



Universidad de Sevilla  
Escuela Politécnica Superior de Sevilla



Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Eléctrica

# **Análisis Electromagnético de un Transformador Trifásico Mediante el Método de los Elementos Finitos**

Autor:  
Sergio Guzmán Molina

Tutor:  
Juan Carlos Del Pino López  
Profesor Titular de Universidad

Dpto. de Ingeniería Eléctrica  
Escuela Politécnica Superior  
Universidad de Sevilla  
Abril de 2020

## INDICE DE CONTENIDOS

1.	RESUMEN .....	4
2.	INTRODUCCIÓN .....	5
3.	OBJETO DEL TFG .....	6
4.	TEORÍA DEL TRANSFORMADOR .....	7
4.1.	DEFINICIÓN .....	7
4.2.	ASPECTOS CONSTRUCTIVOS .....	8
4.2.1.	NÚCLEO.....	8
4.2.2.	DEVANADOS.....	9
4.2.3.	AISLADORES.....	9
4.2.4.	REFRIGERACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES .....	10
4.3.	PROTECCIONES DE UN TRANSFORMADOR DE ACEITE.....	13
4.3.1.	DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN TÉRMICA.....	13
4.3.2.	INDICADOR DE NIVEL DE ACEITE Y LIBERADOR DE PRESIÓN .....	14
4.3.3.	PROTECCIÓN BUCHHOLZ.....	14
4.3.4.	OTRAS PROTECCIONES.....	15
4.4.	ESTUDIO ELÉCTRICO DEL TRANSFORMADOR.....	15
4.4.1.	INTRODUCCIÓN.....	15
4.4.2.	CIRCUITO EQUIVALENTE .....	17
4.4.3.	CIRCUITO EQUIVALENTE TRIFÁSICO.....	20
4.4.4.	ENSAYOS TRANSFORMADOR .....	24
4.4.5.	PÉRDIDAS Y RENDIMIENTO .....	27
5.	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	31
5.1.	COMSOL MULTIPHYSICS.....	32
5.1.1.	ESTRUCTURA COMSOL .....	32
6.	DISEÑO DEL MODELO.....	38
6.1.	DATOS ELÉCTRICOS TRANSFORMADOR.....	39
6.2.	DATOS MATERIALES USADOS .....	39
6.2.1.	ACERO AL CARBONO.....	41
6.2.2.	COBRE.....	42
6.2.3.	REFRIGERANTE.....	43
6.3.	SIMPLIFICACIONES REALIZADAS EN LA GEOMETRÍA.....	45
6.3.1.	NÚCLEO.....	46
6.3.2.	DEVANADOS .....	46
6.3.3.	ESTRUCTURA DEL NÚCLEO.....	47
6.3.4.	CUBA Y DEPÓSITO DE EXPANSIÓN.....	48

6.4.	FÍSICAS USADAS .....	48
6.4.1.	CAMPOS MAGNÉTICOS (MAGNETIC FIELDS). .....	48
6.4.2.	TRANSFERENCIA DE CALOR EN SÓLIDOS Y FLUIDOS. ....	51
6.4.3.	FLUJO LAMINAR. ....	53
6.4.4.	MULTIFÍSICA. ....	54
6.5.	MALLADO.....	55
6.6.	CONDICIONES DEL ESTUDIO. ....	56
7.	RESULTADOS OBTENIDOS. ....	60
7.1.	ENSAYO ELECTROMAGNÉTICO. ....	60
7.2.	MOVIMIENTO DEL FLUIDO. ....	62
7.3.	EFFECTO DE LA TEMPERATURA AMBIENTE Y DE LA REFRIGERACIÓN EXTERNA. ....	63
7.4.	COMPORTAMIENTO DEL TRANSFORMADOR ANTE VARIAS SITUACIONES DE CARGA MODIFICANDO LA REFRIGERACIÓN EXTERNA. ...	65
7.5.	INFLUENCIA DE LA RADIACIÓN AL AMBIENTE.....	68
7.6.	FUNCIONAMIENTO CON SOBRETENSIÓN. ....	69
7.7.	COMPROBACIÓN DE LA REVERSIBILIDAD DEL TRANSFORMADOR. ...	71
7.8.	EFFECTO DE LA PRESENCIA DEL DEPÓSITO DE EXPANSIÓN EN LA TEMPERATURA. ....	72
7.9.	EFFECTO DEL TAMAÑO DE LA CUBA EN LA REFRIGERACIÓN.....	74
7.10.	CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO EN EL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN... ..	76
7.11.	CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BOBINA SECUNDARIA. ....	78
7.12.	SISTEMA DE CARGA DESEQUILIBRADO.....	80
8.	CONCLUSIONES. ....	81
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	82

## **1. RESUMEN**

El objetivo de este proyecto es diseñar en 3D un transformador trifásico con depósito de expansión para así analizar mediante un programa de cálculo del método de elementos finitos los calentamientos que sufre, en su funcionamiento, los diferentes elementos de este.

## **2. INTRODUCCIÓN**

Debido a la importancia de los transformadores en la red de distribución se hace necesario tener un control de todas las variables eléctricas con el fin de establecer criterios de seguridad para que, en caso de avería o defecto, afecten a la mínima parte del sistema.

Los transformadores de aceite mineral son transformadores herméticos que, debido al calentamiento de sus devanados en su funcionamiento, sería peligroso no evacuar de manera correcta dicho calor, dado que, la temperatura de ignición de dicho aceite es relativamente baja. Por esto, es necesario establecer unos controles de dicha temperatura en función del lugar de instalación de este y de la temperatura externa a la que va a estar sometido.

Esto también ocasiona que se deban implementar en las instalaciones sistemas de seguridad pasivos con el fin de minimizar los daños en caso de incendio, como, por ejemplo, elementos constructivos resistentes a la ignición o dispositivos de recogida de aceite en caso de escape de este.

Debido a la infinidad de situaciones de instalación del transformador y para optimizar su funcionamiento, se están implementado cada vez más sistemas de cálculo por ordenador con el fin de aumentar la seguridad en las diferentes condiciones. Esto simplifica, en los sistemas de producción, la realización de prototipos para ensayar la máquina.

### **3. OBJETO DEL TFG**

El objetivo de este TFG es el de diseñar un transformador trifásico mediante un programa de diseño en 3D y analizar los comportamientos electromagnéticos, así como los calentamientos que sufre este debido a su funcionamiento.

En primer lugar, se expondrán todos los conocimientos básicos que se deben conocer a la hora de abordar al transformador como una máquina real y, posteriormente, se procederá a implementar todas las variables físicas en un programa capaz de unificar las físicas magnéticas, eléctricas y térmicas.

Una vez diseñado en 3D e implementadas todas las variables dentro del programa, se realizarán los cálculos pertinentes para estudiar la validez de este método y poder aplicarlo a situaciones reales.

## **4. TEORÍA DEL TRANSFORMADOR**

### **4.1. DEFINICIÓN**

Un transformador es una máquina eléctrica estática reversible capaz de transformar unos valores de tensión e intensidad en otros, generalmente diferentes, manteniendo la potencia eléctrica y sin prácticamente pérdidas.

El uso de los transformadores ha facilitado el transporte de la energía eléctrica desde los puntos de producción hasta los puntos de consumo.

A la salida de las centrales eléctricas es necesario elevar la tensión para que durante el transporte de la energía eléctrica existan menos pérdidas en las líneas. Dado que dicha tensión no es apta para el uso doméstico e industrial, en la mayoría de los casos, se procede a realizar una conversión de tensión a una inferior cerca de los puntos de consumo para así minimizar las pérdidas ocasionadas.

Hay que tener en cuenta que, debido a la transformación de tensión, la intensidad se ve reducida en la misma proporción, es decir, si se aumenta tres veces la tensión, la intensidad se verá reducida tres veces del devanado primario al devanado secundario.

Cabe recordar que las pérdidas por efecto Joule son proporcionales al cuadrado de la intensidad por la resistencia eléctrica que presente el elemento, dado lo anterior, se puede apreciar la disminución drástica y el uso necesario del transformador en el sistema de distribución de energía eléctrica.

## 4.2. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

El transformador consta de las siguientes partes principales:

- A. Núcleo.
- B. Devanado Primario (generalmente de Alta Tensión, en adelante A.T.).
- C. Devanado Secundario (generalmente de Baja Tensión, en adelante B.T.).
- D. Aisladores pasantes de salida.
- E. Sistemas de refrigeración.

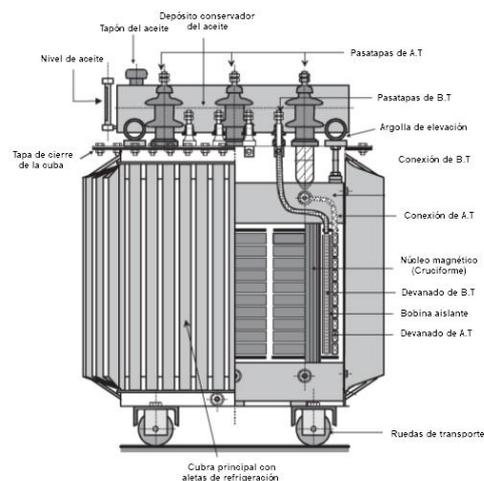


Figura 1: Aspectos constructivos transformador

### 4.2.1. NÚCLEO

El núcleo del transformador es el sistema que forma su circuito magnético. Está constituido por chapas apiladas de acero al silicio recubiertas de una capa de aislante, denominada carlite, muy delgada reduciendo así las pérdidas en el núcleo.

El núcleo está formado por columnas donde se alojan los devanados. Las columnas de los devanados (primario y secundario) son del mismo material ferromagnético y tienen las mismas dimensiones geométricas (figura 2).

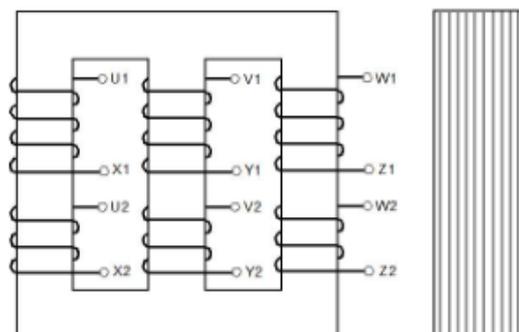


Figura 2: Transformador trifásico de tres columnas

### 4.2.2.DEVANADOS

Constituyen el circuito eléctrico del transformador. Está formado por conductores de cobre, en forma de hilos cilíndricos para diámetros inferior a 4mm o pletinas de cobre cuando se requieren secciones mayores.

Los conductores están recubiertos de una capa aislante, que suelen ser barnizados en el caso de hilos conductores o formado por una o varias capas de fibra de algodón o cinta de papel para el caso de pletinas de cobre.

Según sea la disposición de los devanados de A.T. y de B.T, pueden ser concéntricos o alternados. En los devanados concéntricos los bobinados tienen forma de cilindros coaxiales mientras que en los devanados alternados, las bobinas se subdividen en secciones, de tal forma que los devanados de A.T. y B.T. se suceden alternativamente a lo largo de la columna.

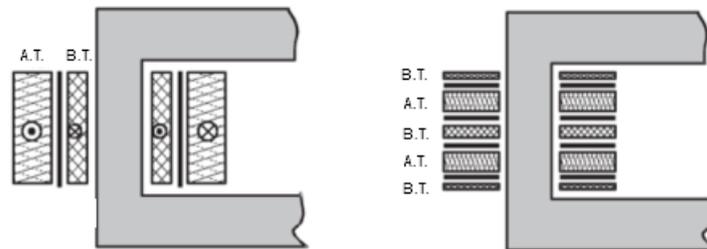


Figura 3: Devanados concéntricos y alternados

### 4.2.3.AISLADORES

Los terminales de las bobinas pasan a la red a través de la cuba mediante unos aisladores pasantes (pasatapas) de porcelana, rellenos de aire o aceite. La misión de este elemento es sujetar mecánicamente a los conductores que forman parte de la línea, manteniéndolos aislados de tierra y de otros conductores.



Figura 4: Pasatapas (Schneider Electric)

#### **4.2.4.REFRIGERACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES**

En un transformador existen una serie de pérdidas que se transforman en calor contribuyendo así al calentamiento de la máquina.

Para que este elevamiento de la temperatura no afecte a los devanados, se deben dotar de unos sistemas de refrigeración adecuados a las condiciones de funcionamiento del transformador.

Existen varios tipos según el medio refrigerante:

A- Transformadores en baño de aceite.

B- Transformadores de aislamiento sólido a base de resinas, denominados “transformadores secos”.

##### **4.2.4.1. TRANSFORMADOR EN BAÑO DE ACEITE**

Existen dos tipos: de llenado integral y con depósito de expansión.

Los transformadores de llenado integral son transformadores herméticos en los cuales, las bobinas junto con el núcleo están introducidas en el interior de una carcasa o envoltente metálica, denominada cuba, inmersos en aceite mineral que tienen varias misiones, se encargan de refrigerar, aislar y sirven de antioxidante de los elementos internos.

La cuba de dichos transformadores posee aletas de refrigeración en las cuales se consigue enfriar el aceite interno mediante dos métodos:

- a. Circulación natural del aceite a través de radiadores enfriados por aire natural, denominados ONAN (Oil Natural-Air Natural).
- b. Circulación natural del aceite a través de radiadores enfriados por aire forzado, denominados ONAF (Oil Natural-Air Forced). Dicha circulación forzada se realiza mediante ventiladores acoplados a los radiadores.

En el caso de los transformadores con depósito de expansión, poseen un depósito colocado en la parte alta del transformador. La misión de este depósito es doble, por una parte, se logra que la cuba del transformador esté completamente llena de aceite y, por otra parte, este depósito es el que absorbe las dilataciones del aceite.

En los transformadores que usan aceite como medio refrigerante hay que tener especial cuidado con las temperaturas que alcanzan internamente ya que dicho aceite es muy inflamable a baja temperatura.

Las normas UNE de transformadores indican los siguientes valores:

- Temperatura ambiente.
  - o Máxima 40°C.
  - o Media diaria no superior a 30°C.
  - o Media anual no superior a 20°C.

- Los calentamientos admisibles son:
  - o Arrollamientos con aislamientos clase A y circulación natural del aceite 65°C.
  - o Aceite en su capa superior, en transformadores con depósito de expansión o bien de llenado integral: 60°C.

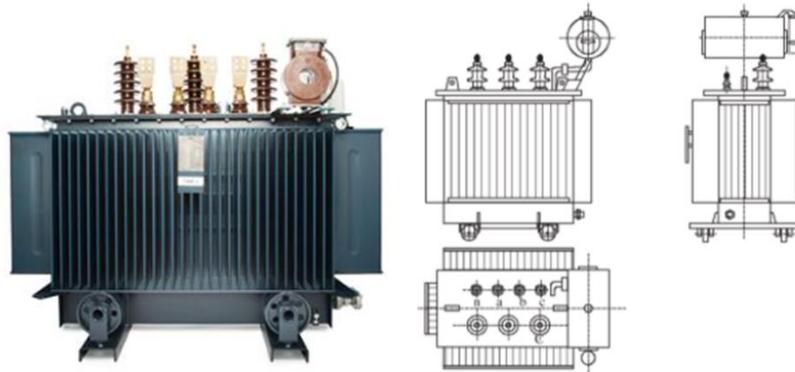


Figura 5: Transformador de llenado integral y con depósito de expansión

<i>Naturaleza del refrigerante</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Naturaleza de la circulación</i>	<i>Símbolo</i>
Aceite mineral	O	Natural	N
Piraleño	L	Forzada	F
Gas	G		
Agua	W		
Aire	A		
Aislante sólido	S		

Tabla 1: Símbolos usados para representar la naturaleza del refrigerante y la forma de

#### 4.2.4.2. TRANSFORMADOR SECO

En estos transformadores las bobinas están dispuestas en el interior de una carcasa o envoltorio metálica con el núcleo al aire. Cada devanado está protegido y aislado mediante una carcasa o recubrimiento metálico individual.

Sus arrollamientos están encapsulados dentro de resina mezclada con sílice y alúmina hidratada y con aditivos endurecedor y flexibilizador.

En este tipo el refrigerante se trata del aire natural que envuelve al transformador, carece de aceite u otro medio.

Hay que tener en cuenta que dichos transformadores aguantan mayores temperaturas dado que sus elementos son autoextinguibles y no producen gases tóxicos o venenosos.



Figura 6: Transformador seco (Schneider Electric)

## 4.3. PROTECCIONES DE UN TRANSFORMADOR DE ACEITE

Las principales son:

- A- Dispositivos de protección térmica.
- B- Indicador de nivel de aceite y liberador de presión.
- C- Protección Buchholz.
- D- Otras protecciones.

### 4.3.1. DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN TÉRMICA

En los transformadores en servicio existen dos fuentes de calor fundamentales:

- El calor generado por el circuito magnético debido a las pérdidas por histéresis magnética y de Foucault.
- El calor producido por las pérdidas por efecto Joule en los devanados.

Debido a esto y al estar completamente sumergido en aceite y de manera hermética, se hace indispensable el tener un control de la temperatura.

Las principales formas de medir la temperatura del aceite son mediante dos dispositivos: los termómetros y los termostatos.

En los termómetros se hace una lectura de la temperatura en la capa superior de aceite indicándolo, mediante una esfera graduada, fuera de la cuba.

En el caso de los termostatos, este detecta las variaciones de temperatura a la que está sometido, haciendo actuar unos contactos eléctricos acoplados a él cuando se excede de unos valores previamente definidos.

Aunque estos dispositivos midan la temperatura del aceite en su zona más caliente, la capa superior, cabe destacar que esta temperatura será un valor medio, ya que el transformador puede sufrir calentamientos puntuales y no ser detectados, por ejemplo, debido a un cortocircuito en sus devanados. Debido a eso, estos dispositivos se usan generalmente para sobrecargas permanentes.



Figura 7: Termómetro (Schneider Electric)

### 4.3.2.INDICADOR DE NIVEL DE ACEITE Y LIBERADOR DE PRESIÓN

Sirve para controlar el nivel de aceite. Generalmente va colocado en un lateral del depósito de expansión. Poseen contactos para dar la alarma si el nivel de aceite decae demasiado comprometiendo el estado del transformador.

Cuando existen problemas internos en el transformador, por ejemplo, cortocircuitos, estos aumentan excesivamente la temperatura del aceite haciendo que evapore. Estos gases, provocados por dicha evaporación, son necesarios evacuarlos dado que podrían generar una sobrepresión interna llegando a deformar la cuba. Para evitar esto se coloca el liberador de presión.

### 4.3.3.PROTECCIÓN BUCHHOLZ

El relé Buchholz se coloca entre la tubería que va desde la cuba al depósito de expansión.

Cuando se produce una avería interna del transformador se originan burbujas de gas que se elevan hasta la parte superior del depósito de expansión. Estas burbujas son detectadas en su recorrido por el relé de forma que, si se trata de una avería leve, es decir, pocas burbujas, da la señal de alarma, y si se trata de una avería grave, provocando mayor concentración de gas, desconecta el transformador.

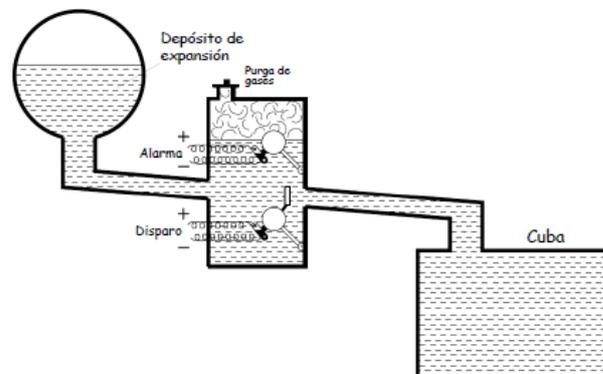


Figura 8:Relé Buchholz

### 4.3.4.OTRAS PROTECCIONES.

Existen otras protecciones controladas por transformadores de intensidad y de tensión que miden las variables eléctricas mediante dispositivos externos, de forma que si se ven alteradas se pueda tomar medidas sobre la actuación del transformador.

No es necesario describir este tipo de protecciones en este proyecto, ya que, en su mayoría, va a centrarse en los calentamientos internos debido a su funcionamiento a plena carga y a la importancia de mantener dicha temperatura en unos niveles aceptables, sin tener en cuenta la variabilidad de las condiciones de carga.

## 4.4. ESTUDIO ELÉCTRICO DEL TRANSFORMADOR

### 4.4.1.INTRODUCCIÓN.

Al aplicar una tensión alterna en el devanado primario, la circulación de una corriente por este hace que se produzca un flujo magnético variable, induciendo en el devanado secundario una fuerza electromotriz (en adelante f.e.m.) cuya relación, en valor absoluto, es igual a la relación de espiras (me).

$$e_1 = n_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{Ec.1})$$

$$e_2 = n_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{Ec.2})$$

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2} = m_e = m_t \quad (\text{Ec.3})$$

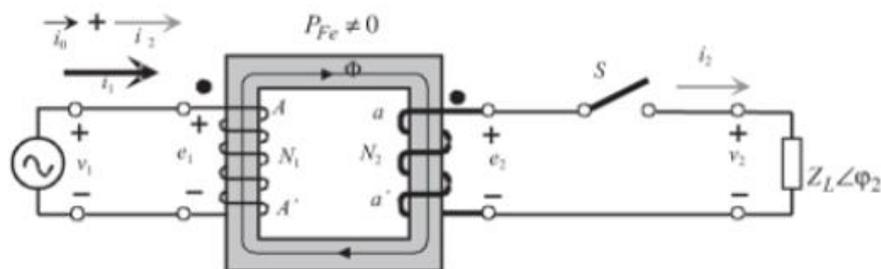


Figura 9: Esquema simplificado transformador

Dependiendo de la transformación de tensiones que realice, el transformador puede ser:

- Transformador reductor:  $U_1 > U_2$ .
- Transformador elevador:  $U_1 < U_2$ .
- Transformador de aislamiento:  $U_1 = U_2$ .

Si se tiene en cuenta que el flujo es de origen sinusoidal:

$$\Phi = \Phi_m \text{sen}(\omega t) = \Phi_m \text{cos}(\omega t - 90) \quad (\text{Ec.4})$$

Teniendo en cuenta ec.1, 2, 3 y 4:

$$E_1 = n_1 \Phi_m \omega \text{cos}(\omega t) \quad (\text{Ec.5})$$

$$E_2 = n_2 \Phi_m \omega \text{cos}(\omega t) \quad (\text{Ec.6})$$

Lo que indica que las tensiones y las f.e.m.s. están adelantadas  $90^\circ$  respecto al flujo, siendo sus valores eficaces:

$$E_1 = \frac{n_1 \Phi_m \omega}{\sqrt{2}} = 4.44 f n_1 \Phi_m \quad (\text{Ec.7})$$

$$E_2 = \frac{n_2 \Phi_m \omega}{\sqrt{2}} = 4.44 f n_2 \Phi_m \quad (\text{Ec.8})$$

La norma UNE-EN-60076-1, define las magnitudes asignadas:

- **Tensión asignada de un arrollamiento:** La tensión especificada a aplicar o a obtener en vacío en los bornes de un arrollamiento sin tomas, o de un arrollamiento con tomas conectado en la toma principal, para un arrollamiento trifásico es la tensión entre los bornes de línea.
- **Relación de transformación asignada:** La relación entre la tensión asignada de un arrollamiento y la de otro arrollamiento asociado y caracterizado por una tensión asignada inferior o igual.
- **Frecuencia asignada:** La frecuencia para la que se diseña el transformador.
- **Potencia asignada:** Valor convencional de la potencia aparente asignada a un arrollamiento que, junto con la tensión asignada del arrollamiento, determina su corriente asignada.

- **Corriente asignada:** La corriente que circula por un borne de línea de un arrollamiento, que se determina a partir de la potencia asignada y la tensión asignada de dicho arrollamiento.

El estudio del transformador trifásico se puede simplificar considerando cada columna como un transformador monofásico. De esta forma, como se mostrará a continuación, se simplificará bastante, ya que muchos conceptos definidos para los transformadores monofásicos serán de inmediata aplicación para los transformadores trifásicos.

#### 4.4.2. CIRCUITO EQUIVALENTE

##### 4.4.2.1. CIRCUITO EQUIVALENTE MONOFÁSICO

Las ecuaciones que definen el comportamiento de un transformador monofásico real son las siguientes:

$$\bar{U}_1 = (R_1 + jX_1) \cdot \bar{I}_1 + \bar{E}_1 \quad (\text{Ec.9})$$

$$\bar{E}_2 = (R_2 + jX_2) \cdot \bar{I}_2 + \bar{U}_2 \quad (\text{Ec.10})$$

$$\bar{I}_1 \cdot N_1 = N_2 \cdot \bar{I}_2 + \bar{I}_v \cdot N_1 \quad (\text{Ec.11})$$

$$\bar{I}_v = \bar{I}_H + \bar{I}_\mu \quad (\text{Ec.12})$$

$$R_H = \frac{\bar{E}_1}{\bar{I}_H} \quad (\text{Ec.13})$$

$$jX_\mu = \frac{\bar{E}_1}{\bar{I}_\mu} \quad (\text{Ec.14})$$

A partir de dichas ecuaciones, se puede deducir el circuito equivalente mostrado en la figura 10.

