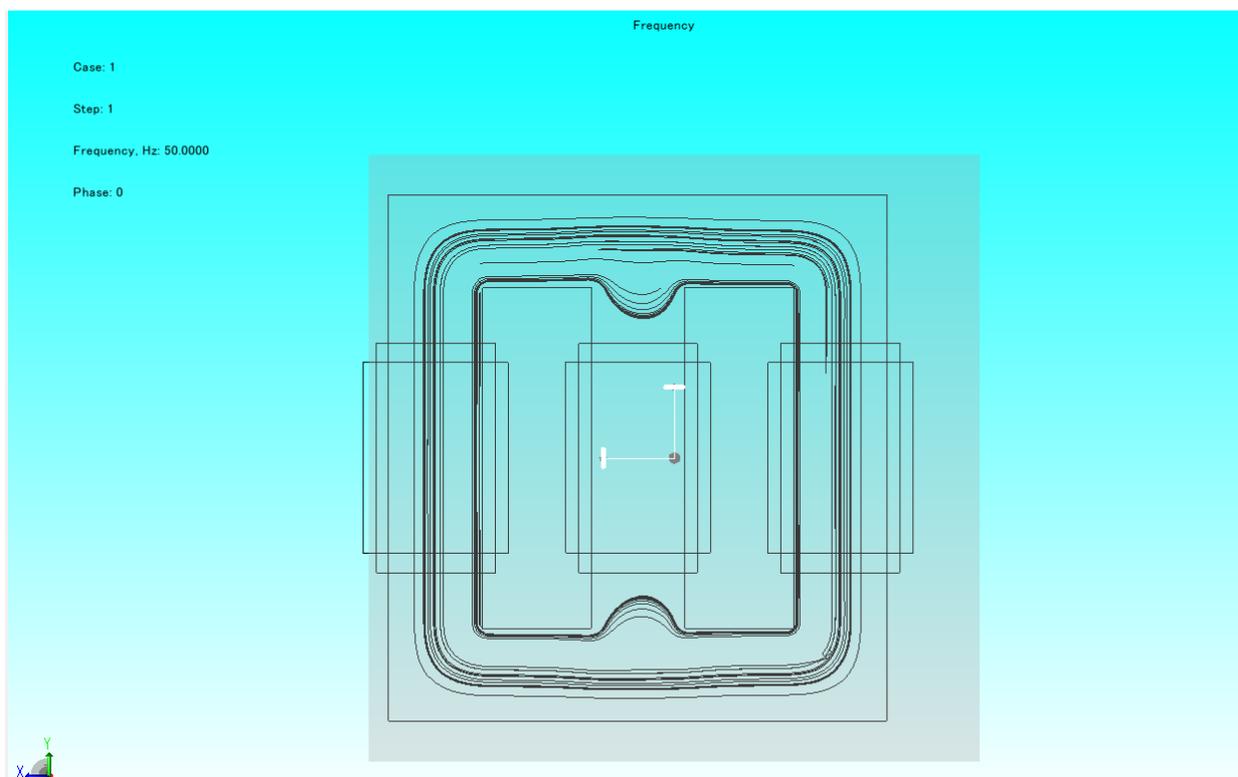


Figura 59. Gráfico “Flux line” de la magnetización del núcleo

8.10 Resultados de las pérdidas de Joule en cada elemento

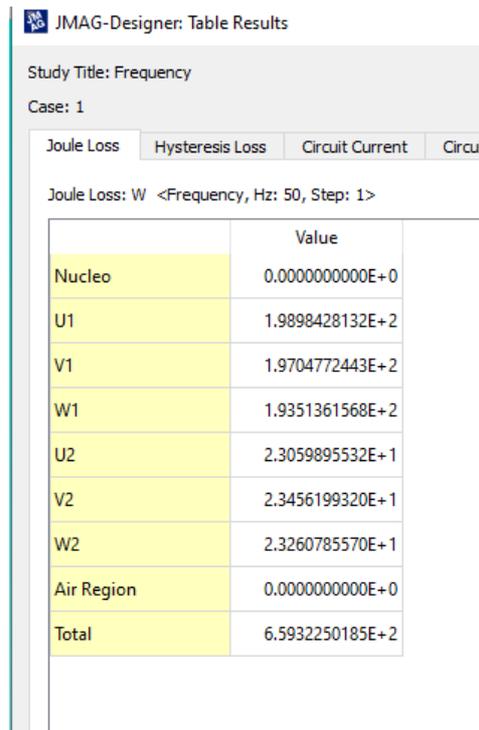


Figura 60. Tabla perdidas Joule

8.11 Resultados de la corriente en cada elemento

Circuit Current: A <Frequency, Hz: 50, Step: 1>

	Real	Imaginary	Amplitude	Phase	RMS
R1	-6.3977005893E+0	-1.3522794883E+2	1.3537920341E+2	-9.2708671713E+1	9.5727552766E+1
R2	1.2037212170E+2	6.1999142660E+1	1.3540066977E+2	2.7251288914E+1	9.5742731771E+1
R3	-1.1397442114E+2	7.3228806008E+1	1.3547186684E+2	1.4727916961E+2	9.5793075701E+1
U1	-2.8007456172E+0	-3.8416197769E+0	4.7541790588E+0	-1.2609404343E+2	3.3617122514E+0
U2	4.1939298912E+1	6.5585932424E+1	7.7848695077E+1	5.7402886107E+1	5.5047340196E+1
V1	4.7089727858E+0	-4.5587748264E-1	4.7309881607E+0	-5.5295946944E+0	3.3453138102E+0
V2	-7.8432822796E+1	3.5867896471E+0	7.8514793203E+1	1.7738164685E+2	5.5518342697E+1
VS1	0.0000000000E+0	0.0000000000E+0	0.0000000000E+0	0.0000000000E+0	0.0000000000E+0
W1	-1.8936094053E+0	4.2889462802E+0	4.6883703752E+0	1.1382190138E+2	3.3151784850E+0
W2	3.5541598419E+1	-6.9642016323E+1	7.8187055551E+1	-6.2962639985E+1	5.5286597181E+1

Figura 61. Tabla de corrientes

8.12 Potencia eléctrica en cada elemento

Circuit Electric Power: W <Frequency, Hz: 50, Step: 1>

	Value
R1(active power)	3.2989551691E+4
R1(reactive power)	0.0000000000E+0
R1(apparent power)	3.2989551691E+4
R2(active power)	3.3000014473E+4
R2(reactive power)	0.0000000000E+0
R2(apparent power)	3.3000014473E+4
R3(active power)	3.3034728068E+4
R3(reactive power)	0.0000000000E+0
R3(apparent power)	3.3034728068E+4
U1(active power)	3.3427151652E+4
U1(reactive power)	3.5688171747E+3
U1(apparent power)	3.3617122476E+4
U2(active power)	-3.2853528297E+4
U2(reactive power)	7.6951898789E+1
U2(apparent power)	3.2853618418E+4
V1(active power)	3.3297465855E+4
V1(reactive power)	3.2235405900E+3
V1(apparent power)	3.3453138064E+4
V2(active power)	-3.3157330755E+4
V2(reactive power)	7.2400395087E+1
V2(apparent power)	3.3157409799E+4
VS1(active power)	0.0000000000E+0
VS1(reactive power)	0.0000000000E+0
VS1(apparent power)	0.0000000000E+0
W1(active power)	3.2959245022E+4
W1(reactive power)	3.5677729525E+3
W1(apparent power)	3.3151784812E+4

Figura 62. Tabla potencias eléctricas

8.13 Resultado de los flujos en las bobinas

Coil Flux-Linkage: Wb <Frequency, Hz: 50, Step: 1>

	Real	Imaginary	Amplitude	Phase	RMS
U1	-3.7984678064E+1	2.3427473242E+1	4.4628267613E+1	1.4833532756E+2	3.1556950662E+1
U2	-2.2667235518E+0	1.4457486127E+0	2.6885357932E+0	1.4746968839E+2	1.9010818908E+0
V1	-1.2940451456E+0	-4.4624144175E+1	4.4642903089E+1	-9.1661041441E+1	3.1567299506E+1
V2	-1.1927113238E-1	-2.6877478382E+0	2.6903929164E+0	-9.2540882741E+1	1.9023950753E+0
W1	3.9275106125E+1	2.1199886447E+1	4.4631481564E+1	2.8359251856E+1	3.1559223268E+1
W2	2.3861213302E+0	1.2420329982E+0	2.6900224853E+0	2.7498051307E+1	1.9021331409E+0

Figura 63. Tabla flujos de las bobinas

PLIEGO DE CONDICIONES

ÍNDICE DEL PLIEGO DE CONDICIONES

1. GENERALIDADES.....	100
2. NORMATIVA LEGAL GENERAL	100
2.1 Orden CIN/351/2009 del Ministerio de Ciencia e Innovación, de 9 de febrero, por la que se establecen los requisitos para la verificación de los títulos universitarios oficiales que habiliten para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico Industrial.	100
3. NORMATIVA LEGAL UNIVERSITARIA	101
3.1 Real Decreto 822/2021, de 28 de septiembre, por el que se establece la organización de las enseñanzas universitarias y del procedimiento de aseguramiento de su calidad	101
3.2 Resolución de 15 de abril de 2013, de la Universidad de Cantabria, por la que se publica el plan de estudios de Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	102
3.3 Memoria para la solicitud de verificación del Grado Universitario en Ingeniería en Tecnologías Industriales de la Universidad de Cantabria	102
4. NORMATIVA ADMINISTRATIVA UNIVERSITARIA.....	106
4.1 Normativa de gestión académica de los estudios de grado de la Universidad de Cantabria (acuerdo de Consejo de Gobierno de 17 de febrero de 2023)	106
4.2 Guía Docente G733 de la asignatura Trabajo Fin de Grado.....	110
4.3 Normativa del Trabajo Fin de Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación (ETSIIyT) (Comisión Académica de 19 de noviembre de 2021)	114
5. NORMAS TÉCNICAS FORMALES DEL DOCUMENTO	122
5.1 Norma de Informes Periciales UNE 197001	123
5.2 Norma de Proyectos Técnicos UNE 157001	127
5.3 Norma sobre Información y documentación, de directrices para la redacción de referencias bibliográficas y de citas de recursos de información.	133

1. GENERALIDADES

El Pliego de Condiciones de este Trabajo Fin de Grado (TFG) tiene como misión reunir y establecer las condiciones legales, administrativas y formales para que el objeto del TFG (desarrollo y presentación) se realice en las condiciones especificadas por la Universidad de Cantabria, el director y el autor del trabajo.