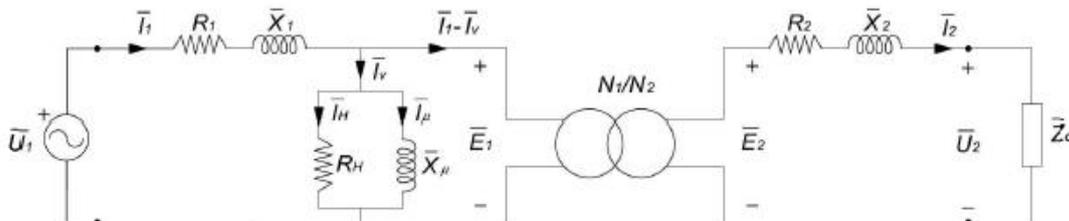


Figura 10: Circuito equivalente transformador en carga.

Para evitar trabajar con dos circuitos independientes, uno para el primario y otro para el secundario, se procede a referir todas las magnitudes eléctricas a uno de los devanados.

#### 4.4.2.2. CIRCUITO EQUIVALENTE REFERIDO AL PRIMARIO

Refiriendo el devanado secundario al primario:

$$\overline{E}'_2 = \overline{E}_2 \cdot m_t \quad (\text{Ec.15})$$

$$\overline{U}'_2 = \overline{U}_2 \cdot m_t \quad (\text{Ec.16})$$

$$\overline{I}'_2 = \frac{\overline{I}_2}{m_t} \quad (\text{Ec.17})$$

$$R'_2 = R_2 \cdot m_t^2 \quad (\text{Ec.18})$$

$$X'_2 = X_2 \cdot m_t^2 \quad (\text{Ec.19})$$

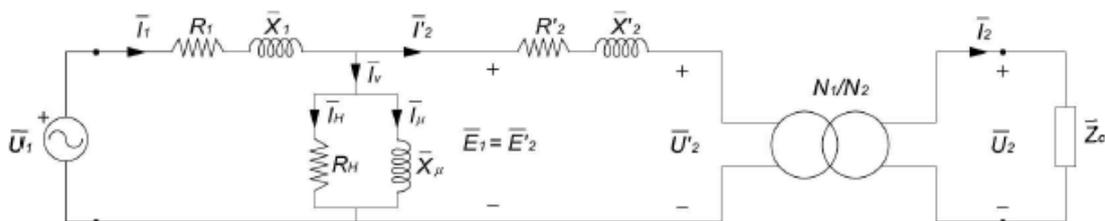


Figura 11: Circuito equivalente referido al primario

Dado que la tensión de alimentación y la f.e.m. inducida en el devanado primario son prácticamente iguales, despreciando los efectos de la corriente  $I_v$ , se puede usar un circuito equivalente más simple:

$$R_{01} = R_1 + R'_2 \quad (\text{Ec.20})$$

$$X_{01} = X_1 + X'_2 \quad (\text{Ec.21})$$

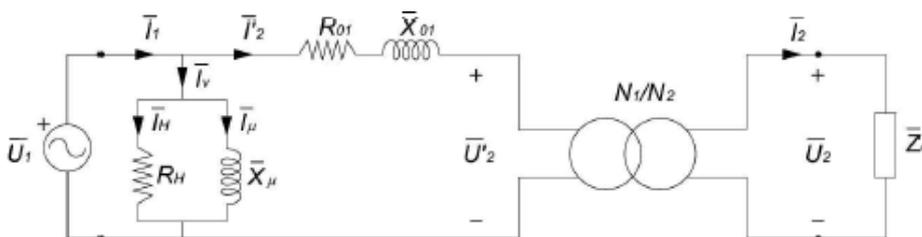


Figura 12: Circuito equivalente aproximado

### 4.4.2.3. CIRCUITO EQUIVALENTE REFERIDO AL SECUNDARIO

Refiriendo el devanado primario al secundario:

$$\overline{E}'_1 = \frac{\overline{E}_1}{m_t} \quad (\text{Ec.22})$$

$$\overline{U}'_1 = \frac{\overline{U}_1}{m_t} \quad (\text{Ec.23})$$

$$\overline{I}'_1 = \overline{I}_1 \cdot m_t \quad (\text{Ec.24})$$

$$R'_1 = \frac{R_1}{m_t^2} \quad (\text{Ec.25})$$

$$X'_1 = \frac{X_1}{m_t^2} \quad (\text{Ec.26})$$

$$R'_H = \frac{R_H}{m_t^2} \quad (\text{Ec.27})$$

$$X'_\mu = \frac{X_\mu}{m_t^2} \quad (\text{Ec.28})$$

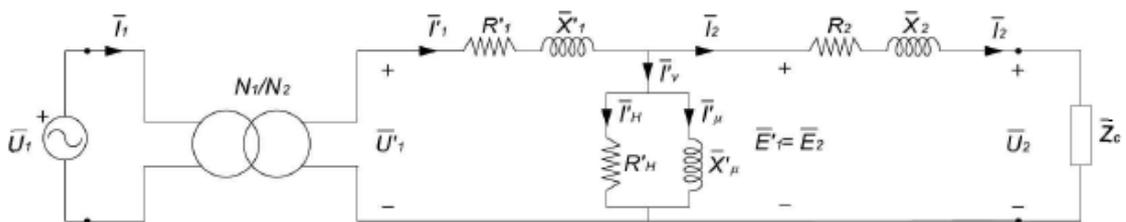


Figura 13: Circuito equivalente referido al secundario.

Dado la aproximación referida en el apartado anterior, aplicándolo a este caso, el circuito aproximado quedaría como sigue:

$$R_{02} = R_2 + R'_1 \quad (\text{Ec.29})$$

$$X_{02} = X_2 + X'_1 \quad (\text{Ec.30})$$

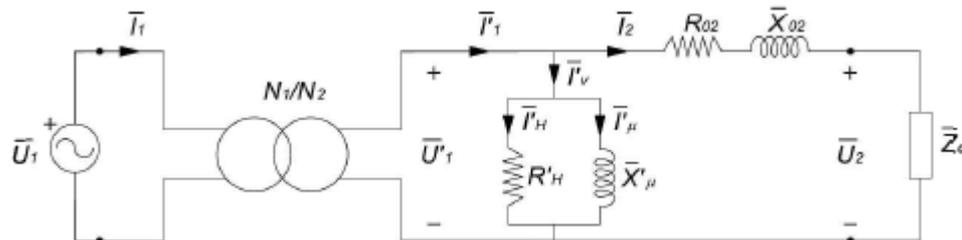


Figura 14: Circuito equivalente aproximado

#### 4.4.3. CIRCUITO EQUIVALENTE TRIFÁSICO

Para obtener resultados más fácilmente es mejor convertir el circuito equivalente a un grupo de conexiones, ya sea estrella-estrella o triángulo-triángulo, independientemente del grupo de conexión real de este. Realizando lo anterior se podrá tratar al transformador trifásico como un transformador monofásico, a efectos de cálculo.

Para los valores de línea habrá que considerar la conexión utilizada en el circuito equivalente, pero, para obtener los valores internos, se tendrá que considerar las conexiones reales de ambos devanados.

La norma UNE-EN-60076-1 define las conexiones básicas de los arrollamientos de un transformador trifásico:

- **Conexión en estrella:** La conexión de arrollamientos en la que un extremo de cada arrollamiento de fase de un transformador trifásico, o de cada arrollamiento de la misma tensión asignada para los transformadores monofásicos que constituyen un banco trifásico, se conecta a un punto común (el punto neutro), y el otro extremo al borne de línea correspondiente.
- **Conexión en triángulo:** La conexión en serie de los arrollamientos de fase de un transformador trifásico o de los arrollamientos de la misma tensión asignada de transformadores monofásicos que constituyen un banco trifásico, efectuada para formar un circuito cerrado.

- **Conexión en zig-zag:** Una conexión de los arrollamientos que consiste en dos secciones de arrollamientos, la primera sección se conecta en estrella, la segunda se conecta en serie entre cada primera sección y los bornes de línea: las dos secciones se disponen de tal manera que cada fase de la segunda sección se bobina sobre una columna diferente del transformador a la de la parte de la primera sección a la que se conecta.

La forma de conectar los arrollamientos primarios y secundarios hace que la relación de transformación se vea afectada y, en general, sea distinta a la relación de espiras. Además, también provoca un desfase entre las tensiones de línea respectivas de dichos arrollamientos.

#### 4.4.3.1. CONEXIÓN ESTRELLA-ESTRELLA (Yy)

Los dos grupos de devanados se encuentran conectados en estrella.

$$m_t = \frac{U_{RS}}{U_{rs}} = \frac{U_{1L}}{U_{2L}} = \frac{U_{1F} \cdot \sqrt{3}}{U_{2F} \cdot \sqrt{3}} = \frac{N_1}{N_2} = m_e \quad (\text{Ec.31})$$

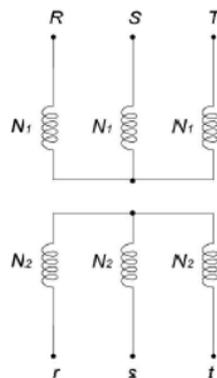


Figura 15: Conexión estrella-estrella (Yy)

#### 4.4.3.2. CONEXIÓN TRIÁNGULO-TRIÁNGULO (Dd)

Los dos grupos de devanados se encuentran conectados en triángulo.

$$m_t = \frac{U_{RS}}{U_{rs}} = \frac{U_{1L}}{U_{2L}} = \frac{U_{1F}}{U_{2F}} = \frac{N_1}{N_2} = m_e \quad (\text{Ec.32})$$

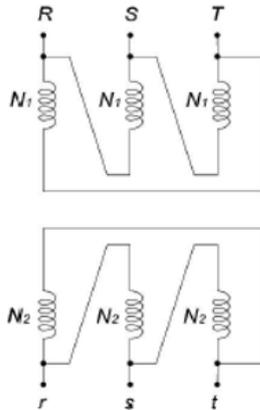


Figura 16: Conexión triángulo-triángulo (Dd)

#### 4.4.3.3. CONEXIÓN ESTRELLA-TRIÁNGULO (Yd)

Los devanados de mayor tensión se encuentran conectados en estrella mientras que los de menor tensión se encuentran conectados en triángulo.

$$m_t = \frac{U_{RS}}{U_{rs}} = \frac{U_{1L}}{U_{2L}} = \frac{U_{1F} \cdot \sqrt{3}}{U_{2F}} = \frac{N_1 \cdot \sqrt{3}}{N_2} = m_e \cdot \sqrt{3} \quad (\text{Ec.33})$$

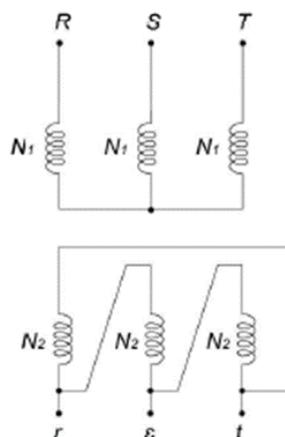


Figura 17: Conexión estrella-triángulo (Yd)

#### 4.4.3.4. CONEXIÓN TRIÁNGULO-ESTRELLA (Dy)

Los devanados de mayor tensión se encuentran conectados en triángulo mientras que los de menor tensión se encuentran conectados en estrella.

$$m_t = \frac{U_{RS}}{U_{rs}} = \frac{U_{1L}}{U_{2L}} = \frac{U_{1F}}{U_{2F} \cdot \sqrt{3}} = \frac{N_1}{N_2 \cdot \sqrt{3}} = \frac{m_e}{\sqrt{3}} \quad (\text{Ec.34})$$

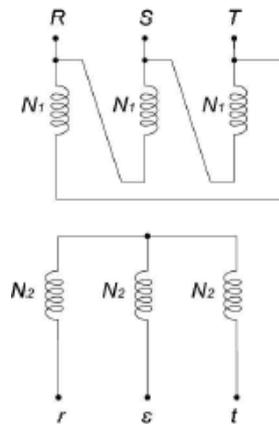


Figura 18: Conexión triángulo-estrella (Dy)

#### 4.4.3.5. CONEXIÓN ESTRELLA-ZIGZAG (Yz)

Los devanados de mayor tensión se encuentran conectados en estrella mientras que los de menor tensión se encuentran conectados en zigzag.

$$m_t = \frac{U_{RS}}{U_{rs}} = \frac{U_{1L}}{U_{2L}} = \frac{U_{1F} \cdot \sqrt{3}}{U_{2F} \cdot \sqrt{3}} = \frac{2 \cdot N_1}{N_2 \cdot \sqrt{3}} = \frac{2 \cdot m_e}{\sqrt{3}} \quad (\text{Ec.35})$$

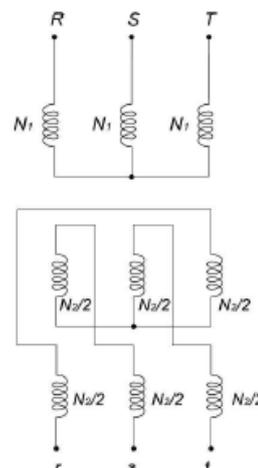


Figura 19: Conexión estrella-zigzag (Yz)

#### 4.4.3.6. CONEXIÓN TRIÁNGULO-ZIGZAG (Dz)

Los devanados de mayor tensión se encuentran conectados en triángulo mientras que los de menor tensión se encuentran conectados en zigzag.

$$m_t = \frac{U_{RS}}{U_{rs}} = \frac{U_{1L}}{U_{2L}} = \frac{U_{1F}}{U_{2F} \cdot \sqrt{3}} = \frac{2 \cdot N_1}{N_2 \cdot 3} = \frac{2 \cdot m_e}{3} \quad (\text{Ec.36})$$

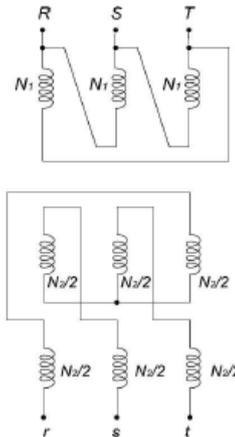


Figura 20: Conexión triángulo-zigzag

#### 4.4.4. ENSAYOS TRANSFORMADOR

Para verificar el comportamiento de la máquina deben realizarse todas las pruebas necesarias para garantizar la seguridad de funcionamiento, ahora bien, en la práctica resulta difícil la realización de ensayos directos reales. Sin embargo, el comportamiento del transformador para cualquier condición de trabajo puede saberse si se conocen los parámetros del circuito equivalente.

Para la determinación de estos parámetros del circuito equivalente del transformador, se realizan dos ensayos:

- Ensayo de vacío.
- Ensayo de cortocircuito.

#### 4.4.4.1. ENSAYO DE VACÍO.

Este ensayo se realiza conectando el primario a su tensión asignada, mientras que los terminales del devanado secundario permanecen sin carga conectada (en vacío).

Mediante este ensayo se puede determinar las pérdidas en el hierro, la relación de transformación, la resistencia de pérdidas en el hierro, la reactancia magnetizante, entre otros valores característicos del circuito equivalente.

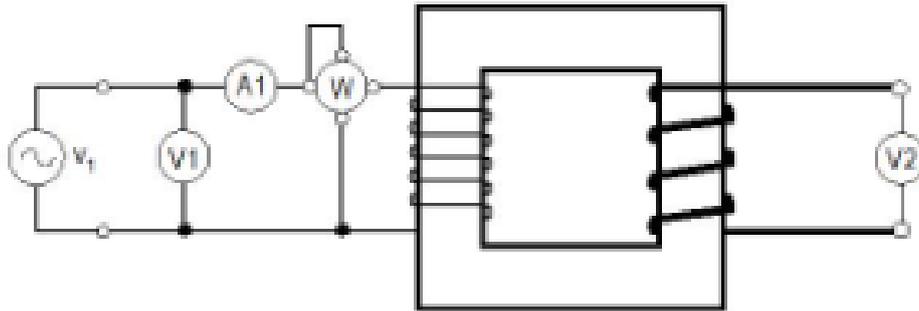


Figura 21: Esquema ensayo de vacío

- El vatímetro mediría la potencia en vacío, que coincide prácticamente con las pérdidas en el hierro.
- El voltímetro 1 mediría la tensión asignada del devanado primario.
- El voltímetro 2 indicará la tensión asignada del devanado secundario.
- El amperímetro 1 mostrará la corriente de vacío.

De lo descrito anteriormente, y sabiendo que  $I_2 = 0$ , se obtiene:

$$P_0 = V_{1n} \cdot I_0 \cdot \cos(\varphi_0) = P_{Fe} \quad (\text{Ec.37})$$

$$Q_0 = V_{1n} \cdot I_0 \cdot \sin(\varphi_0) = Q_{\mu} \quad (\text{Ec.38})$$

Obteniendo así el factor de potencia en vacío.

Descomponiendo el valor de la intensidad de  $I_0$  en parte activa y en parte reactiva, obtenemos lo siguiente:

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_{Fe} + \bar{I}_{\mu} \quad (\text{Ec.39})$$

$$I_{Fe} = I_0 \cdot \cos(\varphi_0) \quad (\text{Ec.40})$$

$$I_{\mu} = I_0 \cdot \sin(\varphi_0) \quad (\text{Ec.41})$$

De donde pueden obtenerse los valores de los parámetros  $R_{Fe}$  y  $X_{\mu}$ :

$$R_H = \frac{V_1}{I_{Fe}} \quad (\text{Ec.42})$$

$$X_{\mu} = \frac{V_1}{I_{\mu}} \quad (\text{Ec.43})$$

Como puede observarse, mediante este ensayo se determinan los parámetros de la rama paralelo del circuito equivalente del transformador.

Cabe destacar que para un transformador trifásico las magnitudes que se miden son las mismas que para el caso monofásico con la única diferencia de que las tensiones e intensidades son valores de línea y la potencia es trifásica.

#### 4.4.4.2. ENSAYO DE CORTOCIRCUITO.

En este ensayo se cortocircuita el devanado secundario y se aplica al devanado primario una tensión que se va elevando gradualmente desde cero hasta que circula la corriente asignada de plena carga por los devanados.

La tensión aplicada representa un pequeño porcentaje respecto a la asignada, por lo que el flujo del núcleo es pequeño, siendo despreciables las pérdidas en el hierro. La potencia absorbida en cortocircuito coincide con las pérdidas en el cobre.

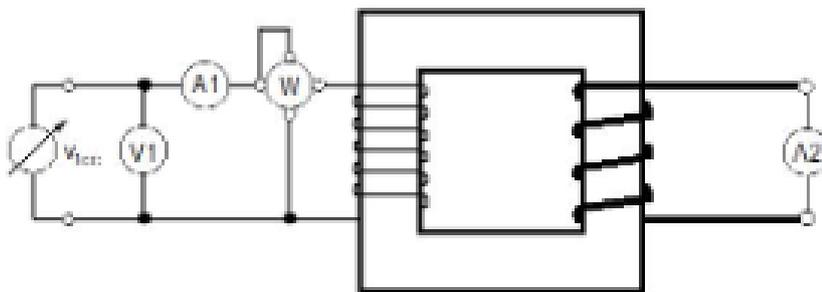


Figura 22: Esquema ensayo de cortocircuito

De las medidas realizadas, puede obtenerse el factor de potencia de cortocircuito:

$$P_{cc} = V_{cc1} \cdot I_{cc1} \cdot \cos(\varphi_{cc}) = P_j \quad (\text{Ec.44})$$

$$Q_{cc} = V_{cc1} \cdot I_{cc1} \cdot \sen(\varphi_{cc}) \quad (\text{Ec.45})$$

Además, pueden calcularse los parámetros de la rama serie del circuito equivalente:

$$R_{01} = \frac{P_j}{I_{cc1}^2} \quad (\text{Ec.46})$$

$$X_{01} = \frac{Q_{cc}}{I_{cc1}^2} = R_{01} \cdot \tan(\varphi_{cc}) \quad (\text{Ec.47})$$

$$Z_{01} = \frac{U_{cc1}}{I_{cc1}} = \sqrt{R_{01}^2 + X_{01}^2} \quad (\text{Ec.48})$$

Para el caso de transformador trifásico, al igual que en el ensayo de vacío, las magnitudes que se miden son las mismas que para el caso monofásico con la diferencia que los datos obtenidos son valores de línea.

#### 4.4.5. PÉRDIDAS Y RENDIMIENTO

##### 4.4.5.1. PÉRDIDAS

En el funcionamiento normal los transformadores absorben de la red eléctrica una potencia activa y reactiva igual a:

$$P_1 = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi_1) \quad (\text{Ec.49})$$

$$Q_1 = V_1 \cdot I_1 \cdot \text{sen}(\varphi_1) \quad (\text{Ec.50})$$

Entregando a la carga, conectada en el secundario, una potencia activa y reactiva iguales a:

$$P_2 = V_2 \cdot I_2 \cdot \cos(\varphi_2) \quad (\text{Ec.51})$$

$$Q_2 = V_2 \cdot I_2 \cdot \text{sen}(\varphi_2) \quad (\text{Ec.52})$$

Siendo menores estas respecto a las primeras.

Considerando estas pérdidas, el balance de potencias quedaría como sigue:

$$P_1 = P_2 + P_{j1} + P_{j2} + P_0 = P_2 + P_p \quad (\text{Ec.53})$$

$$Q_1 = Q_2 + Q_0 + Q_d \quad (\text{Ec.54})$$

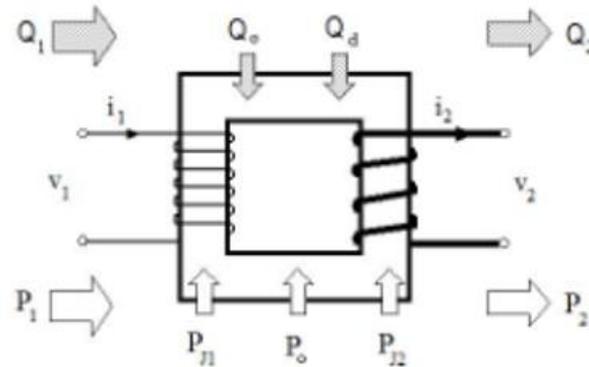


Figura 23: Balance de potencias de un transformador monofásico

Estas pérdidas magnéticas se transforman en calor sobre el propio transformador. Los fenómenos que ocasionan esto son:

- Efecto Joule en los devanados.
- La histéresis magnética en el núcleo.
- Las corrientes de Foucault en el núcleo.

Al circular una corriente eléctrica por los devanados se originan pérdidas de valor determinado por las resistencias de cortocircuito reducidas al primario ( $R_c$ ) o al secundario ( $R'_c$ ), según la siguiente expresión:

$$P_j = P_{j1} + P_{j2} = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2 = R_c \cdot I_1^2 = R'_c \cdot I_2^2 \quad (\text{Ec.55})$$

Estas son las conocidas pérdidas en el cobre y, algunos fabricantes las denominan pérdidas debidas a la carga.

Los fenómenos de histéresis magnética y las corrientes de Foucault originan las pérdidas en el hierro, cuyo valor se obtiene como:

$$P_0 = \frac{E_1^2}{R_H} \cong \frac{V_1^2}{R_H} \quad (\text{Ec.56})$$

Donde  $R_H$  es la resistencia de pérdidas en el hierro. Estas pérdidas son las responsables del calentamiento del núcleo de los transformadores. También son conocidas como pérdidas de vacío.

De la ecuación 42 se deduce que el transformador absorbe en el primario una potencia reactiva que le requiere la carga y unas potencias reactivas adicionales,  $Q_0$  y  $Q_d$ , que se invierten en crear los flujos magnéticos del transformador.

La potencia reactiva  $Q_0$  es aproximadamente igual a la potencia reactiva que absorben los transformadores funcionando en vacío:

$$Q_0 = \frac{E_1^2}{X_\mu} \cong \frac{V_1^2}{X_\mu} \quad (\text{Ec.57})$$

Donde  $X_\mu$  es la reactancia magnetizante.

La potencia reactiva  $Q_d$  es la responsable de crear los flujos de dispersión y su valor está determinado por:

$$Q_d = X_c \cdot I_1^2 \quad (\text{Ec.58})$$

Donde  $X_c$  es la reactancia de cortocircuito del transformador.

#### 4.4.5.2. RENDIMIENTO

Las pérdidas en el cobre ( $P_j$ ), como se ha especificado anteriormente, crecen de manera cuadrática con las corrientes que circulan por los devanados, por tanto, son variables con la carga.

Las pérdidas en vacío ( $P_0$ ), por el contrario, son independientes de la carga y se mantienen constantes.

La existencia de dichas pérdidas se traduce en una menor eficiencia en el funcionamiento del transformador.

Se define el rendimiento de un transformador ( $\eta$ ) como el cociente entre la potencia activa suministrada en el secundario ( $P_2$ ) y la potencia activa absorbida por el primario ( $P_1$ ):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_j + P_0} = \frac{V_2 \cdot I_2 \cdot \cos(\varphi_2)}{V_2 \cdot I_2 \cdot \cos(\varphi_2) + R'_c \cdot I_2^2 + P_0} \quad (\text{Ec.59})$$

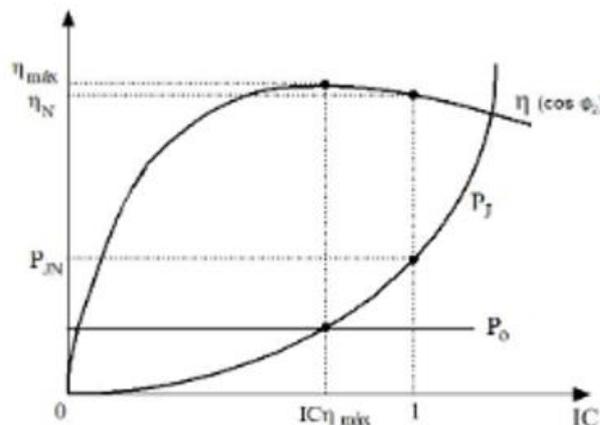


Figura 24: Pérdidas energéticas y rendimiento en función del índice de carga

En la figura anterior se puede observar como el rendimiento máximo del transformador no se obtiene cuando este funciona a plena carga. El rendimiento máximo se alcanza siempre con valores inferiores a la plena carga.