La extensión y estructura de este documento está en función del tipo de TFG que, en este caso, se trata de un estudio práctico titulado “Simulación electromagnética de un transformador trifásico de potencia de 100kVA 10kV/600V, 50Hz. Análisis de las pérdidas de potencia”. Este Pliego de Condiciones integra cuatro apartados que se desarrollan a continuación.

2. NORMATIVA LEGAL GENERAL

2.1 Orden CIN/351/2009 del Ministerio de Ciencia e Innovación, de 9 de febrero, por la que se establecen los requisitos para la verificación de los títulos universitarios oficiales que habiliten para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico Industrial.

Aunque este título académico no comporta la obtención del título profesional de Ingeniero Técnico Industrial, la memoria de verificación de la titulación (apartado 3.3 de este Pliego de Condiciones) refiere a esta normativa legal sobre profesiones reguladas.

En su artículo único, sobre requisitos de los planes de estudios conducentes a la obtención de los títulos de Grado que habiliten para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico Industrial, establece: *“Los planes de estudios conducentes a la obtención de los títulos de Grado que habiliten para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico Industrial, deberán cumplir, además de lo previsto en el Real Decreto 1393/2007, de 29 de octubre, por el que se establece la ordenación de las enseñanzas universitarias oficiales, los requisitos respecto a los apartados del Anexo I del mencionado Real Decreto que se señalan en el anexo a la presente Orden.”*

En el apartado 5 del Anexo de la Orden se indica que deberá: *“...realizarse un trabajo fin de grado de 12 créditos. El plan de estudios deberá incluir como mínimo, los siguientes módulos”*. Siendo el último módulo *“Trabajo fin de grado”* y las competencias que deben adquirirse

“Ejercicio original a realizar individualmente y presentar y defender ante un tribunal universitario, consistente en un proyecto en el ámbito de las tecnologías específicas de la Ingeniería Industrial de naturaleza profesional en el que se sinteticen e integren las competencias adquiridas en las enseñanzas.”

3. NORMATIVA LEGAL UNIVERSITARIA

3.1 Real Decreto 822/2021, de 28 de septiembre, por el que se establece la organización de las enseñanzas universitarias y del procedimiento de aseguramiento de su calidad

En su capítulo III, sobre organización básica de las enseñanzas universitarias oficiales de Grado, en su artículo 14, sobre directrices generales para el diseño de los planes de estudios de las enseñanzas de Grado, y en su punto 6 establece: *“El trabajo de fin de Grado, de carácter obligatorio y cuya superación es imprescindible para la obtención del título oficial, tiene como objetivo esencial la demostración por parte del o la estudiante del dominio y aplicación de los conocimientos, competencias y habilidades definitorios del título universitario oficial de Grado. Este trabajo de fin de Grado dispondrá de un mínimo de 6 créditos para todos los títulos, y un máximo de 24 créditos para los títulos de 240 créditos, de 30 créditos en los títulos de 300 créditos y de 36 créditos en los títulos de 360 créditos. Deberá desarrollarse en la fase final del plan de estudios, siguiendo los criterios que cada universidad o centro establezca. Asimismo, los trabajos de fin de Grado deberán ser defendidos en un acto público, siguiendo la normativa que a tal efecto establezca el centro o en su caso la universidad.”*

3.2 Resolución de 15 de abril de 2013, de la Universidad de Cantabria, por la que se publica el plan de estudios de Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

En el punto 3 de su Anexo, sobre estructura del Plan de Estudios, establece *“Módulo-Trabajo de fin de Grado, Carácter-Obligatorio, ECTS-12”*.

3.3 Memoria para la solicitud de verificación del Grado Universitario en Ingeniería en Tecnologías Industriales de la Universidad de Cantabria

En el apartado 3, sobre objetivos, el subapartado 3.2 sobre competencias a adquirir por el estudiante, y el punto 3.2.2 sobre competencias específicas del módulo de trabajo fin de grado, indica *“ITI_PFG1. Capacidad de integración”*.

En el apartado 5, sobre planificación de las enseñanzas, el subapartado 5.1 sobre estructura de las enseñanzas, y el punto 5.1.1 sobre distribución del plan de estudios en créditos ECTS por tipo de materia, indica *“TABLA 1. Resumen de las materias y distribución en créditos ECTS”* y en la tabla *“Tipo de materia-Trabajo Fin de Grado, ETCS-12”*.

En el apartado 5, sobre planificación de las enseñanzas, y el subapartado 5.3 sobre descripción detallada de los módulos o materias de enseñanza-aprendizaje de que consta el plan de estudios, incluye estos atributos *“Denominación de la materia-PROYECTO FIN DE GRADO, Créditos ECTS-12, Carácter/Tipo-Obligatorio”*, y una descripción sobre las competencias y resultados del aprendizaje que el estudiante adquiere con el Trabajo Fin de Grado que extracto e inserto a continuación:

“Capacidad para la redacción y desarrollo de proyectos en el ámbito de la Ingeniería Industrial que tengan por objeto la construcción, reforma, reparación, conservación, demolición, fabricación, instalación, montaje o explotación de estructuras, equipos mecánicos, instalaciones energéticas, instalaciones eléctricas y electrónicas, instalaciones y plantas industriales y procesos de fabricación y automatización, todo ello, en el ámbito de la tecnología específica de la titulación de la rama industrial cursada por el alumno”.

Capacidad para la dirección de las actividades objeto de los proyectos de ingeniería descritos en el párrafo anterior.

Capacidad para el manejo de especificaciones, reglamentos y normas de obligado cumplimiento.

Capacidad de analizar y valorar el impacto social y medioambiental de las soluciones técnicas.

Competencias y resultados del aprendizaje

- *Generales de la titulación*

ITI_GT1. Adquisición de la capacidad para dirigir las actividades objeto de los proyectos de ingeniería descritos en el epígrafe anterior.

ITI_GT3. Adquisición de la capacidad de resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, creatividad,

razonamiento crítico y de comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas en el campo de la Ingeniería Industrial.

ITI_GT5 Adquisición de la capacidad para manejar especificaciones, reglamentos y normas de obligado cumplimiento.

ITI_GT6 Adquisición de la capacidad de analizar y valorar el impacto social y medioambiental de las soluciones técnicas.

ITI_GT9 Adquisición de la capacidad de trabajar en un entorno multilingüe y multidisciplinar.

- *Generales transversales*

GTRA1. Desarrollo del pensamiento crítico.

GTRA2. Desarrollo del pensamiento creativo.

GTRA3. Adquisición de la capacidad de gestionar el tiempo.

GTRA4. Adquisición de la capacidad de resolver problemas.

GTRA7. Adquisición de la capacidad de comunicarse verbalmente.

GTRA8. Adquisición de la capacidad de comunicación escrita.

GTRA10. Adquisición de la capacidad de adaptarse al entorno.

GTRA12. Adquisición de la capacidad de comunicación interpersonal.

GTRA14. Desarrollo de la creatividad.

GTRA15. Adquisición de la capacidad de innovar.

GTRA16. Adquisición de la capacidad de gestionar proyectos

- *Específicas del módulo de selección de tecnología específica*

ITI_PFG1. Adquisición de la capacidad de realizar un ejercicio original individualmente y presentar y defender ante un tribunal universitario, consistente en un proyecto en el ámbito de las tecnologías específicas de la Ingeniería Industrial de naturaleza profesional en el que se sintetizan e integran las competencias adquiridas en las enseñanzas.

Ver anexos: 2.- Listado de competencias 3.- Tabla de materias - competencias”

En el apartado 5, sobre planificación de las enseñanzas, y el subapartado 5.3 sobre descripción detallada de los módulos o materias de enseñanza-aprendizaje de que consta el plan de estudios, incluye los requisitos previos con esta descripción: *“Al tratarse de un Trabajo Fin de Grado, son necesarios los conocimientos de las distintas materias de carácter obligatorio impartidas en la titulación, si bien algunas de ellas podrían cursarse simultáneamente con la realización del trabajo.”*.

En el apartado 5, sobre planificación de las enseñanzas, y el subapartado 5.3 sobre descripción detallada de los módulos o materias de enseñanza-aprendizaje de que consta el plan de estudios, incluye las actividades formativas en créditos ECTS y su metodología de enseñanza aprendizaje con esta descripción y un reparto orientativo *“Ejercicio original a realizar individualmente y presentar y defender ante un tribunal universitario, consistente en un proyecto en el ámbito de las tecnologías específicas de la ingeniería industrial, de naturaleza profesional, en el que se sintetizan e integran las competencias adquiridas en las enseñanzas.*

Como referencia, la dedicación a cada una de estas actividades estará en torno a los siguientes porcentajes: Clases presenciales-Tutorías-10%-Evaluación 5% No presenciales-Trabajo autónomo-85%”.

En el apartado 5, sobre planificación de las enseñanzas, y el subapartado 5.3 sobre descripción detallada de los módulos o materias de enseñanza-aprendizaje de que consta el plan de estudios, incluye el sistema de evaluación de la adquisición de las competencias y el

sistema de calificaciones con esta indicación “Defensa, ante un tribunal, del Proyecto Fin de Carrera-100%”.

En el apartado 5, sobre planificación de las enseñanzas, y el subapartado 5.3 sobre descripción detallada de los módulos o materias de enseñanza-aprendizaje de que consta el plan de estudios, incluye una breve descripción de los contenidos del Trabajo Fin de Grado que extracto e inserto a continuación:

“El módulo, cubre las competencias descritas en la Orden CIN/351/2009, de 9 de febrero, por la que se establecen los requisitos para la verificación de los títulos universitarios oficiales que habiliten para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico Industrial, en el apartado proyecto fin de grado.

La elaboración de los Proyectos Fin de Carrera comprenderá las siguientes fases:

1ª.- Oferta anual, por parte de los profesores de la titulación y, en particular, por los profesores del Área de Proyectos, de distintos temas que puedan ser objeto de la realización de proyectos fin de carrera. Se procurará que los alumnos concreten el tema a realizar y tengan asignado Director del Proyecto dentro del primer cuatrimestre de 4º curso, sin perjuicio de que puedan surgir temas como consecuencia de la realización por los alumnos de prácticas en empresas.

2ª.- Asignación formal, por parte de los tribunales que hayan de juzgar los PFC, del tema específico y del Director del proyecto, de acuerdo con la normativa que rige la elaboración y defensa de los PFC, aprobada por la Junta de Escuela.

3ª.- Seguimiento del desarrollo de los trabajos, por parte del Director del Proyecto.

4ª.- Depósito de los ejemplares del Proyecto dentro de los plazos establecidos para cada convocatoria, previa autorización del director del Proyecto. Período para el análisis del documento por los miembros del tribunal nombrado al efecto.

5ª.- Exposición y defensa pública del PFC.”

4. NORMATIVA ADMINISTRATIVA UNIVERSITARIA

4.1 Normativa de gestión académica de los estudios de grado de la Universidad de Cantabria (acuerdo de Consejo de Gobierno de 17 de febrero de 2023)

En su título VI, nominado Trabajo Fin de Grado, establece en los apartados uno a diez las siguientes condiciones que se extractan e insertan a continuación:

1. OBJETO Y ÁMBITO DE APLICACIÓN

1. Esta normativa contiene las directrices relativas a la definición, realización, defensa, calificación y tramitación administrativa de los Trabajos de Fin de Grado (en adelante TFG) que se establezcan en los planes de estudios de las distintas titulaciones oficiales de la Universidad de Cantabria que conduzcan a la obtención del Título de graduado de acuerdo con la regulación del R.D. 822/2021.

2. Queda a discreción de cada centro el desarrollo ulterior de la presente normativa para adecuarla a las características propias de cada uno de los títulos de Grado que se impartan en su centro. En cualquier caso, las normas que establezcan los centros deberán ser públicas y adecuarse a lo dispuesto en esta normativa.

2. CARACTERÍSTICAS DEL TFG

1. El TFG consistirá en la realización por parte del estudiante de un trabajo original, autónomo y personal, bajo la orientación de un profesor, en el que se apliquen y desarrollen los conocimientos y capacidades adquiridos a lo largo de la titulación, demostrando que ha alcanzado las competencias previstas en el plan de estudios. El término original queda referido a que en ningún caso pueda ser un trabajo plagiado ni presentado con anterioridad por el alumno en ninguna otra asignatura. Se deberán citar las fuentes utilizadas.

2. La carga de trabajo que el estudiante invierta a lo largo de la realización del TFG debe corresponderse con los créditos ECTS que le otorgue el plan de estudios.

3. El trabajo será desarrollado, defendido y calificado individualmente sin perjuicio de que, cuando el tema elegido así lo aconseje, pueda ser elaborado en colaboración con otros estudiantes, en la manera que el Reglamento del Centro lo prevea.

4. *Excepcionalmente, siempre que así esté previsto en la Memoria de Verificación del título, el Trabajo Fin de Grado se podrá ubicar dentro de una materia o módulo que permita favorecer la interacción de grupos heterogéneos mejorando así las capacidades de trabajo cooperativo y de comunicación de los estudiantes.*

Esta materia o módulo estará integrado por el Trabajo Fin de Grado y un grupo de asignaturas establecido en la Memoria de Verificación.

A efectos de matrícula, plan docente y actas, la gestión se realizará como una asignatura.

En cualquier caso, el Trabajo Fin de Grado deberá tener una calificación individual y ser evaluado y defendido de acuerdo con lo establecido en esta normativa.

5. *En el caso de aquellos planes de estudio que contemplen la posibilidad de realizar Menciones y la Memoria de Verificación del título establezca que el Trabajo Fin de Grado está asociado a la Mención con contenidos y características diferenciados para cada una de las Menciones, los estudiantes que cursen más de una Mención deberán realizar un Trabajo Fin de Grado para cada una de ellas.*

3. DIRECCIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO

1. *Cada TFG tendrá asignado al menos un profesor director, que dirigirá y tutorizará” (tutorará) “al alumno a lo largo de la realización del trabajo.*

2. *Serán obligaciones del director del TFG las siguientes:*

a) *Establecer claramente los objetivos del TFG, así como la metodología y plan de trabajo.*

b) *Proporcionar guía, consejo y apoyo al alumno durante la realización del trabajo.*

c) *Supervisar al alumno en la toma de decisiones que afecten a la estructura del trabajo, tratamiento de los temas, correcta presentación y orientación bibliográfica.*

d) *Determinar la consecución de los objetivos propuestos y autorizar la presentación del TFG.*

e) *Conocer los trámites de gestión necesarios para la realización del TFG, facilitando al estudiante los distintos pasos que tiene que dar en cada momento.*

3. *El director de un TFG deberá ser profesor del centro responsable de la titulación, siendo preferible que sea profesor de esta. Además, podrá actuar como codirector un profesor de la Universidad o un profesional externo a la misma.*

4. En los TFG realizados en instituciones o empresas externas a la Universidad de Cantabria, existirá la figura de un codirector perteneciente a la institución o empresa. En estos casos, el director compartirá con el codirector las tareas de dirección y orientación del estudiante, siendo en cualquier caso responsabilidad del director facilitar la gestión académica.

5. El Centro establecerá los mecanismos necesarios para asegurar que cada estudiante tenga un director y un trabajo, así como para solventar cualquier incidencia que pudiera surgir durante el desarrollo de este. Cuando, por circunstancias sobrevenidas, el director cause baja, el centro arbitrará las medidas oportunas para su sustitución.

4. MATRICULACIÓN Y REQUISITOS PARA LA DEFENSA

1. El TFG podrá ser objeto de matrícula por el estudiante en cualquier momento del curso académico hasta la fecha límite de entrega de actas de la convocatoria extraordinaria de junio, siempre que esté matriculado de todas las asignaturas necesarias para acabar la titulación, excepto, si es el caso, las que tenga pendientes de reconocimiento.

2. La defensa del TFG solo podrá llevarse a cabo cuando el estudiante haya superado todas las asignaturas del Grado y acredite haber alcanzado las competencias lingüísticas descritas en el Título V de la presente Normativa.

3. Si el estudiante está matriculado del TFG y no puede defenderlo en dicho curso académico por no tener superadas las restantes asignaturas del Grado, o por no haber alcanzado los requisitos lingüísticos, deberá matricularse nuevamente cuando esté en disposición de defenderlo.

4. La matrícula del TFG da derecho al estudiante a presentarse a dos convocatorias en un mismo curso académico. Si una vez finalizado dicho curso el alumno no hubiese aprobado su TFG, deberá matricularse de nuevo.

5. PERIODOS DE DEFENSA

Los TFG se podrán defender y evaluar en las convocatorias oficiales establecidas por el Centro durante el curso académico que serán, al menos, cuatro.

6. DEPÓSITO DEL TRABAJO

1. Cada alumno deberá realizar una memoria en la que se incluya el desarrollo del trabajo realizado y en la que deberán constar el título de la misma y un resumen escrito en español y

en inglés. Todos los TFG deberán contener una portada en la que se detalle el grado, la Facultad o Escuela, título del TFG, nombre del alumno, nombre del director y del codirector si lo hubiera y el año en que se presenta.

2. El Reglamento del Centro podrá concretar más aspectos relativos a la presentación de los TFG y a la forma y plazos en que el estudiante debe depositar su TFG.