En la gráfica anterior puede apreciarse que el rendimiento máximo ocurre cuando las pérdidas del cobre se igualan a las pérdidas en vacío, es decir,  $P_j = P_0$ .

En la ecuación 59 puede observarse como el rendimiento del transformador disminuye con el factor de potencia de la carga conectada en el secundario.

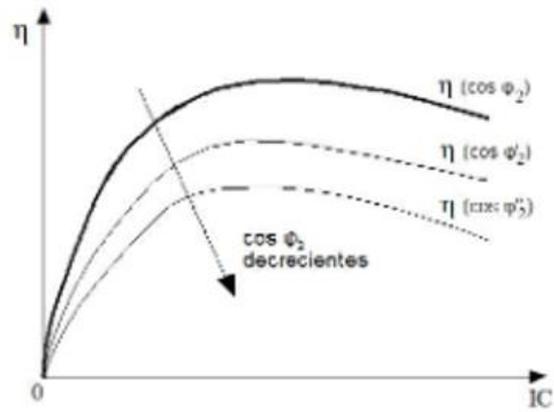


Figura 25: Representación del rendimiento en función del índice de carga y del factor de potencia de la carga.

## 5. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

El método se basa en simplificar el número de variables desconocidas en el problema de resolución de la pieza en un número determinado que establezcan un comportamiento general definido.

Dicha simplificación se consigue subdividiendo las diferentes partes de la pieza en partes más pequeñas denominadas “elementos”. Con esto se consigue subdividir el problema en problemas más pequeños de resolución más simple.

La subdivisión en elementos puede realizarse con diferentes formas, adecuándose a la situación de cada problema. Se le denominan elementos finitos porque el número de elementos es limitado.

Los elementos están conectados entre sí por los denominados nodos o puntos nodales. Al conjunto de todos estos elementos y nodos, se le denomina malla. Cabe destacar que la subdivisión del problema, no otorgará resultados exactos, sino aproximados.

La precisión de este método matemático radica en la cantidad de elementos y nodos en los que está dividido el problema. Dicho de otra forma, a más cantidad de elementos y nodos en la malla, más precisión en los resultados obtenidos.

La evolución de la lógica computacional está haciendo que este método sea más tenido en cuenta, debido a que se está mejorando las técnicas de modelado y de muestras de resultados, haciendo que sea más exacto dicho modelo al comportamiento real del problema estudiado.

Este método se utiliza tanto para la resolución de problemas de análisis estructural, como también, para hacer análisis térmicos, acústicos, dinámicos, electromagnéticos, entre otros.

En el caso de este proyecto, se usará el programa Comsol Multiphysics que, basado en el método explicado, conseguirá relacionar las físicas térmicas y electromagnéticas para obtener el comportamiento de un transformador trifásico en diferentes condiciones de entorno y de carga.

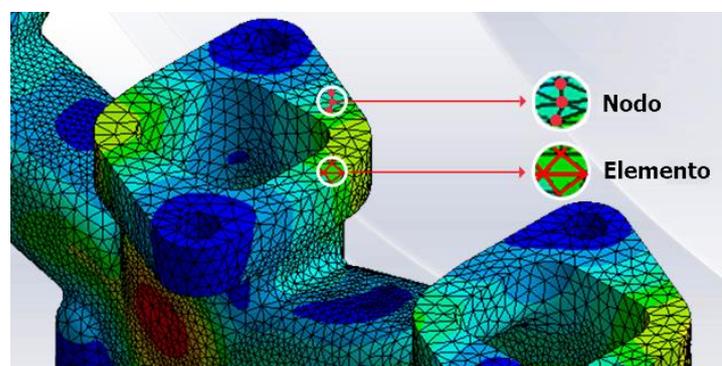


Figura 26: Ejemplo mallado en elementos finitos

## **5.1. COMSOL MULTIPHYSICS**

El programa usado en la resolución del problema expuesto es Comsol Multiphysics v5.5. Este programa es capaz de abarcar todos los pasos del flujo de trabajo de modelado, desde la geometría, propiedades del material y la resolución física que resuelve el modelo.

Este programa es usado para el desarrollo y estudio de los problemas que puedan darse en una pieza o máquina para optimizarlos y así reducir el diseño de prototipos.

En comparación con el diseño de prototipos, el modelado permite una optimización más rápida, más eficiente y precisa.

El modelo a estudiar es un modelo multifísico. Dichos modelos consideran una amplia gama de posibles condiciones de funcionamiento y efectos físicos, ya que se estudian las dependencias y vínculos entre varias físicas, lo que hace posible diseñar y optimizar procesos y dispositivos para condiciones de funcionamiento realistas.

Existen varios estudios que pueden ser realizados con esta herramienta, como son los estudios estacionarios, dependientes del tiempo, de dominio de frecuencia y de frecuencia propia.

El sistema discretiza el modelo utilizando el método de elementos finitos (MEF) para las variables espaciales. Para algunos tipos de problemas, el método del elemento de contorno (BEM) también se puede utilizar para discretizar el espacio. Para problemas dependientes del espacio y el tiempo, se utiliza el método de líneas, donde el espacio se discretiza con FEM (o BEM), formando así un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO). Estas EDO se resuelven luego utilizando métodos avanzados, incluidos métodos implícitos y explícitos para el paso del tiempo.

### **5.1.1. ESTRUCTURA COMSOL**

Para implementar el modelo en Comsol, el programa ofrece una organización por apartados los cuales aportan una amplia variedad de posibilidades a la hora de diseñar el modelo. Dichos apartados, son:

- Definiciones.
- Geometría.
- Materiales.
- Físicas.
- Multifísicas.
- Malla.
- Estudio.
- Resultados.

En primer lugar, se deberá de considerar estructurar todos los valores del diseño del transformador, tanto eléctricas como geométricas, en una tabla asignándole a cada una un nombre de parámetro. Comsol da la posibilidad de hacerlo mediante variables locales o globales. La principal diferencia es que mediante las variables globales se podrán hacer barridos paramétricos de cualquier variable, es decir, realizar estudios asignándoles diferentes valores de dichas variables y obteniendo los resultados para esas condiciones establecidas. Por ello, es más que interesante, cuando se vayan a considerar dicha clase de estudios, asignar las tablas de parámetros en el apartado de variables globales.

En el caso de las definiciones locales, será de gran interés definir diferentes sondas para que se encarguen de la medición de las variables eléctricas y de temperatura máxima. También este apartado nos da la posibilidad de crear las condiciones de las propiedades ambientales (figura 27).

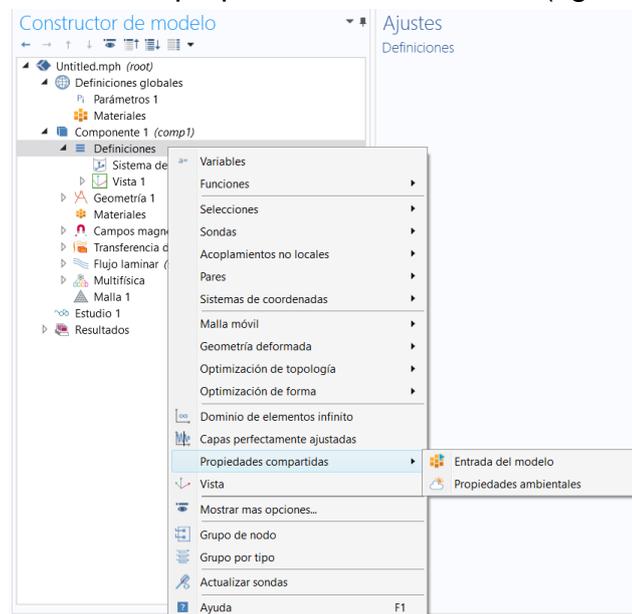


Figura 27:Definiciones locales

El siguiente apartado nos da la posibilidad de crear el diseño, en este caso en 3D, de la pieza o máquina a estudiar. Este apartado denominado geometría, da la posibilidad de cargar desde un bloque CAD el diseño o realizarlo dentro del programa de Comsol. Este programa difiere un poco respecto a los programas de diseño 3D convencionales, ya que los valores de todos los elementos tienen que ser introducidos mediante coordenadas y tamaños, es decir, no permite dibujar directamente sobre la plantilla del modelo como, por ejemplo, es el caso de Autocad o Solidworks.

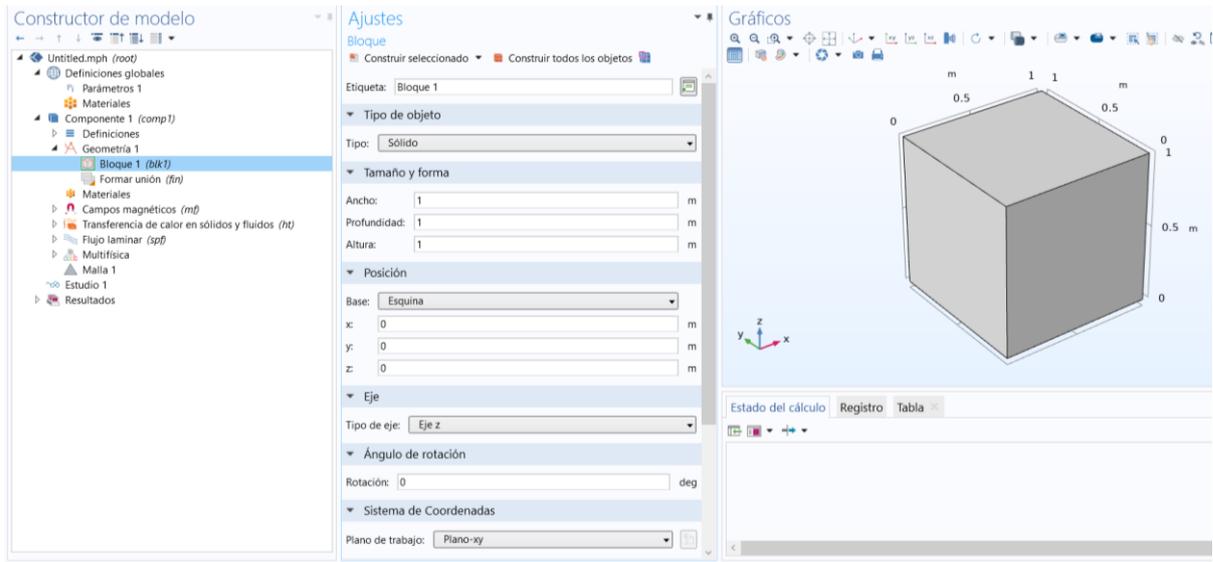


Figura 28: Ejemplo de creación de un elemento.

En la lista de materiales se podrán asignar diferentes materiales de la biblioteca o crear algún material nuevo a partir de otro material o de un material en blanco. Los materiales de la biblioteca vienen de manera predeterminada con las características físicas, aunque se podrán modificar de forma manual si se desea. Los materiales creados o modificados se podrán guardar en dicha biblioteca para su uso en otros modelos, lo que permite una mejor personalización del modo de trabajo.

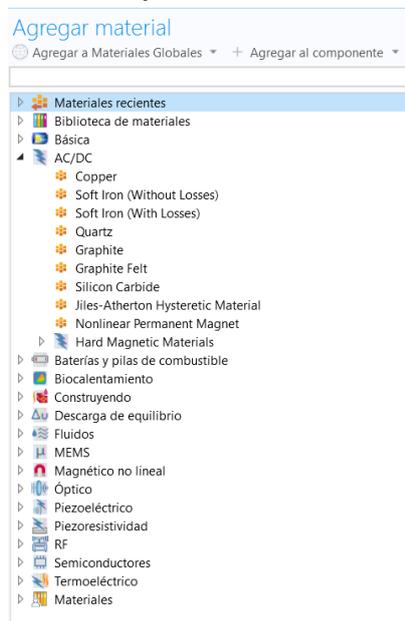


Figura 29: Biblioteca de materiales.

Mediante el apartado de Magnetic Fields, como se expone posteriormente, se crearán todas las condiciones magnéticas del modelo. Se establecerán cuáles serán las bobinas primarias y secundarias y el comportamiento magnético del núcleo y del resto de elementos. Mediante la designación de las bobinas, se asignarán los datos correspondientes a tensión, número de espiras y grosor de conductores. En la figura 30 puede verse las múltiples opciones que facilita el programa la hora de diseñar cualquier modelo.

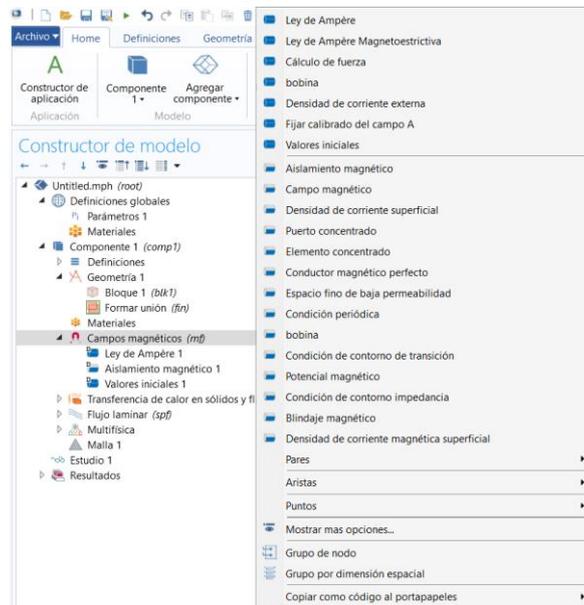


Figura 30: Opciones de diseño en Magnetic Fields.

Mediante las físicas “Transferencia de calor en sólidos y fluidos” y “flujo laminar”, se establecerán las condiciones de intercambio de calor conductivos y convectivos y, el comportamiento del fluido interno del transformador, respectivamente.

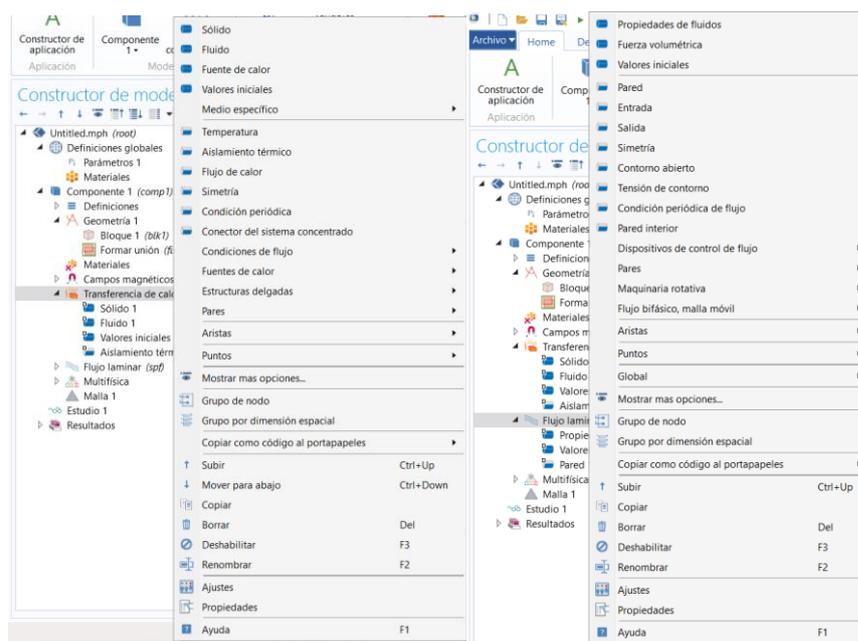


Figura 31: Interfaz Transferencia de calor en sólidos y fluidos (izquierda) y flujo laminar (derecha)

Una vez definidas las físicas, se deberá establecer una unión entre estas para que el programa calcule los valores en función de los vínculos entre las diferentes variables. Esta unión se realiza a través del apartado multifísica. En este apartado se establecerán dos multifísicas: flujo no isotérmico y calentamiento electromagnético. En la primera, se establecerá la unión entre el comportamiento del fluido y la transferencia de calor y, en la segunda, el vínculo entre el comportamiento electromagnético y la transferencia de calor. En el caso de calentamiento electromagnético, analizará las pérdidas del transformador como fuente de calor.

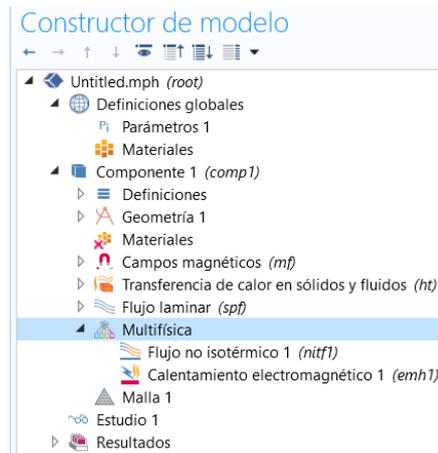


Figura 32:Multifísica

El siguiente apartado, malla, ofrece la opción de diseñar el mallado de la pieza de forma que se pueda controlar la fiabilidad de los resultados obtenidos. Ofrece múltiples opciones, pudiendo dejar el calibrado de los elementos de forma automática por el programa o controlar el usuario los tamaños y formas de manera manual, pudiendo establecer diferentes mallas a las piezas de la máquina sin necesidad de tener una única para toda la máquina. De esta forma, se puede establecer un tamaño menor de elemento para la parte de más interés y un tamaño mayor para la parte en la que no sean determinantes los resultados. Este apartado es muy importante ya que un ajuste bueno del mallado de la máquina, ocasionará unos mejores resultados con un tiempo de cálculo mucho menor.

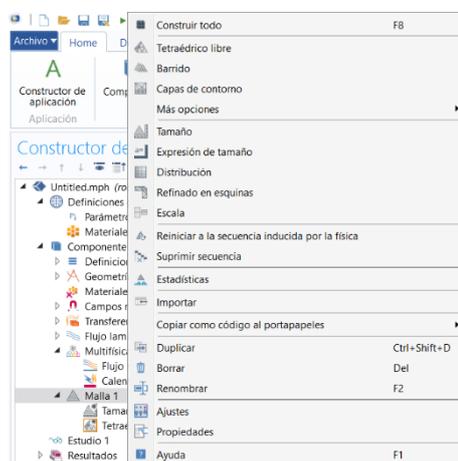


Figura 33: Mallado.

Lo último a definir será el apartado estudio. En este apartado se establecerán las condiciones de cálculo. Se podrán asignar barridos paramétricos, barridos de material, así como establecer el dominio en el que se realizarán los cálculos. En el caso a estudiar se usarán los pasos de estudio de frecuencia-estacionario, análisis de geometría de la bobina y los barridos paramétricos.

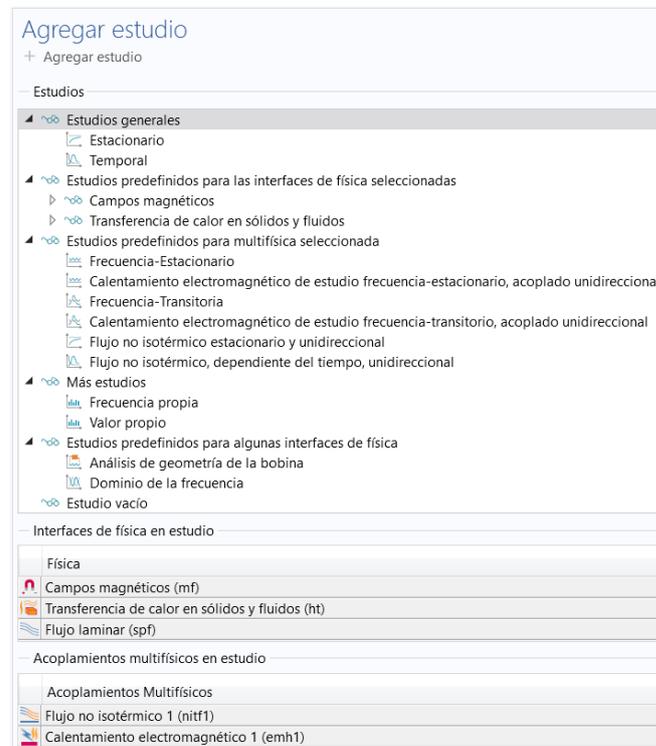


Figura 34: Estudios.

Una vez establecidas todas las condiciones del modelo, se procederá a realizar los cálculos. Una vez finalizados, el programa creará un bloque, en el apartado “resultados” → “conjuntos de datos”, en el cual se almacenará la solución del estudio. Para extraer las soluciones de estudio, el programa nos facilita determinadas herramientas en las cuales podremos seleccionar la forma de visualización y las variables a observar.

En este apartado, Comsol, brinda la posibilidad de extraer los resultados de muchas formas. Pueden realizarse planos de corte para una visualización en 2D, ver directamente la pieza en 3D, realizar gráficos con valores de sondas, etc.

Dado que el programa cuando realiza el cálculo lo almacena en un bloque, solo se tendría que extraer los resultados creando gráficos, es decir, no es necesario realizar más cálculos para unas mismas condiciones de estudio.

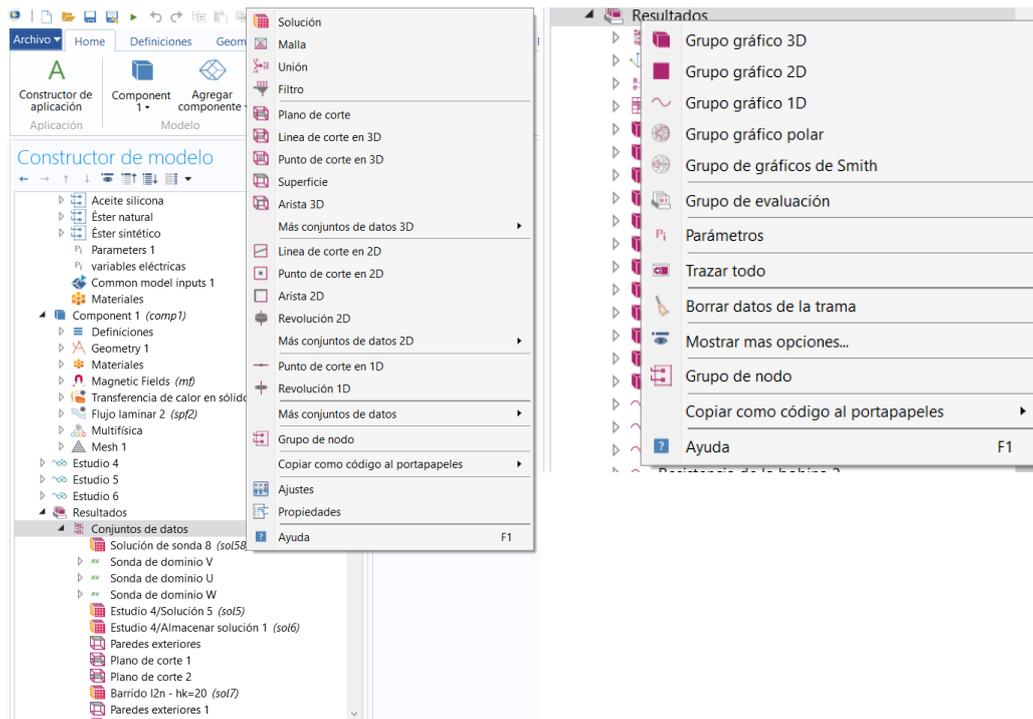


Figura 35: Herramientas correspondientes al apartado resultados.

Una vez mostrada la estructura del programa, se va a proceder a determinar los ajustes que se han realizado en dichos apartados para especificar el comportamiento del transformador y, así, obtener los resultados deseados para el modelo de interés.

## 6. DISEÑO DEL MODELO

El transformador a estudiar es un transformador trifásico de aceite mineral con depósito de expansión de potencia nominal 400kVA. Poseerá una tensión asignada de 15000/400 V y su intensidad asignada será de 15.4/577.35 A con un grupo de conexión Yy0.

El devanado primario estará formado por 1800 espiras de hilo de cobre esmaltado con una sección de 8.51 mm<sup>2</sup>. Para el caso de las bobinas secundarias, se ha establecido una sección de 1.68 cm<sup>2</sup> y 48 espiras, siendo del mismo material que la bobina primaria.

Para el aislamiento entre los devanados se ha colocado papel, ya que es el aislamiento más común.

El núcleo, la estructura, la cuba y el depósito de expansión se ha considerado de acero al carbono.