7. EVALUACIÓN DEL TFG

1. El Centro regulará la forma de evaluación del TFG y fijará los criterios de valoración y el procedimiento de defensa. Entre los criterios de valoración estarán, al menos, los siguientes: la calidad científica y técnica del TFG presentado, la calidad del material entregado, la claridad expositiva, y la capacidad de debate y la defensa argumental.

2. Se garantizará que al menos uno de los evaluadores del TFG sea profesor de la titulación.

3. El Centro publicará con al menos una semana de antelación, el lugar, día y hora fijados para la defensa de cada trabajo.

8. DEFENSA DEL TFG

1. La defensa del TFG se realizará en un acto público, bien en español o en inglés, en la manera que establezca el Reglamento del Centro.

2. El alumno realizará la defensa del TFG mediante la exposición oral de su contenido o de las líneas principales del mismo y contestará a las preguntas y aclaraciones que se le planteen. El Reglamento del Centro fijará los tiempos que correspondan a cada una de las partes de la defensa.

3. La defensa del TFG se realizará en modalidad presencial. No obstante, se podrá realizar en la modalidad "a distancia" siempre que esté debidamente justificada, existan las condiciones técnicas que lo permitan y se garantice la defensa del TFG.

4. En la modalidad a distancia será necesario que la Comisión Académica y la dirección del TFG tomen las medidas necesarias y oportunas para garantizar la identidad del estudiante y evitar así su suplantación.

9. CALIFICACIÓN Y ACTAS

1. Una vez finalizado el acto de defensa del TFG se firmará el acta individual correspondiente a cada alumno utilizando el sistema de calificación establecido en el Real Decreto 1125/2003. Los TFG no estarán sujetos al porcentaje de Matrículas de Honor previstos en el citado Real Decreto. Todos los estudiantes matriculados en el Trabajo Fin de Grado que no se presenten a la defensa, figurarán en un acta única expedida al finalizar el curso académico.
2. En el caso de que un TFG obtuviera la calificación de suspenso, el evaluador hará llegar un informe al estudiante y a su director con los criterios que han motivado dicha calificación. Dicho informe podrá incluir recomendaciones para mejorar la calidad del mismo.
3. Los plazos de calificación y entrega de actas serán acordados para cada curso académico por los órganos de gobierno de la Universidad.

10. REPOSITORIO UCrea

1. Con el fin de dar cumplimiento a la normativa sobre política institucional de acceso abierto a la producción académica, científica e investigadora de la Universidad de Cantabria (Repositorio Ucrea), una vez finalizada la presentación de los trabajos fin de grado, aquéllos que resulten aprobados deberán depositarse en el repositorio institucional de acceso abierto de la UC.
2. Para realizar este depósito, las Secretarías de los Centros enviarán una copia de los trabajos en formato electrónico a la Biblioteca Universitaria junto con el documento de consentimiento de los autores y la modalidad de acceso elegida.
3. La Biblioteca se ocupará también de la conservación de los trabajos cuya difusión no haya sido autorizada por los autores y garantizará el acceso a los mismos para evaluadores, gestores u otras personas en los términos previstos en las disposiciones aplicables.”

4.2 Guía Docente G733 de la asignatura Trabajo Fin de Grado

Las condiciones de desarrollo del Trabajo Fin de Grado, citadas en las normativas anteriores, se reúnen en la Guía Docente de esta actividad o asignatura.

En su apartado 2, sobre prerrequisitos, se establece “Para poder matricularse del TFG es necesario matricularse de todas las asignaturas que queden para completar la titulación. Para poder presentarlo y defenderlo, hay que tener aprobadas todas las asignaturas de la titulación

y acreditar haber alcanzado las competencias lingüísticas establecidas en la Universidad de Cantabria.”.

En su apartado 3, sobre competencias genéricas y específicas, se reproducen las mismas del apartado 3.3 de este Pliego de Condiciones.

En su apartado 4, sobre objetivos de la asignatura, se establecen: *“Que el estudiante realice un trabajo original, autónomo y personal, cuyo objetivo es mostrar la adquisición de competencias asociadas a la titulación” y “Que el estudiante muestre sus competencias en la elaboración de una memoria que recoja el trabajo realizado y en la defensa en sesión pública del mismo. El trabajo contendrá suficientes elementos de creación personal y citarán adecuadamente todas las fuentes utilizadas”.*

En su apartado 5, sobre modalidades organizativas y métodos docentes, se establece el siguiente reparto orientativo de 300 horas totales de la actividad: *“Seminarios, tutorías, sesiones de laboratorio, etc. realizados con el Director del Trabajo-30 horas”, “Evaluación y Defensa del TFG-15 horas”, “Búsqueda y estudio de documentación, trabajo autónomo de laboratorio o de campo. Desarrollo del trabajo. Escritura de la memoria y preparación de la presentación-225 horas”.*

En su apartado 6, sobre organización docente de la asignatura, se establece:

- *“Organización de la oferta y asignación de Trabajos Fin de Grado”*

“El tema del TFG podrá definirse entre el alumno y el director del trabajo o ser asignado por el Área de Proyectos.

Para iniciar el desarrollo del TFG, su título y sus líneas de desarrollo deberán contar con la conformidad del Tribunal correspondiente que esté en activo en ese momento. A tal efecto el alumno lo solicitará formalmente en el Negociado de la Escuela mediante la Ficha de Asignación y que se deberá presentar al menos en la convocatoria anterior a la de la defensa del trabajo. En el caso de que el informe sea desfavorable, el Tribunal deberá justificar razonadamente el mismo.”

- *“Temporización: convocatorias, fechas de entrega y defensa de cada convocatoria”.*
Establece los siguientes fases y fechas de cumplimentación: *“Asignación del TFG-Al menos en una convocatoria anterior a la que se realice la defensa”, “Presentación de*

la memoria-Al menos una semana antes al acto de presentación”, “Convocatorias de defensa del TFG-Diciembre, Febrero, Mayo, Julio, Septiembre”

- *“¿En qué consiste el TFG? (descripción de la memoria y del material necesario para realizar su defensa pública)”*

“El Trabajo Fin de Grado podrá realizarse de acuerdo con el concepto clásico de Proyecto que se recoge en la norma UNE 157001 "CRITERIOS GENERALES PARA LA ELABORACIÓN DE PROYECTOS", estructurado en los ocho documentos básicos: Índice General, Memoria, Anexos, Planos, Pliego de Condiciones, Estado de Mediciones, Presupuesto y, cuando proceda, Estudios con Entidad Propia. Dependiendo del tipo de Trabajo, especialmente los ligados a modelos experimentales y prototipos, o con alto contenido informático, puede ser conveniente otra estructuración más acorde con la naturaleza de estos trabajos. En esos casos se mantendrá en lo posible y con las adaptaciones necesarias, la estructura tradicional ya que ello facilitará su posterior análisis y revisión y proporcionará uniformidad en la presentación.

El Trabajo Fin de Grado realizado quedará plasmado en un documento en formato PDF.

El formato del documento respetará lo indicado en

<http://web.unican.es/centros/etsiit/Paginas/TFG.aspx>.

La presentación ha de realizarse en formato póster en una sesión pública de hasta tres horas de duración como tiempo de referencia. Es decir, el alumno se apoyará en un póster de tamaño A1 y podrá añadir, opcionalmente, una presentación utilizando un ordenador portátil o la presentación de un demostrador en una pequeña mesa.”

- *“Observaciones”*

“Los datos de esta guía académica se extraen de la Memoria del Plan de Estudios y de la Normativa de Trabajo Fin de Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales, aprobada en Comisión Académica de Ingeniería Industrial de 15 de diciembre de 2020.”

En su apartado 7, sobre métodos y criterios de evaluación, se establece:

- *“Composición del tribunal encargado de juzgarla”*

“Para evaluar los TFG se constituirá un Tribunal para cada Materia Optativa reconocida en el Plan de Estudios: 1) Gestión y Organización Industrial, 2) Diseño Mecánico, 3) Electroenergética, 4) Electrónica y Automática y 5) Química.

En cada convocatoria se elegirá para cada Materia Optativa entre la lista de los profesores con docencia de los Grados de la familia Industrial a 4 profesores para formar parte de los Tribunales de Trabajos Fin de Grado cuya composición será la de presidente, secretario y dos Vocales. En cada tribunal el presidente será preferentemente un profesor del área de la Materia Optativa. Las designaciones de los profesores se realizarán de forma rotativa.”

- *“Descripción del acto de defensa”*

“La presentación consiste en que, a lo largo de la sesión, los miembros del tribunal (juntos o individualmente) reciben una explicación por parte del alumno y las respuestas a las preguntas que pudieran formular. El alumno se mantiene en el póster durante la sesión o bien se cita con los miembros del tribunal. Fuera del tiempo de explicación del alumno a los miembros del tribunal los posters quedan a exposición pública y el alumno puede atender a los interesados en el trabajo.”

- *“Criterios de valoración orientativos. Establece los siguientes criterios y ponderación: “Calidad científica y técnica del TFG presentado-30%”, “Calidad del material entregado-30%”, “Claridad expositiva-25%” y “Capacidad de debate y la defensa argumental-15%”*

- *“Observaciones”*

“El Tribunal rellenará el Acta con las calificaciones correspondientes y la firmará.

El presidente entregará en el Negociado de la Escuela el Acta, los documentos con las calificaciones y la copia en formato pdf del Trabajo Fin de Grado. El Negociado publicará las calificaciones.

Cuando parte del Trabajo Fin de Grado haya sido realizado con la ayuda y participación de empresas privadas, el Director del Trabajo podrá solicitar a la Comisión Académica, que para

su depósito en la biblioteca se entregue una versión de la memoria en la que aquellos datos confidenciales de la empresa o del Trabajo fin de Grado sean omitidos.

Los alumnos que lo soliciten recibirán por escrito una argumentación de las deficiencias observadas por el Tribunal.”

Termina la Guía docente con una observación en su apartado 8, sobre competencias lingüísticas en inglés, que dice: *“Se admite, sin ser obligatorio, la presentación del documento y defensa en inglés. En el caso de alumnos que realizan el proyecto en un programa de intercambio internacional, podrán presentar el documento en el idioma de la universidad en el que se realiza el trabajo”.*

4.2 Normativa del Trabajo Fin de Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación (ETSIIyT) (Comisión Académica de 19 de noviembre de 2021)

Su contenido establece las siguientes condiciones:

“1. CONSIDERACIONES GENERALES

1. El Trabajo Fin de Grado (en adelante TFG) es un trabajo original, autónomo y personal realizado por el estudiante, cuyo objetivo es mostrar la adquisición de competencias asociadas a la titulación.

2. El TFG debe ser dirigido por un “Director de Trabajo”. El estudiante deberá confeccionar una memoria que recoja el trabajo realizado, el cual defenderá en sesión pública ante un Tribunal, que lo calificará. El trabajo contendrá suficientes elementos de creación personal y citarán adecuadamente todas las fuentes usadas.

2. TIPOS DE TRABAJO

Los TFG atenderán a una de las siguientes tipologías:

a) Proyecto clásico: pueden versar, por ejemplo, sobre el diseño e incluso la fabricación de un prototipo, la ingeniería de una instalación de producción, la implantación de un sistema en cualquier campo de la ingeniería o un proyecto integral de naturaleza profesional. En este apartado se incluyen los Proyectos de Instalaciones y Plantas Industriales.

b) Estudios técnicos, organizativos o económicos: realización de estudios de equipos, sistemas, servicios, productos y mercados que traten cualquiera de los aspectos de diseño, planificación, producción, gestión, explotación, comunicación, información y cualquier otro propio de los campos de estudio de la titulación, que integre las competencias propias de la misma, relacionando cuando proceda alternativas técnicas con evaluaciones económicas, discusión y valoración de los resultados. En este apartado se incluyen los Proyectos de Desarrollo de Prototipos.

c) Trabajos teóricos, experimentales o numéricos, trabajos de naturaleza teórica, computacional o experimental, en conexión con las líneas de investigación y desarrollo de los Departamentos implicados en la Titulación, que constituyan una contribución a la técnica en los diversos campos de estudio de la Titulación, incluyendo, cuando proceda, evaluación económica, discusión y valoración de los resultados. En este apartado se incluyen los Proyectos de Productos Software, los Proyectos de Investigación y los Proyectos de Consultoría y Auditoría.

3. DIRECCIÓN

1. El Director de un Trabajo Fin de Grado puede ser un profesor que imparta docencia en alguno de los Grados y Másteres de la familia Industrial de la Escuela, esto es, Grados en Ingeniería en Tecnologías Industriales, Ingeniería Mecánica, Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Electrónica y Automática, Ingeniería Química y Másteres en Ingeniería Industrial y de Investigación en Ingeniería Industrial. Igualmente, pueden ser Directores de un TFG los investigadores con suficiencia investigadora que impartan docencia en dichas titulaciones. Los profesores de la Escuela que no impartan docencia en alguna de las titulaciones mencionadas podrán ser directores de un TFG con el visto bueno de la Comisión Académica.

2. El TFG podrá ser realizado en una empresa bajo la dirección de un titulado superior de la misma. Se incluyen también en este supuesto los titulados (ingeniero, licenciado, arquitecto, y grado o máster universitario) contratados por la Universidad de Cantabria en proyectos de investigación. En estos dos supuestos la propuesta deberá contar con la aprobación del Subdirector-Jefe de estudios. Dicha propuesta ha de especificar, a la vez, la designación de un Profesor Ponente, que cumpla las condiciones para ser director del TFG según se indica en el

apartado anterior. Dicho Profesor Ponente actuará de coordinador entre el director del TFG y el Centro.

3. El Trabajo Fin de Grado podrá ser co-dirigido," (codirigido,) "siempre que los Directores cumplan los requisitos anteriores, y haciendo constar una lista de los mismos en la memoria.

4. La realización del TFG dentro del programa Erasmus - Sócrates u otros convenios de colaboración referentes al Plan de Estudios tendrá la convalidación que se contemple en el propio convenio.

4. CONTENIDO Y ESTRUCTURA DEL TFG

1. El Trabajo Fin de Grado se realizará preferentemente de acuerdo con el concepto clásico de Proyecto que se recoge en la norma UNE 157001 "CRITERIOS GENERALES PARA LA ELABORACIÓN DE PROYECTOS", estructurado en los ocho documentos básicos: Índice General, Memoria, Anexos (Cálculos, Seguridad, Medio Ambiente, etc.), Planos, Pliego de Condiciones, Estado de Mediciones, Presupuesto y, cuando proceda, Estudios con Entidad Propia.

2. Dependiendo del tipo de Trabajo, especialmente los ligados a modelos experimentales y prototipos, o con alto contenido informático, puede ser conveniente otra estructuración más acorde con la naturaleza de estos proyectos. En esos casos se mantendrá en lo posible y con las adaptaciones necesarias la estructura tradicional, ya que ello facilitará su posterior análisis y revisión y proporcionará uniformidad en la presentación.

3. El Trabajo Fin de Grado realizado quedará plasmado en un documento en formato PDF.

4. El formato respetará lo indicado al final de esta normativa.

5. MATRÍCULA Y CONVOCATORIAS DEL TFG

1. La matrícula del TFG se podrá efectuar en cualquiera de los períodos hábiles abonando las tasas correspondientes a los créditos fijados para el mismo. Los plazos de matrícula del TFG serán establecidos por el Negociado del Centro.

2. Si el estudiante está matriculado del TFG y no puede defenderlo en dicho curso académico, deberá matricularse nuevamente cuando esté en disposición de defenderlo.

3. Las convocatorias ordinarias en un curso académico se harán públicas en un plazo máximo de un mes desde el inicio del curso. Los estudiantes podrán solicitar la convocatoria de tribunal

de forma extraordinaria en otras fechas que estarán sujetas al informe favorable del Jefe de Estudios.

6. ASIGNACIÓN DEL TÍTULO Y DIRECTOR DEL TFG

1. El tema del TFG podrá definirse entre el alumno y el Director del trabajo o ser asignado por el Área de Proyectos de Ingeniería.

2. Para iniciar el desarrollo del TFG, su título y sus líneas de desarrollo deberán contar con la conformidad del Tribunal correspondiente que esté en activo en ese momento. A tal efecto, el alumno lo solicitará en el Negociado de la Escuela mediante la Ficha de Asignación recogida en el anexo y que se deberá presentar al menos en la convocatoria anterior a la de la defensa del proyecto. En el caso de que el informe sea desfavorable, el Tribunal deberá justificar razonadamente el mismo.

7. DESIGNACIÓN DE TRIBUNALES

1. Para evaluar los TFG se constituirá un Tribunal para la Titulación.

2. En cada convocatoria se elegirá entre los profesores con docencia en Grados de la familia Industrial a 3 profesores (1 presidente, 1 secretario y un 1 vocal) para formar parte del Tribunal. Asimismo, se designará a un suplente que deberá estar presente en la constitución del tribunal y actuar como miembro cuando fuera necesario.

3. La composición del Tribunal se hará pública con suficiente antelación.

4. La designación de un profesor como miembro del Tribunal es irrenunciable, salvo causa de fuerza mayor o circunstancia especial que lo impida. En este último caso el profesor deberá solicitar su renuncia por escrito, dirigido al Subdirector-Jefe de Estudios y al director de departamento correspondiente, manifestando el motivo.

5. La designación de los profesores será rotativa. En el caso de fuerza mayor o circunstancia especial que impida actuar como tribunal a un miembro designado éste pasará a formar parte del tribunal inmediatamente siguiente.