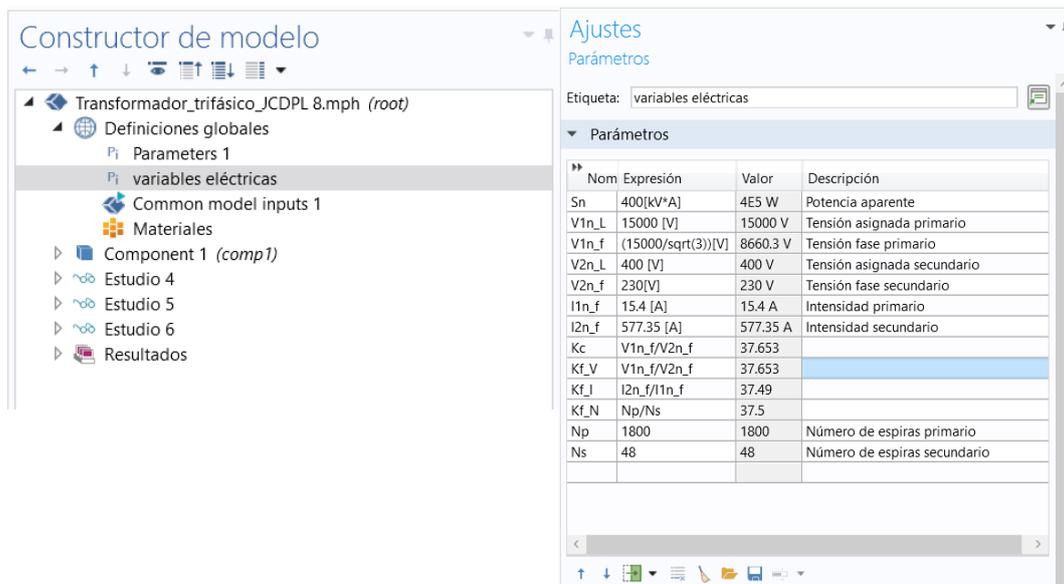
Con esta descripción de la máquina, se va a proceder a intentar implementar el cálculo mediante los elementos finitos a las características de funcionamiento de dicha máquina, realizando los cálculos electromagnéticos y térmicos para así verificar la validez de dicho método.

## 6.1. DATOS ELÉCTRICOS TRANSFORMADOR.

Con los datos eléctricos del transformador, se introducirá una tabla en definiciones globales, la cual se utilizará para los posteriores cálculos. Véase la figura 36. Dicha tabla ha sido colocada en definiciones globales puesto que posteriormente se podrá realizar algún barrido paramétrico para cualquier variable alojada en dicha tabla. Si estos datos fueran colocados en el apartado de definiciones locales, no podríamos realizar dichos barridos respecto a esas variables.

Estos datos son:

- Potencia asignada: 400 kVA
- Tensión asignada: 15000/400 V.
- Grupo de conexión: Yy0.
- Intensidad asignada: 15.4/577.35 A
- Número de espiras: 1800/48 espiras.



Nom	Expresión	Valor	Descripción
Sn	400[kV*A]	4E5 W	Potencia aparente
V1n_L	15000 [V]	15000 V	Tensión asignada primario
V1n_f	(15000/sqrt(3))[V]	8660.3 V	Tensión fase primario
V2n_L	400 [V]	400 V	Tensión asignada secundario
V2n_f	230[V]	230 V	Tensión fase secundario
I1n_f	15.4 [A]	15.4 A	Intensidad primario
I2n_f	577.35 [A]	577.35 A	Intensidad secundario
Kc	V1n_f/V2n_f	37.653	
Kf_V	V1n_f/V2n_f	37.653	
Kf_I	I2n_f/I1n_f	37.49	
Kf_N	Np/Ns	37.5	
Np	1800	1800	Número de espiras primario
Ns	48	48	Número de espiras secundario

Figura 36: Tabla variables eléctricas.

## 6.2. DATOS MATERIALES USADOS

Para la construcción del modelo, como se ha comentado anteriormente, se han usado los siguientes materiales:

- Núcleo: Acero al carbono, también conocido como acero dulce.
- Arrollamientos: Hilos de cobre.
- Estructura núcleo: Acero al carbono.
- Cuba y depósito de expansión: Acero al carbono.
- Aislamiento entre devanados: Papel.
- Líquido refrigerante: Aceite mineral.

En la siguiente figura puede observarse como se ha implementado lo anterior en el modelo en el respectivo apartado de materiales. Comsol posee una biblioteca interna de materiales los cuales vienen definidas sus características físicas. Dichas características pueden ser modificadas de forma manual. En el caso a tratar, se han modificado algunas características de los materiales de la biblioteca como se podrá ver a continuación.

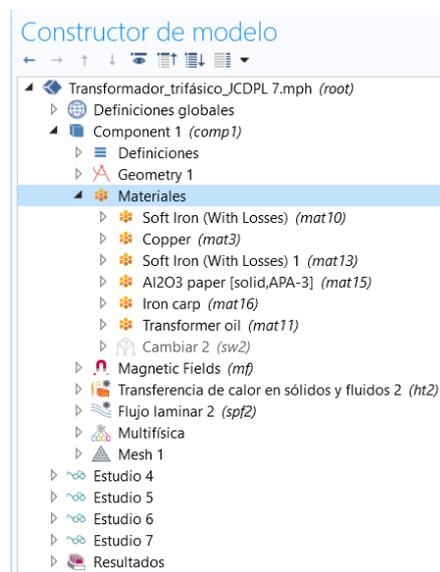


Figura 37: Materiales empleados.

En cada material, las características físicas, pueden ser modificadas en forma de parámetros colocados en tablas en definiciones globales. Esto hará que puedan ser parametrizadas en los distintos estudios para visualizar el impacto que poseerá la modificación de dichas características pudiendo hacer una mejor optimización del funcionamiento. También pueden establecerse diferentes materiales a una misma parte de la máquina y, posteriormente, calcular el funcionamiento para los distintos materiales. Esto permitirá realizar un mismo estudio para diferentes materiales, por ejemplo, para diferentes refrigerantes o materiales de la cuba, y así poder comparar la efectividad en el modelo estudiado.

A continuación, se van a exponer las características físicas de los diferentes materiales empleados para el diseño del modelo.

### 6.2.1.ACERO AL CARBONO.

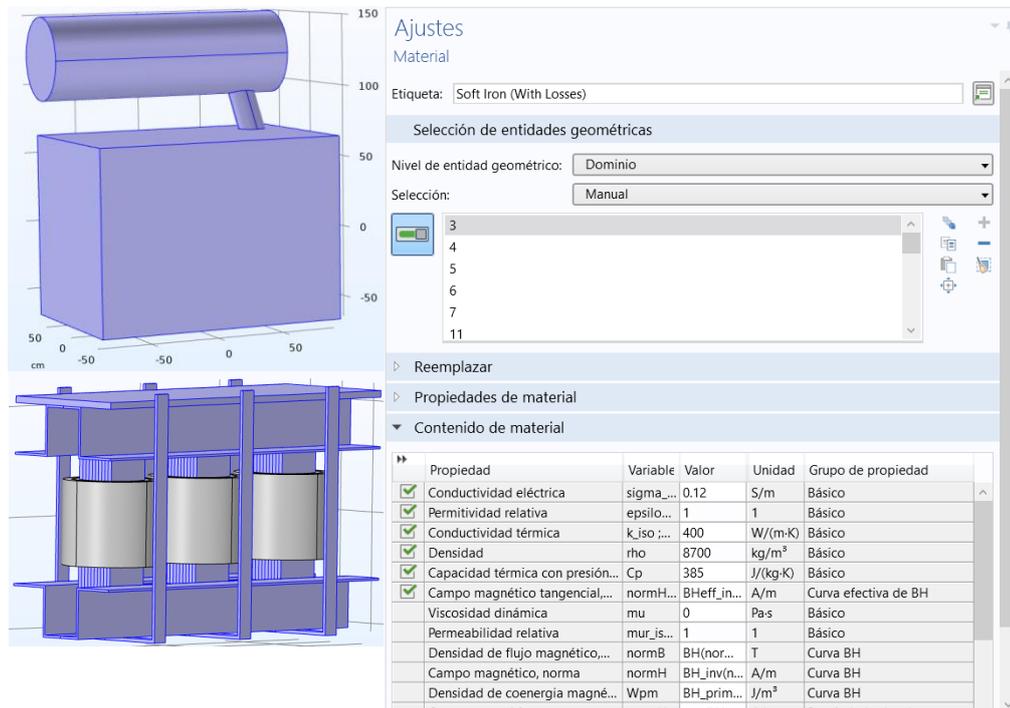


Figura 38: Elementos con material acero al carbono (izquierda), propiedades del acero al carbono (derecha).

Como puede verse en la figura 38 (color azul), se ha usado acero al carbono tanto para el núcleo de chapas magnéticas como para la estructura que soporta dicho núcleo. También se ha usado dicho acero para la cuba y el depósito de expansión.

Los datos que definirán la transmisión de calor y el comportamiento electromagnético de estos materiales son los mostrados en la figura 38.

Dado que una característica importante es el comportamiento ante la inducción magnética del núcleo, ya que será el que ayudará a establecer el flujo magnético en el transformador, se ha optado por definir dicho comportamiento usando la curva B-H efectiva. Dicha curva viene ya definida de manera predeterminada en el material usado y es la que puede verse en la figura 39.

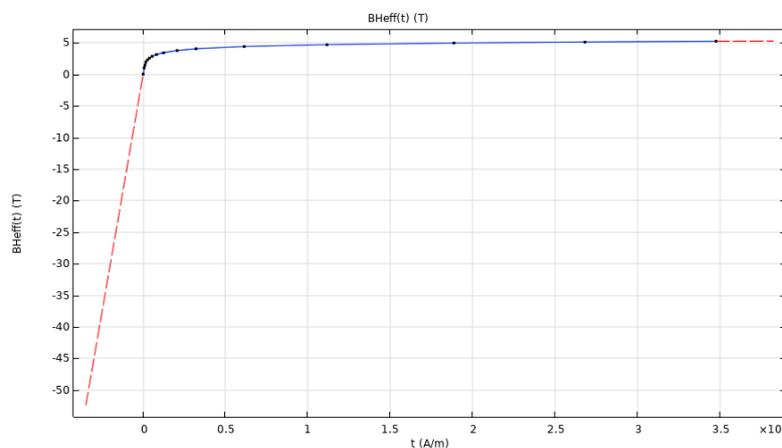


Figura 39: Curva B-H efectiva.

El comportamiento del acero descrito en la cuva B-H, será lo que ocasionará las denominadas pérdidas por histéresis magnética. También son denominadas como pérdidas en el hierro y son las obtenidas cuando sometemos a la máquina a un ensayo de vacío. Por esto, estas pérdidas ocasionarán que una de las fuentes de calor principales sea el núcleo.

### 6.2.2. COBRE.

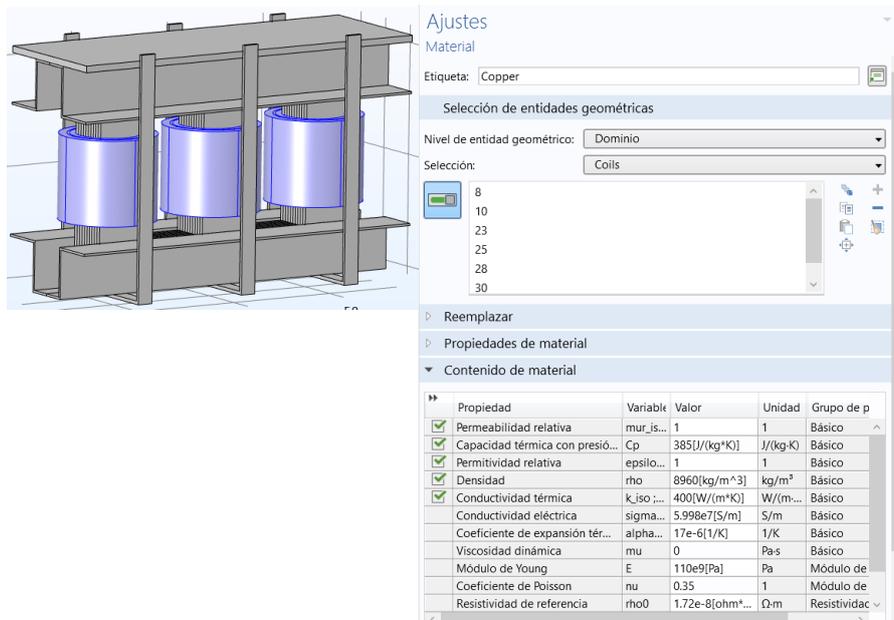


Figura 40: Devanados de cobre (izquierda), propiedades del cobre (derecha).

Las bobinas se han considerado de cobre. La lista de características físicas de este material es la mostrada en la figura 40.

### 6.2.3.REFRIGERANTE.

Las características físicas del refrigerante usado, al ser dependientes de la temperatura, vendrán definidos en gráficas dentro de cada material, como puede verse en la figura 41.

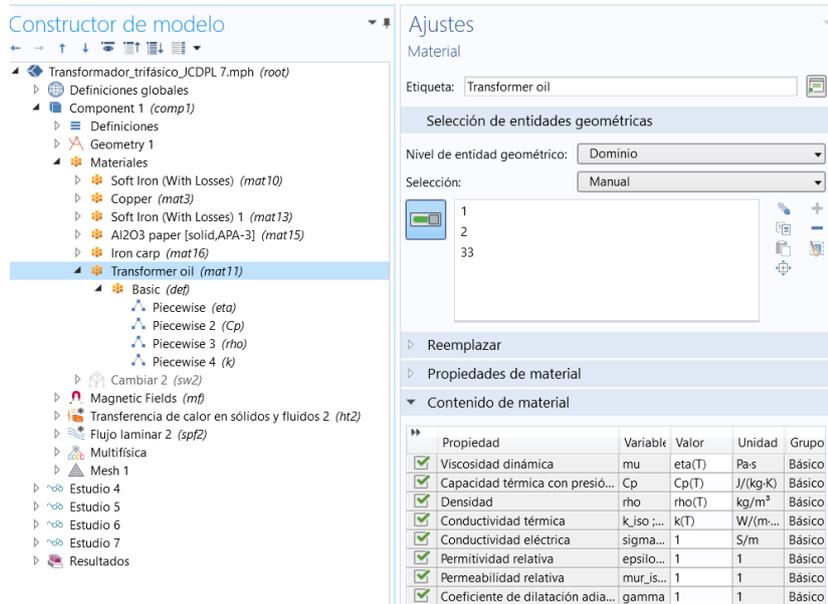


Figura 41: Propiedad del refrigerante.

Estas curvas serán diferentes para cada material usado, de forma que, se comportarán de manera diferente ante los calentamientos que estos sufran.

Las variables que engloban estas gráficas son: viscosidad dinámica ( $\eta$ ), capacidad térmica ( $C_p$ ), densidad ( $\rho$ ), conductividad térmica ( $k$ ).

En el estudio realizado, el refrigerante usado es aceite mineral cuyas características físicas se expondrán en el siguiente apartado.

### 6.2.3.1. ACEITE MINERAL.

A continuación, se expondrán las gráficas con los diferentes valores de las características físicas dependientes de la temperatura.

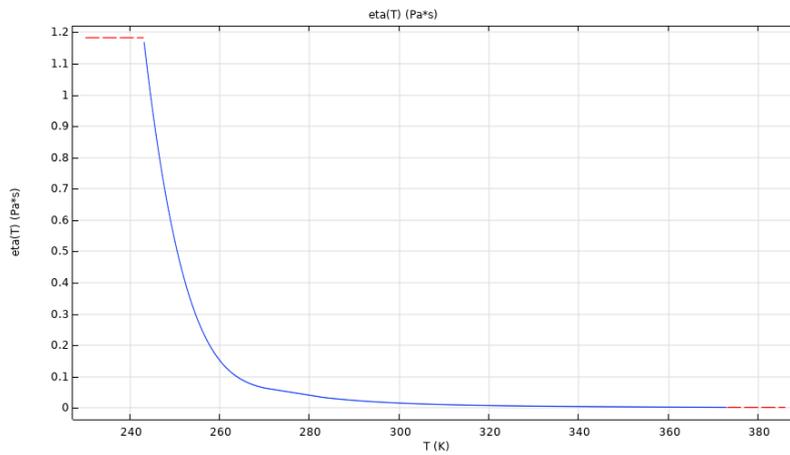


Figura 42: Viscosidad dinámica.

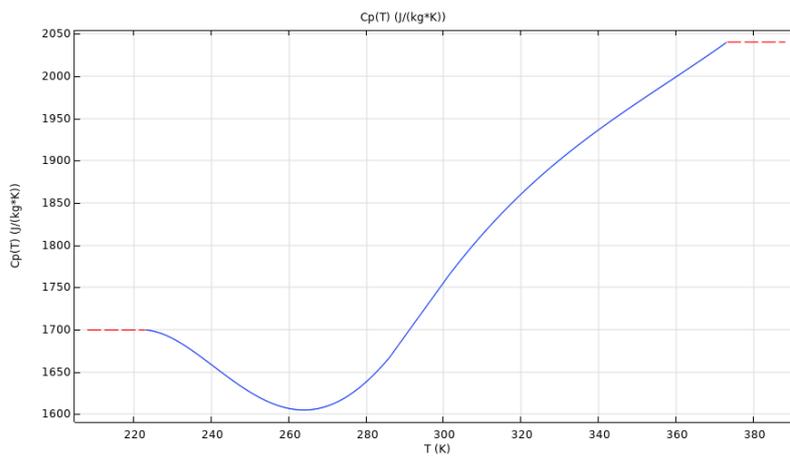


Figura 43: Capacidad térmica.

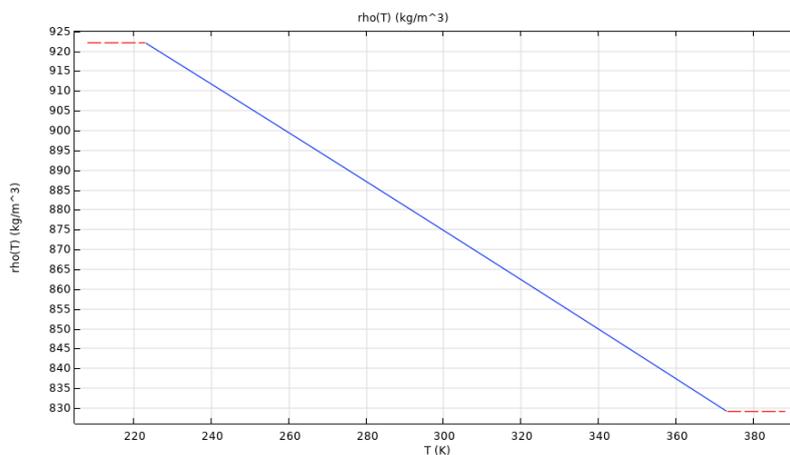


Figura 44: Densidad.

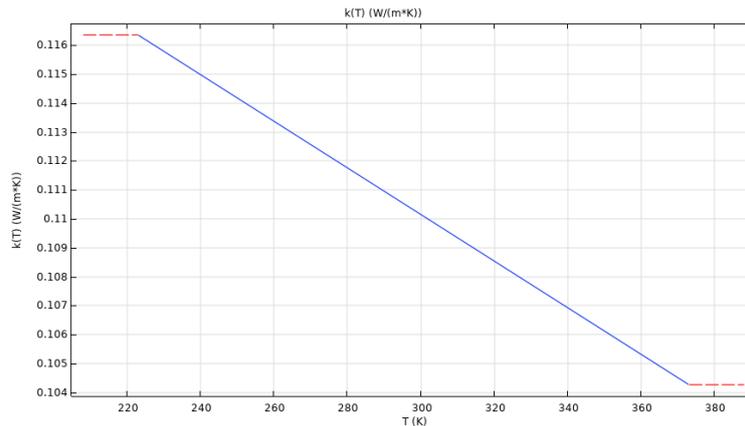


Figura 45: Conductividad térmica.

### 6.3. SIMPLIFICACIONES REALIZADAS EN LA GEOMETRÍA.

Como se ha visto en el apartado 4, el transformador en baño de aceite mineral con depósito de expansión posee otras partes que no se han tenido en cuenta para realizar el modelo, como son las aletas de refrigeración, los aisladores, entre otros.

La pretensión de este proyecto es conocer la estrecha relación existente entre el aceite y las pérdidas de calor que se producen en el núcleo y devanados, así como, la afectación de la temperatura exterior a dicho calentamiento.

Por ello, el modelo presenta simplificaciones en cuanto a la estructura ya que esto ahorrará bastante tiempo de cálculo y permite obtener una aproximación bastante real del funcionamiento del transformador.

Debido a que, para el diseño en elementos finitos, los cálculos que se deben de realizar son complejos y requiere de un ordenador bastante potente, son necesarias dichas simplificaciones, dado que, de otra forma, sería tedioso y prácticamente imposible llegar a unos cálculos tan próximos. En definitiva, se sacrifica algo de exactitud por mejorar enormemente la velocidad de obtención de resultados.

Cabe destacar que dichas simplificaciones deben ser realizadas con sumo cuidado, realizando alguna comprobación del impacto que tendrá en los resultados. Algunos de estos datos serán inamovibles ya que modificarlos implicaría la obtención de resultados erróneos.

### 6.3.1.NÚCLEO.

Una de las simplificaciones que se han realizado, ha sido considerar el núcleo con un número de chapas bastante reducido.

El núcleo ha sido diseñado con 10 chapas metálicas de espesor de 2 cm, 1.3 m de largo y 1 m de altura cada una.

Para comprobar si esta simplificación afecta a los resultados finales, se ha procedido a realizar un estudio aplicando únicamente el ensayo electromagnético. En primer lugar, se ha calculado para el número de chapas anteriores y, posteriormente, con 200 chapas de 1mm de espesor.

De los resultados obtenidos, únicamente se ha visto una diferencia en la uniformidad del campo magnético. De los demás resultados, las características eléctricas inducidas del transformador no se ven afectadas ni ningún otro valor. Por tanto, se considera aceptable la simplificación realizada.

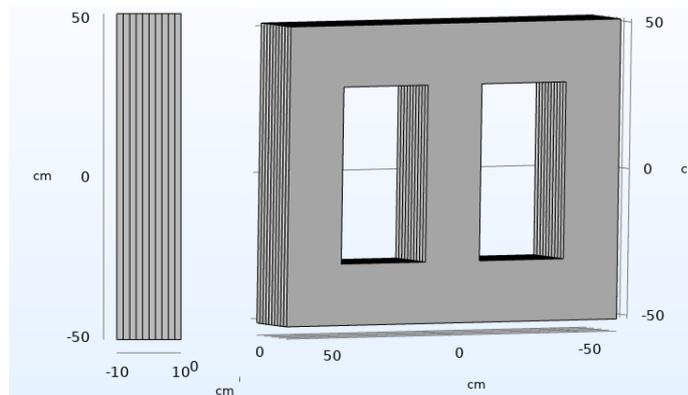


Figura 46: Núcleo del transformador.

### 6.3.2.DEVANADOS.

Las bobinas y el aislamiento se han realizado con cilindros macizos, ya que, como veremos posteriormente, una vez asignadas las características de los arrollamientos, el programa realizará automáticamente un análisis de la geometría de la bobina antes de realizar los cálculos pertinentes.

Mediante la física magnetic fields (campos magnéticos), se establecerá que dichos cilindros se tratan de bobinas con una determinada sección de conductor, el número de espiras, la alimentación de dichas bobinas, así como, la dirección de la corriente a través de ellas. Esto será importante ya que dependiendo la dirección que se establezca se verá modificado el índice horario. En la realidad, sería el equivalente de bobinar el devanado en una dirección u otra.

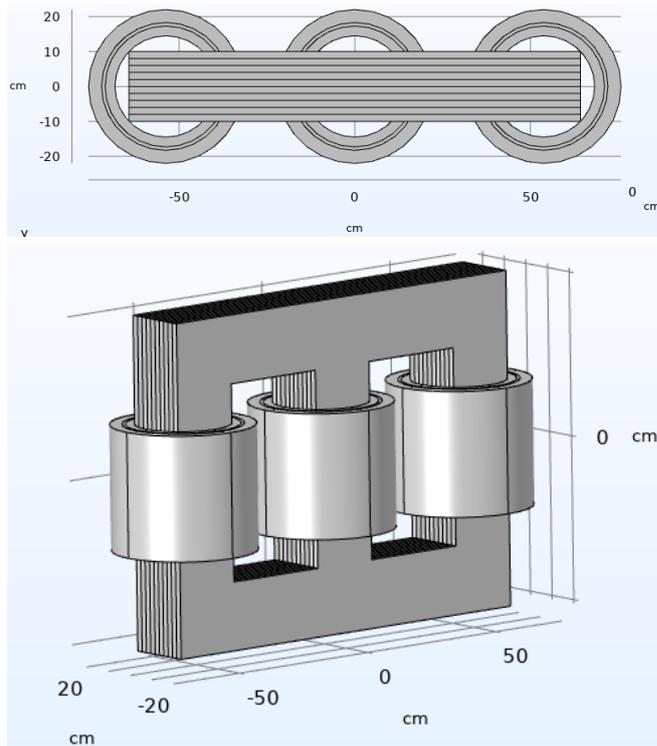


Figura 47: Devanados del transformador.

### 6.3.3. ESTRUCTURA DEL NÚCLEO.

Como puede verse a continuación, se ha realizado la estructura que sujetaría el núcleo del transformador.

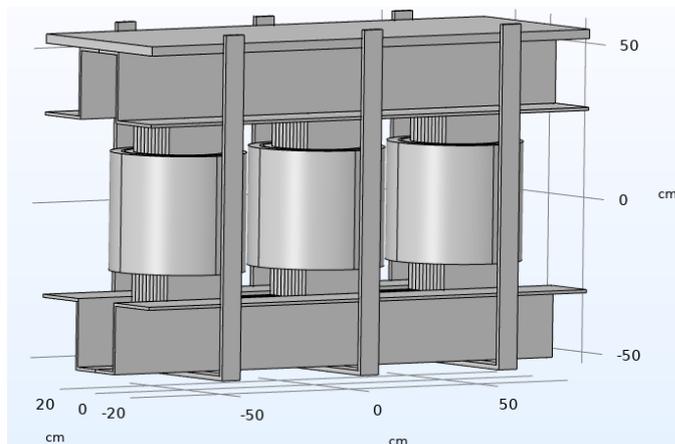


Figura 48: Estructura del núcleo del transformador.