8. PRESENTACIÓN A EXAMEN

1. *Sólo podrán proceder a la presentación del TFG los alumnos que hayan aprobado todos los demás créditos de la Titulación y tengan la conformidad del Tribunal a través de la ficha de asignación.*
2. *Para proceder a la presentación del TFG, el Director del proyecto o el Ponente, dará previamente su autorización por escrito, según la ficha de autorización recogida en el anexo, y, si lo considera oportuno, podrá acompañarla de un informe para el Tribunal.*
3. *Para realizar el examen, el alumno deberá entregar en el Negociado del Centro el documento TFG y su resumen, ambos en formato PDF, según las indicaciones del anexo al menos cinco días antes del comienzo del acto de presentación. Al inicio del TFG se ha de incluir un resumen que, junto con el título, deben estar redactados en español y en inglés.*
4. *El Jefe de Estudios propondrá la fecha y hora de convocatoria del Tribunal.*
5. *El Negociado del Centro será el encargado de publicar el lugar, fecha y hora para la presentación de los trabajos y hará llegar a cada miembro del Tribunal una copia (PDF) de los documentos del TFG, con una antelación de, al menos, cuatro días antes de la presentación del TFG. En el caso de que alguno de los miembros del Tribunal, a la vista de la memoria considere que el trabajo no tiene la calidad suficiente para ser declarado apto, al menos 24 horas antes de defensa pública lo comunicará al Subdirector-Jefe de Estudios de la titulación, que se lo hará saber al estudiante y al resto de miembros del tribunal. El Subdirector-Jefe de Estudios se reunirá con los miembros del Tribunal para resolver de la forma más adecuada.*
6. *Para que actúe el Tribunal deberán estar presentes tres miembros del mismo. La presidencia recaerá en el profesor de mayor categoría docente y antigüedad. Ejercerá como secretario el profesor de menor categoría docente y antigüedad.*
7. *La presentación ha de realizarse en formato póster en una sesión pública de hasta tres horas de duración como tiempo de referencia. Es decir, el alumno se apoyará en un póster de tamaño A1 y podrá añadir, opcionalmente, una presentación utilizando un ordenador portátil o la presentación de un demostrador en una pequeña mesa. La presentación consiste en que, a lo largo de la sesión, los miembros del tribunal (juntos o individualmente) reciben una explicación por parte del alumno y las respuestas a las preguntas que pudieran formular. El alumno se*

mantiene en el póster durante la sesión o bien se cita con los miembros del tribunal. Fuera del tiempo de explicación del alumno a los miembros del tribunal los posters quedan a exposición pública y el alumno puede atender a los interesados en el trabajo.

9. EVALUACIÓN DEL TFG

1. Una vez finalizadas todas las presentaciones de una convocatoria, el Tribunal calificará los TFG teniendo en cuenta la calidad del contenido del documento, la adecuación de la estructura, la claridad en la exposición, las respuestas dadas a las preguntas que le formulen y, en su caso, la información aportada por el Director del TFG.

2. El Tribunal rellenará el Acta con las calificaciones correspondientes y la firmará.

3. El Presidente entregará en el Negociado de la Escuela el Acta los documentos con las calificaciones del Trabajo Fin de Grado. El Negociado publicará las calificaciones.

4. Cuando parte del TFG haya sido realizado con la ayuda y participación de empresas privadas, el Director del Proyecto podrá solicitar a la Comisión Académica de los estudios correspondientes, que para su depósito en la biblioteca se entregue una versión de la memoria en la que aquellos datos confidenciales de la empresa o del TFG sean omitidos.

5. Los alumnos que lo soliciten recibirán por escrito una argumentación de las deficiencias observadas por el Tribunal.

10. REPOSITORIO UCrea

1. Con el fin de dar cumplimiento a la normativa sobre política institucional de acceso abierto a la producción académica, científica e investigadora de la Universidad de Cantabria (Repositorio Ucrea), una vez finalizada la presentación de los TFG, aquellos que resulten aprobados deberán depositarse en el repositorio institucional de acceso abierto de la UC.

2. Para realizar este depósito, la Secretaría del Centro enviará una copia de los trabajos en formato electrónico a la Biblioteca Universitaria junto con el documento de consentimiento de los autores y la modalidad de acceso elegida.

3. La Biblioteca se ocupará también de la conservación de los trabajos cuya difusión no haya sido autorizada por los autores y garantizará el acceso a los mismos para evaluadores, gestores u otras personas en los términos previstos en las disposiciones aplicables.

11.- PROYECTOS FIN DE GRADO REALIZADOS EN PROGRAMAS DE INTERCAMBIO (Adaptación de lo aprobado en JUNTA DE ESCUELA DE 26- Junio-2008)

En el caso de que un alumno que participe en un programa de intercambio: Erasmus, u otro, incluya el TFG en el acuerdo académico deberá presentar en el Negociado de la Escuela la memoria del Trabajo Fin de Grado en disco compacto, con carátula correspondiente e impresos solicitados a todos los estudiantes del Grado (autorización de consulta en línea y documento de recogida de datos de egresados)."

En el caso de que dicho alumno no se matricule del TFG, se aplicará el punto 1.11 del título VII de la Normativa de Gestión Académica.

11.1 Compromiso del estudiante

El estudiante se compromete a realizar su matrícula conforme a la normativa de la Universidad en general y del Centro en particular. En dicha matrícula deberán incluirse todas las asignaturas previstas en el impreso del Plan de Estudios.

Si el alumno no cumple el compromiso indicado en la normativa no se considera el TFG realizado en el programa de intercambio para su inclusión en el expediente.

Para el caso en el que el Alumno que participa en el programa de intercambio, incluyendo el TFG en el acuerdo académico, se haya matriculado en éste, pero al finalizar el programa de intercambio no haya superado todos los créditos del plan de estudios a excepción del TFG

a) Se le guarda la calificación a la espera de la última convocatoria del curso que corresponde a su programa de intercambio.

b) Si al finalizar el curso sigue en la misma circunstancia de no haber superado todos los créditos:

Se le asigna un director y podrá presentar el trabajo realizado en el programa de intercambio ante el tribunal de TFG cuando el director dé el "visto bueno" con la ficha de "autorización de presentación a examen".

No requiere el trámite de aprobación de la ficha de "asignación de título y director".

No requiere cambio de formato, sino que entrega el documento generado en la Universidad de destino, aportando un resumen en castellano e inglés.

El Presidente podrá solicitar al Coordinador Erasmus la calificación obtenida por el alumno en la Universidad de destino traducida al sistema Español.” (español).” Esta calificación no condiciona la decisión del tribunal.”

Esta normativa de la ETSIIyT nombra los impresos relativos a estas condiciones académicas y cita como anexos los siguientes:

- Ficha de asignación de título y director del Trabajo Fin de Grado
- Ficha de autorización de presentación a examen del Trabajo Fin de Grado
- Hoja de Resumen del Trabajo Fin de Grado
- Formatos (portada e índices generales) del documento Trabajo Fin de Grado

También nombra otro impreso de consentimiento para depósito en el repositorio institucional UCrea para dar cumplimiento a la normativa anterior de Gestión Académica, pero no se incluye en el anexo.

Adicionalmente, la ETSIIyT solicita otro impreso para el seguimiento de sus egresados. Los impresos administrativos necesarios pueden obtenerse en la web de la ETSIIyT y se relacionan a continuación:

- Ficha de asignación de título y director del Trabajo Fin de Grado
- Ficha de autorización de presentación a examen del Trabajo Fin de Grado
- Impreso de consentimiento UCrea
- Impreso de seguimiento de egresados

5. NORMAS TÉCNICAS FORMALES DEL DOCUMENTO

Sin perjuicio de las recomendaciones del apartado 4.2 y las instrucciones del apartado 4.3 sobre condiciones formales de estructura y edición del documento, el autor considera que en estos trabajos académicos resulta oportuno aplicar los criterios generales de los documentos profesionales Informe Pericial, Proyecto Técnico y Proyecto de actividad, regulados en las normas UNE 197001 de julio de 2019, UNE 157001 de junio de 2014, y UNE 157601 de julio de 2007. Por este motivo, a continuación, se establecen las condiciones formales del documento.

Dado el objeto del Trabajo Fin de Grado, se descarta el formato de proyecto de actividad y se adopta el de informe pericial con adiciones del formato de proyecto técnico. Estas condiciones se concretan en las correspondencias, modificaciones y consideraciones siguientes (en mayúsculas se nombran los documentos del TFG).

- Se atienden las consideraciones sobre título, identificación (inicial y final) y paginación del informe pericial.
- La declaración de tachas y el juramento o promesa del informe pericial no procede incluirlos y se descartan.
- Se adopta el índice general del informe de pericial agregando apartados para los documentos procedentes del formato del proyecto técnico, simplemente **ÍNDICE GENERAL** del TFG. En este sentido, el cuerpo del informe y los anejos se corresponden con la Memoria y los Anexos del TFG, respectivamente. Los apartados añadidos al Índice General se corresponden con documentos agregados que se citan más tarde y son: Planos, Pliego de Condiciones, Mediciones, Presupuesto y Estudios con Entidad Propia (si es el caso).
- El cuerpo del informe se corresponde con la memoria del proyecto técnico, simplemente **MEMORIA** del TFG. La memoria del TFG se estructura con las pautas de un informe pericial, en las siguientes partes: objeto, alcance, antecedentes, consideraciones preliminares, documentos de referencia, terminología y abreviaturas, desarrollo del estudio y conclusiones.

- Los anejos del informe se corresponden con los anexos del proyecto técnico, simplemente ANEXOS del TFG.
- Se añaden los documentos PLANOS, PLIEGO DE CONDICIONES, MEDICIONES y PRESUPUESTO como en los proyectos técnicos.
- El documento MEDICIONES no procede porque este trabajo no comporta una realización material ni actividades experimentales. Carece de contenido concreto.
- El documento PRESUPUESTO no procede porque este trabajo no comporta una realización material ni ha requerido costes económicos de desarrollo. Carece de contenido concreto.
- No se incluye el documento ESTUDIOS CON ENTIDAD PROPIA.

En relación con el apartado Documentos de referencia de la Memoria se establecen las condiciones de presentación de referencias conforme a los indicado en la norma UNE-ISO 690:2013, subapartado 5.2 en este apartado.

5.1 Norma de Informes Periciales UNE 197001

A continuación, se incluyen los contenidos de la norma sobre criterios generales para la elaboración de informes periciales, que serán de aplicación en el formato de este TFG. Los puntos 0 a 4 de la norma no son de aplicación en los TFG.

El contenido del TFG atenderá a lo indicado en el apartado 5, sobre contenido del informe pericial, que extractamos y relacionamos a continuación:

“Todo informe pericial debe constar de la siguiente estructura básica:

a) Título.

b) Identificación.

c) Paginación.”

La declaración de tachas y el requisito de veracidad no son de aplicación en los TFG y no forman parte del contenido del TFG.

“f) Índice del cuerpo del informe y de los anejos (si procede).

g) Cuerpo del informe.

h) Anejos (si procede).

5.1 Título

Todo informe pericial debe tener un título que lo identifique de forma clara e inequívoca.

5.2 Identificación

Es el elemento que contiene los datos necesarios, que a continuación se detallan, para identificar el informe pericial:

5.2.1 Al inicio del informe

a) El título y su código o referencia de identificación. Debe existir una correspondencia unívoca entre el código o la referencia del informe correspondiente, de forma que no pueda haber en un mismo emisor otro informe que disponga de la misma identificación.

b) El nombre del organismo u organismos a los que se dirige el informe pericial y el número de expediente o procedimiento, si lo hubiera.

c) El nombre y apellidos del perito, su titulación, y, en su caso, colegio o entidad a la que pertenece, número de colegiado/asociado y si dispone de número de registro como profesional experto certificado o certificado de cualificación profesional en la materia objeto de la pericia, documento de identificación, domicilio profesional, teléfono, fax, correo electrónico y cualquier otro identificador profesional que pudiera existir, salvo aquellos cuya revelación no sea legalmente procedente.

d) El nombre, apellidos y documento de identificación del solicitante del informe pericial, sea en nombre propio o en representación de otra persona física o jurídica, cuyos datos también deben figurar y cualquier otro identificador que pudiera existir, cuya revelación sea legalmente procedente.

e) En el caso en que el objeto del informe pericial contemple un emplazamiento geográfico concreto, se debe definir dicho emplazamiento (dirección y población) y, si procede, sus coordenadas geográficas.”

Los puntos f y g no son de aplicación en los TFG.

h) Cuando proceda, si existen más de un informe sobre un mismo asunto, ampliación o corrección, estos deben estar clara e inequívocamente identificados, indicando la referencia.

5.2.2 Al final del informe

a) Cuando proceda, la descripción del sistema del aseguramiento de la integridad del informe, utilizado por el perito.

b) La firma del perito o peritos autores del informe pericial.

c) La fecha de emisión del informe pericial.

5.3 Paginación

En todas las páginas del informe pericial debe figurar el código o referencia de identificación, el número de página y el número total de páginas.”

La declaración de tachas y el requisito de veracidad no son de aplicación en los TFG.

5.6 Índice general del cuerpo del informe y de los anejos

El índice general del informe pericial tiene como misión el facilitar la localización de todos y cada uno de los capítulos y apartados.

El índice debe indicar el número de página en que se inicia cada uno de los capítulos y apartados del informe pericial.

5.7 Cuerpo del informe pericial

5.7.1 Generalidades

El cuerpo del informe pericial es el documento principal de su estructura y asume la función de presentar y justificar las conclusiones.

El cuerpo del informe pericial debe ser claramente comprensible por todos los interesados, especialmente en lo que se refiere a sus objetivos, las investigaciones realizadas y las razones que han conducido a las conclusiones adoptadas.

5.7.2 Contenido

El orden y la denominación de los capítulos propuestos pueden variar si existen normas específicas para el tipo de pericia desarrollada o la entidad que va a realizar la pericial tiene procedimientos específicos.

A continuación, se indica la estructura mínima que debe tener el contenido de un informe pericial:

1 OBJETO

En este capítulo del cuerpo del informe pericial se debe indicar su finalidad.

2 ALCANCE

En este capítulo del cuerpo del informe pericial se deben indicar las cuestiones planteadas por el solicitante.

3 ANTECEDENTES

En este capítulo se deben indicar los hechos, cosas, sucesos o asuntos que se hayan producido con anterioridad al inicio del informe pericial, relacionados con la pericia en curso y que estén en conocimiento del perito.

4 CONSIDERACIONES PRELIMINARES

En este capítulo del cuerpo del informe pericial se deben enumerar todos aquellos datos de partida y actuaciones necesarias para la comprensión de la investigación llevada a cabo y su metodología empleada.

Se podrá incluir, en caso necesario, los criterios y técnicas utilizadas para garantizar la representatividad de la muestra objeto del informe pericial.

5 DOCUMENTOS DE REFERENCIA

Este capítulo del cuerpo del informe pericial debe recoger el conjunto de disposiciones normativas, otras normas de no obligado cumplimiento, la buena práctica profesional y la bibliografía que se han tenido en cuenta, y que hayan sido citadas en el informe pericial.

6 TERMINOLOGÍA Y ABREVIATURAS

En este capítulo del cuerpo del informe pericial se deben relacionar todas las definiciones de palabras técnicas, así como el desarrollo y significado de todas las abreviaturas o siglas que se hayan utilizado en el informe pericial.”

El punto 7 del contenido de informe pericial, relativo al desarrollo del estudio, es la parte central del TFG y también de su Memoria. Su estructura será acorde con la naturaleza del contenido técnico del TFG. No se establecen condiciones particulares para esta parte de la Memoria (desarrollo del estudio) en este Pliego de Condiciones.

8 CONCLUSIONES

En este capítulo del cuerpo del informe pericial se debe establecer de forma inequívoca la exposición técnica y experta resumida que se emite sobre los extremos que constan en el apartado 5.7.2 (punto 2 ALCANCE).

NOTA Se pueden añadir consideraciones adicionales que a juicio del perito maticen las conclusiones.

5.8 anejos

Los anejos forman parte inseparable de la estructura del informe pericial, y deben estar recogidos en el índice general.

Asimismo, deben estar identificados de manera correlativa y paginados de forma inequívoca.

Como anejo, el perito puede incluir las referencias, documentos, planos, fotografías, muestras y procedimientos de toma y conservación de estas, etc. que puedan fundamentar las conclusiones del informe pericial.”

5.2 Norma de Proyectos Técnicos UNE 157001

A continuación, se incluyen algunos contenidos de la norma sobre criterios generales para la elaboración formal de los documentos que constituyen un proyecto técnico, que se aplicarán en el formato y edición de este TFG. Los puntos 0 a 5 de la norma no se aplican en los TFG con este tipo de estudios.

El contenido del TFG atenderá a lo indicado en los extractos de los apartados 6 a 11 que recopilamos a continuación.

En relación con el apartado 6, sobre la memoria, y subapartado 6.1 sobre generalidades se indican las siguientes condiciones a aplicar en el documento Memoria del TFG:

“La Memoria es uno de los documentos que constituyen el Proyecto y asume la función fundamental de nexo de unión entre todos ellos.

Tiene como misión justificar las soluciones adoptadas” y sigue “y, conjuntamente con los planos y el pliego de condiciones, debe describir de forma unívoca el objeto del Proyecto.

La Memoria debe ser claramente comprensible, no sólo por profesionales especialistas sino por terceros, en particular por el cliente, y especialmente en lo que se refiere a los objetivos

del Proyecto, las alternativas estudiadas, sus ventajas e inconvenientes, y las razones que han conducido a la solución elegida.”

Se añaden estas condiciones del subapartado 6.10 sobre el orden de prioridad entre los documentos:

“En este capítulo de la memoria el autor del Proyecto, frente a posibles discrepancias, debe establecer el orden de prioridad de los documentos del Proyecto.

Si no se especifica otra cosa, el orden de prioridad debe ser el siguiente:

1 Planos.

2 Pliego de condiciones.

3 Presupuesto.

4 Memoria.

En relación con el apartado 7, sobre los anexos, se indican las siguientes condiciones a aplicar en el documento Anexos del TFG:

7.1 Generalidades

El documento Anexos está formado por los documentos que desarrollan, justifican o aclaran apartados específicos de la memoria u otros documentos del Proyecto.

7.2 Contenido

El documento Anexos, si forma parte de un volumen distinto al documento principal, se debe iniciar con un índice que haga referencia a cada uno de los documentos, capítulos y apartados que lo componen, con el fin de facilitar su utilización.

Este documento debe contener los anejos necesarios (según proceda en cada caso) correspondientes a:

- Documentación de partida. Este Anexo debe incluir aquellos documentos que se han tenido en cuenta para establecer los requisitos de diseño.

- Cálculos. Este Anexo o Anexos tienen como misión justificar las fórmulas aplicadas, las soluciones adoptadas y, conjuntamente con los documentos planos y el pliego de condiciones, debe describir de forma unívoca el objeto del Proyecto.

Debe contener las hipótesis de partida, los criterios y procedimientos de cálculo, así como los resultados finales base del dimensionado o comprobación de los distintos elementos que constituyen el objeto del Proyecto.

- Anexos de aplicación en función del ámbito del Proyecto, son, por ejemplo:

- Seguridad (prevención de incendios, sanidad, radiaciones, pública concurrencia, etc.).

- Medio ambiente (acústica, residuos, emisiones, etc.).

- Eficiencia energética.

- Emplazamiento del proyecto, Geotécnicos, Hidráulicos, Hidrológicos, Pluviométricos, etc.

- Gestión de residuos.

- Otros.