Se considerarán también los calentamientos sufridos en dicha estructura, aunque serán bastante menores que el calentamiento de las bobinas o del núcleo.

### 6.3.4. CUBA Y DEPÓSITO DE EXPANSIÓN.

Las dimensiones del depósito de expansión son de 30 cm de radio y 1,8 m de largo.

La cuba posee dimensiones de 1,8 m de largo por 1.3 m de alto y 1.2 m de profundidad.

La tubería de unión entre la cuba y el depósito es de 10 cm de diámetro.

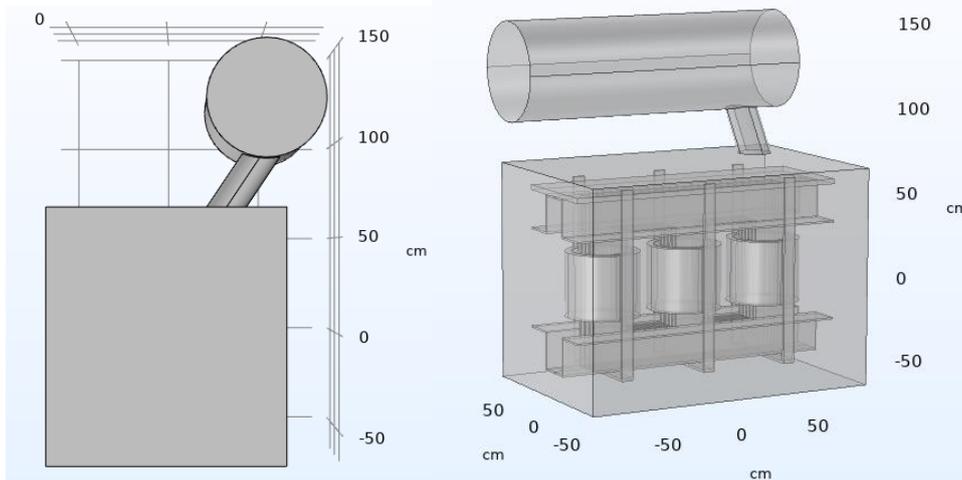


Figura 49: Cuba y depósito de expansión.

## 6.4. FÍSICAS USADAS

### 6.4.1. CAMPOS MAGNÉTICOS (MAGNETIC FIELDS).

En la siguiente figura puede verse la estructura de las condiciones usadas para el modelo.

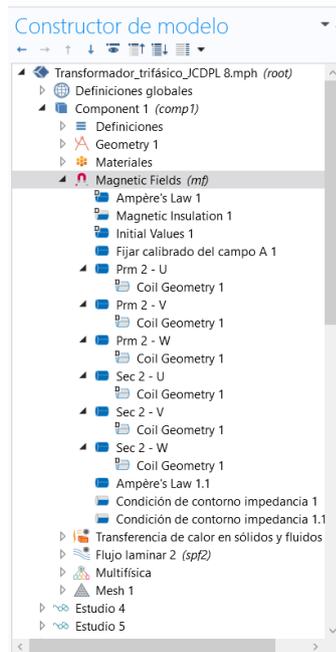


Figura 50: Estructura Magnetic Fields.

De lo anterior cabe destacar:

- En Ley de Ampère 1 se ha incluido todo el transformador excepto el núcleo. De dicha selección se usará, para el modelo de magnetización, la permeabilidad relativa de cada material.
- En fijar calibrado del campo se ha tomado un valor de 1 A/m ya que esto mejora la condición de convergencia de los resultados.
- Como veremos a continuación, se les ha asignado a las bobinas los datos geométricos, las tensiones e intensidades reales.
- En condición de contorno impedancia 1, se ha seleccionado la cuba y el depósito de expansión. Esto le especifica al programa que el campo magnético no saldrá de esta. Esta simplificación ahorrará tiempo de cálculo.
- En condición de contorno impedancia 1.1, se ha seleccionado la estructura del núcleo.
- En ley de Ampère 1.1 se ha seleccionado el núcleo del transformador y se ha usado para el modelo de magnetización la curva efectiva B-H del material. Dicha curva se encuentra expuesta en el apartado de materiales de esta memoria (figura 39).

A continuación, se va a explicar con más detalle la definición de las bobinas ya que es una de las partes más importantes en la definición del modelo.

Para las bobinas primarias se ha tenido en cuenta una tensión de fase de  $15000/\sqrt{3}$  con el desfase correspondiente a cada bobina.

El resto de parámetros usados son:

- Número de espiras ( $N_p$ ): 1800 espiras.
- Sección del conductor ( $P_{rm\_asp}$ ):  $8.51 \text{ mm}^2$

Figura 51: Datos bobina del primario.

Se ha establecido la dirección en sentido antihorario como puede verse en la siguiente figura. En este apartado, como puede verse, se establecerá también la longitud de la arista. Estos valores han sido definidos en una tabla en definiciones globales.

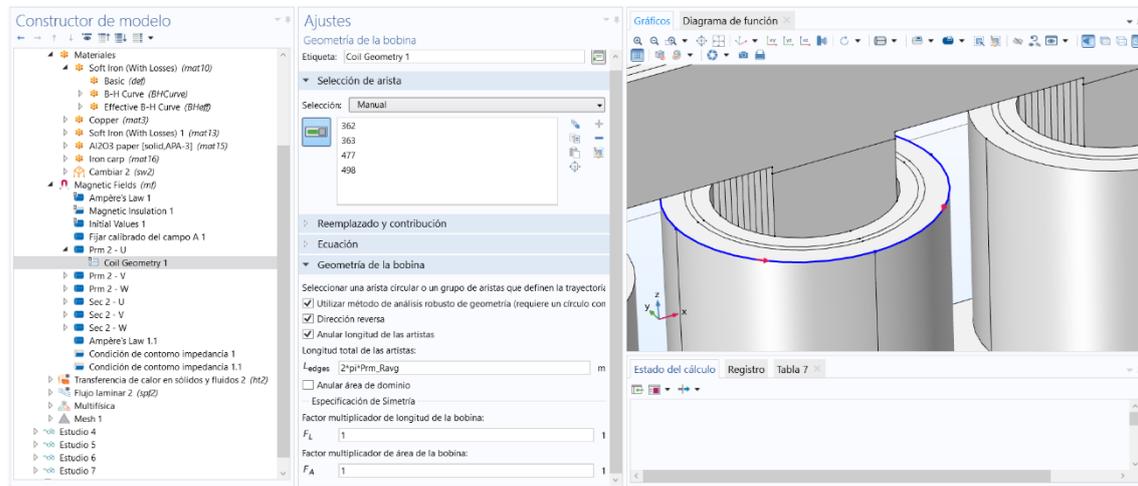


Figura 52: Geometría de bobina primaria en Magnetic Fields.

Para las bobinas secundarias se ha tenido en cuenta una intensidad de 577.35 A con el desfase correspondiente a cada bobina. Esta intensidad será una de las principales fuentes de calor en nuestro transformador dado su elevado valor. Se ha considerado que la carga sea puramente resistiva.

El resto de parámetros usados son:

- Número de espiras ( $N_s$ ): 48 espiras.
- Sección del conductor ( $Scn\_asp$ ):  $1.68 \text{ cm}^2$

Los valores de tensión de dichas bobinas serán los inducidos respecto a las bobinas primarias. Estos valores vendrán mostrados en otro apartado posterior cuando se realicen los cálculos correspondientes. Se estima que tomarán un valor de  $400/\sqrt{3}$  con el desfase correspondiente para cada bobina.

Se ha establecido la misma dirección que las bobinas primarias como puede verse en la siguiente figura. En este apartado, al igual que en el caso de las bobinas primarias, se establecerá también la longitud de la arista.

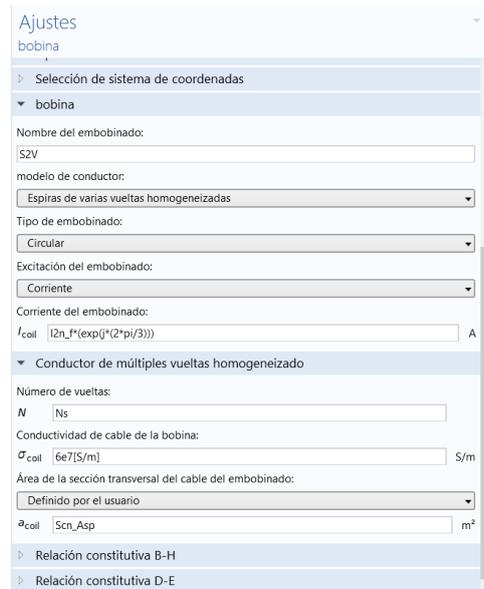


Figura 54: Datos bobina del devanado secundario.

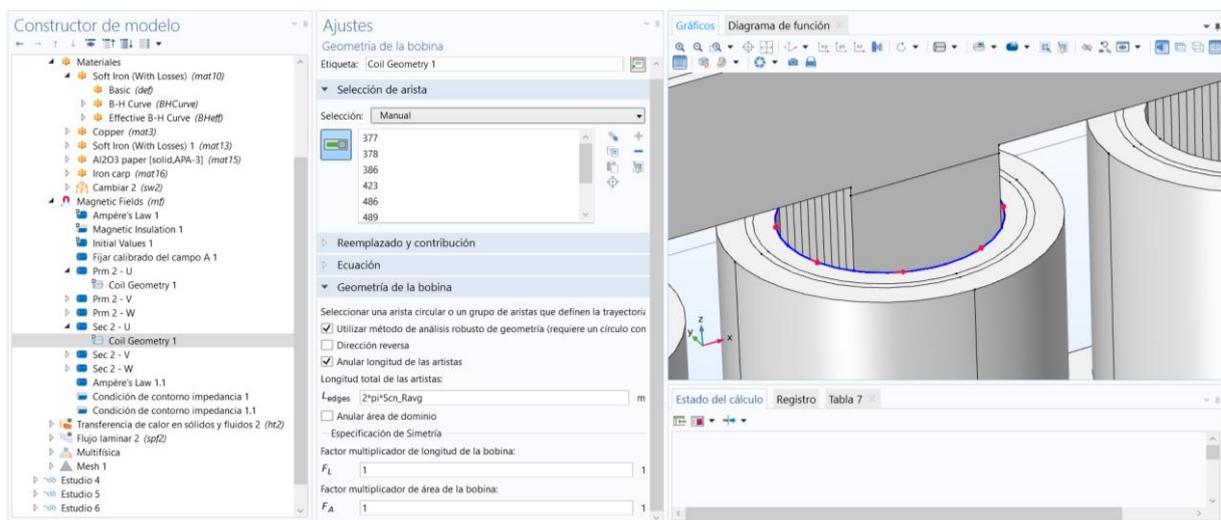


Figura 53: Geometría de bobina secundaria en Magnetic Fields.

## 6.4.2. TRANSFERENCIA DE CALOR EN SÓLIDOS Y FLUIDOS.

Estas son las condiciones que se han impuesto en este apartado:

- Se han seleccionado las partes del transformador que corresponden a materiales sólidos.
- Se ha marcado el aceite del transformador, contenido en la cuba, como material líquido.
- Se han establecido unas condiciones de temperaturas iniciales.
- Se ha indicado el flujo de calor convectivo como puede verse en la figura 55. El coeficiente de transferencia de calor se ha fijado en función de un parámetro  $hk$  que posteriormente se especificará con más detalle.
- Se ha establecido radiación al ambiente.
- Queda definida las paredes de la cuba como capa fina de grosor 1mm.

En este apartado, el programa nos da la posibilidad de establecer fuentes de calor y asignárselas a los diferentes elementos del transformador. Sin embargo, esto no es de interés para el caso que nos ocupa, ya que a través de la multifísica calentamiento electromagnético, como veremos posteriormente, el programa calculará de manera automática dichos calentamientos a través de las pérdidas electromagnéticas.

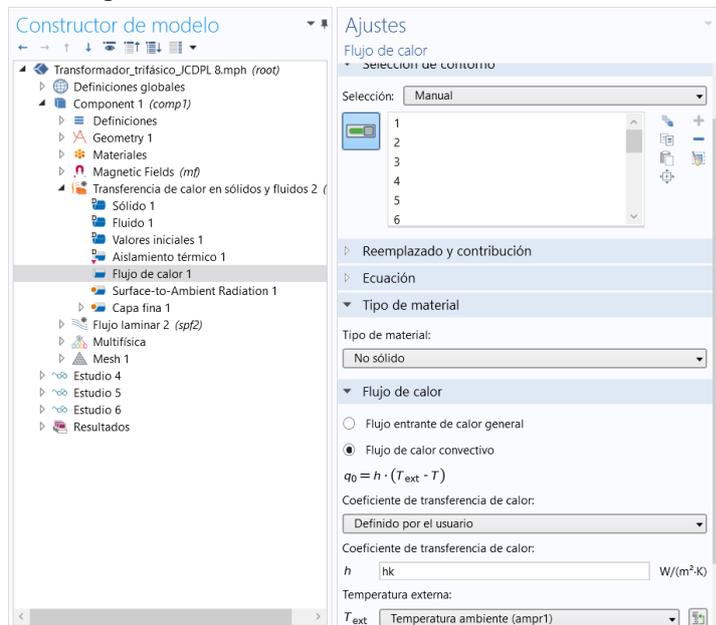


Figura 55: Transferencia de calor en sólidos y líquido. Flujo de calor.

Mediante el apartado capa fina se establece que entre el medio refrigerante y el aire exterior existe una capa de material diferente a los dos fluidos. Esta capa está definida como condición de contorno en el material: acero al carbono.

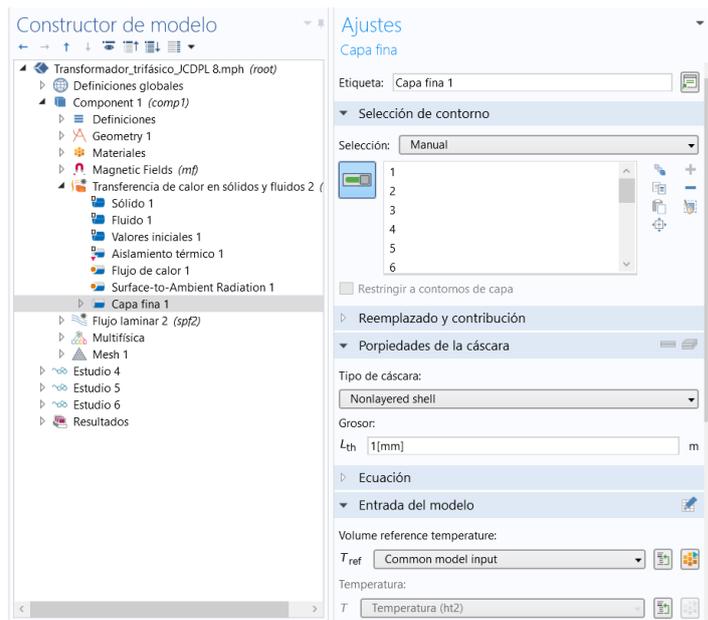


Figura 56: Capa fina paredes de la cuba.

### 6.4.3.FLUJO LAMINAR.

En este apartado se seleccionará el aceite del transformador ya que aquí terminaremos de asignar las características de dicho fluido.

- Se han definido los elementos que constituyen una pared para el líquido, es decir, que no puede atravesar.
- Se ha considerado la fuerza de gravedad ya que esto afectará a la convección interna natural del aceite.
- Se le ha asignado al aceite la condición de incompresibilidad. Al igual que otras simplificaciones tenidas en cuenta, esta simplificación ha sido calculada para las diferentes opciones, llegando a la conclusión que, para el caso del transformador no se ve afectado dicha simplificación, mejorando en gran medida el tiempo de computación.

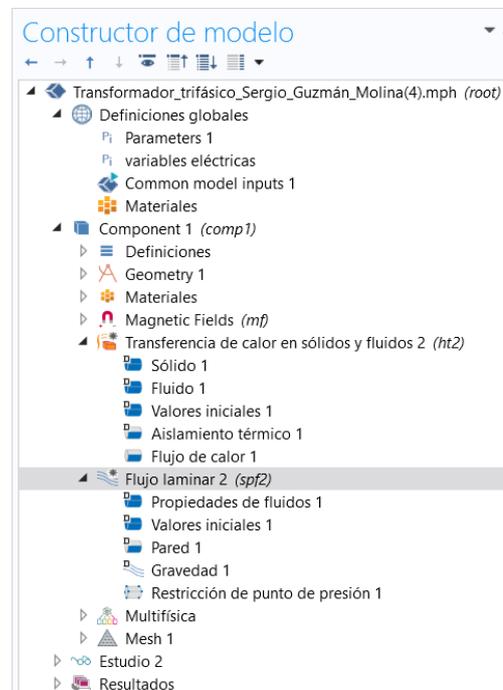


Figura 57: Flujo laminar.

## 6.4.4. MULTIFÍSICA.

Mediante las multifísicas, Comsol es capaz de acoplar varias físicas y realizar uniones entre las variables que dependen unas de otras para así calcular los datos lo más realista posibles.

En este caso harán falta 2 multifísicas.

- En la multifísica calentamiento electromagnético se acoplarán las físicas magnéticas y térmicas para relacionar las pérdidas del transformador con la emisión de calor ocasionadas por estas.

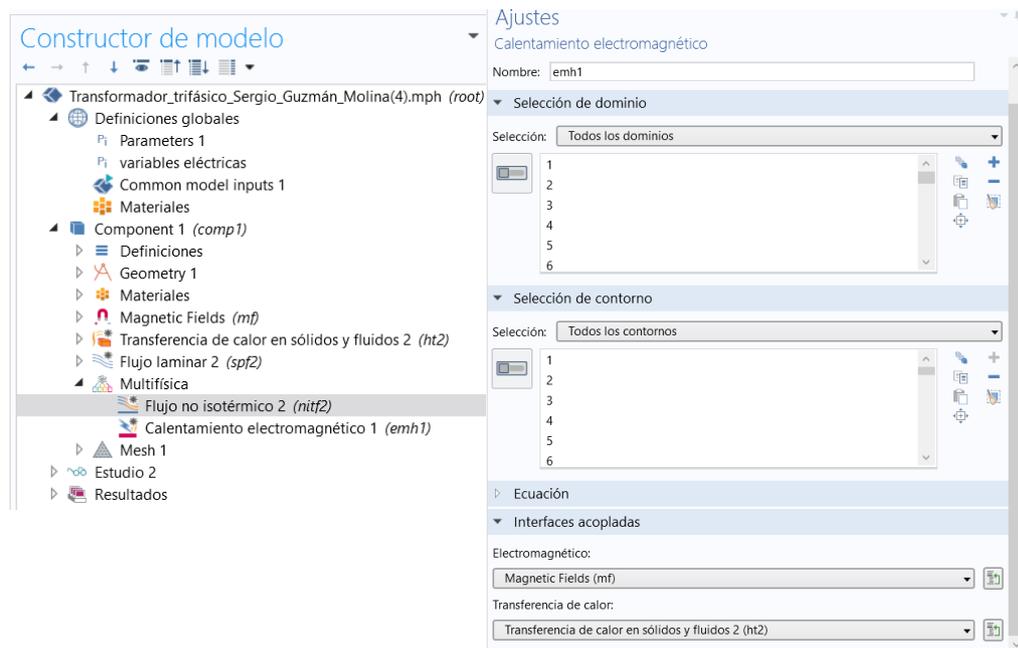


Figura 58: Ajustes multifísica. Calentamiento electromagnético

Mediante la física flujo no isotérmico se acoplan la física de transferencia de calor en sólidos y líquidos con las características de comportamiento del líquido definidas en flujo laminar.

Las multifísicas hacen posible el interconectar las diferentes variables y así poder visualizar el impacto que tendrán la modificación de una variable en los resultados, por ejemplo, cambiando la intensidad podrá verse como afectan a las pérdidas del transformador y, por consiguiente, a los calentamientos que este sufre.

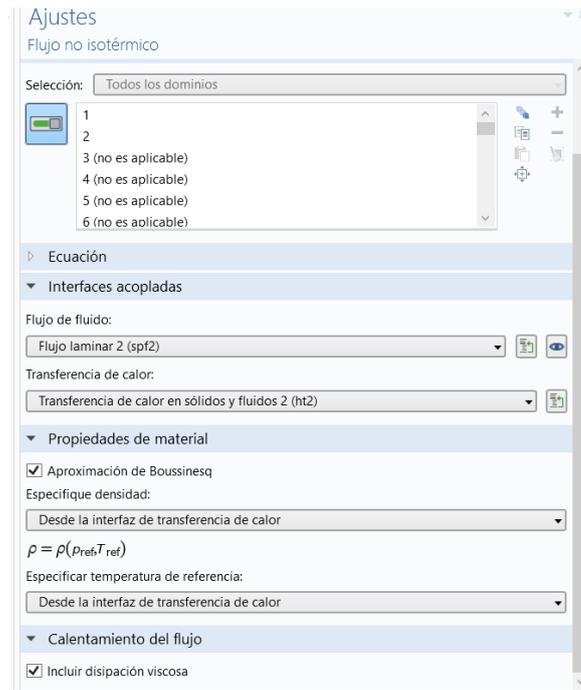


Figura 59: Ajustes flujo no isotérmico.

## 6.5. MALLADO.

Como se ha explicado anteriormente, Comsol, al tratarse de un programa de elementos finitos, necesita definir la subdivisión de la geometría en elementos. Dependiendo de la exactitud con la que se quiera obtener los resultados, se usará un mallado más fino, para más exactitud, o uno más grueso, para menos exactitud.

La geometría de estos elementos puede ser rectangular o triangular.

Como puede verse en la figura 60 se ha establecido un estilo de mallado fino con geometría triangular para la estructura del núcleo y para el núcleo.

Para los contornos de la bobina se ha usado una geometría rectangular con tamaño algo mayor. Esta geometría se ha tenido en cuenta debido a que la bobina tendrá un calentamiento uniforme debido al tamaño que estas poseen.

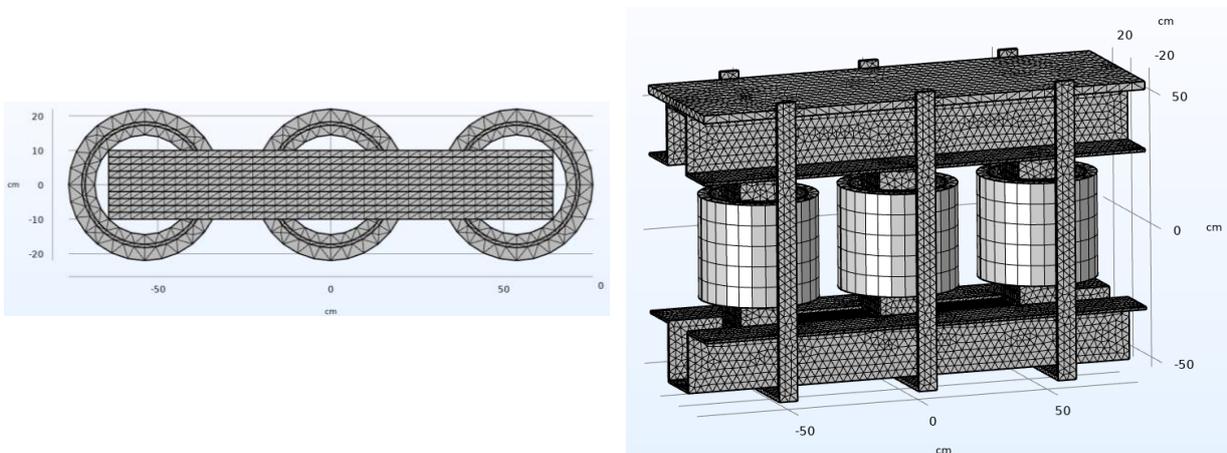


Figura 60: Mallado parte interna del transformador.

Para el exterior del transformador se ha optado por una malla normal triangular, dejando que el programa asigne automáticamente la distribución de esta.

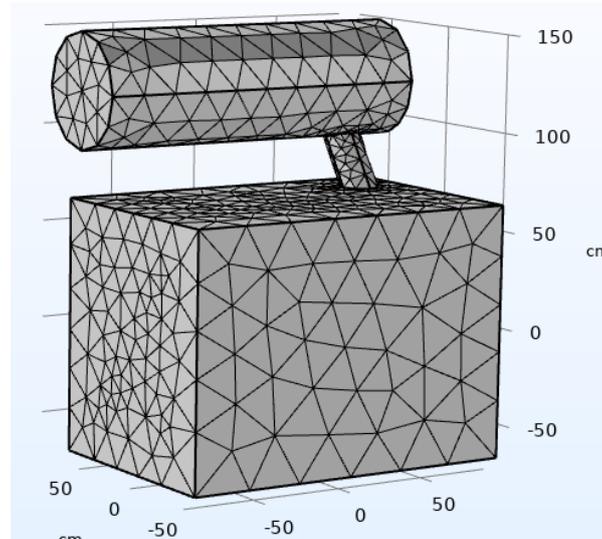


Figura 61: Mallado exterior del transformador.

Debido a que los calentamientos en el interior se han considerado más importantes que en el exterior, se ha optado por realizar un mallado más grueso en el exterior.

## 6.6. CONDICIONES DEL ESTUDIO.

El cálculo de dicho modelo se ha realizado con el siguiente ordenador:

- Procesador: Intel Core i7 – 1065G7.
- RAM: 16 GB.
- Memoria Virtual: 32 GB.