- Estudios con entidad propia

Este documento debe contener todos aquellos estudios que deban incluirse en el Proyecto por exigencias legales.

Debe comprender, entre otros y sin carácter limitativo, los relativos a:

- Estudio Básico de Seguridad y Salud o Estudio de Seguridad y Salud, según corresponda.

- Estudio de Impacto Ambiental.

Cada anexo debe contener la justificación del cumplimiento de la normativa legal vigente aplicable y, si procede, de las fórmulas aplicadas para el cálculo.

- Otros documentos que justifiquen y aclaren conceptos expresados en el Proyecto

Se pueden incluir:

- Catálogos de los elementos constitutivos del objeto del Proyecto.

- Listados.

- Información en soportes lógicos, magnéticos, ópticos o cualquier otro.

- *Maquetas o modelos.*
- *Otros documentos que se juzguen necesarios.”*

En relación con el apartado 8, sobre los planos, se indican las siguientes condiciones a aplicar en el documento Planos del TFG:

8.1 Generalidades

El documento Planos es uno de los documentos que constituyen el Proyecto y tiene como misión, junto con la memoria, definir de forma unívoca el objeto del Proyecto.

8.2 Contenido

El documento Planos se debe iniciar con un índice que haga referencia a cada uno de los planos que contiene, indicando su ubicación en el documento, con el fin de facilitar su utilización.

Cada uno de los planos debe contener la información gráfica, alfanumérica, de códigos y de escala, necesaria para su comprensión y correcta ejecución de lo representado.

Los planos y la documentación técnica, en cuanto a principios generales de representación, cajetines, indicaciones, escritura, rotulación, acotación, símbolos gráficos, plegado, listas de elementos, escalas, métodos de proyección, formatos y presentación de los elementos gráficos y gestión de la información técnica asistida por ordenador, deben tener en cuenta, salvo indicación en contra del autor del Proyecto, lo indicado en las siguientes Normas: UNE 1027, UNE 1032, UNE 1035, UNE 1039, UNE 1089-1, UNE 1089-2, UNE 1135, UNE 1166-1, UNE-EN ISO 3098-0, UNE-EN ISO 3098-2, UNE-EN ISO 3098-3, UNE-EN ISO 3098-4, UNE-EN ISO 3098-5, UNE-EN ISO 3098-6, UNE-EN ISO 5455, UNE-EN ISO 5456-1, UNE-EN ISO 5456-2, UNE-EN ISO 5456-3, UNE-EN ISO 5457, UNE-EN ISO 6433, UNE-EN ISO 10209-2, UNE-EN ISO 11442-1, UNE-EN ISO 11442-2, UNE-EN ISO 11442-3, UNE-EN ISO 11442-4, UNE-EN ISO 81714-1.

En relación con el apartado 9, sobre el pliego de condiciones, se indican las siguientes recomendaciones generales a aplicar en este documento Pliego de Condiciones del TFG:

“El Pliego de condiciones se debe iniciar con un índice que haga referencia a cada uno de los documentos, los capítulos y apartados que lo componen, con el fin de facilitar su utilización”.

Debe contener: indicando sobre contenido relativo a normas y reglamentación en uno de sus puntos "d) La reglamentación y la normativa aplicables incluyendo las recomendaciones o normas de no obligado cumplimiento que, sin ser preceptivas, se consideran de necesaria aplicación al Proyecto a criterio de su autor."

En relación con el apartado 10, sobre mediciones, se indican las siguientes recomendaciones a aplicar en el documento Mediciones del TFG:

Sobre generalidades, "El documento mediciones es uno de los documentos del Proyecto y tiene como misión definir y determinar las unidades de cada partida o unidad de obra que configuran la totalidad del producto, obra, edificio, instalación y servicios objeto del Proyecto, basándose en la información contenida en el documento "Planos".

Debe incluir el número de unidades y definir las características, modelos, tipos y dimensiones de cada partida de obra o elemento del objeto del Proyecto.

Preferentemente se debe utilizar el sistema internacional de unidades conforme a la Norma UNE 82100 (partes 0 a 13).

Se debe utilizar el concepto de partida alzada en aquellas unidades de obra en que no sea posible desglosar, en forma razonable, el detalle de estas."

Y sobre contenido, "El documento Mediciones, si forma parte de un volumen distinto al principal, se debe iniciar con un índice que haga referencia a cada uno de los documentos, los capítulos y apartados que lo componen, con el fin de facilitar su utilización.

Debe contener un listado completo de las partidas de obra que configuran la totalidad del Proyecto.

Se debe subdividir en distintos apartados o subapartados, correspondientes a las partes más significativas del objeto del Proyecto.

Debe servir de base para la realización del Presupuesto."

Con relación al apartado 11, sobre presupuesto, se indican las siguientes recomendaciones a aplicar en el documento Presupuesto del TFG:

Sobre generalidades, *“El Presupuesto es uno de los documentos del Proyecto y tiene como misión determinar el coste económico, en unidades monetarias, de la ejecución material del objeto del Proyecto especificando las partidas ejecutadas por contrata y/o por administración.*

Se debe basar en el documento de Mediciones y seguir su misma ordenación.

En los proyectos administrativos es suficiente un resumen de las partidas más importantes (obras, cada una de las instalaciones, mobiliario y maquinaria, medidas correctoras, prevención de incendios, etc.).”

Y sobre contenido, *“El Presupuesto se debe iniciar con un índice que haga referencia a cada uno de los documentos, los capítulos y apartados que lo componen, con el fin de facilitar su utilización.*

El Presupuesto debe contener:

- un cuadro de precios unitarios de materiales, mano de obra y elementos auxiliares que componen las partidas o unidades de obra;*
- un cuadro de precios unitarios de las unidades de obra, de acuerdo con el documento de mediciones y con la descomposición correspondiente de materiales, mano de obra, elementos auxiliares y costes indirectos;*
- el presupuesto propiamente dicho que contenga la valoración económica global, desglosada y ordenada según el documento de mediciones.*

El Presupuesto debe establecer el alcance de los precios, indicando claramente si incluyen o no conceptos tales como:

- gastos generales y beneficio industrial;*
- impuestos, tasas y otras contribuciones;*
- seguros;*
- costes de certificación y visado;*
- permisos y licencias;*
- cualquier otro concepto que influya en el coste final de materialización del objeto del proyecto.”*

5.3 Norma sobre Información y documentación, de directrices para la redacción de referencias bibliográficas y de citas de recursos de información.

La citación y listado de documentos referenciados en cualquier parte del TFG atenderá a las condiciones estipuladas en la norma UNE-ISO 690 de mayo de 2013.

PRESUPUESTO

En este Trabajo de Fin de Grado (TFG), se ha optado por no considerar el aspecto económico, tal como se detalló en la sección de alcance, por lo tanto, tampoco se ha elaborado un presupuesto, como suele ser habitual en este tipo de estudios. Sin embargo, de haberse realizado la presupuestación, habría sido necesario tener en cuenta ciertos puntos específicos del trabajo. Por ejemplo, en la elección de materiales, como la lámina de acero para el núcleo y la preferencia del cobre sobre el aluminio a pesar de su menor costo. Asimismo, al seleccionar el refrigerante, se deberían considerar los posibles costos de mantenimiento futuro.

El presupuesto también incluiría el costo de la licencia del software utilizado, JMAG, cuyo precio ronda los 1000 euros, dependiendo de la versión, así como el de un programa para la generación del diseño 3D.

Además, se tendría en cuenta el costo de la mano de obra para realizar los cálculos, el uso del software JMAG e incluso un posible proceso de aprendizaje previo si fuera necesario, así como la redacción del proyecto final. Los materiales y el ensamblaje de las piezas representarían la mayor parte del presupuesto, especialmente en el caso de transformadores de gran potencia, donde estos costos pueden ser significativos.

A pesar de todos estos gastos, debido a las bajas pérdidas y la larga vida útil de los transformadores, los clientes tienen la posibilidad de amortizar su inversión a lo largo del tiempo, lo que les permite hacer frente al desembolso necesario para adquirir uno.

IDENTIFICACIÓN FINAL

ASEGURAMIENTO DE LA INTEGRIDAD DEL TRABAJO FIN DE GRADO	
Normativa general	- Orden CIN/351/2009 del Ministerio de Ciencia e Innovación de 9 de febrero
Normativa legal universitaria	- Real Decreto 822/2021 de 28 de septiembre - Resolución de 15 de abril de 2013 de la UC - Memoria de verificación del Grado Universitario en Ingeniería en Tecnologías Industriales de la UC
Normativa administrativa universitaria	- Acuerdo de Consejo de Gobierno de la UC de 17 de febrero de 2023 (gestión académica de grado) - Guía Docente de la asignatura G733 del TFG - Acuerdo de Comisión Académica de la ETSIIyT de 19 de noviembre de 2021 (normas TFG-GITI) - Repositorio Ucrea (https://web.unican.es/buc)
PRESENTACIÓN Y DEFENSA DEL TRABAJO FIN DE GRADO	
Lugar	Sala: Vestíbulo ETSIIyT Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación (ETSIIT). Universidad de Cantabria (UC)
Fecha	21 de junio de 2024
Tribunal académico	Presidente: Sancibrian Herrera, Ramon Secretario: Diaz Rodríguez, F. Javier Vocales: Bernardos Llorente, Pilar
FIRMA DEL AUTOR Y FECHA	