Se han realizado diez estudios diferentes:

- En el primer estudio, denominado “Efecto de la temperatura ambiente y de la refrigeración externa”, se ha realizado un barrido paramétrico de la temperatura ambiente, así como del coeficiente de transferencia de calor del aire externo del transformador, sin variar las condiciones eléctricas, es decir, funcionando el transformador con sus valores asignados de tensión e intensidad, y estableciendo el refrigerante como aceite mineral.
- En el segundo estudio, “Comportamiento del transformador ante varias situaciones de carga modificando la refrigeración externa”, se han variado las condiciones de carga del transformador, así como el coeficiente de transferencia de calor del aire externo, dejando fija la temperatura externa a 20°C, siendo el refrigerante aceite mineral.

- En el tercer estudio, "Influencia de la radiación al ambiente", se ha variado la temperatura ambiente y la emisividad, dejando fija la carga del transformador a su valor de intensidad asignada. Además, se ha fijado el valor del coeficiente de transferencia de calor a  $0.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- En el cuarto estudio, "Funcionamiento con sobretensión" se ha alimentado las bobinas primarias a una tensión un 10% superior a la nominal, dejando fijo el valor de temperatura ambiente a  $30^\circ\text{C}$ , el valor del coeficiente de transferencia de calor a  $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  y el de emisividad a 0.7.
- En el quinto estudio, "Comprobación de la reversibilidad del transformador", se ha probado el carácter reversible de la máquina, alimentando el transformador por el lado de baja tensión.
- En el sexto estudio, "Efecto de la presencia del depósito de expansión en la temperatura", se ha fijado la alimentación a su tensión asignada con régimen de carga nominal. Se ha eliminado el depósito de expansión de la geometría y se ha establecido el valor de temperatura ambiente a  $30^\circ\text{C}$ , el valor del coeficiente de transferencia de calor a  $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  y el de emisividad a 0.7.
- En el séptimo estudio, "Efecto del tamaño de la cuba en la refrigeración", se ha variado el tamaño de la cuba y del depósito de expansión mediante un barrido paramétrico. Se ha fijado un valor de carga un 30% superior a la nominal y se ha establecido el valor de temperatura ambiente a  $30^\circ\text{C}$ , el valor del coeficiente de transferencia de calor a  $0.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  y el de emisividad a 0.7.
- En el octavo estudio, "Cortocircuito trifásico en el devanado de baja tensión", se han alimentado las bobinas primarias con su valor asignado y se han cortocircuitado las bobinas secundarias. En este caso, el estudio realizado es un estudio frecuencia-transitoria. El tiempo del estudio ha sido de 2 segundos.
- En el noveno estudio, "Cortocircuito monofásico en bobina secundaria", se ha optado por establecer un régimen de carga desequilibrado para dos bobinas secundarias, y otra se ha cortocircuitado. Al igual que el caso anterior, se ha realizado con un estudio frecuencia-transitoria de 2 segundos de duración.

- En el décimo estudio, “Sistema de carga desequilibrado”, se ha optado por implantar un sistema desequilibrado de intensidades en las bobinas secundarias. Las intensidades tomarán valores de 70, 90 y 120% de la carga nominal. También, se ha establecido el valor de temperatura ambiente a 30°C, el valor del coeficiente de transferencia de calor a 0.5 W/(m<sup>2</sup>·K) y el de emisividad a 0.7.

Cabe destacar que también se han realizado otros estudios como, por ejemplo, modificando levemente las características del aceite del transformador para procurar optimizar los resultados obtenidos, pero dado que los resultados no se han visto modificados enormemente, no han sido expuestos en esta memoria.

Para realizar el cálculo se ha tenido que establecer un barrido paramétrico, en el que se establecerán las condiciones del estudio, seguido de dos pasos de cálculos:

- Paso 1: Análisis de geometría de la bobina.
- Paso 2: Frecuencia-Estacionario.

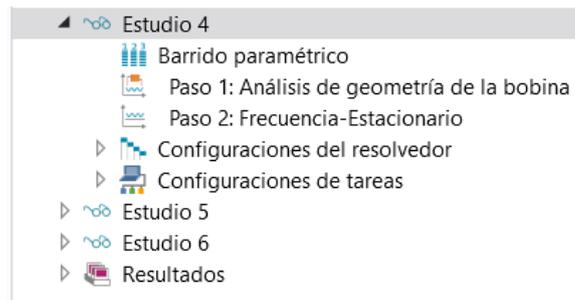


Figura 62: Pasos del estudio.

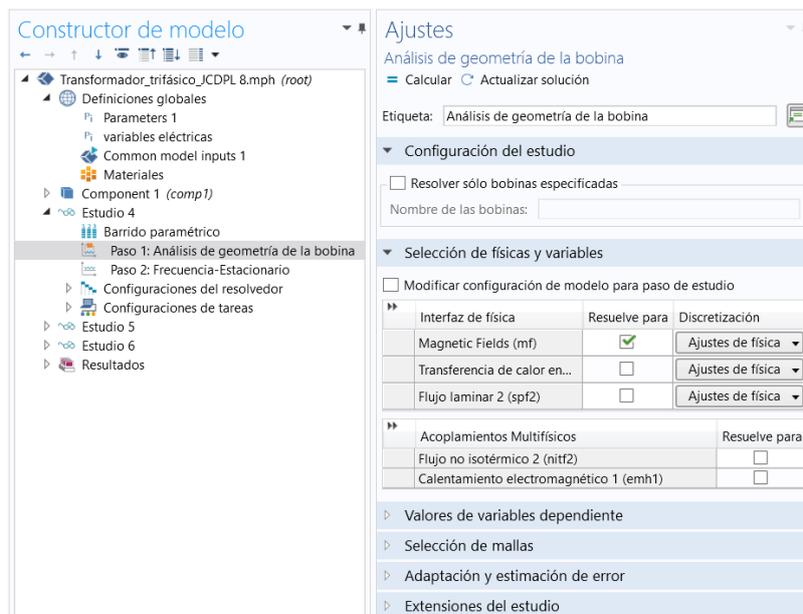


Figura 63: Análisis de geometría de la bobina.

En este paso el programa desarrolla las condiciones impuestas en la bobina mediante la física campos magnéticos, dándole forma a esta según los datos introducidos para calcular los siguientes pasos. Esta geometría será la que definirá las pérdidas ocasionadas en esta y los posteriores calentamientos ocasionadas en el transformador.

Como puede verse en la figura 63, solo se ha seleccionado la física Magnetic Fields ya que es la única implicada en el diseño de la bobina.

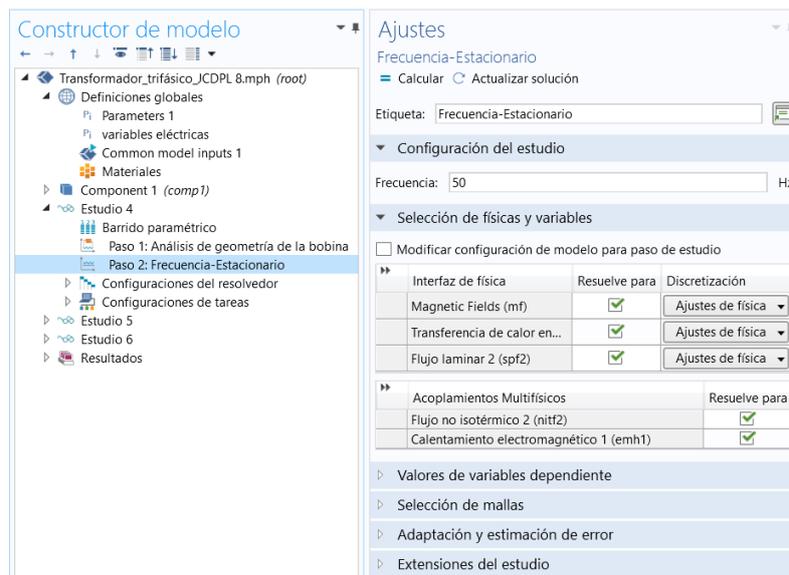


Figura 64: Frecuencia-Estacionario.

En el paso frecuencia-estacionario se han seleccionado todas las físicas y sus respectivas multifísicas ya que este paso llevará toda la parte del cálculo magnético y térmico del transformador.

## 7. RESULTADOS OBTENIDOS.

A continuación, se va a proceder a exponer los resultados obtenidos para los diferentes estudios.

### 7.1. ENSAYO ELECTROMAGNÉTICO.

En este apartado se expondrán los resultados correspondientes al ensayo electromagnético tomando como punto de partida los valores asignados del transformador.

Aplicando la tensión asignada en los devanados primarios, con sus correspondientes desfases de ángulos, las tensiones inducidas en el secundario serán las siguientes:

$$\begin{aligned} V_{2U} &= 235.36 + 40.801j = 238.87_{[9.8348^\circ]} V \\ V_{2V} &= -152.81 + 183.42j = 238.73_{[129.798^\circ]} V \\ V_{2W} &= -85.525 - 224.18j = 239.94_{[-110.882^\circ]} V \end{aligned}$$

Definiendo la intensidad por el secundario de 577, 35 A, en el devanado primario tendremos una intensidad de 15.426 A.

Cabe recordar que en el programa se han definido Tensión primaria e Intensidad secundaria, los demás valores están obtenidos de los cálculos realizados por el programa.

La distribución del campo magnético en el núcleo es la mostrada en la figura 65.

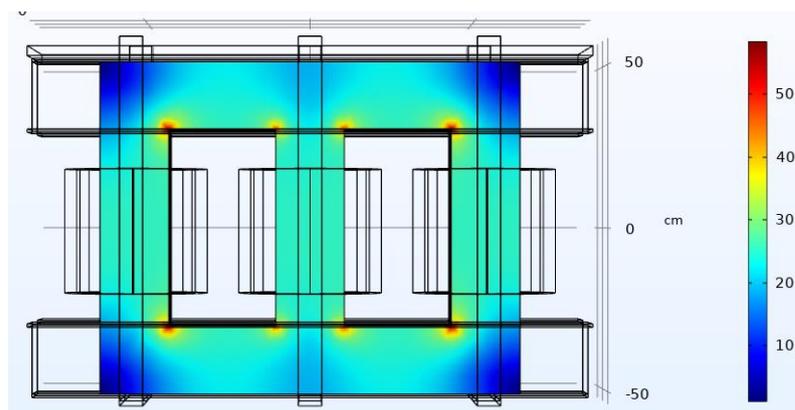


Figura 65: Distribución campo magnético.

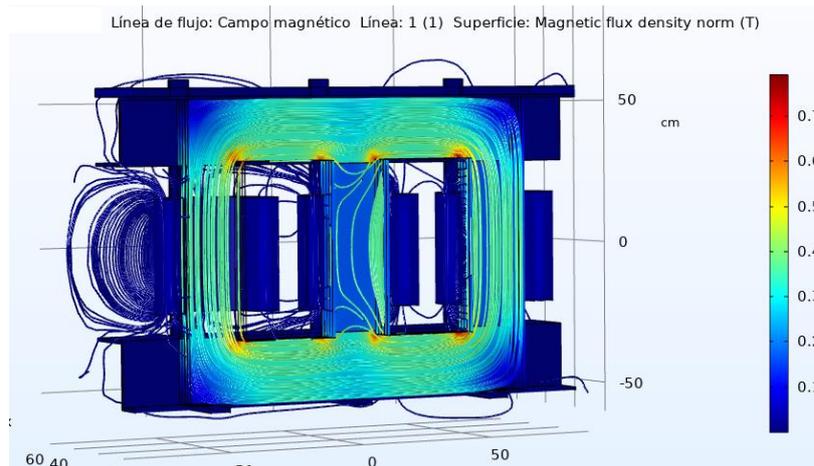


Figura 66: Líneas de campo magnético.

En la imagen anterior puede apreciarse el movimiento de las líneas de campo dentro de la cuba.

Cabe señalar que, como se indicó anteriormente en el apartado 6.4.1 de esta memoria, las líneas de campo no atravesarán la cuba. Esto reducirá bastante el tiempo de cálculo.

Estas líneas de campo inducirán las tensiones, indicadas anteriormente, en las bobinas secundarias.

Al tratarse de un transformador Yy0, pueden darse por válidas las tensiones anteriores. Existe un pequeño desvío de ángulos de dichas tensiones de unos  $9.8^\circ$  que puede estar relacionado con las simplificaciones realizadas en el modelo.

Una vez que se han verificado las tensiones e intensidades, se procederá a visualizar las pérdidas del transformador. Para ello, se ha modificado la intensidad de la bobina secundaria para ver cómo se ven afectadas dichas pérdidas.

Los datos obtenidos son los que se muestran en la figura 67.

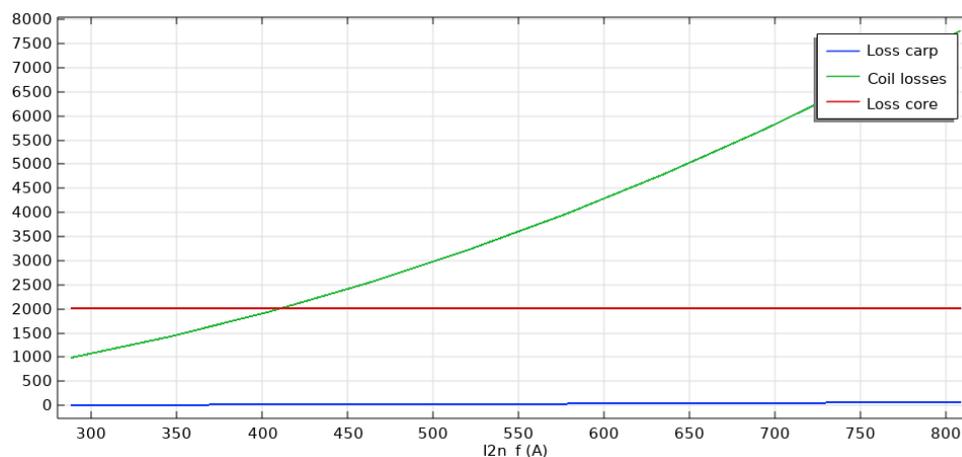


Figura 67: Pérdidas en estructura, núcleo y bobinas.

Puede verse en la figura anterior, la condición de máximo rendimiento del transformador se dará con un 71% de carga. Siendo en ese punto las pérdidas de las bobinas iguales a las pérdidas en el núcleo (pérdidas en el cobre iguales a pérdidas en el hierro).

Las pérdidas en el núcleo, como puede verse, una vez se alcanza la saturación magnética, esta permanece constante. Siendo su valor de 2015.1 W.

Las pérdidas en los devanados, para su intensidad asignada, tomará un valor de 3963.5 W.

## 7.2. MOVIMIENTO DEL FLUIDO.

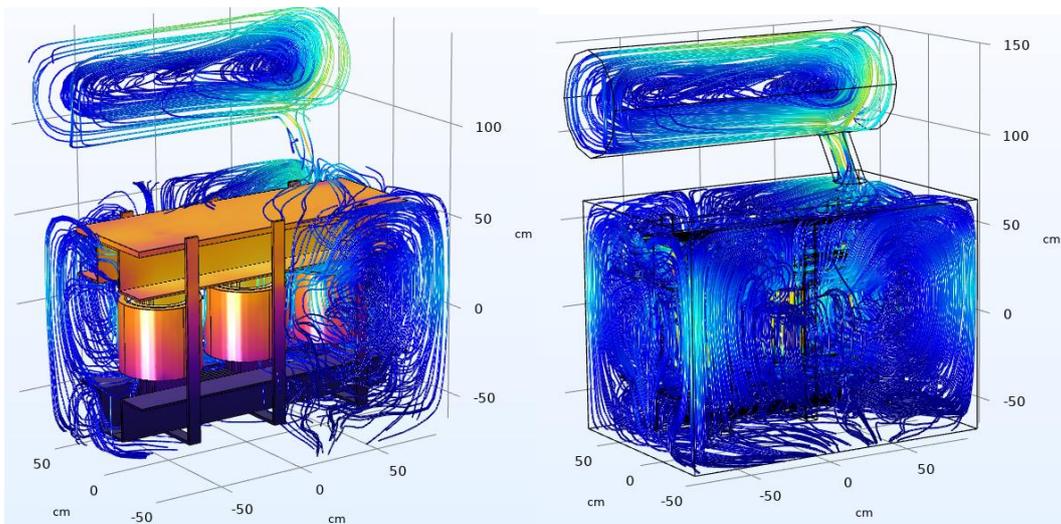


Figura 68: Movimiento del fluido.

Como puede apreciarse en las figuras anteriores, existe un movimiento del aceite debido a su calentamiento. Conforme aumenta la temperatura del aceite la densidad se reduce haciendo que este suba y, una vez enfriado en el depósito, comience a descender hacia la cuba.

Se observa como en el depósito cilíndrico, este cambio de densidad ocasiona cierta vorticidad haciendo que regrese el aceite una vez enfriado.

En la figura 68, puede contemplarse como la parte superior del transformador tendrá mayor temperatura que la parte inferior debido a lo explicado anteriormente.

En este apartado no se han contemplado el orden de dichas magnitudes ya que difieren de cada estudio y se expondrán en los siguientes apartados. Únicamente se ha mostrado el comportamiento general del fluido y los calentamientos internos que serán comunes para todos los ensayos.

### 7.3. EFECTO DE LA TEMPERATURA AMBIENTE Y DE LA REFRIGERACIÓN EXTERNA.

En este estudio se ha realizado un barrido paramétrico de la temperatura ambiente, así como del coeficiente de transferencia de calor del aire externo.

Las temperaturas designadas para el cálculo serán de 10°C, 20°C, 25°C, 30°C, 35°C.

Los valores del coeficiente de transferencia de calor serán 0.5, 5, 10, 20 W/(m<sup>2</sup>·K).

El valor de emisividad al ambiente se ha dejado fijo cuyo valor será de 0.7.

La intensidad que circularán por los devanados se corresponderá a la intensidad asignada, es decir, 577.35 A por el secundario y 15.4 A por el primario.

El refrigerante usado para este estudio será aceite mineral.

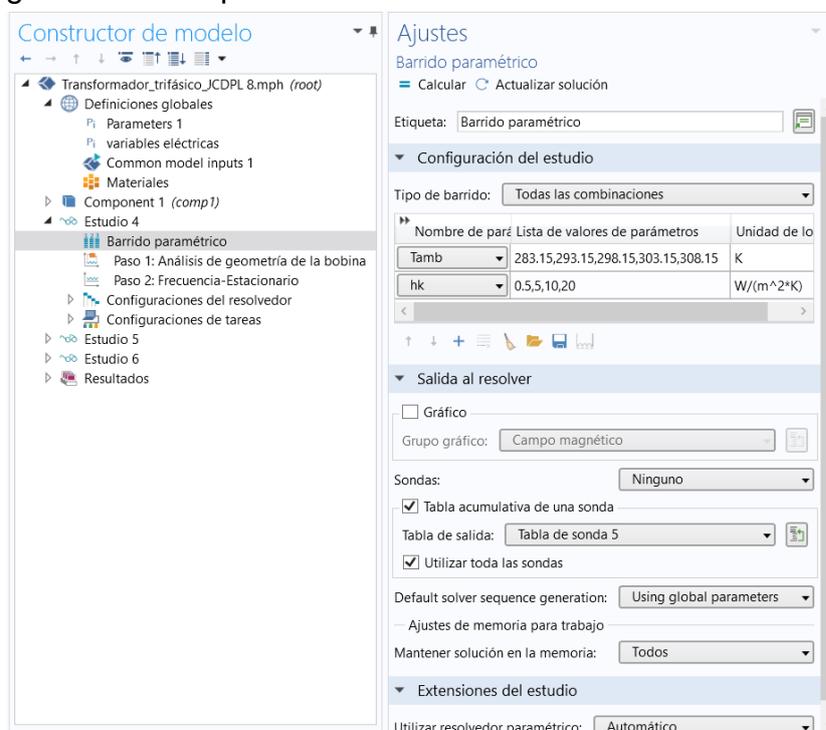


Figura 69: Ajustes Barrido Paramétrico.

En este estudio se analizará la influencia que produciría en el transformador la modificación de las condiciones del entorno. Este análisis se realizará teniendo en cuenta dos variables: la temperatura externa y el coeficiente de transferencia de calor.

El coeficiente de transferencia de calor puede ser mejorado mediante la colocación de elementos pasivos, por ejemplo, aletas de refrigeración, o activos, ventiladores en el lugar donde este se sitúe.

Mediante la modificación de este parámetro podemos ver la clara afectación que tendrá en el calentamiento interno del transformador.

Este será un dato bastante importante a estudiar y dependerá en gran medida del lugar donde sea colocado el transformador, así como los sistemas disponibles de refrigeración.

En este caso, se han establecido unos valores hipotéticos sobre los que se han realizado los cálculos para comprobar esta influencia y como mejorando las condiciones del entorno del transformador, mejora la refrigeración.

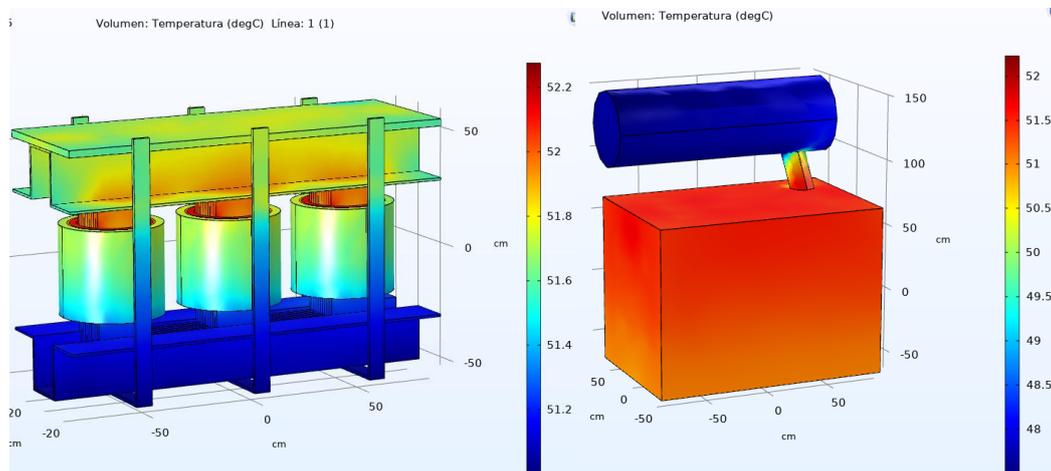


Figura 70: Temperaturas internas y de la cuba para una  $T^a_{ambiente}$  de 25 °C y  $h_k$  de 5W/(m<sup>2</sup> K)

La figura 70 muestra los calentamientos con régimen de carga nominal y una temperatura ambiente de 25°C con un coeficiente de transferencia de calor de 5 W/(m<sup>2</sup> K).

Dado que el estudio se ha realizado para 5 valores de temperatura y 4 valores diferentes de coeficiente de transferencia de calor, se va a proceder a agrupar los valores máximos en una única gráfica, ya que son los valores que nos serán de limitación a la hora de diseñar el transformador.

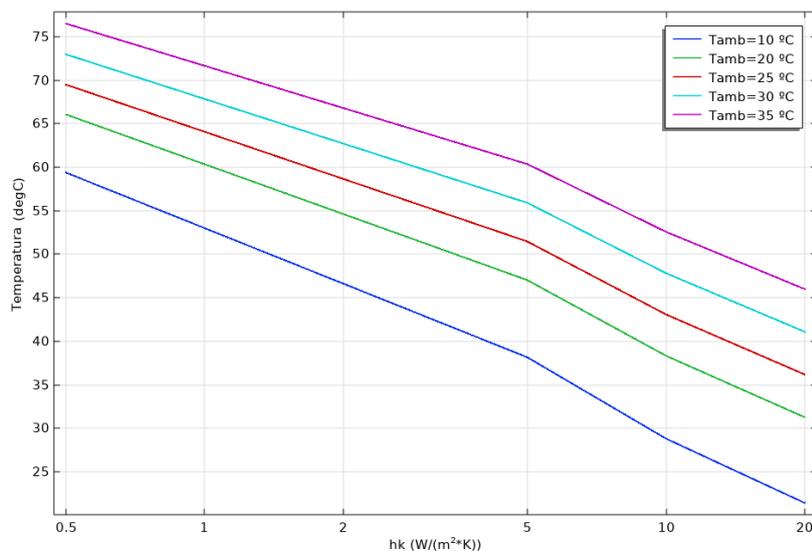


Figura 71: Temperatura máxima transformador.

Puede verse como mejorando el coeficiente de transferencia de calor, el transformador es capaz de aguantar mayores temperaturas externas. Por tanto, puede ser interesante colocar sistemas de refrigeración para mejorar tanto el coeficiente de transferencia de calor como disminuir la temperatura ambiente. Esto servirá para que el transformador, en caso de sobrecargas, sea capaz de soportarlo. Esto se verá en el siguiente estudio.

## 7.4. COMPORTAMIENTO DEL TRANSFORMADOR ANTE VARIAS SITUACIONES DE CARGA MODIFICANDO LA REFRIGERACIÓN EXTERNA.

En este estudio se ha variado las condiciones de carga, así como el coeficiente de transferencia de calor del aire.

Se ha variado la carga del transformador al 50%, 75%, 100%, 130% de su intensidad asignada.

El coeficiente de transferencia de calor se ha especificado para unos valores de 0.5, 1, 5, 10 W/(m<sup>2</sup>·K).

El valor de emisividad al ambiente es de 0.7.

La temperatura ambiente se ha establecido de 20°C.

El refrigerante usado para este estudio es aceite mineral.

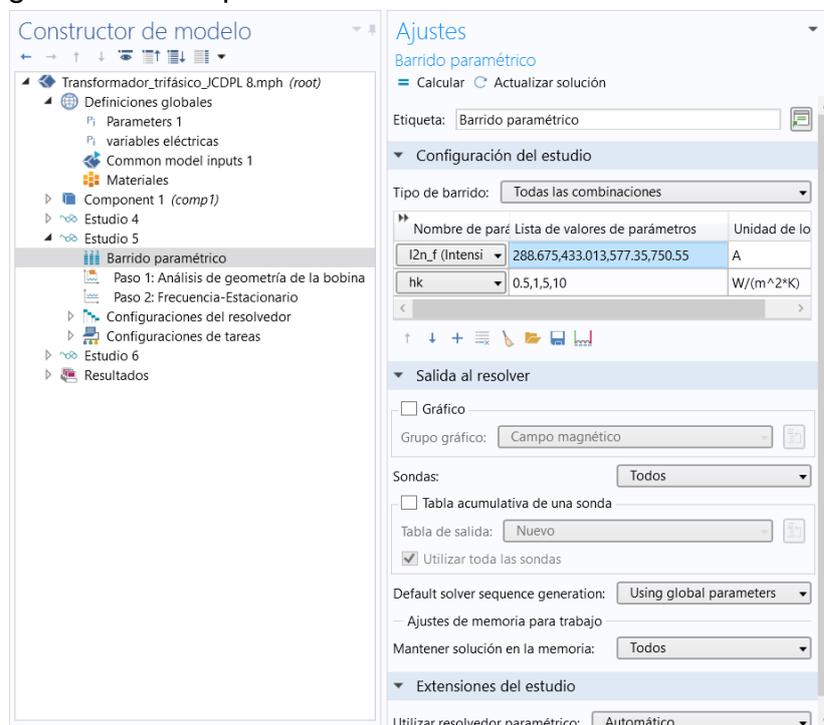


Figura 72:Ajustes Barrido Paramétrico.

En este caso, se busca la relación entre la ventilación externa del transformador con los calentamientos que este sufre y, así poder visualizar como se comportaría con diferentes condiciones de carga.

Se ha establecido una temperatura ambiente constante de 20°C y se ha modificado los valores de carga para así poder visualizar como, refrigerando de manera correcta el transformador, para valores de carga superior a la nominal, puede funcionar entre unos valores de temperatura aceptables.

En este estudio, se realizará un barrido paramétrico de la intensidad y del coeficiente de transferencia de calor externo.

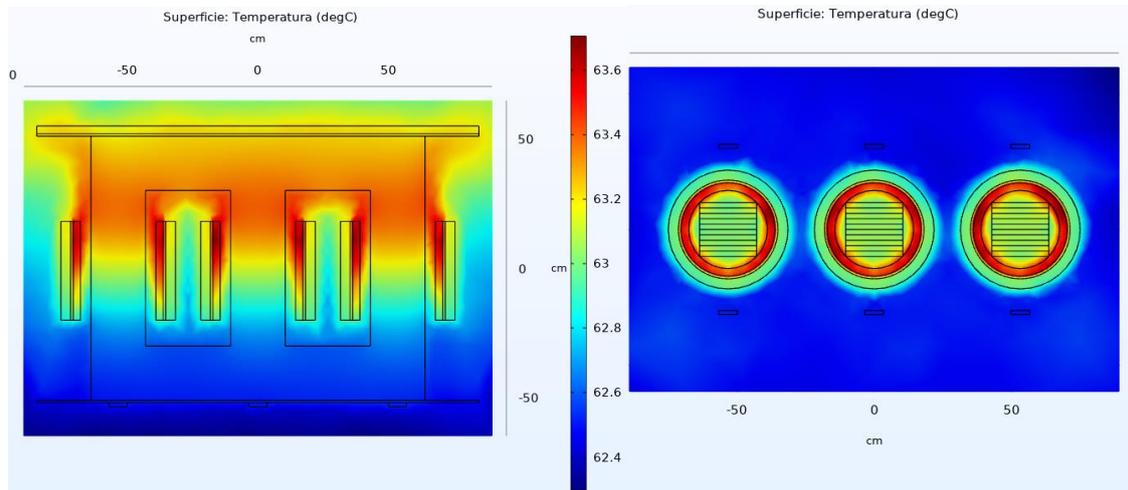


Figura 73: Temperaturas internas para una carga de 577.35 A y un  $h_k$  de  $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ .

En la figura 73 puede apreciarse el calentamiento del aceite debido al núcleo y a las bobinas. Este calentamiento ocasiona el movimiento convectivo interno de dicho aceite.

El aceite cerca del núcleo alcanza temperaturas altas, las cuales habría que prestarles atención ya que son las que ocasionarán la degradación del aceite o, en caso de sobrecalentamientos excesivos, la ignición de este.

Los focos de calor del transformador serán, por un lado, el núcleo magnético, el cual ocasionará calentamientos debido a las pérdidas por histéresis magnética y corrientes de Foucault y, por otro lado, las bobinas, ya que al pasar por ellas una gran corriente, originan grandes pérdidas por efecto Joule.

En la siguiente figura pueden apreciarse las temperaturas máximas alcanzadas en función de la intensidad y del coeficiente de transferencia de calor del aire externo al transformador.

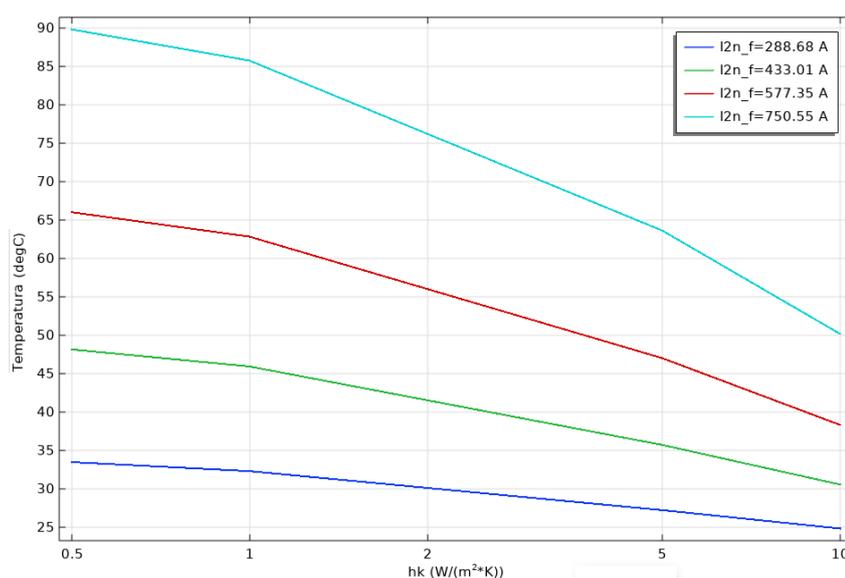


Figura 74: Temperaturas máximas.

Puede observarse como mejorando las condiciones de ventilación exteriores del transformador, mejora notablemente la temperatura interna que este alcanza pudiendo así sobrecargar el transformador de forma puntual, si se requiriese.

Hay que tener en cuenta que estos valores se han fijado para un valor fijo de temperatura ambiente. Sin embargo, como se explicó en el apartado anterior, variando la temperatura ambiente y el coeficiente de transferencia de calor puede ocasionar que el valor de intensidad soportado por el transformador sea mayor o menor al nominal.

El caso de que el transformador pueda aguantar una intensidad menor a la nominal podría ocurrir al tener una temperatura ambiente excesiva con un índice de transferencia de calor bastante bajo. Esto implicaría un calentamiento excesivo en el interior cuyo límite vendrá definido por dicha intensidad.

Por esto, es muy importante mantener una buena ventilación externa del transformador, dado que así se podrá usar una de las ventajas que posee el transformador de aceite respecto al transformador seco, que es el buen comportamiento que posee frente a las sobrecargas debido a lo anterior descrito.

## 7.5. INFLUENCIA DE LA RADIACIÓN AL AMBIENTE.

En este estudio, se ha variado tanto la emisividad como la temperatura ambiente, de esta forma, se consigue analizar el efecto de las condiciones ambientales y, modificando la radiación al ambiente, visualizar el efecto que produciría mejorar dicha emisividad.

En el barrido paramétrico realizado, la emisividad ha tomado valores de 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 y 1. Además, se ha realizado el mismo barrido para valores de temperatura ambiente de 10°C, 20°C, 25°C, 30°C y 35°C.

La intensidad del devanado secundario se ha establecido a 577,35 A y el coeficiente de transferencia de calor a 0.5 W/(m<sup>2</sup>·K).

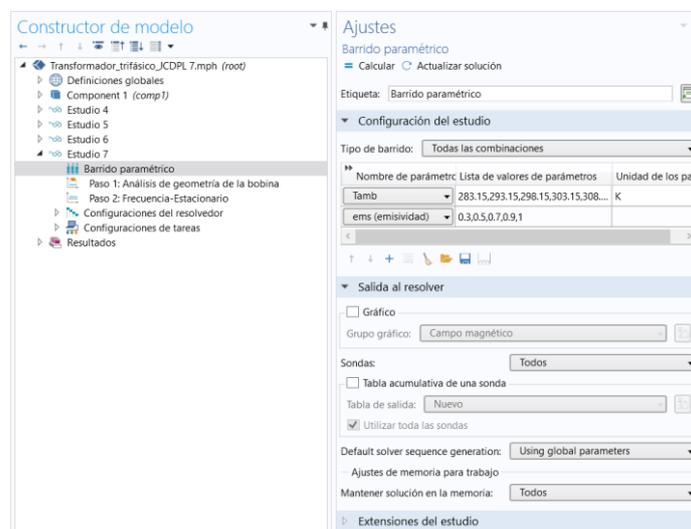


Figura 75:Ajustes Barrido Paramétrico.

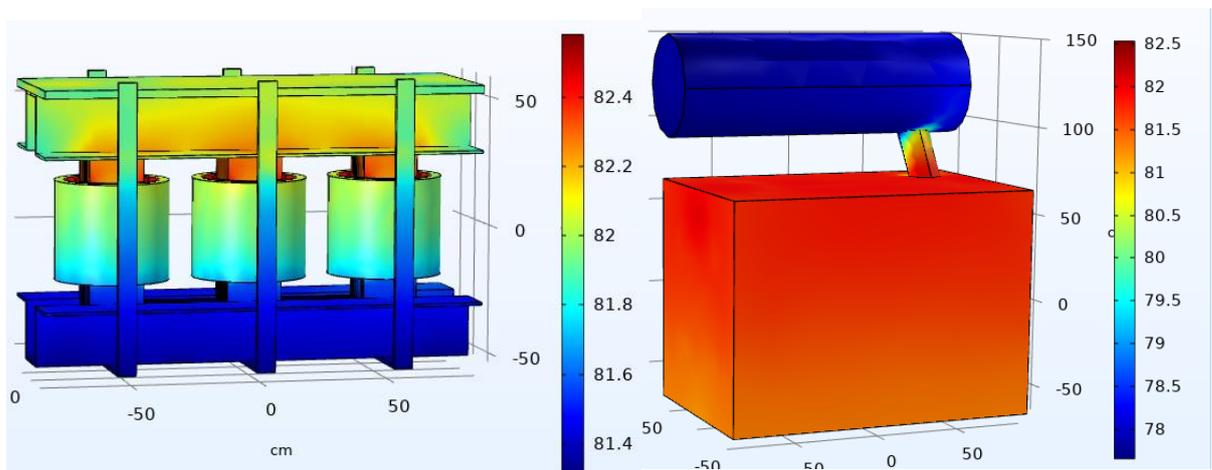


Figura 76: Temperaturas con emisividad de 0.5 y temperatura ambiente de 25°C.

La figura 76 muestra los calentamientos con régimen de carga nominal y una temperatura ambiente de 25°C con una emisividad de 0.5.

Dado que el estudio se ha realizado para 5 valores de temperatura y 5 valores diferentes de emisividad, se va a agrupar los valores máximos en una única gráfica.

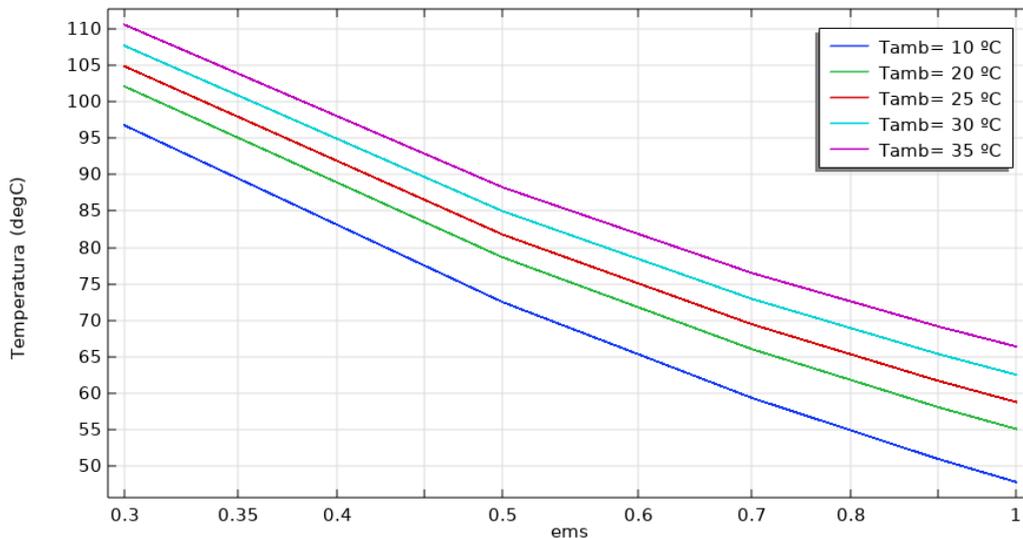


Figura 77: Temperaturas máximas.

En la figura 77, puede apreciarse como mejorando la emisividad al ambiente se consigue una mejora considerable en la temperatura que alcanza el transformador en su interior. Esta emisividad, aunque en el estudio se han tenido en cuenta un abanico de valores bastante importante, en la realidad, viene determinada por el material a usar, la rugosidad de la superficie o el color, pudiéndose mejorar dentro de un rango limitado.

## 7.6. FUNCIONAMIENTO CON SOBRETENSIÓN.

En este estudio se ha considerado el caso de alimentar el devanado primario con una tensión un 10% superior a la asignada. De esta forma, se consigue analizar los calentamientos que sufriría el transformador en dicha condición.

Se ha establecido una temperatura ambiente de 30°C con un coeficiente de transferencia de calor de 10 W/(m<sup>2</sup>·K). La emisividad se ha fijado para un valor de 0.7.

En este caso solo se ha realizado un estudio, es decir, sin aplicar ningún barrido paramétrico, dado que solo es de interés ver la afectación de la temperatura para régimen de carga nominal.

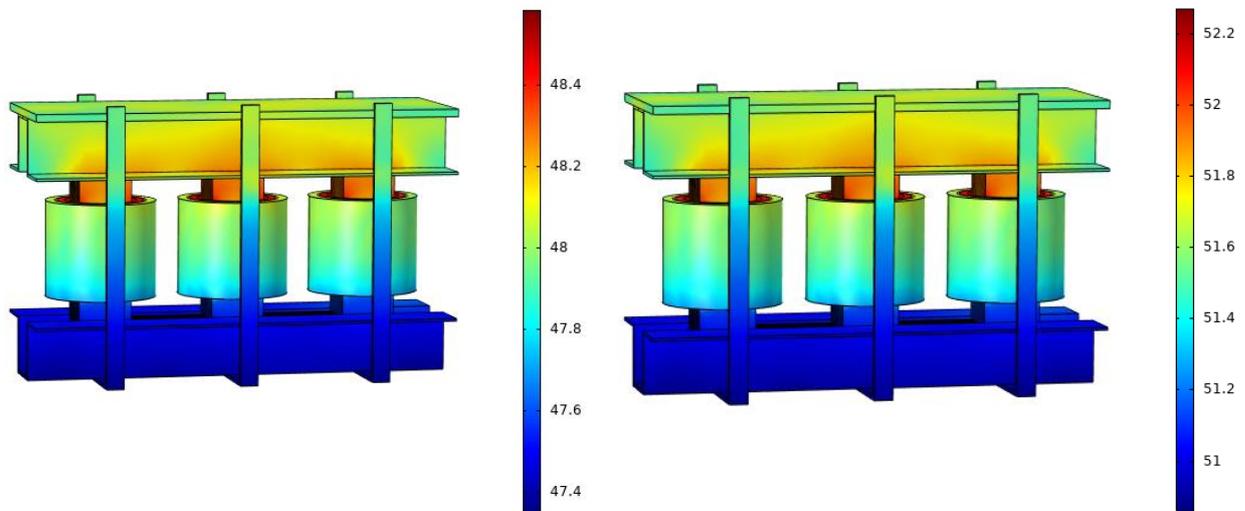


Figura 78: Caso tensión nominal (izquierda), caso tensión un 10% superior a la nominal (derecha).

En la figura 78, puede observarse el aumento de temperatura que sufre el transformador al incrementarse la tensión de alimentación.

Las tensiones inducidas en el devanado secundario son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 V_{2U} &= 258.89 + 44.882j = 262.752_{[9.8352^\circ]} V \\
 V_{2V} &= -168.09 + 201.77j = 262.613_{[129.7969^\circ]} V \\
 V_{2W} &= -90.777 - 246.60j = 262.778_{[-110.2094^\circ]} V
 \end{aligned}$$

Puede verse como ese aumento de tensión también se ve reflejado en las tensiones del devanado secundario, ya que estas deberían de estar situadas en torno a los 230 V. Las intensidades de los devanados también se verán afectadas, siendo de 635.08 A en el devanado secundario y de 16.97 A en el devanado primario.

Como se comentó en el apartado 7.1, las pérdidas de los devanados alimentados a su tensión asignada, ascenderán a un valor de 3963,5 W. En el caso de este estudio, el aumento de la tensión de alimentación ha ocasionado que estas pérdidas asciendan hasta un valor de 4795.8 W.

Por ello, puede afirmarse como variando la tensión de alimentación produce un calentamiento mayor, ocasionado por el aumento de las pérdidas, disminuyendo el rendimiento de la máquina.

Mediante el análisis de este estudio, se puede verificar la idoneidad del modelo para la investigación en diferentes condiciones de alimentación y de carga, pudiéndose examinar el comportamiento del transformador y ajustar los niveles de tensión para optimizar el rendimiento.

## 7.7. COMPROBACIÓN DE LA REVERSIBILIDAD DEL TRANSFORMADOR.

En este estudio se ha realizado la alimentación inversa del transformador para comprobar el carácter reversible del modelo. Se ha procedido a alimentar el devanado secundario con su tensión asignada (230 V) y verificar las tensiones en el devanado primario. Asimismo, se ha establecido la intensidad en el devanado primario a su intensidad asignada y se ha comprobado la intensidad que circularía por el devanado secundario.

Este estudio se ha realizado con una temperatura ambiente de 30°C y con un coeficiente de transferencia de calor de 10 W/(m<sup>2</sup>·K). La emisividad se ha fijado para un valor de 0.7.

Al igual que el caso anterior, no se ha realizado ningún barrido paramétrico ya que lo que se pretende es ver el carácter reversible del transformador.

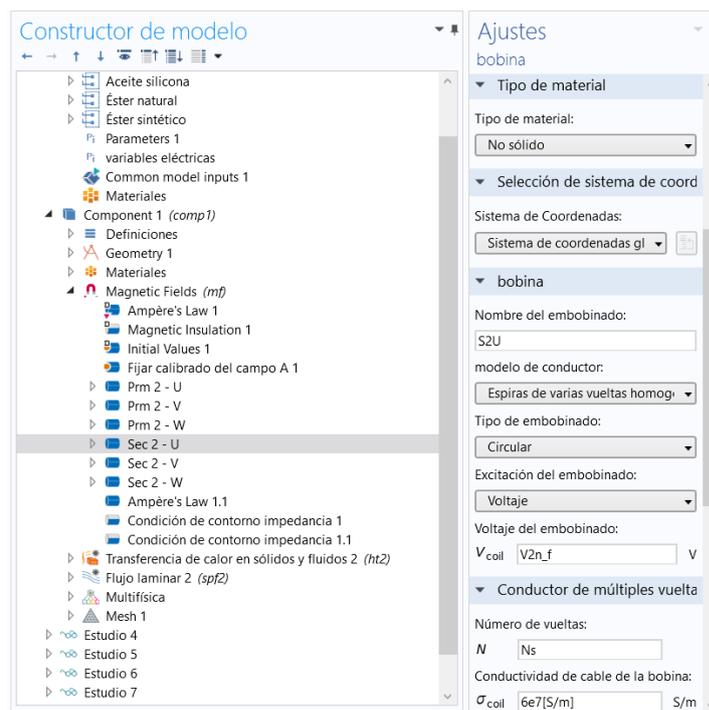


Figura 79: Modificación de la alimentación de las bobinas.

Como puede verse en la figura anterior, se ha procedido a alimentar las bobinas secundarias con su tensión nominal para verificar si en el devanado primario se inducen las tensiones nominales y, así comprobar el carácter reversible de la máquina.

Realizando la medición mediante sondas, se verifica que las tensiones en los devanados primarios son las siguientes:

$$V_{1U} = 8792.3 + 1527.1j = 8923.933_{[9.8532^\circ]} V$$

$$V_{1V} = -5714.6 + 6839.7j = 8912.808_{[129.8798^\circ]} V$$

$$V_{1W} = -3079.1 - 8376.9j = 8924.8703_{[-110.1819^\circ]} V$$

Circulando una intensidad de 15.4 A por el devanado de alta tensión, circulará una intensidad de 575.62 A por el devanado de baja tensión.

No se ven afectadas las temperaturas ya que, el transformador sigue trabajando a su régimen de carga nominal, simplemente se ha modificado la alimentación de un devanado a otro.

Con los valores mostrados anteriormente, puede verificarse el carácter reversible de la máquina.

## 7.8. EFECTO DE LA PRESENCIA DEL DEPÓSITO DE EXPANSIÓN EN LA TEMPERATURA.

Mediante este estudio se pretende analizar la afectación del depósito de expansión en las temperaturas del transformador. Para ello, se ha procedido a eliminar el depósito de expansión.

Se ha alimentado el transformador con sus valores de tensión e intensidad asignados.

Este estudio se ha realizado con una temperatura ambiente de 30°C y con un coeficiente de transferencia de calor de 10 W/(m<sup>2</sup>·K). La emisividad se ha fijado para un valor de 0.7

No se ha realizado ningún barrido paramétrico pues se pretende ver dicha variación de temperatura para un valor de carga nominal.

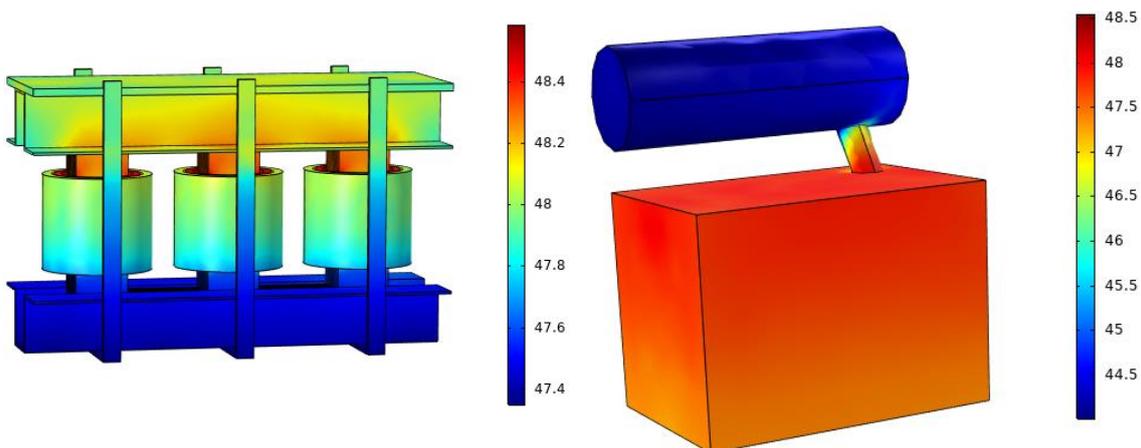


Figura 80: Temperaturas en caso de tener depósito de expansión.

Alimentado el transformador a sus valores nominales, con una temperatura ambiente de 30 °C, con un coeficiente de transferencia de calor de 10 W/(m<sup>2</sup>·K) y siendo la emisividad de 0.7, se ha procedido a realizar dos estudios, uno con el depósito de expansión (figura 80) y otro sin él (figura 81).

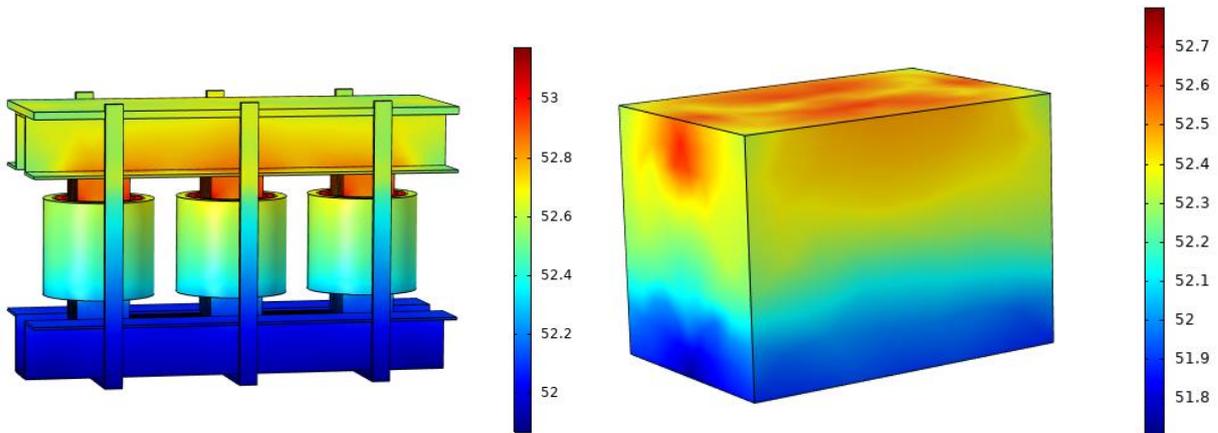


Figura 81: Temperaturas en caso de no tener depósito de expansión.

Puede verse cómo aumenta en todo el transformador en torno a unos 4°C la temperatura. Cabe recordar que, al modificar las condiciones de emisividad, el coeficiente de transferencia de calor o incluso incrementar la carga, haría que este valor aumentara notablemente mostrándose mayor diferencia entre un caso y otro.

También es interesante reseñar de la figura 80 la diferencia de temperatura entre la cuba y el depósito. Puede verse que el depósito de expansión se encuentra a una temperatura inferior que la cuba, produciendo la refrigeración del aceite.

Al no haber sido modificadas las características eléctricas, las pérdidas del transformador no se verán afectadas, siendo las indicadas en el apartado 7.1.

Como conclusión, puede afirmarse que es muy conveniente que posea un depósito de expansión, dado que absorberá las dilataciones del aceite y favorecerá la refrigeración, ayudando a mantener el transformador dentro de unas temperaturas aceptables en su funcionamiento.

## 7.9. EFECTO DEL TAMAÑO DE LA CUBA EN LA REFRIGERACIÓN.

En este estudio se busca visualizar el enfriamiento que sufriría el transformador en el caso de aumentar el tamaño de la cuba y del depósito de expansión.

Para ello se han parametrizado los valores de la geometría. Se han tenido en cuenta 4 tamaños para analizar la modificación en la temperatura.

Se ha procedido a sobrecalentar el transformador aumentando el valor de intensidad un 30% respecto a la nominal. De esta forma se puede analizar, en caso de sobrecarga, si sería viable aumentar el tamaño de la cuba para refrigerar mejor el transformador.

Para conseguir dicho calentamiento, se ha establecido el valor de la temperatura ambiente a 30°C y el coeficiente de transferencia de calor a 0.5 W/(m<sup>2</sup>·K). La emisividad se ha fijado para un valor de 0.7.

Considerando una condición de carga de 750.55 A en el devanado secundario, se ha procedido a realizar un barrido paramétrico con 4 tamaños de cuba.

La temperatura ambiente se ha fijado a 30°C y el coeficiente de transferencia de calor a 0.5 W/(m<sup>2</sup>·K). La emisividad adoptará un valor de 0.7.

Los cuatro tamaños analizados son los de la siguiente tabla:

	Caso 1.	Caso 2.	Caso 3.	Caso 4.
Altura de la cuba. (cm)	143	156	169	182
Anchura de la cuba. (cm)	198	216	234	252
Profundidad de la cuba. (cm)	132	144	156	168
Radio del depósito. (cm)	33	36	39	42
Longitud del depósito. (cm)	198	216	234	252
Radio de la tubería de unión. (cm)	11	12	13	14

Tabla 2: Tamaños de la cuba y del depósito de expansión.

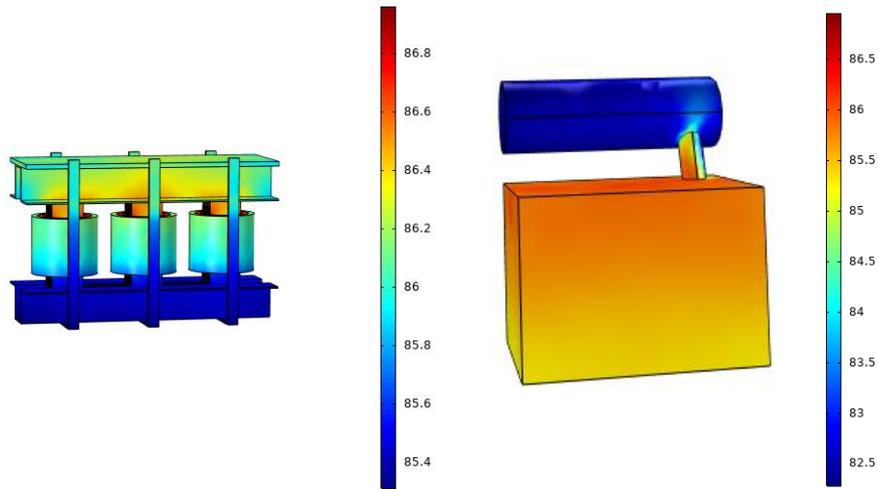


Figura 82: Temperaturas interior del transformador (izquierda) y exterior (derecha). Tamaños caso 1.

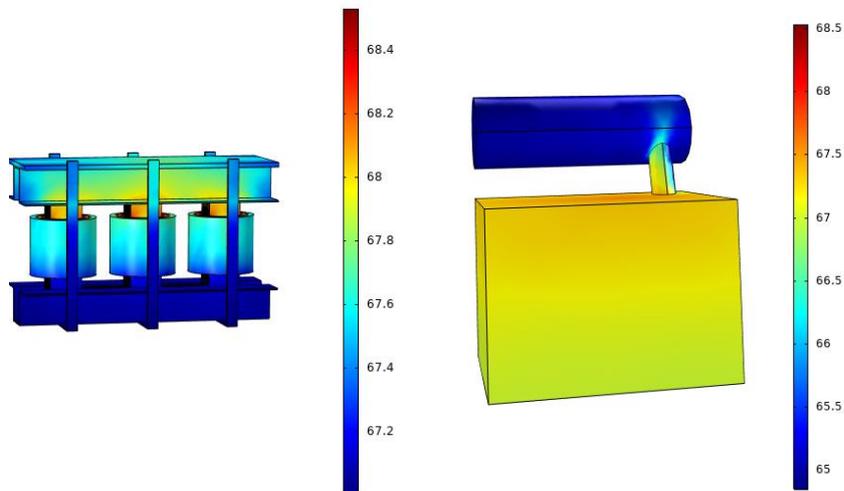


Figura 83: Temperaturas interior del transformador (izquierda) y exterior (derecha). Tamaños caso 4.

En las figuras anteriores, puede verse la clara afectación a la temperatura al aumentar el tamaño de la cuba. Se han considerado unos aumentos de un 10,20,30 y 40 % respecto al tamaño considerado en los demás estudios.

En la figura 84 puede verse la clara tendencia de la temperatura máxima al aumentar el tamaño de la cuba. Comparando el caso 1 y el caso 4, se puede ver unos 18°C de diferencia en el valor de temperatura máxima que sufriría el transformador.

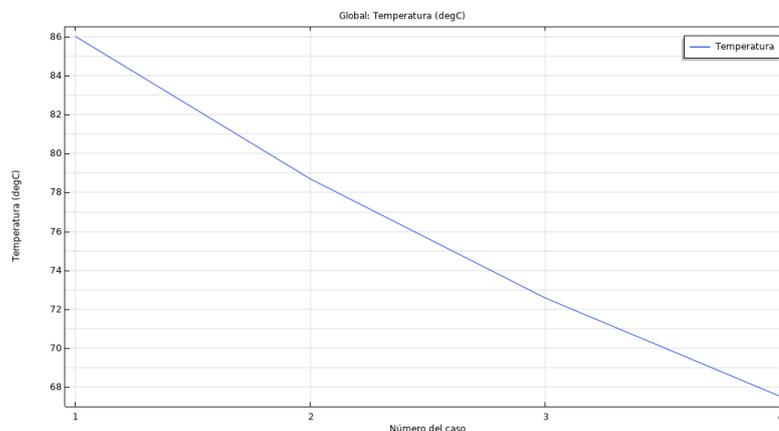


Figura 84: Variación de la temperatura para los diferentes casos.

Mediante los resultados obtenidos, se puede afirmar como mediante este estudio se puede lograr optimizar el tamaño de la cuba para considerar sobrecargas o hacerlo trabajar en condiciones ambientales más desfavorables. Habría que considerar el sobre coste que ocasionaría el aumento del tamaño de la cuba a la hora de realizar mantenimientos o en la propia construcción del transformador. Estas variables deberían tenerse en cuenta en función del funcionamiento real al que vaya a estar sometido el transformador.

## 7.10. CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO EN EL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN.

En este caso, se ha establecido la alimentación del transformador a su tensión asignada por el lado de alta tensión y, posteriormente, se ha cortocircuitado el devanado de baja tensión.

El cortocircuito se ha simulado estableciendo una tensión de valor 0 V en las bobinas secundarias (figura 85).

Con este estudio, se busca visualizar los valores de intensidad que circularán por el transformador en el caso descrito. No se analizará el impacto térmico que tendrá, ya que se ha procedido a realizar un estudio temporal de 2 segundos el cual no es tiempo suficiente para que tenga un gran impacto en las características térmicas generales del transformador.

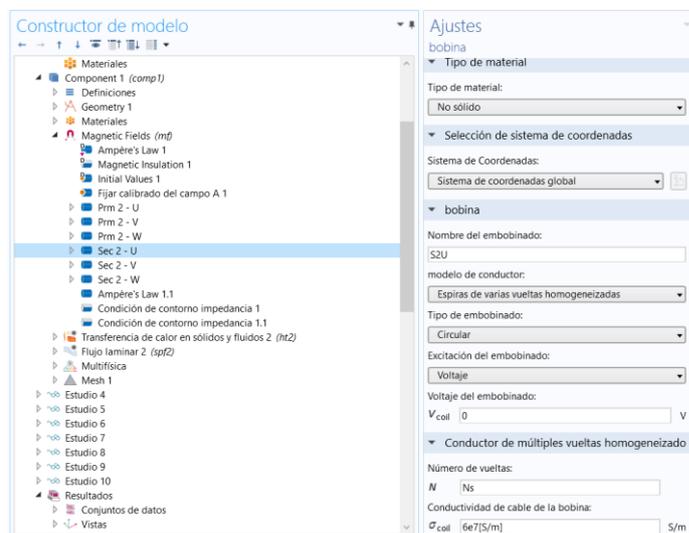


Figura 85: Parámetros cortocircuito bobinas secundarias.

Como se ha indicado anteriormente, se ha realizado mediante un estudio de frecuencia-transitoria. Se ha fijado para un tiempo total de 2 segundos con paso de 0.1 segundos. Esta configuración puede verse en la siguiente figura.

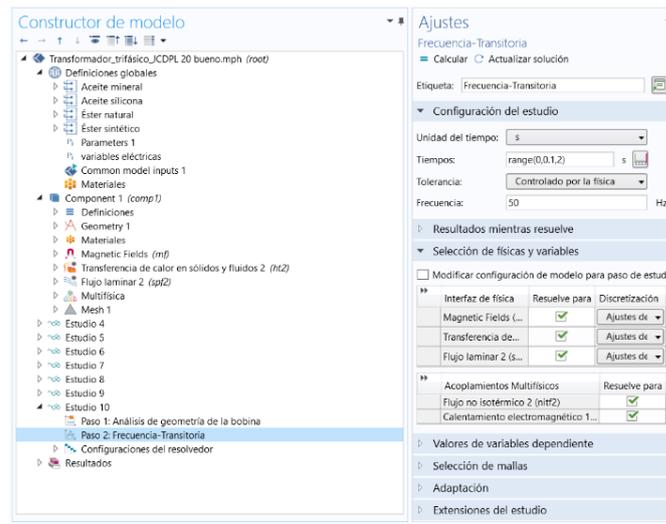


Figura 86: Configuración estudio frecuencia-transitoria.

Se han colocado sondas de medición en todas las bobinas para analizar las intensidades que circularán por estas en las condiciones descritas. Estos valores son los siguientes:

$$I_{2U} = -365.84 + 3224.8j = 3245.48_{[96.4723^\circ]} A$$

$$I_{2V} = -2635.3 - 1934.9j = 3269.3492_{[-143.4723^\circ]} A$$

$$I_{2W} = 2990.3 - 1293.3j = 3257.9931_{[-23.388^\circ]} A$$
  

$$I_{1U} = 9.7848 - 86.306j = 86.859_{[-83.532^\circ]} A$$

$$I_{1V} = 70.160 + 51.383j = 86.963_{[36.218^\circ]} A$$

$$I_{1W} = -79.833 + 34.269j = 86.877_{[156.77^\circ]} A$$

Tras analizar estos valores, puede apreciarse que los valores de intensidad son en torno a 5.6 veces mayores que su intensidad asignada.

El campo magnético también se ve afectado, como puede verse en la figura 87, ya que no poseerá la misma uniformidad en todo el núcleo como en los casos anteriores. En el caso de las líneas de campo, puede verse como se concentran más por la parte donde ocurre el cortocircuito, es decir, en los devanados secundarios.

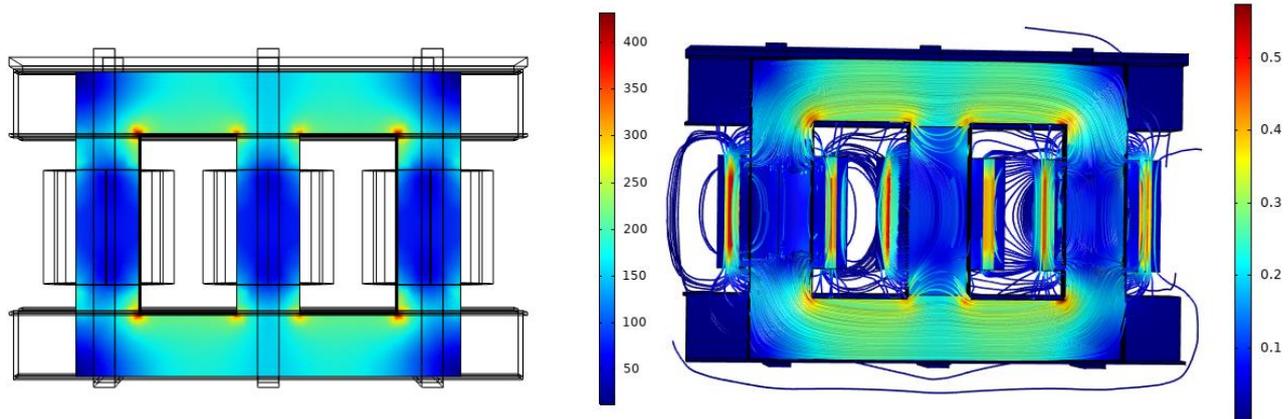


Figura 87: Distribución del campo magnético en el núcleo.

Analizando las pérdidas en el cobre, debido a la gran intensidad que circula, ascienden a un valor de 126180 W. Este valor es 31.8 veces superior a las pérdidas en características nominales. Esto se traduce en calor dentro del transformador que tendrá una gran repercusión en los calentamientos que sufrirá.

Debido a que se ha realizado un estudio en un corto periodo de tiempo, no puede verse esta afectación en las características térmicas, pero, con los datos obtenidos, puede verse como en poco tiempo excederá las temperaturas para el caso de carga nominal. Por ello, es necesario extinguir este cortocircuito de la forma más rápida ya que si se demora en el tiempo podría ocasionar daños irreversibles en el transformador.

## 7.11. CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO EN BOBINA SECUNDARIA.

Este estudio se trata de una variante del estudio anterior. En lugar de establecer el cortocircuito en todas las bobinas secundarias, se ha procedido a establecer el cortocircuito en una sola bobina. Para las otras dos bobinas, se han establecido unas intensidades desequilibradas.

El valor de las intensidades del secundario será:

$$I_{2U} = 692.82_{[0^\circ]} A$$

$$I_{2W} = 404.145_{[-120^\circ]} A$$

El valor de la intensidad  $I_{2U}$  es una 20% superior a la nominal, mientras que el valor de  $I_{2W}$  es un 30% inferior a la nominal.

El cortocircuito se establecerá en la bobina secundaria V.

La alimentación del devanado primario se ha fijado a su tensión nominal.

Alimentando las bobinas primarias a su tensión asignada, se fija un valor del 120% de la carga nominal para la bobina U y un valor del 70% de la carga para la bobina W. Posteriormente, se realiza un cortocircuito en la bobina V.

La intensidad que circulará por la bobina en estas condiciones será:

$$I_{2v} = -2624.7 - 1943.2j = 3265.7_{[-143.48^\circ]} A$$

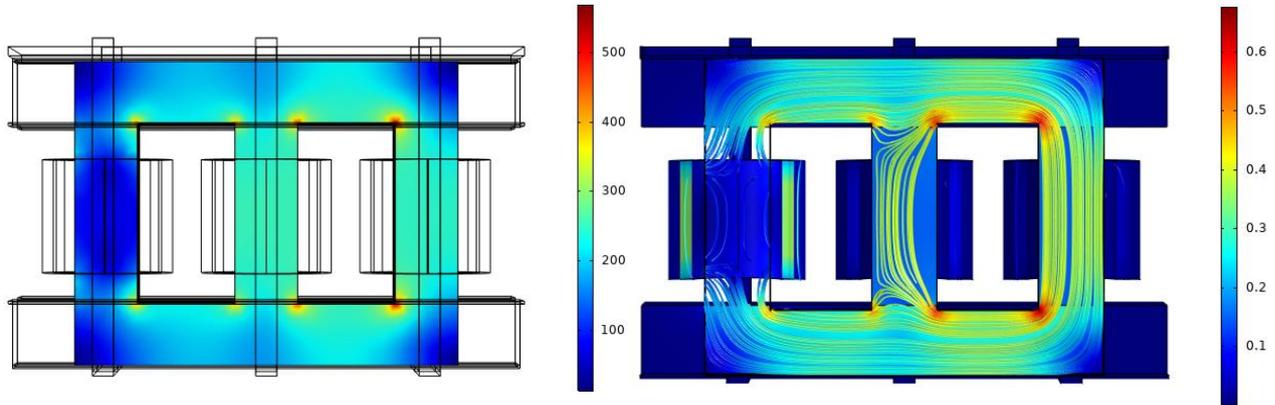


Figura 88: Distribución del campo magnético en el núcleo.

En la figura anterior, al igual que ocurría en el estudio anterior, puede verse como en la bobina donde ocurre el cortocircuito se ve afectado el campo magnético.

Al tratarse de un cortocircuito en una única bobina, la potencia disipada no será tan superior como en el caso anterior, pero seguirá siendo unas 11 veces superior a las pérdidas en régimen de carga nominal. Aun siendo inferior al caso anterior, podría perjudicar notablemente al transformador si no se toman las medidas adecuadas y se extingue el cortocircuito de forma correcta.

Este análisis es interesante realizarlo porque es un defecto típico en el comportamiento real del transformador. Esto ayuda a analizar los calentamientos que sufriría en caso de pasar de un régimen de carga desequilibrado a producirse un cortocircuito en una bobina.

## 7.12. SISTEMA DE CARGA DESEQUILIBRADO.

Se ha considerado un régimen de carga desequilibrado para las bobinas secundarias. Para el caso de la bobina U se ha establecido una carga del 70% de la carga nominal, para la bobina V, un 90% y, para el caso de la bobina W con una sobrecarga del 120% respecto a la carga nominal.

La alimentación de las bobinas primarias se ha fijado a su valor nominal.

Este estudio se ha realizado con una temperatura ambiente de 30°C y con un coeficiente de transferencia de calor de 10 W/(m<sup>2</sup>·K). La emisividad se ha fijado para un valor de 0.7

Mediante este estudio se busca analizar los calentamientos que sufrirá el transformador, así como las pérdidas que tendrá funcionando con régimen de carga desequilibrado. Dado que la mayoría de ocasiones los sistemas eléctricos son desequilibrados, este estudio intenta acercar un poco más el modelo a un sistema real.

Los valores de intensidad a los que se ha sometido el devanado secundario son los siguientes:

$$I_{2U} = 404.145_{[0^{\circ}]} A$$

$$I_{2V} = 519.615_{[120^{\circ}]} A$$

$$I_{2W} = 692.82_{[-120^{\circ}]} A$$

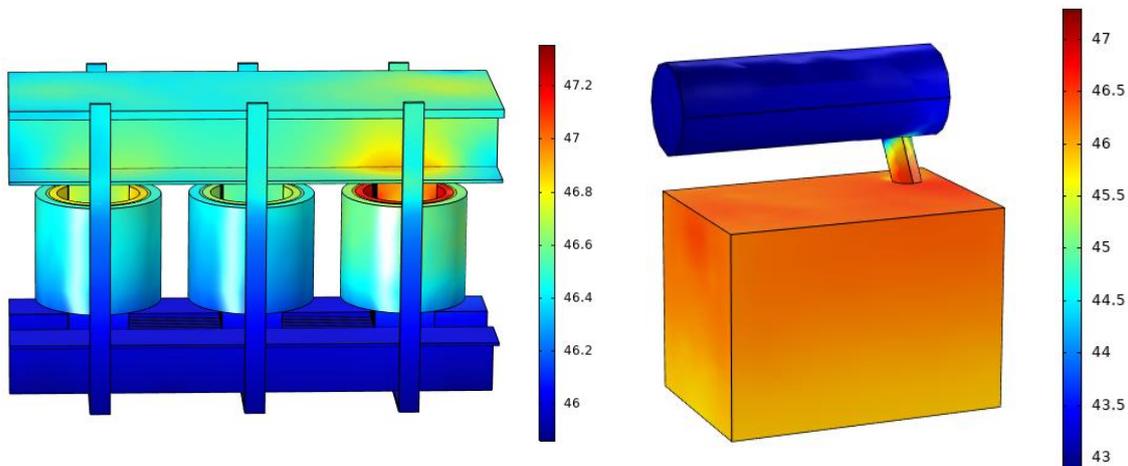


Figura 89: Temperaturas en el transformador.

Como puede verse en la figura anterior, el desequilibrio de intensidades antes mencionado, ocasiona un calentamiento diferente en cada bobina. Esto origina que el calentamiento general de la cuba sea una media entre los calentamientos internos. Esto puede causar confusión a la hora de observar los calentamientos de las bobinas, ya que puede darse el caso en que la cuba se encuentre con unas temperaturas aceptables y en uno de los devanados exista una sobrecarga excesiva que no puede ser observada externamente.

Por esto, es importante analizar tanto variables eléctricas como térmicas para así conocer el trabajo al que está siendo sometido el transformador.

Las pérdidas en el cobre serán de 3616.8 W. Estas pérdidas son menores a las nominales debido a que la media de las intensidades es menor a la nominal.

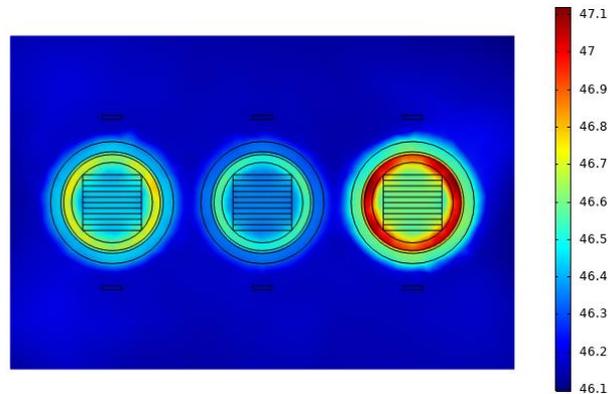


Figura 90: Distribución temperaturas.

## 8. CONCLUSIONES.

Con los estudios realizados en el modelo se puede confirmar que, modificando cualquier dato de los materiales, de las características de la carga, así como su naturaleza, datos de las características ambientales a los que está sometido, tamaño del transformador, etc., podemos extraer resultados fiables a la realidad para cualquier transformador de aceite.

El inconveniente del modelo, es que, al no haberse realizado con un ordenador más potente, no se ha podido realizar un mallado más fino para que los datos arrojados fueran más exactos. Esto también ha ocasionado que no se pudiera hacer un único barrido paramétrico para todas las variables de los estudios para poder ver directamente la vinculación entre una modificación u otra.

Este modelo permite que se puedan obtener tanto datos eléctricos como térmicos y estudiar en mayor medida los comportamientos del fluido para optimizar mejor el funcionamiento del transformador.

## 9. **BIBLIOGRAFÍA**

- Máquinas eléctricas, Sexta edición, Jesús Fraile Mora, Mc Graw Hill, ISBN: 978-84-481-6112-5.
- Máquinas eléctricas y sistemas de potencia, Sexta edición, Wildi, Theodore, Pearson Educación, ISBN: 970-26-0814-7, México, 2007
- Problemas resueltos de máquinas eléctricas, Segunda edición, Alfonso Bachiller Soler, Guillermo Ortega Gómez. Milagros Gómez Alós, ISBN: 978-84-9732-523-3.
- Centro de Transformación MT/BT, Robert Capella, publicación técnica Schneider Electric PT-004, edición: noviembre 2000.
- Resumen. Documentación de Alumno de la formación de Operadores Locales en Subestaciones Eléctricas E2I2. Empresa de Estudios e Ingeniería Industrial [www.e2i2.es](http://www.e2i2.es).
- El método de los elementos finitos, Tercera edición, O.C.Zienkiewicz, edición en español Editorial Reverté, ISBN: 978-84-291-4894-7.